

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

探討天文化學中的氰基反應機制 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：個別型
計畫編號：NSC 97-2112-M-032-001-
執行期間：97年08月01日至98年10月31日
執行單位：淡江大學物理學系

計畫主持人：秦一男

計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理人員：許喆閔

報告附件：國外研究心得報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 99 年 01 月 18 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 成果報告
 期中進度報告

探討天文化學中的氰基反應機制

Investigation of the CN Radical Reaction Mechanism in Astrochemistry

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 97-2112-M-032 -001-

執行期間：97年08月01日至98年10月31日

計畫主持人：秦一男

共同主持人：

計畫參與人員：許喆閔

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

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

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：

中華民國九十九年一月十八日

探討天文化學中的氰基反應機制

Investigation of the CN Radical Reaction Mechanism in Astrochemistry

計畫編號：NSC-93-2112-M-032-007

執行期限：93年8月1日至95年2月28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：許喆閱 淡江大學物理系

一、中文摘要

在天文學家不斷的發現新的星際有機分子後，不得不嘗試解釋：各式各樣不飽和有機分子究竟是如何在星際空間形成的。早期對星際分子雲的研究及化學反應模型多認為，離子與分子間的碰撞以及解離、再複合等反應，是合成類似於 HC_3N 長鏈氰化物分子的主要途徑；但是透過實驗室的研究以及天文學家在觀測上的驗證，在理論上這樣的反應途徑所能提供的分子數量，要比天文學家觀測所得的少了兩個數量級。因此，近來有人建議，氰基與乙炔兩中性分子間的反應才是合成 HC_3N 分子的主要途徑。為此，在過去的兩年中我們選擇尋找 $\text{CH}_3\text{CCH} + \text{CN}$ 反應的兩個產物作為研究對象： CH_3CCCN 與 $\text{H}_2\text{CCCH}(\text{CN})$ 。實驗室的測量預測，若氰基與氫原子的取代反應是形成這類分子的主要途徑，兩者在星際間的含量應相當；其中， CH_3CCCN 分子早在星際介質內被發現，但直到最近 $\text{H}_2\text{CCCH}(\text{CN})$ 的存在才被確認，而另一個同分異構物：3-氰基丙炔則尚未被發現。

除了長鏈分子外，多環芳香烴一直是令天文學家感到好奇，確也十分頭痛的化合物，因為我們對它的形成所知有限；不過，一般相信，苯分子 C_6H_6 應該在這些反應當中扮演相當重要的媒介。苯在天文上的重要性雖然十分清楚，但因為苯分子不具有電偶極矩，使得電波天文學家無法直接觀測它。為了能進一步了解這一個重要的有機分子在星際介質內的分布，我們希望能偵測到氰化苯 $\text{C}_6\text{H}_5\text{CN}$ 。首先，它具有相當大的電偶極矩(約 4.2 Debye)，這使得電波天文學家有機會直接觀測到它在氣態時的分布。而且，就如同前段內所述，有苯分子及氰基分布的地方，氰化苯的形成應該是十分自然的，尤其是 $\text{C}_6\text{H}_6 + \text{CN}$ 為放熱反應，這使該反應即便在低溫的

星際空間也能產生。因此，我們希望以過去的研究為基礎，進一步確認氰化苯的存在，以及試圖了解它在星際化學中的地位。這將有助於天文學家們進一步探索星際間有機分子形成的反應機制，也是朝向天文生物學的發展上非常重要的一步。除此之外，這些含氮的有機分子一旦在星際空間中形成後，便十分迅速的附著於星際塵埃的表面上，還可能更進一步與其他星際塵埃結合成類似於彗核的冰狀物質；對早期的地球而言，這正是前生物演化當中 - 無論是醣類或是氨基酸 - 非常重要的原料。

像 CN 這樣的中性官能基在星際介質這樣的低溫環境下有它在化學反應時的好處：沒有庫倫障礙，活性亦強。因此和其他星際分子簡單的二體碰撞便能產生各式各樣的產物。藉由觀測這些產物的含量及存在的環境，對我們了解星際有機分子的合成，尤其是這些含氮基的分子將提供更深入的了解。

