

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

宇宙微波背景輻射的次等效應之研究(2/3) 期中進度報告(精簡版)

計畫類別：個別型
計畫編號：NSC 95-2112-M-002-012-
執行期間：95年08月01日至96年07月31日
執行單位：國立臺灣大學天文物理學研究所

計畫主持人：吳俊輝

報告附件：國際合作計畫研究心得報告

處理方式：期中報告不提供公開查詢

中華民國 96年05月31日

期中進度報告

宇宙微波背景輻射的次等效應之研究(2/3)

NSC 95-2112-M-002-012

台大物理系暨天文物理研究所 吳俊輝

目錄

一、報告內容	2
前言及目的	2
本年度成果	2
1. 國際合作	2
(a) MAXIPOL	2
(b) SDSS	3
2. AMiBA 計畫	3
3. 理論研究	5
(a) 宇宙弦的效應	5
(b) 有限宇宙的效應	5
(c) Sunyaev-Zel'dovich 效應	5
二、參考文獻	5
三、計畫成果自評	6

一、報告內容：

前言及目的

今年度是三年計畫的第二年。此三年計畫，旨在加強對宇宙微波背景輻射次等效應的研究，以理論研究為主，觀測資料為輔，承襲之前的成果，為當今的宇宙學新發展作準備。過去五年來在國科會的補助下，已建構出良好的電腦計算系統，出版十多篇 SCI 論文，計有 8 名碩士生畢業，其中有 3 名學生繼續留在本研究小組攻讀博士學位，目前是博士班三年級的學生。本年度中進行了多次的國外訪問研究，大幅強化了所參與的國際合作計畫，且多次受邀在國外大學及國際會議上發表研究成果，相關資訊請見已繳交之“國際合作研究計畫國外研究心得報告”。

本年度成果

本計畫的內容及本年度之成果可大分為以下三類，茲分述之。

1. 國際合作：

(a) MAXIPOL:

該計畫是之前 MAXIMA 計畫的擴建，在 2003 年升空取得觀測資料，旨在量測 CMB polarization，本人在該計畫中一直擔任科學分析的領導人。本計畫的成員之一 George Smoot 並順利獲得 2006 諾貝爾物理獎。今年度之內我們已和美方共同發表兩篇 first result 的論文，已被 *Astroph. J.* 接受，將在近期內刊出。兩篇論文中的 第一篇為科學成果，由本人擔任第一作者（見參考文獻 1），第二篇則是關於硬體的論文（見參考文獻 2），2006 諾貝爾物理獎得主 George Smoot 同時是這兩篇論文的共同作者。MAXIPOL 計畫是國際上極重要的 CMB 觀測計畫，由於高精度之觀測資料的分析曠日費時，故分析工作歷時多年，終於在今年獲得主要的結果，Figure 1 是本計畫所測得的 CMB 極化圖。我國在硬體上完全沒有經費上的貢獻，但由於在資料分析的過程中本人乃擔任主要領導人，所以得以成為 first result 論文的第一作者。本人是該計畫中唯一的台灣人，故此次成果論文的發表，將對提高我國國際能見度有很大的幫助。該計畫所量測到的 CMB 極化現象，雖在學界已不是第一次（但仍排前幾名）但其對學界還有另一項極重要的貢獻，就是證明一個新的極化觀測技術（rotating half-wave plate）確實可用，並具許多革命性的優點，因此，該計畫的成功已直接影響到將於 2008 年初發射升空的 Planck 衛星計畫，此衛星計畫已決定採用 MAXIPOL 的技術進行極化的觀測。本計畫的觀測資料尚有約有三分之一未被分析，經與美方溝通，擬在國科會本計畫的補助下派遣一位博士生於暑期起前往，並在我的指導下來進行分析。本計畫在本年度預核案中被刪減的出國預算，經追加後對本計畫之幫助頗大，因此希望在第三年度中（下年度），原本在預核案中被刪減的預算仍能比照給予寬限。

