

การคาดคะเนลuminosityของเครื่อง Large Hadron Collider โดยใช้การผลิตอนุภาค W และ Z

จากบทวิทยานิพนธ์



นายรัชพล รัตนวงศ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์

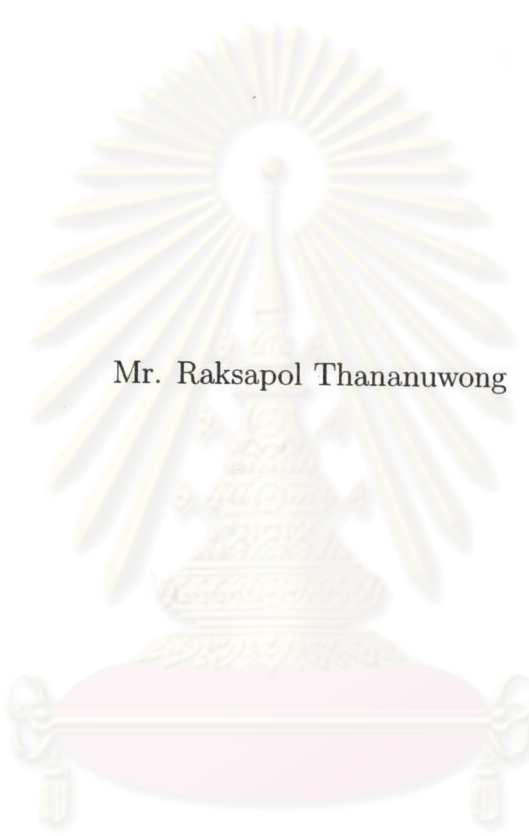
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-6825-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

LUMINOSITY ESTIMATION OF THE LARGE HADRON COLLIDER USING  
W AND Z PARTICLE PRODUCTION



Mr. Raksapol Thananuwong

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Physics

Department of Physics

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic year 2004

ISBN 974-17-6825-7

Thesis Title Luminosity estimation of the Large Hadron Collider using W and Z particle production  
By Mr. Raksapol Thananuwong  
Field of Study Physics  
Thesis Advisor Burin Asavapibhop, Ph.D.  
Thesis Co-advisor Associate Professor David Ruffolo, Ph.D.

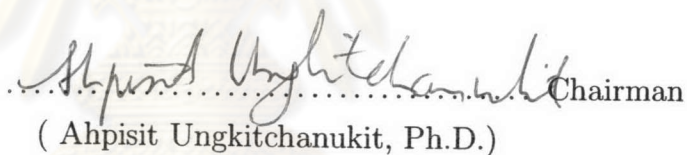
---

Accepted by the Faculty of Science, Chulalongkorn University in Partial Fulfillment of the Requirements for the Master's Degree

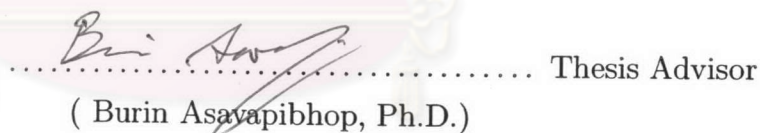


..... Dean of the Faculty of Science  
(Professor Piamsak Menasveta, Ph.D.)

#### THESIS COMMITTEE



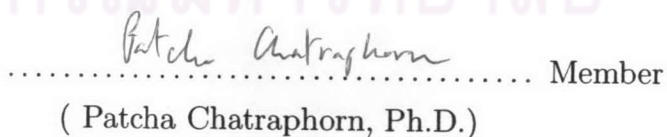
..... Chairman  
( Ahpisit Ungkitchanukit, Ph.D.)



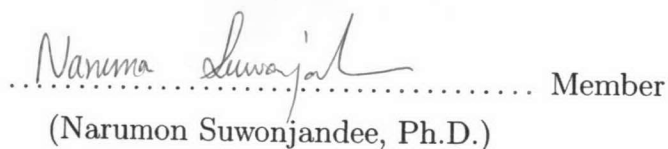
..... Thesis Advisor  
( Burin Asavapibhop, Ph.D.)



..... Thesis Co-advisor  
(Associate Professor David Ruffolo, Ph.D.)



..... Member  
( Patcha Chatraphorn, Ph.D.)



..... Member  
(Narumon Suwonjandee, Ph.D.)