關鍵詞：星際介質、分子雲、有機分子、氰基、電波天文學

Abstract

Since the first detection of HC_3N and other unsaturated nitriles, there is a debate if these molecules are formed in ion-molecule encounters or neutral-neutral reactions. Theoretically, the predicted number density by only ion-molecule reactions is two orders of magnitude less than the observational results. We thus intend to investigate the synthetic route to form these molecules in the interstellar medium (ISM) - a backbone system to the interstellar carbon-hydrogen-nitrogen chemistry as verified in laboratory experiments and observations. Recently we demonstrated that the reaction of CN radicals with CH_3CCH forms two isomers CH_3CCCN and $\text{H}_2\text{CCCH}(\text{CN})$ with similar abundances,

however, only CH₃CCCN was identified in the ISM before our NSC project. Our recent explicit identification of H₂CCCH(CN) will elucidate the role of neutral-neutral reactions in the formation of nitriles in the ISM – a crucial mystery unresolved for the last 40 years. In addition, another isomer 3-butyne nitrile (HCCCH₂(CN)) has never been observed yet.

Furthermore, Ever since the very first postulation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), the formation routes of PAH like species in the interstellar medium (ISM) has been a challenge for astronomers and astrochemists. However, the search for interstellar benzene as the very first “building” block of PAHs presents a particular problem. Pioneering crossed molecular beam experiments with unsaturated hydrocarbons and our identification of interstellar H₂CCCH(CN) showed that the exchange of a hydrogen atom in the hydrocarbon versus a cyanogen radical, CN, is common in all these processes. The benzonitrile molecule, C₆H₅CN, represents therefore an ideal microwave tracer for interstellar benzene. Also, benzonitrile is important from the astrobiological viewpoint: this molecule is thought to be the key species to a prebiotic synthesis of amino acids on young Earth upon aminolyses and hydrolyses. We thus intend to search for C₆H₅CN in different environments of the ISM: TMC-1 (cold), Orion-KL (hot), and CRL 618 (planetary nebula).

As a neutral radical, CN has many advantages in a low temperature environment such as ISM: no entrance barrier, highly reactive. Simple binary collision with the other molecules can provide large variety of products. The identification of its daughter molecules will give us more deep understanding of the reaction mechanism with CN radical in the ISM.

Keywords: Interstellar Medium; Molecular Clouds; Organic Compounds; CN radicals; Radio Astronomy

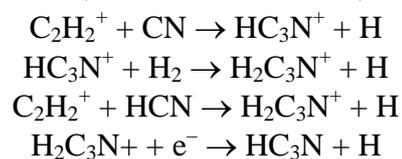
二、計畫緣由與目的

自從氰基乙炔(cyanoacetylene) – HCCCN (X¹Σ⁺) – 分子在星際間被發現以來，天文學

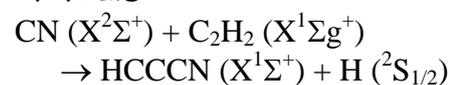
家就不斷的面臨一個問題：與其類似的各式各樣不飽和有機分子究竟是如何在星際空間形成的。其中包含如 H-(C≡C)_n-CN (n = 1 ~ 5; cyanopolyynes)以及 CH₃-(C≡C)_n-CN (n = 1 ~ 2; methyl- cyanopolyynes)等長鏈分子。這些高度不飽和的有機氰化物可以讓天文學家有機會了解，在星際空間中各種分子的形成過程，主要是藉由中性分子間的反應 (neutral-neutral reaction)，抑或是離子與分子間的碰撞 (ion-molecule encounter)。這是個已經困擾天文物理學家近四十年的問題 (Cherchneff & Glassgold 1993)。