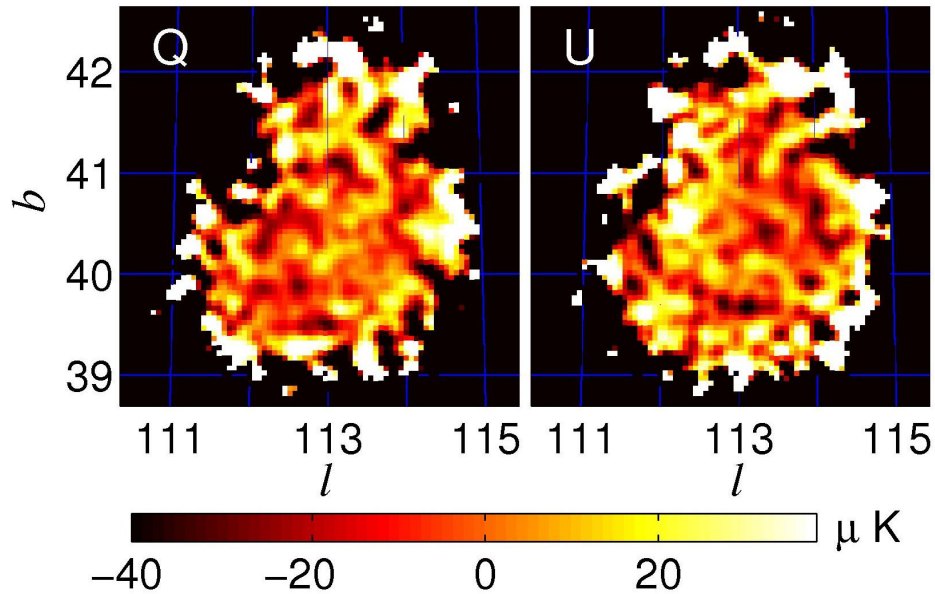


Figure 1: MAXIPOL 測得的 CMB 極化圖 (in Galactic coordinates)。

(b) Sloan Digital Sky Survey (SDSS) :

該計畫是目前世界上關於宇宙大尺度結構量測的指標性計畫，雖然我國完全沒有經費上的投資或貢獻，但本人仍受對方邀請無條件加入該計畫，協助其資料分析。目前本人及學生已受 Fermi Lab 邀請，前後共訪問兩次洽談合作事宜，目前合作的可行性及詳細的模式仍在溝通評估中。對方希望如果本人無法長期造訪，我方仍能派人長期進駐，因此本人正規畫派遣至少一名博士生前往。

2. AMiBA 計畫：

關於 AMiBA 計畫，其硬體主要是由中研院天文所負責建造，本人參與已近六年，為其建構出一套完整的電腦模擬及資料分析的軟硬體系統，多年來主持每週一次的 Science Meeting，目前為該計畫的首席科學家。在去年九月本人和本人的博士生首次取得並分析出 first-light image of Jupiter，後續也順利觀測到土星、火星、金星、蟹狀星雲等。在今年二月再度和博士生成功地觀測到一個微弱的 quasar (強度約為 550mJy)。最重要的是在今年 4 月 18 日，本人和本人的三名博士生成功地觀測到 Sunyaev-Zel'dovich (S-Z) cluster A2142，達成 AMiBA 計畫進行六年以來的第一個科學目標，首次取得國人自力獲得的宇宙學觀測資料 (見 Figures 2 & 3)。其間所使用的分析工具，正是本人六年來所獨立建構完成的。目前本人之博士生已長駐於夏威夷，為主要的觀測人力，在中研究後續的人力協助下，我們繼續進行 S-Z cluster 的科學觀測，本計畫期待在年底前可取得大量的 CMB 觀測資料，冀能透析宇宙的本質，例如其演化史、暗能量的含量、宇宙膨脹速率等。本人領導的科學團隊中亦有中研院天文所的研究人員參與。本人一年至少有三個月以上實地在夏威夷進行此計畫之測試及觀測，近兩年來所投注之心力更多，幾年下來已將主要精力都投注在此計畫上，因此很高興已在今年度看到初步的科學成果。這些成果目前正在整理準備發表中。