รักษพล ธานานวงศ์: การคาดคะเนลูมินอซิตีของเครื่อง Large Hadron Collider โดยใช้การผลิตอนุภาค W และ Z. (LUMINOSITY ESTIMATION OF THE LARGE HADRON COLLIDER USING W AND Z PARTICLE PRODUCTION) อ. ที่ปรึกษา : อ.ดร. บุรินทร์ อัครพิภพ อ. ที่ปรึกษาร่วม: รศ. ดร. เดวิด รูฟโฟโล จำนวนหน้า 144 หน้า. ISBN 974-17-6825-7.

ค่าลูมินอซิตีของเครื่องเร่งอนุภาคเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงความเข้มของลำอนุภาคพลังงานสูงที่เข้ามาชนกัน การวัดค่าลูมินอซิตีของเครื่องเร่งอนุภาค LHC นี้ต้องให้ได้ค่าที่มีความแม่นยำสูง เพื่อที่จะได้นำไปใช้ในการคำนวณหาค่าภาคตัดขวางของปฏิกิริยาที่เราสนใจจากการชนกันของกลุ่มอนุภาคโปรตอนที่มีพลังงาน 14 TeV วิธีการวัดวิธีหนึ่งที่ถูกนำเสนอมาคือการใช้การผลิตอนุภาค W และ Z ด้วยเหตุผลที่ว่า การผลิตอนุภาคทั้งสองนี้มีสัญญาณรบกวนน้อย และได้มีการคำนวณค่าภาคตัดขวาง ทางทฤษฎีไว้ได้อย่างแม่นยำแล้ว ในวิทยานิพนธ์นี้ เราได้ทำการศึกษาถึงผลของประสิทธิภาพของเครื่องตรวจจับอนุภาค CMS ในการตรวจจับอนุภาคมิวออนจากปฏิกิริยา  $q\bar{q} \rightarrow W^+W^- \rightarrow \mu^+\nu(\bar{\nu})$  และปฏิกิริยา  $q\bar{q} \rightarrow Z^0Z^0 \rightarrow 2\mu^+2\mu^-$  ที่มีต่อความแม่นยำในการวัดค่าลูมินอซิตี นอกจากนี้ เรายังได้ทำการเปรียบเทียบคุณลักษณะของมิวออนจากทั้งสองกระบวนการกับ มิวออนที่มาจากกระบวนการที่คาดว่าจะเป็สัญญาณรบกวน โดยนำกระบวนการทั้งหมดนี้ ใสในโปรแกรมจำลองเครื่องตรวจจับอนุภาคและการตอบสนองทางอิเล็กทรอนิกส์ของโครงการ CMS ผลที่ได้เราสรุปว่า เรายังไม่สามารถหาค่าที่แน่นอนของผลของประสิทธิภาพของเครื่องตรวจจับอนุภาค CMS ต่อความแม่นยำในการวัดค่าลูมินอซิตีได้ เนื่องจากจำนวนเหตุการณ์ที่ใส่เข้าไปในการจำลองมีค่าน้อยเกินไป ส่วนในการศึกษาเปรียบเทียบกับสัญญาณรบกวน เราพบว่า สัญญาณรบกวนที่มีอนุภาคมิวออนค่าโมเมนตัมตามขวางต่ำ สามารถถูกกำจัดไปได้โดยการตั้งข้อแม้ที่ค่าโมเมนตัมตามขวาง ( $P_T$ ) มากกว่า 6 GeV/c ผลที่ได้ก็คือเราพบว่าในช่วง ค่ามวลมาตรฐานของ Z,  $70 < M_Z < 105 \text{ GeV}/c^2$ , จะมีสัญญาณรบกวนประเภทเดรลยานอยู่ประมาณ 14%.

ภาควิชา ฟิสิกส์  
สาขาวิชา ฟิสิกส์  
ปีการศึกษา 2547

ลายมือชื่อนิสิต .....รักษพล ธานานวงศ์.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....บุรินทร์ อัครพิภพ.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....เดวิด รูฟโฟโล.....

## 4472380823 :MAJOR PHYSICS

KEY WORDS: LUMINOSITY / LHC / CMS / TRANSVERSE MOMENTUM / INVARIANT MASS /

RAKSAPOL THANANUWONG : LUMINOSITY ESTIMATION OF THE LARGE HADRON COLLIDER USING W AND Z PARTICLE PRODUCTION. THESIS ADVISOR : DR. BURIN ASAVAPIBHOP, PH.D., CO-ADVISOR: ASSOC. PROF. DAVID RUFFOLO, PH.D., 144 pp. ISBN 974-17-6825-7.