除此之外，這些含氮的有機分子一旦在星際空間中形成後，便十分迅速的附著於星際塵埃的表面上，還可能更進一步與其他星際塵埃結合成類似於彗核的冰狀物質；對早期的地球而言，這正是前生物演化當中 – 無論是醣類或是氨基酸 – 非常重要的原料。甚至這些長鏈氰化物還可能在早期地球大氣的無氧環境下，扮演今天富氧大氣中臭氧的角色，使地球在四十五億年前沒有臭氧的保護下免於大量的紫外線照射，讓這些與生命起源息息相關的化學分子得以存活。今天地球上的環境已經與四十五億年前大相逕庭，但在土星(Saturn)的衛星泰坦(Titan)上，我們竟然發現 HC₃N 的存在；或許，這正讓天文學家有機會再度經歷，在地球上初期生命是如何誕生及演化的。

早期對星際分子雲的研究及化學反應模型多認為，離子與分子間的碰撞 (ion-molecule encounter)以及解離、再複合等反應，是合成類似於 HC₃N 長鏈氰化物分子的主要途徑 (Howe & Millar 1990)：



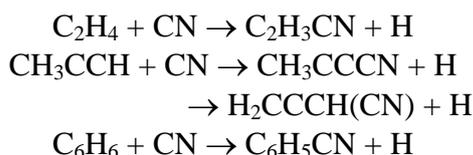
但是透過實驗室的研究以及天文學家在觀測上的驗證，在理論上這樣的反應途徑所能提供的分子數量，要比天文學家觀測所得的少了兩個數量級 (Howe & Millar 1990)。因此，近來有人建議，氰基 (cyanogen radical) CN (X²Σ⁺)與乙炔(acetylene) C₂H₂ (X¹Σ_g⁺)兩中性分子間的反應：



才是合成 HC₃N 分子的主要途徑。這樣的反

應可以發生於碳星(carbon star; 如 IRC+10216)外圍拱星氣體殼層(circumstellar envelope)上的噴發處(Cherchneff & Glassgold 1993; Cherchneff et al. 1993; Millar & Herbst 1994; Doty & Leung 1998);或是高溫的星際介質中(Millar et al. 1997; Ruffle et al. 1997);或是類似於 TMC-1 的黑暗星雲內(des Forets et al. 1991; Suzuki et al. 1992; Herbst et al. 1994)。

近幾年來化學實驗上的改革與進步,尤其是藉由分子束交叉碰撞的實驗,讓我們有機會得以在實驗室內驗證,氰基與乙炔分子間的反應因為沒有庫倫障礙,的確是合成 HC₃N 的主要過程(Huang et al. 1999b)。進一步的實驗更發現,氰基 CN 分子與其他中性有機分子上的氫原子是十分容易發生取代反應的;例如下列的各項反應(Huang et al. 1999a; Balucani et al. 1999a; Balucani et al. 1999b):



值得注意的是,上述反應的產物當中,氰基乙炔(cyanoacetylene) HC₃N、氰基乙烯(vinylcyanide) C₂H₃CN、以及甲基氰基乙炔(methyl cyanoacetylene) CH₃CCCN 三者都已經被證實存在於星際介質當中。;而氰基丙二烯(cyanoallene) H₂CCCH(CN)的存在除了我們透過最近的觀測結果加以確認(Chin et al. 2005)外,其他的研究團隊也已經確認其存在(Lovas et al. 2006)。

多環芳香烴(polycyclic aromatic hydrocarbons; PAHs)一直是令天文學家感到好奇,確也十分頭痛的化合物。這類化合物的大小介於小型有機分子與大型的含碳聚合體之間,佔星際介質內碳總含量的相當一部分比例,而且也是造成紅外線波段內部份未被確認譜線的主要來源。雖然如此,我們對它的形成卻所知有限;不過,一般都相信,苯分子(benzene) C₆H₆ 應該在這些反應當中扮演相當重要的媒介(Allain et al. 1997; Brenner & Barker 1992; Cherchneff & Barker 1992; Frenklach & Feigelson 1989)。苯在天文上的重要性雖然十分清楚,但是,因為苯分子不具有電偶極矩(dipole moment),使得電波天文學家無法直接觀測它。它的電子能階