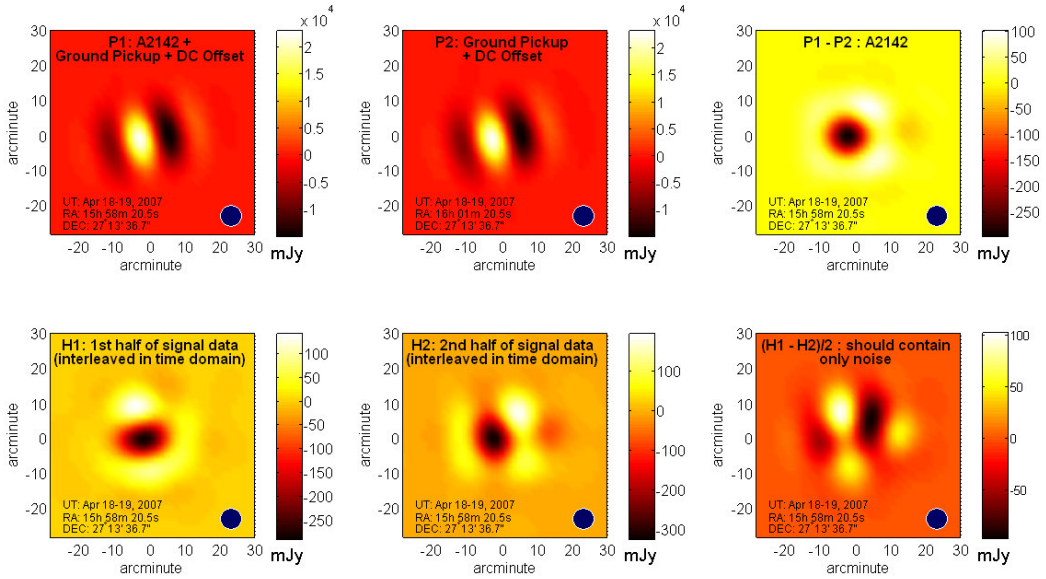


Figure 2: 利用本人獨力發展出之分析軟體系統，由 AMiBA 所觀測到的 S-Z cluster A2142 及其訊號存在之驗證。

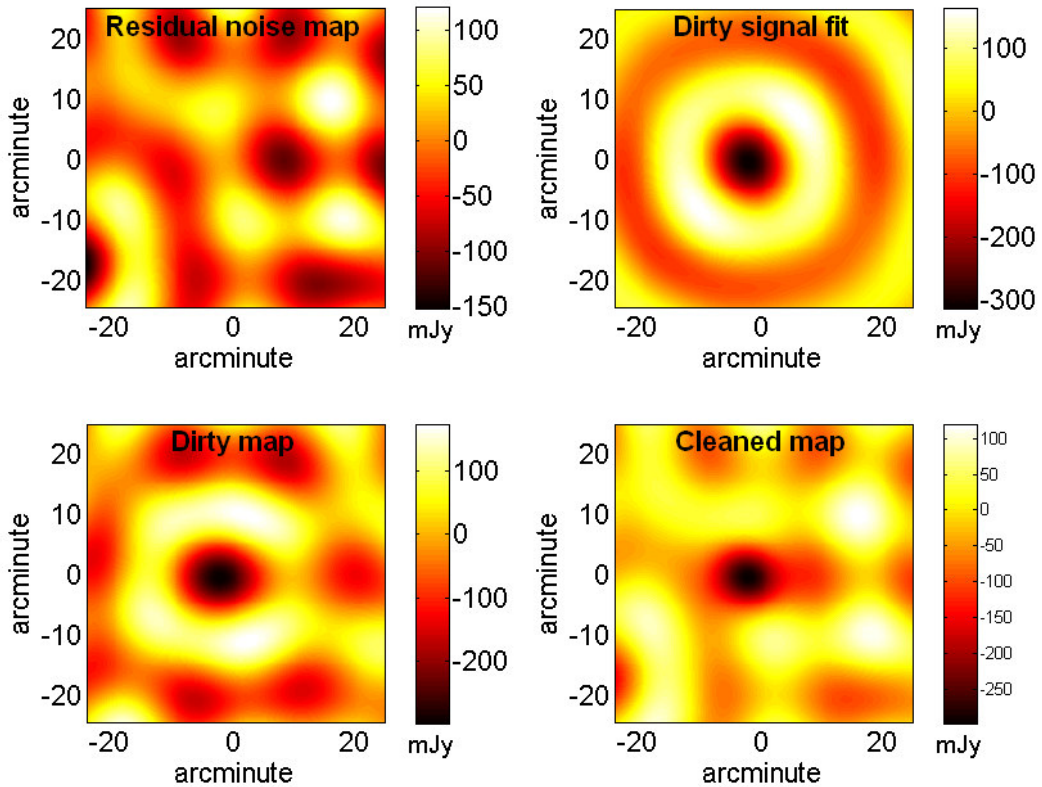


Figure 3: 經本人之軟體系統所分析出、由 AMiBA 所觀測到的 S-Z cluster A2142 及其雜訊之清除。

3. 理論研究：

此部分之重點在於加強對宇宙微波背景輻射次等效應的研究，以為和近期的觀測結果達相輔相成之效。以下分述之：

- (a) 宇宙弦的效應：初步的成果，在今年度已應邀在明尼蘇達大學的理論物理中心及 U.C. Berkeley 以演說方式發表。過去五年來我們一直致力於發展出高效能的宇宙弦模擬程式，目前的版本仍具有全世界最高的解析度及最快的運算速度。此模擬結果可置入愛因斯坦方程式以計算出宇宙弦對宇宙微波背景輻射的效應。這些研究結果目前仍舊尚未發表，目前計畫有一系列的論文要出版。宇宙弦在近年來已知可由 String Theory, Inflation, SUSY GUT 等理論產生（見參考文獻 3, 4），因此如果能在觀測上獲得其存在的證據，將可配合此處的電腦定量分析，對以上這些重要的理論進行限制，讓這些原本廣泛被為不太可能進行實驗驗證的物理理論，成為一門實驗及觀測科學。
- (b) 有限宇宙的效應：今年的重點為分析 WMAP 的新資料，並預測 Planck 衛星計畫未來將取得之資料所可能達成的科學成果，其旨在探究宇宙的大小及拓撲，論文已在起草中。初步結果顯示我們的宇宙極有可能是有限大的。研究過程中大量使用國家高速電腦中心（National Center for High-performance Computing, NCHO）的電腦資源，計算進行得頗為順利。
- (c) Sunyaev-Zel'dovich 效應：今年度配合 AMiBA 的實際觀測，完成了由 full N-body simulation 所模擬出的 S-Z 效應。此部分的模擬研究，緊密地配合 AMiBA 計畫的執行，以致得以順利在今年四月獲得 AMiBA 的第一項科學觀測成果。這項研究是目前 CMB 研究領域的一個重要趨勢，全世界有近十個觀測計畫都將在未來的二年內獲取前所未有的高精度資料，國際上之競爭頗為激烈。唯有將電腦模擬及資料分析技術等與實際觀測資料作緊密結合，方能在短時間內順利獲取科學成果。