Luminosity defines the intensity of colliding beam machines. The LHC's luminosity must be measured as accurately as possible in order to obtain precise cross-section of interesting events generated from proton-proton collision at 14 TeV center-of-mass energy. One of the methods proposed to measure the luminosity of the LHC is through  $W^\pm$  and  $Z^0$  production because the production signal is clean and their cross-sections are theoretically well predicted. In our work, we investigated the two weak bosons production channels  $q\bar{q} \rightarrow W^+W^- \rightarrow \mu^\pm\nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$  and  $q\bar{q} \rightarrow Z^0Z^0 \rightarrow 2\mu^+2\mu^-$  by considering the efficiency of the CMS detector and its reconstruction systems. We also made comparison between muons from the  $W^\pm$  and  $Z^0$  and muons from their background candidates. After all processes were put through the full CMS simulation chain, we conclude that we cannot yet make a conclusive determination of the effect of detector and its reconstruction system on the uncertainty in luminosity measurement, due to too small number of events output from the simulation chain. In comparison with the background, we found that the low transverse momentum background can be eliminated by imposing cut on  $P_T > 6$  GeV/c. For the Drell-Yan background, we found that there is  $\sim 14\%$  of its contamination inside the  $Z^0$  mass window ( $75 < M_{\mu^+\mu^-} < 105$  GeV/c<sup>2</sup>).

Department Physics

Field of study Physics

Academic year 2004

Student's signature

Advisor's signature

Co-advisor's signature

*Raksapol Thananu Wong*  
*Burin Asavapi Bhop*  
*David Ruffolo*

# Acknowledgements

Through out the progress of carrying out this thesis, many people have involved in making the tremendous task of particle physics research and computer data analysis to be in the way that I otherwise could not have done it alone. I would like to take this opportunity to express my gratitude to them.

First, I wish to express my sincere gratitude to Dr. Burin Asavapibhop, my thesis advisor, for his considerate guidance, his effort to push me to be a good physics researcher, and his generous support. Besides, I thank him for giving me a great opportunity to participate in CMS experiment at CERN. Not only had I gained invaluable experience and knowledge from my participation, but also had an opportunity to meet wonderful friends, great scientists and initiated the work on this thesis.

I am also grateful to Professor Albert De Roeck, my supervisor in CERN summer student program, for introducing me to the CMS experiment and advising me for the thesis topic.

My great appreciation also goes to Assoc.Prof David Ruffolo, Dr. Narumon Suwonjandee and Dr. Nakorn Phisangittisakul, for their invaluable suggestion and comments.

My special thanks to Wutthikrai Busayaporn and Norraphat Srimanobhas, the third- and second-year graduate students, for their help on ROOT program and CMS softwares. Their willing to answer all trivial questions that I was not dare to ask other people is always appreciated.

Finally, many thanks to all faculties and graduate students at the Department of Physics, Faculty of Science, Chulalongkorn University, for their wonderful friendship and generosity.

This thesis is dedicated to my parents, who always love, care and encourage.

# Table of Contents

	Page
Abstract (Thai) .....	iv
Abstract (English) .....	v
Acknowledgements .....	vi
List of Figures .....	xi
List of Tables .....	xv
Chapter	
<b>1 Introduction</b> .....	<b>1</b>
1.1 Particle Physics Research .....	1
<b>2 Theoretical Background</b> .....	<b>4</b>
2.1 The Standard Model .....	4
2.2 Proton Substructure .....	6
2.3 The Parton Distribution Function .....	7
2.4 The Weak Interaction and $W^\pm$ and $Z^0$ Particles .....	8
2.5 The Luminosity .....	12
2.6 Luminosity Measurement Methods .....	14