躍遷則落在紫外線波段;但因為紫外線在星際介質中十分容易被散射,尤其是在可能含有苯的緻密分子雲內。就在最近,透過太空紅外望遠鏡(Infrared Space Observatory; ISO)的協助,讓天文學家終於在原始行星狀星雲(proto planetary nebula) CRL 618 內發現了睽違已久的苯分子(Cernicharo et al. 2001)。既然 CN 十分容易取代其他中性分子上的氫原子,上述的最後一項產物 - 氰化苯(benzonitrile) C₆H₅CN - 就應當亦存在於星際氣體當中。

為了能進一步了解這一個重要的有機分子在星際介質內的分布,我們希望能偵測到氰化苯(benzonitrile) C₆H₅CN。首先,它具有相當大的電偶極矩(約 4.2 Debye),這使得電波天文學家有機會直接觀測到它在氣態時的分布。而且,就如同前段中的分析,有苯分子及氰基分布的地方,氰化苯的形成應該是十分自然的(Huang et al. 1999; Balucani et al. 1999a; Balucani et al. 1999b),尤其是 C₆H₆ + CN 為放熱反應,這使該反應即便在低溫的星際空間也能產生。

除此以外,從天文生物學的觀點來看,氰化苯的存在更有其重要性,在早期地球上它更可能提供了氨基酸或鹽基等其它重要有機化合物的材料來源。

三、結果與討論

為了達到本計劃的預期成果,我們因此選定兩座大型的分米波望遠鏡來執行此一計劃:

1. 德國馬克斯·普朗克電波天文研究所(Max-Planck-Institut für Radioastronomie; MPIfR)的 100m 望遠鏡,位於德國西部的 Effelsberg (波昂附近);
2. 美國國家電波天文台(National Radio Astronomy Observatory; NRAO)的 110 × 100 m Green Bank 望遠鏡(GBT),位於美國西維吉尼亞州。

這兩座望遠鏡的口徑都達到 100 公尺以上,並且可以指向天空中的任何一個方向進行觀測。為了尋找可能含量極低的 C₆H₅CN 分子,只有透過這樣大型且靈敏的望遠鏡才有可能達到本計劃的目標。在此之前,我們也曾於 2004 年 7 月中至 8 月初至澳洲觀測,以本銀河系中心為觀測目標,充分利用南半球的優勢;可惜因為本銀河系中心距離我們過

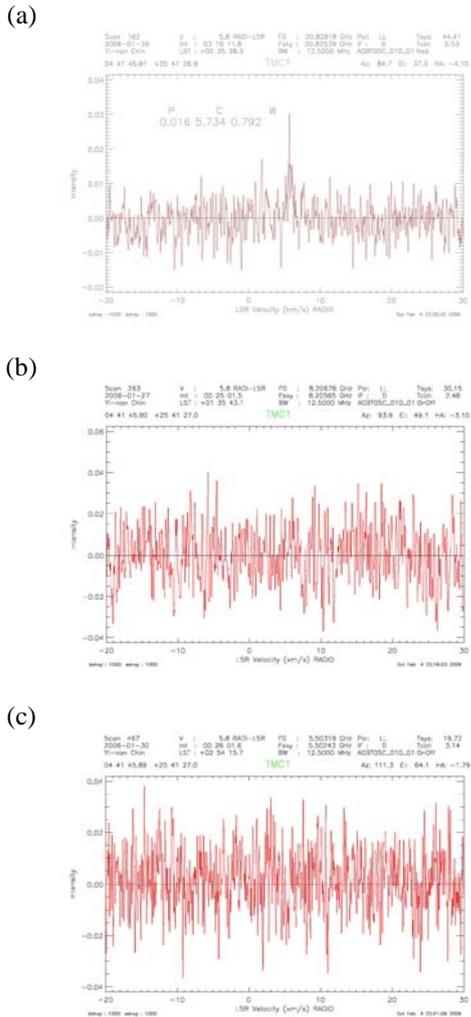


Fig. 1: 利用 *GBT* 觀測 TMC-1 內氰化苯的轉動能階躍遷譜線：(a) 為 $8_{0,8} \rightarrow 7_{0,7}$ ，(b) 為 $3_{0,3} \rightarrow 2_{0,2}$ ，(c) 為 $2_{0,2} \rightarrow 1_{0,1}$ 的觀測結果。