依循本計畫向來的精神，以上這些多年來累積出的研究成果，不但在單純的理論研究上可以持續有所進展，目前及日後更可將其直接運用在我們所參與的數個不同的觀測計畫上（如 MAXIPOL、SDSS、Polarbear、EBEX、Planck、台灣的 AMiBA 等）。日後我們將繼續雙管齊下，同時推動理論研究和觀測成果。

二、參考文獻：

1. J.H.P. Wu et al., 2007, 'MAXIPOL: Data Analysis and Results', accepted by *Astrophys. J.*
2. B.R. Johnson et al., 2007, 'MAXIPOL: CMB Polarimetry Using a Rotating Half-Wave Plate', accepted by *Astrophys. J.*
3. J.H.P. Wu, 2007, 'Coherence Constraint on the Existence of Cosmic Defects', submitted to *Phys.Rev.Lett.*
4. J.H.P. Wu, 2007, 'New method of extracting non-Gaussian features', submitted to *Phys.Rev.D*
5. Pei-Ying Hsieh, 2006, 'Interferometric CO(J=2-1) Image of the Circumnuclear Region in the Seyfert 1 Galaxy NGC 1097', M.Sc. Thesis, National Taiwan University.

三、計畫成果自評：

本人長年主要的研究重點是現代宇宙學，尤其是關於宇宙微波背景輻射（Cosmic Microwave Background, 簡稱 CMB）的研究與探討。目前依據 SLAC/SPIRES database 上的記錄，本人已發表之論文的平均被引用次數為每篇 107 次。今年的成果自評分述如下：

- (1) **宇宙微波背景輻射**：多年來本人為多項 CMB 觀測計畫的核心成員，包括歐洲太空總署(ESA)的 Planck 衛星計畫(自 1998 年至今) 美國 NASA 的 MAXIMA/MAXIPOL 計畫(自 1999 年至今) 以及台灣卓越計畫中的 AMiBA 計畫(自 2000 年至今)，目前本人是後兩個計畫的首席科學家。目前洽談中的計畫還包括 SDSS(關於宇宙大尺度結構的觀測)、EBEX、POLARBEAR 等。我國在這些計畫中從來沒有硬體上的投資或貢獻，但本人憑藉個人在理論研究以及資料分析上的專長優勢，得以受邀參與這些計畫並在其中扮演科學分析的主導角色。本人在這些計畫中的主要角色及貢獻在於對科學細節的訂定及科學成果的取得，大量地使用超級電腦進行事前模擬及事後的觀測資料統計分析，過程中創造出許多目前已漸趨普及的分析技術，包括偵測 non-Gaussianity 的方法、asymmetric beams 的處理方法、CMB 的 maps 及 power spectrum 的估算方法、宇宙參數的估算方法等。其中 **MAXIMA/MAXIPOL** 計畫是世界上兩個首次觀測到 sub-degree 尺度 CMB 的實驗之一（另一個是 BOOMERANG）這項突破不但將宇宙學帶入了精準時代，使宇宙參數估計的誤差小於 10%，並且使人類對宇宙的起源有更進一步的了解。此成果也因此被 Science 雜誌評選為全球百大科學貢獻之一，本人參與其中所發表之論文已近二十篇，並陸續增加中，其中本人為第一作者的已有五篇，其被引用總次數已近兩千次。目前本人仍是 MAXIPOL 計畫的科學領導人，主持每週一次的 Telecon，此計畫已於 2006 年底首次發表兩篇 first result 論文，發佈 CMB polarization 現象的觀測結果，我是科學成果論文的第一作者（見參考文獻 1），另一篇則是關於 instrumentation 的論文（見參考文獻 2），此成果已促成 Planck 衛星計畫決定採用相同的技術在 2008 年於太空中進行觀測。團隊中本人多年的研究夥伴 Prof. George Smoot 更在去年獲得諾貝爾物理獎，本人和其合寫的論文已近二十篇。關於 **AMiBA** 計畫，其硬體主要是由中研院天文所負責建造，本人參與已六年，獨力為其建構出一套完整的電腦模擬及資料分析的軟硬體系統，多年來主持每週一次的 Science Meeting，目前已成功在 2006 年 9 月和本人的博士生首次取得並分析出 first-light image of Jupiter；在今年 2 月再度和博士生成功地觀測到一個微弱的 quasar (550mJy)；今年 4 月 18 日本人和本人之三位博士生，利用本人獨力完成之軟體系統成功地觀測分析出 Sunyaev-Zel'dovich (S-Z) cluster A2142，達成 AMiBA 計畫進行六年以來的第一個科學目標，首次取得國人自力獲得的宇宙學觀測資料。目前本人之博士生已長駐於夏威夷，為主要的觀測人力，我們一直持續進行 CMB 的科學觀測，本計畫期待在年底前可取得大量的 CMB 觀測資料，冀能透析宇宙的本質，例如其演化史、暗能量的含量、宇宙膨脹速率等。
- (2) **理論研究**：主要的貢獻之一在於宇宙弦的研究，包括它們的演化、可能造成的可觀測現象、以及對基礎物理的衝擊等。這些成果有很多已被用來和觀測結合，用以間接驗證及測試 String Theory、SUSY GUT、Inflation 等，讓這些理論成為實驗科學。其中一項尤其重要的貢獻為發展出世界上第三個高解度宇宙弦模

