

การจำลองวงศนามแม่เหล็กบนขอบทิศตะวันตกของดวงอาทิตย์ที่สังเกตในช่วงเกิดสุริยุปราคาเต็ม  
ดวงเมื่อวันที่ 24 ตุลาคม 2538

นายไพศาล ตู้ประกาย



สถาบันวิทยบริการ  
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์  
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2542

ISBN 947-333-116-6

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**MODELING OF MAGNETIC LOOPS ON THE WEST SOLAR LIMB OBSERVED DURING  
THE TOTAL SOLAR ECLIPSE OF OCTOBER 24, 1995**



**Mr. Paisan Tooprakai**

**สถาบันวิทยบริการ**  
**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements**

**จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย**  
**for the Degree of Master of Science in Physics**

**Department of Physics**

**Graduate School**

**Chulalongkorn University**

**Academic Year 1999**

**ISBN 974-333-116-6**

**Thesis Title**      Modeling of Magnetic Loops on the West Solar Limb Observed  
During the Total Solar Eclipse of October 24, 1995

**By**                      Mr. Paisan Tooprakai

**Department**        Physics


**Thesis Advisor**    Associate Professor David Ruffolo, Ph.D.

---


Accepted by the Graduate School, Chulalongkorn University in Partial  
Fulfillment of the Requirement for the Degree of Master of Science

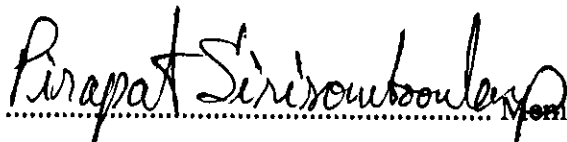
  
..... Dean of Graduate School  
(Associate Professor Suchada Kiranandana, Ph.D.)

**Thesis Committee**

  
..... Chairman  
(Associate Professor Anantasin Techagumpuch, Ph.D.)

  
..... Thesis Advisor  
(Associate Professor David Ruffolo, Ph.D.)

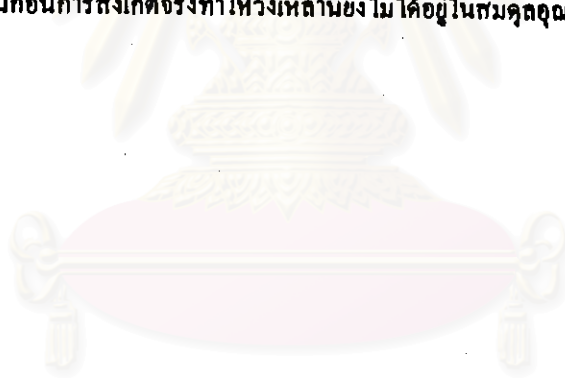
  
..... Member  
(Associate Professor Mayuree Natenapit, Ph.D.)

  
..... Member  
(Assistant Professor Pirapat Sirisomboonlap, Ph.D.)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

ไพศาล ผู้ประภาษ : การจำลองวงสนามแม่เหล็กบนขอบทิศตะวันตกของดวงอาทิตย์ที่สังเกตในช่วงเกิดสุริยุปราคาเต็มดวงเมื่อวันที่ 24 ตุลาคม 2538 (MODELING OF MAGNETIC LOOPS ON THE WEST SOLAR LIMB OBSERVED DURING THE TOTAL SOLAR ECLIPSE OF OCTOBER 24, 1995) อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร. เควิค รุฟโฟโล, 163 หน้า. ISBN 974-333-116-6.