於遙遠 (8 kpc)，且所使用的望遠鏡口徑不及 60 公尺，無法得到預期的譜線。

2005 年我們曾經申請到 NRAO 的 *GBT* 的觀測時間，實際上的觀測則在 2006 年的 2 月完成。結果是令人振奮的：在長達數個小時的積分之後，我們終於在金牛座分子雲 (TMC-1) 的方向上得到氰化苯的 $8_{0,8} \rightarrow 7_{0,7}$ 轉動能階躍遷譜線 (請參閱 Fig. 1.a)。可惜的是，單一譜線並無法作為新分子存在的證據，不過以此為基礎，我們接下來在 NRAO 也爭取到更多的觀測時間，希望補足長波長的轉動能階躍遷譜線。可惜的是，在 $3_{0,3} \rightarrow 2_{0,2}$ 與 $2_{0,2} \rightarrow 1_{0,1}$ 轉動能階躍遷譜線的觀測上都未能有效的確認此分子 (請參閱 Fig. 1.b & c)。主要是在低頻觀測上我們都被安排到比較不理想的天氣，而事實上，對如此微弱的

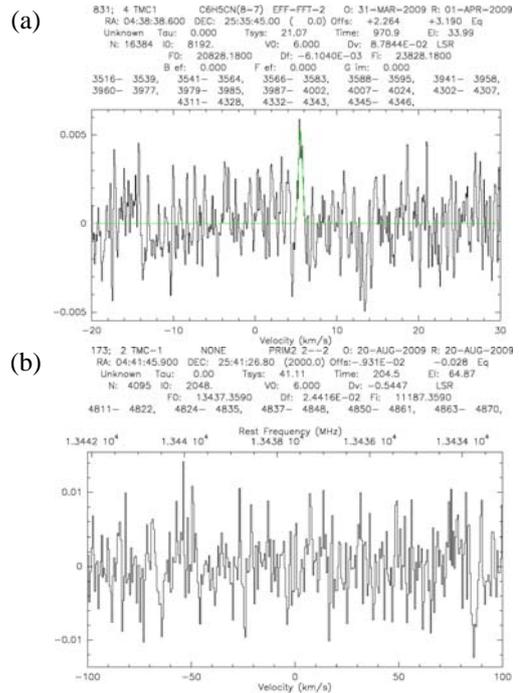


Fig. 2: 利用 Effelsberg 觀測 TMC-1 內氰化苯的轉動能階躍遷譜線：(a) 為 $8_{0,8} \rightarrow 7_{0,7}$ ，(b) 為 $5_{0,5} \rightarrow 4_{0,4}$ 的觀測結果。

訊號而言，好的觀測系統與天氣是缺一不可的。

為配合國外天文台及國內寒暑假時間，在本計畫執行過程當中，分別於；2009 的 4 月與 8 月則使用德國的 Effelsberg 望遠鏡，目標則針對 TMC-1。四月份的觀測首先先確認之前在 *GBT* 的觀測結果 (請參閱 Fig. 2.a)。這個結果除了對兩望遠鏡之間的系統校正十分重要，同時也可排除此一訊號為地面干擾的可能性。八月份原來計畫同時觀測 $6_{0,6} \rightarrow 5_{0,5}$ 與 $5_{0,5} \rightarrow 4_{0,4}$ 的轉動能階躍遷譜線，但是因為其中一架接收機故障，所以僅能執行 $5_{0,5} \rightarrow 4_{0,4}$ 的觀測 (請參閱 Fig. 2.b)。雖然因為觀測時間略有不足，沒有能有確認的譜線，但是在應該出現的位置上似乎存在著微弱的訊號。接下來我們將在 2010 年 1 月底再度赴 Effelsberg 觀測，針對頻率略高的 $6_{0,6} \rightarrow 5_{0,5}$ 轉動能階躍遷譜線進行觀測，希望能有正面的結果，並能以此為基礎爭取到更多其他大型望遠鏡的觀測時間。