Chapter	Page
2.6.1	Luminosity measurement using beam parameters . . . . . 15
2.6.2	Luminosity measurement using optical theorem . . . . . 15
2.6.3	Luminosity measurement using production of particular processes . . . . . 16
2.7	Physics of Weak Boson Production at the LHC . . . . . 18
2.7.1	The $W^\pm$ Production: $q\bar{q} \rightarrow W^+W^- \rightarrow l^\pm\nu_l(\bar{\nu}_l)$ . . . . . 19
2.7.2	The $Z^0$ Production: $q\bar{q} \rightarrow Z^0Z^0 \rightarrow 2l^+2l^-$ . . . . . 20
<b>3</b>	<b>Experimental Apparatus . . . . . 22</b>
3.1	The Large Hadron Collider (LHC) . . . . . 22
3.1.1	The LHC experimental environment . . . . . 25
3.2	The Compact Muon Solenoid (CMS) . . . . . 27
3.2.1	An Overview of the CMS Detector . . . . . 27
3.2.2	The Tracker . . . . . 29
3.2.3	The Electromagnetic Calorimeter . . . . . 33
3.2.4	The Hadronic Calorimeter . . . . . 38
3.2.5	The Muon Chamber . . . . . 41
3.2.6	Trigger and Data Acquisition . . . . . 47
<b>4</b>	<b>Simulation . . . . . 50</b>
4.1	Event Generation . . . . . 50
4.1.1	Physics in CMKIN . . . . . 52
4.1.2	Generating Events using CMKIN . . . . . 54
4.2	Detector Simulation . . . . . 56
4.3	Event Reconstruction and Digitization . . . . . 59



Chapter	Page
<b>5 Data Analysis, Results, and Discussions</b> .....	<b>62</b>
5.1 Analysis with DST .....	62
5.2 Analysis with ROOT .....	64
5.3 Results and Discussions .....	64
5.3.1 Characteristics of muons from $Z^0$ and $W^\pm$ .....	65
5.3.2 Comparison between Signal Muons and Background Muons .	70
5.3.3 The Invariant Mass Plots of Di-muons .....	75
5.3.4 Detection Efficiency and Acceptance .....	80
<b>6 Conclusions</b> .....	<b>82</b>
<b>References</b> .....	<b>84</b>
<b>Appendices</b> .....	<b>88</b>
<b>Appendix A: Technical Terms</b> .....	<b>89</b>
A.1 Rapidity and Pseudorapidity .....	89
A.2 Azimuthal Angle .....	92
A.3 Transverse Momentum .....	92
A.4 Drell-Yan Process .....	92
A.5 Minimum bias events .....	93
A.6 Pile up .....	93
A.7 HEPEVT Ntuple Format .....	94
<b>Appendix B: CMKIN</b> .....	<b>95</b>
B.1 CMKIN Main Source Code .....	95
B.2 Datacard Files .....	95

Chapter	Page
<b>Appendix C: OSCAR and ORCA</b> .....	<b>110</b>
C.1 OSCAR Files .....	110
C.2 ORCA Files .....	116
C.3 DST Analysis Source Code .....	127
<b>Vitae</b> .....	<b>144</b>



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# List of Figures

Figure	Page
2.1 Expected cross-sections as a function of energy in the center of mass system for proton-proton collision. (picture excerpted from G. Fluège. Future Research in High Energy Physics. In N. Ellis and M. B. Gavela, editors, <i>1993 European School of High Energy Physics</i> , Yellow reports. (1994): CERN 94-04.) . . . . .	11
2.2 The event rates of particles production at the LHC at “nominal luminosity.” (picture from CERN Internal Note, 1983) . . . . .	18
2.3 The theoretically calculated cross-sections for W and Z production times leptonic branching ratios in pp collisions at 14 TeV using the MRST99, CTEQ5M and CTEQ5HQ parton sets (picture from A.D. Martin, R.G. Roberts, W.J. Stirling and R.S. Thorne. <i>Eur. Phys. J. C</i> 14 (2000) 133). . . . .	19
2.4 Feynman Diagram of $W^\pm$ Production at LHC. . . . .	20
2.5 Feynman Diagram of $Z^0$ Production at LHC. . . . .	20
3.1 The sub-accelerators and the injection system of the LHC. (picture from the LHC Conceptual Design, CERN/AC/95-05, 1995.) . . . .	23
3.2 The CMS Detector with its components labelled. (picture from <a href="http://cmsdoc.cern.ch">http://cmsdoc.cern.ch</a> ) . . . . .	28
3.3 Slice of the CMS detector. (picture from <a href="http://cmsdoc.cern.ch">http://cmsdoc.cern.ch</a> ) . . . .	29
3.4 The CMS Tracker. . . . .	30
3.5 The diagram showing the magnetic field (B) being perpendicular to the plane of particle’s circular motion of radius R. . . . .	31