โครงสร้างวงสนามแม่เหล็กในชั้นโคโรนาของดวงอาทิตย์สามารถสังเกตได้ในช่วงเกิดสุริยุปราคาเต็มดวงหรือใช้เครื่องมือชนิดพิเศษในอวกาศช่วย ในที่นี้เราได้จำลองโครงสร้างวงสนามแม่เหล็กในชั้นโคโรนาโดยพิจารณาใช้แบบจำลองสนามแม่เหล็กที่อิสระจากแรง ซึ่งมีค่า  $\alpha$  คงที่และใช้วิธีการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็วเป็นวิธีการหนึ่งโดยทั่วไปของอาลิสตันครากิสในปี 1981 โดยใช้ข้อมูลแมกนีโตแกรมที่ได้จาก National Optical Astronomy Observatories (NOAO) เป็นเงื่อนไขขอบเขตทำให้สามารถหาสนามแม่เหล็กที่อิสระจากแรงในโคโรนาได้ในสามมิติ และเมื่อเปรียบเทียบแบบจำลองที่ได้กับการสังเกตจริงในช่วงความยาวคลื่นรังสีเอกซ์จากยานอวกาศโซโคพบว่าเมื่อ  $\alpha = 0.1$  ต่อฟิลิปดา จะได้ลักษณะของวงเป็นรูปตัว S อย่างเหมาะสมเมื่อมองลงบนตัวดวงอาทิตย์ จากนั้นเปรียบเทียบแบบจำลองของเรากับภาพถ่ายของ  $Fe^{II}$  โดยคณะวิจัยของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยช่วงสุริยุปราคาเต็มดวงเมื่อวันที่ 24 ตุลาคม 2538 ซึ่งเป็นภาพที่มีความละเอียดสูงและแสดงถึงความไม่ต่อเนื่องของโครงสร้างวง จากแบบจำลองสรุปได้ว่าความไม่ต่อเนื่องเป็นโครงสร้างของวงสนามแม่เหล็กที่ใหญ่ ( $\sim 10^4$  กม.) ไม่ได้เกิดจากวงสนามแม่เหล็กเล็กๆ ที่ฐานทั้งสองของวง ดังนั้น คำอธิบายที่ดีที่สุดสำหรับความไม่ต่อเนื่องที่สังเกตได้คือ กัมมันตภาพของดวงอาทิตย์ที่เกิดขึ้นบางวันก่อนการสังเกตจริงทำให้วงเหล่านี้ยังไม่ได้อยู่ในสมดุลอุณหพลศาสตร์ ทำให้ได้ผลสอดคล้องกับที่เราสังเกตเห็น



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา ..... ฟิลิปป์  
สาขาวิชา ..... ฟิลิปป์  
ปีการศึกษา ..... 2542

ลายมือชื่อนิติกร ..... ไพศาล ผู้ประภาษ  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... เควิค รุฟโฟโล  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาอื่น ..... ..

# # 3971284223 : MAJOR PHYSICS

KEY WORD: SOLAR ECLIPSE / CORONAL LOOPS / MAGNETOHYDRODYNAMICS / SOLAR ACTIVE REGIONS / CORONA

PAISAN TOOPRAKAI: MODELING OF MAGNETIC LOOPS ON THE WEST SOLAR LIMB OBSERVED DURING THE TOTAL SOLAR ECLIPSE OF OCTOBER 24, 1995. THESIS  
ADVISOR: ASSOC. PROF. DAVID RUFFOLO, Ph.D. 163 pp. ISBN 974-333-116-6.

The coronal magnetic loop structure of the Sun can be observed during a total solar eclipse or using special instruments in space. We simulate the coronal magnetic loop structure by considering a constant- $\alpha$  force-free field model and using fast Fourier transforms (FFT) in a method generalized from that of Alissandrakis (1981). We use magnetogram data from the National Optical Astronomy Observatories (NOAO) as a boundary condition and derive a force-free coronal magnetic field in three dimensions. When comparing our simulation results with X-ray observations from the Yohkoh satellite, we find that  $\alpha = 0.1$  arc second<sup>-1</sup> gives the appropriate S-shape for loops on the disk. We compare our field model with the photograph of Fe<sup>+9</sup> line emission taken by a Chulalongkorn University expedition during the total solar eclipse of October 24<sup>th</sup>, 1995, which yields a high resolution image of the discontinuity of loop structures. We conclude that the discontinuity is indeed in large ( $\sim 10^5$  km) loop structures and did not occur from small magnetic loops at the footpoints. Our best explanation of this apparent discontinuity is that solar activity involving these loops occurred some days before our observation, so the loops were not in thermodynamic equilibrium, in accordance with our observation.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา ฟิสิกส์