擬程式(另外兩個程式的作者分別為Allen & Shalard及Bennett & Bouche)，此程式之模擬解析度及效能目前仍為世界第一，成果僅在國際會議中發表，仍尚未發表於期刊中。此項研究成果，將可配合上述本人所參與的觀測計畫，進行進一步的觀測驗證，讓理論研究和實際觀測能夠緊密結合。歷年來本人亦有論文探討宇宙擾動的本質，並藉由與觀測資料的比對，進而了解宇宙的起源及宇宙模型中的參數。其中尤其重要的是關於 galaxy clusters 的研究，有助於對宇宙中暗物質及暗能量的探討。此外，本人也同時進行數項 CMB 的理論研究，例如宇宙的大小及拓樸、Sunyaev-Zeldovich effects、重力透鏡效應、Polarization 等。各項子題在本年度內皆穩定成長，希望能有餘力儘速將這些成果發表於學術期刊中。

除了以上直接的成果外，本計畫的間接成效還包括以下數項：

1. 研究能量的建置：本計畫很著重軟體研究能量的建置，本年度中在各個子題上都有良好的進展，且有進一步的成果。
2. 國際能見度的提升：本人受邀參加國際學術會議發表研究成果，並與國外合作者於年內共同發表研究成果，此過程中不但可與國際上同領域之先進交換心得，還可提高我國在此領域中之國際能見度。
3. 與其它計畫的配合：主持人同時參與國內及國際上之各項觀測計畫，可直接將此處國科會計畫之研究成果，直接應用在這些觀測資料上。
4. 人才的培育：目前在學的有一位碩士生及三位博士生，協助本計畫的推動。未來仍將持續把博士生送往國外參與本人所參與之各項計畫，一方面協助計畫的進行，另一方面增強其研究能力，以達本土人才培育的目的。

本計畫原則上推動順利，達到預期的成效。

國際合作研究計畫國外研究心得報告

本年度內，在國科會的補助下，本人出國數次，分別報告如下：

1. 國際合作部分：

- (a) MAXIPOL計畫：2006年底及2007年初，本人造訪U. C. Berkeley及University of Minnesota進行研究，分析MAXIPOL觀測資料。本人目前為此觀測計畫的科學分析領導人，觀測資料於2002及2003年取得，但因資料中含有嚴重的systematic error，所以為了解決此問題，花了很多時間進行進一步的軟體測試，目前已透過新的分析方式，將此error降到最低或甚至去除。本計畫的first result目前已寫成兩篇論文，皆已被Astroph. J.所接受，近期內將刊出，本人為兩篇論文中科學結果論文的第一作者（另一篇為關於硬體的論文，Brad Johnson為第一作者），並因此而受邀於2007年的美國天文年會中發表演說（內容詳下附件）。MAXIPOL計畫的成員之一George Smoot（也是本人所發表之MAXIPOL論文的共同作者），並在2007年10月獲得諾貝爾物理獎，為該計畫及CMB的研究注入了一劑強心針。目前本人將派遣至少一名博士生前往美國長駐，以繼續加強雙邊的合作。
- (b) SDSS (Sloan Digital Sky Survey) 計畫：本人於2006年下旬應邀至Fermilab擔任訪問學人，並和其討論未來關於SDSS計畫的合作。台灣在此計畫上並無金錢上的投資或貢獻，但本人憑藉著個人在資料分析及電腦模擬上的專長及優勢，承蒙對方無條件式地邀請參與此計畫。目前初步的共識為本人將設法派遣一名博士生進駐Fermi lab，以利後續的合作。