Figure	Page
3.6 The Pixel Detector Layout. . . . .	31
3.7 The Silicon Strip Detector Layout. . . . .	32
3.8 The CMS's Electromagnetic Calorimeter. . . . .	34
3.9 The lead-tungstate crystals have a front face of about $22 \times 22 \text{ mm}^2$ and have a length of only 23 cm . . . . .	35
3.10 A diagram showing the electronic readout sequence in ECAL. . . . .	36
3.11 The preshower detector contains two thin lead converters followed by silicon strip detector planes placed in front of the ECAL. . . . .	37
3.12 The CMS's Hadronic Calorimeter. . . . .	38
3.13 The HCAL Barrel (HB), Endcap (HE) and Forward (HF) in the CMS Detector. . . . .	39
3.14 The CMS's Muon Chamber. . . . .	41
3.15 A 150 GeV Higgs event decaying into four muons in the CMS detector. . . . .	42
3.16 An example of muon tracks through the muon stations. . . . .	43
3.17 The Drift Tube of the Muon Chamber. . . . .	44
3.18 A sketch of the mechanism of signal detection in the CSCs. . . . .	46
3.19 The sketch of detection process in the RPCs. . . . .	47
3.20 The CMS Level-1 trigger scheme. (picture from the CMS Collab- oration; <i>The Trigger and Data Acquisition Project</i> , CERN/LHCC 2000-038.) . . . . .	48
3.21 The CMS High-Level trigger scheme. (picture from the CMS Col- laboration, <i>The Trigger and Data Acquisition Project</i> , CERN/LHCC 2000-038.) . . . . .	49
4.1 An illustration of the complex of typical event at the LHC $p^+p^+ \rightarrow$ $H \rightarrow Z^0 Z^0 \rightarrow 4\mu^\pm$ . . . . .	51

Figure	Page
4.2 The full chain of the CMS simulation softwares. . . . .	52
4.3 The flow chart of KINE module for PYTHIA ntuple generation in CMKIN. . . . .	55
4.4 An IGUANACMS visualization of SUSY (Super Symmetry) event. (picture from <a href="http://iguanacms.web.cern.ch/iguanacms/gallery.html">http://iguanacms.web.cern.ch/iguanacms/gallery.html</a> )	59
5.1 The CMS muon trigger system. (picture from the CMS Collaboration, <i>The Trigger and Data Acquisition Project</i> , CERN/LHCC 2000-038.) . . . . .	63
5.2 The $P_T$ distribution of muons from generated $Z^0$ (left) and generated $W^\pm$ (right). . . . .	67
5.3 The $\eta$ distribution of muons from generated $Z^0$ (left) and generated $W^\pm$ (right). . . . .	68
5.4 The $\phi$ distribution of muons from generated $Z^0$ (left) and generated $W^\pm$ (right). . . . .	69
5.5 Comparison of $P_T$ distribution between generated signal and background . . . . .	72
5.6 Comparison of $\eta$ distribution between generated signal and background . . . . .	73
5.7 Comparison of $\phi$ distribution between generated signal and background . . . . .	74
5.8 The invariant mass plot of di-muons from simulated and reconstructed $Z^0$ . . . . .	77
5.9 The invariant mass plot of di-muons from generated low-mass Drell-Yan and generated $Z^0$ . . . . .	78
5.10 The polynomial fit on generated low-mass Drell-Yan. . . . .	79
5.11 The $Z^0$ signal after subtracting the Drell-Yan's tail. . . . .	80

Figure	Page
A.1 A diagram showing the z-direction of the beam and the x- and y-axis.	90
A.2 A diagram showing the center-of-mass scattering angle with respect to the beam direction. . . . .	90
A.3 The scale of rapidity of the CMS detector. . . . .	91
A.4 A diagram showing azimuthal angle ( $\phi$ ) with respect to the beam direction (z-axis) and the transverse momentum ( $P_T$ ). . . . .	92
A.5 The Feynman diagram of Drell-Yan process for massive lepton-pair production in $pp$ collision. . . . .	93


  
 ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# List of Tables

Table	Page
2.1 First Generation Fermions . . . . .	4
2.2 Second Generation Fermions . . . . .	5
2.3 Third Generation Fermions . . . . .	5
2.4 Gauge Bosons . . . . .	6
2.5 Groups of PDF developers . . . . .	8
2.6 The decay modes of $W^\pm$ bosons . . . . .	12
2.7 The decay modes of $Z^0$ bosons . . . . .	12
3.1 The main LHC characteristics . . . . .	24
4.1 The number of events being generated by CMKIN for each process. . . . .	56
4.2 The type and number of events being input in OSCAR . . . . .	58
5.1 The reconstruction efficiency of muons from $Z^0$ and $W^\pm$ . . . . .	80
A.1 Entries of HEPEVT Ntuple . . . . .	94
B.1 The CMKIN generated physics processes and its datacard files . . . . .	95