สาขาวิชา ฟิสิกส์

ปีการศึกษา 2542

ลายมือชื่อนิสิต ไพศณ โทปราไค

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา David Ruffolo

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม



# Acknowledgements

I would like to express my deeply felt gratitude to numerous people who have, directly and indirectly, contributed to this work. I am thankful to all of them for their encouragement and support, especially Associate Professor Dr. David Ruffolo, my direct advisor and Police Captain Dr. Wiwat Sidhisoradej who were always clever, gentle, kind and helpful during my thesis and my programming work.

I would like to thank the eclipse expedition of the Faculty of Science of Chulalongkorn University for their data and the National Optical Astronomy Observatories (NOAO) for magnetogram data used for my thesis.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# Table of Contents

Abstract in Thai .....	iv
Abstract in English .....	v
Acknowledgements .....	vi
Table of Contents .....	vii
List of Figures .....	x
<b>Chapter I Introduction .....</b>	<b>1</b>
The Objectives of This Thesis .....	5
<b>Chapter II Theoretical Background .....</b>	<b>7</b>
2.1 Magnetohydrodynamics (MHD) .....	8
2.2 Magnetohydrostatics .....	10
2.2.1 Force-free field condition .....	10
2.2.2 Fourier transform technique to solve this problem .....	11
<b>Chapter III Observational Data .....</b>	<b>18</b>
3.1 Total Solar Eclipse Photography from the Research Group of Chulalongkorn University .....	18
3.2 Data from Kitt Peak Magnetograms .....	21
3.3 X-ray Data from the Yohkoh Satellite .....	27
<b>Chapter IV Numerical Techniques .....</b>	<b>32</b>

4.1 Forward and Inverse Fourier Transforms in Two Dimensions .....	32
4.2 Discrete Fourier Transform in Two Dimensions .....	33
4.3 Magnetic Field Line Visualization .....	34
4.4 Selection of Initial Points of Visualized Magnetic Field Lines .....	35
4.5 Interpolation and Image Drawing Method .....	36
4.5.1 Linear interpolation .....	36
4.5.2 Bilinear interpolation .....	37
4.5.3 Linear interpolation in three dimensions .....	38
4.5.4 Image drawing method .....	40
4.6 Summary of Simulation Procedure .....	43
<b>Chapter V Results and Comparisons .....</b>	<b>45</b>
5.1 Testing the Program .....	45
5.2 Simulated Magnetic Field in 3D .....	49
5.3 Minimization to Select Initial Points of Visualized Magnetic Field Lines .....	60
5.4 Results of Tracing Magnetic Field Line Results. ....	64
5.5 Comparison with Yohkoh Observations .....	86
5.6 Comparison with Chulalongkorn University Observation of the Total Solar Eclipse .....	90
<b>Chapter VI Conclusions .....</b>	<b>94</b>
<b>References .....</b>	<b>97</b>
<b>Appendix A Energy Levels of Fe<sup>+9</sup> .....</b>	<b>99</b>
<b>Appendix B Minimization by Powell's Methods .....</b>	<b>100</b>



<b>Appendix C</b>	<b>Linear Interpolation Program</b> .....	<b>116</b>
<b>Appendix D</b>	<b>Program for Simulating Magnetic Fields in Three Dimensions</b> .....	<b>122</b>
<b>Appendix E</b>	<b>Minimization Program</b> .....	<b>146</b>
<b>Appendix F</b>	<b>Program to Trace Field Lines</b> .....	<b>153</b>
<b>Appendix G</b>	<b>Image Drawing Program</b> .....	<b>158</b>
	<b>Curriculum Vitae</b> .....	<b>163</b>