2. AMiBA計畫部分：本人於2006及2007年多次赴夏威夷推動AMiBA觀測計畫。此行程雖不受本計畫補助，但AMiBA的資料分析及部分觀測人力確實是仰賴本計畫在執行過程中所建構出之能量來進行。去年9月本人和博士生一同觀測到來自宇宙中的first light（木星、土星、金星、火星、蟹狀星雲等）。今年四月，本人和本人的三位博士生又順利地觀測到Sunyaev-Zel'dovich cluster A2142，成功達成AMiBA計畫的第一個科學目標，為該計畫立下了重要的科學里程碑。其間所使用的分析軟體，正是本人在過去近六年來於國科會補助下所獨自發展出來的。AMiBA計畫和本計畫息息相關，因為其目前及未來的觀測資料可直接和本計畫的研究成果結合，以探討CMB的次等效應。

3. 國際會議及國外演講部分：

- (a) 2006年10月：受University of Minnesota物理系邀請，進行colloquium。
- (b) 2006年11月：受美國Fermi lab的邀請，進行colloquium。
- (c) 2007年1月：受美國天文學會邀請，於209th Annual Meeting of American Astronomical Society (Seattle, USA) 中發表演講（內容詳下附件）。

附件：“國際會議中所發表演講之內容”

由於本人是 MAXIPOL 計畫的 first result 的 first author，所以應邀在 209th Annual Meeting of American Astronomical Society (Seattle, USA) 中發表演講，內容如下。


AAS, Seattle, Jan. 10, 2007

Measurements of CMB Polarization with MAXIPOL

Jiun-Huei Protty Wu
Dept. of Physics & Institute of Astrophysics
National Taiwan University

- The MAXIPOL experiment**
Instrument & observations
Calibration & beam profile
- Data analysis & results**
Time-domain processing
Q, U maps & polarization power spectra
Tests for systematic errors
Bayesian & frequentist approaches
- Conclusion**

astro-ph/0611394 Johnson et al.
astro-ph/0611392 Wu et al.



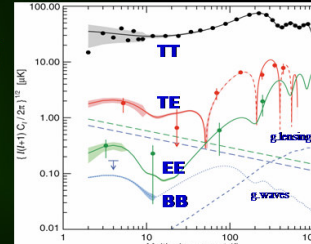
MAXIPOL J. H. Protty Wu AAS Seattle 1/10/2007 [1/15]

MAXIPOL Collaboration

M. E. Abroe (UMN)
P. A. R. Ade (Cardiff, UK)
J. Bock (JPL)
J. Borrill (LBNL)
A. Bosscheri (IFAC-CNR)
P. de Bernardis (URLS, Italy)
J. Collins (UCB)
S. Hanany (UMN) **(P.I.)**
A. H. Jaffe (Imperial, UK)
B. R. Johnson (UMN)
T. Jones (UMN)
A. T. Lee (UCB)
L. Levinson (WISR, Israel)
T. Matsumura (UMN)
B. Rabi (UCB)
T. Renbarger (UMN)
P. L. Richards (UCB)



G. P. Smoot (UCB)
R. Stompor (UP-7, France)
H. T. Tran (UCB)
C. D. Winant (UCB)
J. H. P. Wu (NTU, Taiwan)
J. Zuntz (Imperial, UK)

astro-ph/0611394 Johnson et al.
astro-ph/0611392 Wu et al.



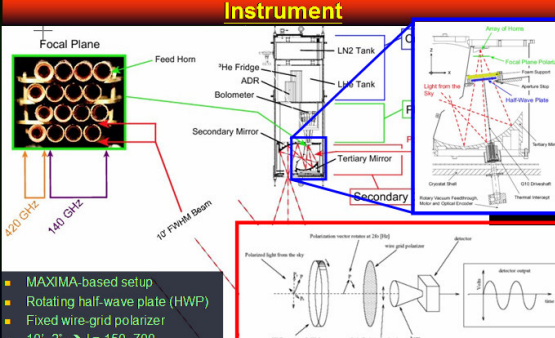
MAXIPOL J. H. Protty Wu AAS Seattle 1/10/2007 [2/15]

The Experiment

MAXIPOL J. H. Protty Wu AAS Seattle 1/10/2007 [3/15]

Instrument

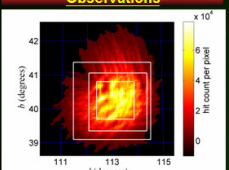



- MAXIMA-based setup
- Rotating half-wave plate (HWP)
- Fixed wire-grid polarizer
- 10⁻² → l = 150-700