四、計畫成果自評

本計畫所使用的望遠鏡與當初所提出的計畫雖然不盡相同，但在以觀測為主要的研究上也是常發生的。重要的是，我們觀測到在計畫

之初所設定的兩個目標分子，這對搜尋星際分子而言是十分難得的。這展示我們所依循的化學實驗結果是十分可靠的。在接下來的計畫當中，我們將加強與化學家與天文計算領域的合作，屏除過去「亂槍打鳥」式的盲目搜索，改以充分的背景知識做為未來了解星際化學的基礎。

這些年來，台灣不管是在業餘天文愛好的風氣，或是天文研究的工作上，都有十分大的進步 – 前者包括台北天文科學教育館，及各地中小學內天文觀測站的成立；後者包括中研院天文所的各项計畫，以及教育部追求卓越計畫內的天文與粒子物理學 – 兩者目前都需要大量的天文專業人才。本計畫所訓練的研究生將可繼續從事天文方面的研究工作，也能兼顧業餘天文工作上所需的獨立操作能力，在畢業後必能為國內天文研究環境有所貢獻。

五、參考文獻

- Allain, T., Sedlmayr, E. & Leach, S. 1997, *Astron. & Astrophys.* **323**, 163
- Balucani, N., Asvany, O., Chang, A.H.H., Lin, S.H., Lee, Y.T., Kaiser, R.I., Bettinger, H.F., Schleyer, P.v.R., & Schaefer III, H.F. 1999a, *J. Chem. Phys.* **111**, 7457
- Balucani, N., Asvany, O., Chang, A.H.H., Lin, S.H., Lee, Y.T., Kaiser, R.I., Bettinger, H.F., Schleyer, P.v.R., & Schaefer III, H.F. 1999b, *J. Chem. Phys.* **111**, 7472
- Brenner, J.D. & Barker, J.R. 1992, *Astrophys. J. Lett.* **388**, L39
- Brotten, N.W., MacLeod, J.M., Avery, L.W., Irvine W.M., Höglund, B., Friberg, P. & Hjalmarsen, Å. 1984, *Astrophys. J. Lett.* **276**, L25
- Cernicharo, J., Heras, A.M., Tielens, A.G.G.M., Pardo, J.R., Herpin, F., Guélin, M. & Waters, L.B.F.M. 2001, *Astrophys. J. Lett.* **546**, L123
- Cherchneff, I. & Barker, J.R. 1992, *Astrophys. J.* **394**, 703
- Cherchneff, I. & Glassgold, A.E. 1993, *Astrophys. J. Lett.* **419**, L41
- Cherchneff, I., Glassgold, A.E. & Mamon, G.A. 1993, *Astrophys. J.* **410**, 188
- Chin Yi-nan, Lemme C., Kaiser R.I., & Henkel C., 2006: Detection of Interstellar Cyanoallene and its Implications for Astrochemistry, in “ASTROCHEMISTRY: From Laboratory Studies to Astronomical Observations” of Pacificchem 2005, hold in Dec. 2005, Hawaii AIP Conference Proceedings Vol. 855, pp. 149 – 153
- des Forets, G.P., Flower, D.R. & Herbst, E. 1991, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **253**, 359
- Doty, S.D. & Leung C.M. 1998, *Astrophys. J.* **502**, 898
- Frenklach, M. & Feigelson, E.D. 1989, *Astrophys. J.* **341**, 372
- Herbst, E., Lee, H.H., Howe, D.A., & Millar, T.J. 1994, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **268**, 335
- Howe, D.A. & Millar, T.J. 1990, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **244**, 444
- Huang, L.C.L., Balucani, N., Lee, Y.T., Kaiser, R.I., & Osamura, Y. 1999a, *J. Chem. Phys.* **111**, 2857
- Huang, L.C.L., Lee, Y.T., & Kaiser, R.I. 1999b, *J. Chem. Phys.* **110**, 7119
- Lovas F.J., Remijan A.J., Hollis J.M., Jewell P.R. & Snyder L.E. 2006, *Astrophys. J.* **637**, L37
- Millar, T.J. & Herbst, E. 1994, *Astron. & Astrophys.* **288**, 561
- Millar, T.J., Macdonald, G.H., & Gibb, A.G. 1997, *Astron. & Astrophys.* **325**, 1163
- Ruffle D.P., Hartquist, T.W., Taylor, S.D., & Williams, D.A. 1997, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **291**, 235
- Suzuki, H., Yamamoto, S., Ohishi, M., Kaifu, N., Ishikawa, S., Hirahara, Y., & Takano, S. 1992, *Astrophys. J.* **392**, 551