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# List of Figures

Figure		Page
Figure 1.1	The components of the Sun's atmosphere. ....	3
Figure 1.2	The Fe <sup>+9</sup> image of the total solar eclipse on 24 <sup>th</sup> October, 1995 by a Chulalongkorn University expedition. ....	6
Figure 3.1	An enlarged version of figure 1.2, the Fe <sup>+9</sup> image of the total solar eclipse on 24 <sup>th</sup> October, 1995 taken by a group of scientists from Chulalongkorn University at Klonglan National Park, Kampaeng Phet Province. ....	20
Figure 3.2	Full-disk photospheric distribution of the line-of-sight magnetic field component from the Kitt Peak magnetogram on October 15 <sup>th</sup> , 1995 (15:15:00 UT). ....	22
Figure 3.3	Full-disk photospheric distribution of the line-of-sight magnetic field component from the Kitt Peak magnetogram on October 17 <sup>th</sup> , 1995 (15:34:47 UT). ....	23
Figure 3.4	Full-disk photospheric distribution of the line-of-sight magnetic field component from the Kitt Peak magnetogram on October 18 <sup>th</sup> , 1995 (14:59:24 UT). ....	24
Figure 3.5	Full-disk photospheric distribution of the line-of-sight magnetic field component from the Kitt Peak magnetogram on October 20 <sup>th</sup> , 1995 (15:12:54 UT). ....	25

Figure 3.6	Full-disk photospheric distribution of the line-of-sight magnetic field component from the Kitt Peak magnetogram on October 21 <sup>st</sup> , 1995 (15:40:12 UT). . . . .	26
Figure 3.7	X-ray image of the solar disk from the Yohkoh satellite on 17 <sup>th</sup> October 1995 (04:42:47 UT). . . . .	28
Figure 3.8	X-ray image of the solar disk from the Yohkoh satellite on 20 <sup>th</sup> October 1995 (02:27:33 UT). . . . .	29
Figure 3.9	X-ray image of the solar disk from the Yohkoh satellite on 21 <sup>st</sup> October 1995 (04:08:40 UT). . . . .	30
Figure 3.10	X-ray image of the solar disk from the Yohkoh satellite on 24 <sup>th</sup> October 1995 (08:39:46 UT). . . . .	31
Figure 4.1	Linear interpolation. . . . .	36
Figure 4.2	Bilinear interpolation. . . . .	37
Figure 4.3	Linear interpolation in three dimensions. . . . .	39
Figure 4.4	Coordinate system 1. . . . .	41
Figure 4.5	Overall flow chart of the simulation procedure. . . . .	44
Figure 5.1	The contour plot of the initial $z$ -component electric field data in the $x$ - $y$ plane for testing the program. . . . .	46
Figure 5.2	The contour plot of the $z$ -component electric field data in the $x$ - $y$ plane for testing the program after rotation and bilinear interpolation. . . . .	47
Figure 5.3	The contour plot of the $z$ -component electric field data in the $x$ - $y$ plane when finishing our program after the inverse Fourier transform. . . . .	48
Figure 5.4	Vector plot of the magnetic field on October 18 <sup>th</sup> , 1995 at $\alpha = 0.1$ arc second <sup>-1</sup> in the $x$ - $z$ plane. . . . .	50