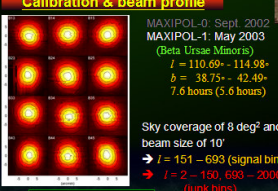
$$d_l = s_l^T + \epsilon \left[-s_l^Q \cos \phi_l + s_l^U \sin \phi_l \right] + n_l$$

MAXIPOL J. H. Protty Wu AAS Seattle 1/10/2007 [4/15]

Observations

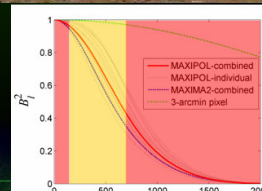
Calibration & beam profile



MAXIPOL-0: Sept. 2002
MAXIPOL-1: May 2003
(Beta Ursae Minoris)
l = 110.69° - 114.98°
b = 38.75° - 42.45°
7.6 hours (5.6 hours)


Sky coverage of 8 deg² and beam size of 10'

→ l = 151 - 693 (signal bin)
→ l = 2 - 150, 693 - 2000 (junk bins)




MAXIPOL J. H. Protty Wu AAS Seattle 1/10/2007 [5/15]

Data Analysis & Results



Formosa II HPC cluster
National Center for High-performance Computing, Taiwan
IBM e326 320 CPU-Cores



Seaborg: world ranking 14 (National Energy Research Scientific Computing Center at Lawrence Berkeley National Laboratory)
IBM SP Power3 375 MHz 16 way / 6656 CPU / 9984 GFlops

MAXIPOL J. H. Protty Wu AAS Seattle 1/10/2007 [6/15]

Time-domain processing

$$d_t = s_t^T + \epsilon \left[-s_t^Q \cos \phi_t + s_t^U \sin \phi_t \right] + n_t$$

$$\phi_t = 4\beta_1 - 2\alpha_1 f, \quad f_\beta = 1.86 \text{ Hz}, \quad f_\alpha \approx 4f_\beta = 7.44 \text{ Hz}$$

$$d_t^Q = \left\langle \frac{-2d_t}{\epsilon} \cos \phi_t \right\rangle$$

$$d_t^U = \left\langle \frac{2d_t}{\epsilon} \sin \phi_t \right\rangle$$

$$m_{pp}^X = N_{pp'}^X A_{p't} (N_{t't'}^X)^{-1} d_{t'}^X$$

$$N_{pp'}^X = [A_{p't} (N_{t't'}^X)^{-1} A_{t'p'}^X]^{-1}$$

J. H. Protty Wu AAS Seattle 1/10/2007 [7/15]

Q, U Maps

$$(Q \pm iU)(\mathbf{n}) = \sum_{\ell m} (a_{\ell m}^E \pm i a_{\ell m}^B) \pm 2Y_{\ell m}(\mathbf{n})$$

$$C_{\ell}^{YY'} = \frac{1}{2\ell+1} \sum_m a_{\ell m}^Y a_{\ell m}^{Y'}$$

J. H. Protty Wu AAS Seattle 1/10/2007 [8/15]

Polarization power spectra: EE, EB, BB

$$\ell(\ell+1)C_{\ell}^{XX} / 2\pi \text{ } (\mu\text{K}^2) \quad \ell = 151 - 693$$

Shape $D_{\ell}^{(n)}$	EE	EB	BB
$1/\ell(\ell+1)$	55 ⁺⁵¹ ₋₄₅	18 ⁺²⁷ ₋₂₄	-31 ⁺³¹ ₋₂₁
ACDM	109 ⁺¹³⁰ ₋₁₀₁	23 ⁺³⁷ ₋₃₇	-48 ⁺²⁵ ₋₂₅
$1/(2\ell+1)$	83 ⁺⁶⁸ ₋₅₀	24 ⁺⁴⁰ ₋₃₈	-51 ⁺²⁷ ₋₂₅
1	117 ⁺⁶⁰ ₋₇₇	32 ⁺⁵² ₋₄₀	-41 ⁺³¹ ₋₃₃

Bayesian approach (inc. σ_{cal})

$1/\ell(\ell+1)$	53 ⁺⁵⁷ ₋₄₅	14 ⁺³³ ₋₃₁	-30 ⁺³¹ ₋₂₁
ACDM	113 ⁺¹³⁶ ₋₁₀₉	27 ⁺⁴² ₋₃₄	-41 ⁺²⁹ ₋₃₁
$1/(2\ell+1)$	88 ⁺⁷⁰ ₋₅₈	29 ⁺³⁹ ₋₃₈	-41 ⁺²⁴ ₋₂₄
1	108 ⁺⁵⁰ ₋₇₂	34 ⁺⁵³ ₋₄₀	-47 ⁺²⁵ ₋₂₉