國外研究心得報告
探討天文化學中的氰基反應機制

Investigation of the CN Radical Reaction Mechanism in
Astrochemistry

計畫編號：NSC 97-2112-M-032-001

執行期限：97 年 8 月 1 日至 98 年 10 月 31 日

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

數據分析及學術交流：德國波昂馬克斯·普朗克電波天文研究所 (Max-Planck-Intitut für Radioastronomie)

日期：2009 年 8 月 28 日至 9 月 4 日共 8 日

觀測地點：馬克斯·普朗克電波天文研究所 Effelsberg 100-m 望遠鏡

觀測日期：2009 年 8 月 19 日至 9 月 10 日 (除赴波昂外) 共 13.8 日

總計出國時間：2009 年 8 月 19 日至 9 月 10 日止共計 21.8 日

附 記：

前次至德國馬克斯·普朗克電波天文研究所 (Max-Planck-Intitut für Radioastronomie) 利用其位於 Effelsberg，直徑 100 米的電波望遠鏡，尋找本計劃所建議之氰化苯分子 (C_6H_5CN)，並成功的確認之前於美國的國立電波天文台 Green Bank 觀測站所觀測到的譜線為真實存在。本次原定針對本分子於波長 1.9 及 2.2 cm 之其他轉動能階進行觀測；然恰逢 1.9 cm 接收機之放大器損毀更換，因此完全僅針對 2.2 cm 波段。該分子的存在將讓我們對星際間所有環狀有機分子的形成與氰基的反應機制有一番全新的認識。

國外研究心得報告
探討天文化學中的氰基反應機制

Investigation of the CN Radical Reaction Mechanism in
Astrochemistry

計畫編號：NSC 97-2112-M-032-001

執行期限：97 年 8 月 1 日至 98 年 7 月 31 日

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

數據分析及學術交流：德國波昂馬克斯·普朗克電波天文研究所 (Max-Planck-Intitut für Radioastronomie)

日期：2009 年 3 月 27 日至 4 月 5 日 (除觀測日外) 共 4.8 日

觀測地點：馬克斯·普朗克電波天文研究所 Effelsberg 100-m 望遠鏡

觀測日期：2009 年 3 月 30 日至 4 月 2 日共 4 日

總計出國時間：2009 年 3 月 27 日至 4 月 5 日止共計 8.8 日

附 記：

此次至德國馬克斯·普朗克電波天文研究所 (Max-Planck-Intitut für Radioastronomie) 利用其位於 Effelsberg，直徑 100 米的電波望遠鏡，尋找本計劃所建議之氰化苯分子 (C_6H_5CN)，並成功的確認之前於美國的國立電波天文台 Green Bank 觀測站所觀測到的譜線為真實存在。該分子的存在將讓我們對星際間所有環狀有機分子的形成與氰基的反應機制有一番全新的認識。