Figure 5.5	Contour plot of initial magnetic field data, $B_l$ (in G), on October 18 <sup>th</sup> , 1995 in the $x$ - $y$ plane. ....	51
Figure 5.6	Contour plot of $B_l$ (in G) in the $x$ - $y$ plane on October 18 <sup>th</sup> , 1995 at $\alpha = 0.1$ arc second <sup>-1</sup> , after rotation by $\beta = 26^\circ$ . ....	52
Figure 5.7	Contour plot of $B_z$ (in G) in the $x$ - $y$ plane on October 18 <sup>th</sup> , 1995 at $\alpha = 0.1$ arc second <sup>-1</sup> after finishing the field simulation program. ....	53
Figure 5.8	Vector plot of the magnetic field in the $x$ - $y$ plane at $z = 0$ and $\alpha$ near 0. Sunspots $(x, y)$ locations are approximately $(0.35, 0.55)$ and $(0.60, 0.75)$ in these units. ....	54
Figure 5.9	Vector plot of the magnetic field in the $x$ - $y$ plane at $z = 20$ arc seconds ( $\approx 66,000$ km) and $\alpha = -0.1$ arc second <sup>-1</sup> . ....	55
Figure 5.10	Vector plot of the magnetic field in the $x$ - $y$ plane at $z = 20$ arc seconds ( $\approx 66,000$ km) and $\alpha$ near 0. ....	56
Figure 5.11	Vector plot of the magnetic field in the $x$ - $y$ plane at $z = 20$ arc seconds ( $\approx 66,000$ km) and $\alpha = 0.05$ arc second <sup>-1</sup> . ....	57
Figure 5.12	Vector plot of the magnetic field in the $x$ - $y$ plane at $z = 20$ arc seconds ( $\approx 66,000$ km) and $\alpha = 0.1$ arc second <sup>-1</sup> . ....	58
Figure 5.13	Vector plot of the magnetic field in the $x$ - $y$ plane at $z = 20$ arc seconds ( $\approx 66,000$ km) and $\alpha = 0.15$ arc second <sup>-1</sup> . ....	59
Figure 5.14	Initial $x$ - $z$ points before minimizing $V$ at $\alpha = 0.05$ arc second <sup>-1</sup> . ....	61
Figure 5.15	Initial $x$ - $z$ points after minimizing $V$ at $\alpha = 0.05$ arc second <sup>-1</sup> . ....	61
Figure 5.16	Initial $x$ - $z$ points before minimizing $V$ at $\alpha = 0.10$ arc second <sup>-1</sup> . ....	62

Figure 5.17	Initial $x$ - $z$ points after minimizing $V$ at $\alpha = 0.10$ arc second <sup>-1</sup> . . . . .	62
Figure 5.18	Initial $x$ - $z$ points before minimizing $V$ at $\alpha = 0.15$ arc second <sup>-1</sup> . . . . .	63
Figure 5.19	Initial $x$ - $z$ points after minimizing $V$ at $\alpha = 0.15$ arc second <sup>-1</sup> . . . . .	63
Figure 5.20	The magnetic field lines in 3D at $\alpha = 0.05$ arc second <sup>-1</sup> for 18 <sup>th</sup> October, 1995. . . . .	65
Figure 5.21	The magnetic field lines in 3D at $\alpha = 0.10$ arc second <sup>-1</sup> for 18 <sup>th</sup> October, 1995. . . . .	66
Figure 5.22	The magnetic field lines in 3D at $\alpha = 0.15$ arc second <sup>-1</sup> for 18 <sup>th</sup> October, 1995. . . . .	67
Figure 5.23	Simulation of the magnetic field, rotated from 18-10-95 to 15-10- 95, at $\alpha = 0.05$ arc second <sup>-1</sup> . . . . .	68
Figure 5.24	Simulation of the magnetic field, rotated from 18-10-95 to 17-10- 95, at $\alpha = 0.05$ arc second <sup>-1</sup> . . . . .	69
Figure 5.25	Simulation of the magnetic field, rotated from 18-10-95 to 18-10- 95, at $\alpha = 0.05$ arc second <sup>-1</sup> . . . . .	70
Figure 5.26	Simulation of the magnetic field, rotated from 18-10-95 to 20-10- 95, at $\alpha = 0.05$ arc second <sup>-1</sup> . . . . .	71
Figure 5.27	Simulation of the magnetic field, rotated from 18-10-95 to 21-10- 95, at $\alpha = 0.05$ arc second <sup>-1</sup> . . . . .	72
Figure 5.28	Simulation of the magnetic field, rotated from 18-10-95 to 24-10- 95, at $\alpha = 0.05$ arc second <sup>-1</sup> . . . . .	73
Figure 5.29	Simulation of the magnetic field, rotated from 18-10-95 to 15-10- 95, at $\alpha = 0.10$ arc second <sup>-1</sup> . . . . .	74