Frequentist approach

$1/\ell(\ell+1)$	62 ⁺⁵² ₋₄₂	3 ⁺³³ ₋₃₁	26 ⁺³¹ ₋₂₀
ACDM	68 ⁺⁴⁶ ₋₄₅	5 ⁺³⁴ ₋₃₁	21 ⁺⁴⁷ ₋₃₈
$1/(2\ell+1)$	73 ⁺⁶⁹ ₋₄₃	23 ⁺³¹ ₋₂₈	38 ⁺⁴² ₋₃₈
1	72 ⁺⁷⁵ ₋₄₆	8 ⁺⁴⁶ ₋₄₀	21 ⁺⁴⁶ ₋₂₉

J. H. Protty Wu AAS Seattle 1/10/2007 [10/15]

EE spectrum

Shape $D_{\ell}^{(n)}$	No Prior	$C_{\ell}^{EB} = C_{\ell}^{BB} = 0$
$1/\ell(\ell+1)$	96%	83%
ACDM	94%	-
$1/(2\ell+1)$	98%	92%
1	98%	-

Shape $D_{\ell}^{(n)}$	Mode	68%	95%
Bayesian $C_{\ell}^{EB} = C_{\ell}^{BB} = 0$			
$1/\ell(\ell+1)$	12	+40	+83
		-21	-39
$1/(2\ell+1)$	41	+59	+120
		-38	-71
Bayesian $C_{\ell}^{EB} = C_{\ell}^{BB} = 0$ (inc. σ_{cal})			
$1/\ell(\ell+1)$	12	+41	+94
		-22	-38
$1/(2\ell+1)$	49	+66	+144
		-48	-81

J. H. Protty Wu AAS Seattle 1/10/2007 [10/15]

Tests for systematic errors

- Difference maps**

Test	Appr.	EE	EB	BB
time B		-19 ⁺⁵⁴ ₋₂₉	-55 ⁺³³ ₋₃₈	8 ⁺⁴⁵ ₋₄₈
time B (σ_{cal})		-10 ⁺⁴⁸ ₋₃₉	-55 ⁺³⁵ ₋₄₂	8 ⁺⁴⁹ ₋₄₉
time F		21 ⁺⁴⁸ ₋₅₁	8 ⁺⁴³ ₋₄₂	-25 ⁺¹⁵ ₋₁₇
polar F		-5 ⁺⁴² ₋₄₁	35 ⁺¹¹ ₋₁₂	30 ⁺⁴¹ ₋₄₁
- Regions of different sizes**

Region Size ($x^\circ \times x^\circ$)	EE	EB	BB
$x = 1.7$	69 ⁺⁴⁷ ₋₄₆	12 ⁺²⁵ ₋₂₇	22 ⁺²⁵ ₋₂₅
$x = 1.1$	63 ⁺⁴⁶ ₋₄₄	8 ⁺²⁰ ₋₁₈	14 ⁺²¹ ₋₂₁
- Gaussianity test**
 - Karhunen-Loeve coefficients of maps \rightarrow Kolmogorov test for Gaussianity \rightarrow 95% confidence
- Beam asymmetry & polarization leakage**
 - Scans of Jupiter showed instrumental polarization for 2 out of 12 polarimeters (4% & 5%)
 - Simulations assuming 4.2% leakage from T for all 12 polarimeters \rightarrow $\leq 3 \mu\text{K}^2$ to C_{ℓ}^{EB} and C_{ℓ}^{BB}

J. H. Protty Wu AAS Seattle 1/10/2007 [11/15]

AMiBA: Taiwanese CMB experiment

J. H. Protty Wu AAS Seattle 1/10/2007 [12/15]

Sunyaev-Zeldovich Effect (Wu, 2006)

Structure formation:
baryons(red) + CDM(white) +DE

Resulting SZ map:

MAXIPOL

J. H. Protty Wu AAS Seattle
1/10/2007 [13/15]

Search for cosmic strings

(Hybrid Inflation,
String theory,
SUSY GUT, etc)

(J.H.P. Wu, 2006)

String Evolution

Conclusion

- Shows weak evidence of EE signal:
 - Measured EE power is $\ell(\ell+1)C_{\ell}^{EE}/2\pi = 55_{-21}^{+10} \mu\text{K}^2$
 - Probability that EE > 0 is 96%
- Consistent with concordance cosmological model:
 - Λ CDM predicts $\ell(\ell+1)C_{\ell}^{EE}/2\pi = 14 \mu\text{K}^2$
 - EB & BB powers are consistent with zero
- A successful pathfinder for rapid polarization modulation (HWP):
 - Can shift signals to higher frequency to avoid 1/f noise
 - Post-demodulation noise $P(f)$ is white well below 50 mHz, with a level consistent with inherent detector+amplifier readout noise
 - no indication of residual systematics in Q,U in time/map domain
 - Essential support for future polarization experiments such as EBEX, Polar Bear, Spider, SPT-pol, CMBPOL(?).

SZ, B mode next!!

MAXIPOL

J. H. Protty Wu AAS Seattle
1/10/2007 [15/15]