Figure 5.30	Simulation of the magnetic field, rotated from 18-10-95 to 17-10-95, at $\alpha = 0.10$ arc second <sup>-1</sup> . . . . .	75
Figure 5.31	Simulation of the magnetic field, rotated from 18-10-95 to 18-10-95, at $\alpha = 0.10$ arc second <sup>-1</sup> . . . . .	76
Figure 5.32	Simulation of the magnetic field, rotated from 18-10-95 to 20-10-95, at $\alpha = 0.10$ arc second <sup>-1</sup> . . . . .	77
Figure 5.33	Simulation of the magnetic field, rotated from 18-10-95 to 21-10-95, at $\alpha = 0.10$ arc second <sup>-1</sup> . . . . .	78
Figure 5.34	Simulation of the magnetic field, rotated from 18-10-95 to 24-10-95, at $\alpha = 0.10$ arc second <sup>-1</sup> . . . . .	79
Figure 5.35	Simulation of the magnetic field, rotated from 18-10-95 to 15-10-95, at $\alpha = 0.15$ arc second <sup>-1</sup> . . . . .	80
Figure 5.36	Simulation of the magnetic field, rotated from 18-10-95 to 17-10-95, at $\alpha = 0.15$ arc second <sup>-1</sup> . . . . .	81
Figure 5.37	Simulation of the magnetic field, rotated from 18-10-95 to 18-10-95, at $\alpha = 0.15$ arc second <sup>-1</sup> . . . . .	82
Figure 5.38	Simulation of the magnetic field, rotated from 18-10-95 to 20-10-95, at $\alpha = 0.15$ arc second <sup>-1</sup> . . . . .	83
Figure 5.39	Simulation of the magnetic field, rotated from 18-10-95 to 21-10-95, at $\alpha = 0.15$ arc second <sup>-1</sup> . . . . .	84
Figure 5.40	Simulation of the magnetic field, rotated from 18-10-95 to 24-10-95, at $\alpha = 0.15$ arc second <sup>-1</sup> . . . . .	85
Figure 5.41	Comparison between our simulation at $\alpha = 0.05$ arc second <sup>-1</sup> and a Yohkoh image for 17 <sup>th</sup> October, 1995. . . . .	87
Figure 5.42	Comparison between our simulation at $\alpha = 0.1$ arc second <sup>-1</sup> and a Yohkoh image for 17 <sup>th</sup> October, 1995. . . . .	88

- Figure 5.43 Comparison between our simulation at  $\alpha = 0.15$  arc second<sup>-1</sup> and a Yohkoh image for 17<sup>th</sup> October, 1995. .... 89
- Figure 5.44 Comparison between the simulation result for 24<sup>th</sup> October, 1995 at  $\alpha = 0.05$  arc second<sup>-1</sup> and the Fe<sup>+9</sup> photograph from the Chulalongkorn University expedition. .... 91
- Figure 5.45 Comparison between the simulation result for 24<sup>th</sup> October, 1995 at  $\alpha = 0.1$  arc second<sup>-1</sup> and the Fe<sup>+9</sup> photograph from the Chulalongkorn University expedition. .... 92
- Figure 5.46 Comparison between the simulation result for 24<sup>th</sup> October, 1995 at  $\alpha = 0.15$  arc second<sup>-1</sup> and the Fe<sup>+9</sup> photograph from the Chulalongkorn University expedition. .... 93
- Figure A.1 Term splitting in the ground state of Fe<sup>+9</sup> giving rise to the  $\lambda$  6374 forbidden coronal line. .... 99
- Figure B.1 Successive minimizations along coordinate directions (the “steepest-descent” method) in a long, narrow “valley” (shown as contour lines). Unless the valley is optimally oriented, this method is extremely inefficient, taking many tiny steps to get to the minimum, crossing and re-crossing the principal axis. .... 102

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย