รายงานฉบับสมบูรณ์

รหัสโครงการ CO-39-06-EMT-10-01

การจำลองเหตุการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ สำหรับการแก้ไขผลการกระเจิงหลายครั้ง และการลดทอนฟลักซ์ในการศึกษาปฏิกิริยานิวเคลียร์ด้วยนิวตรอน

Computer Simulation on The Multiple Scattering and Attenuation Corrections in the Studies of Nuclear Reaction by Neutron

อุดมรัตน์ ทิพวรรณ, สมศร สิงขรัตน์, ถิรพัฒน์ วิลัยทอง และ สุวิชา รัตนรินทร์

Udomrat Tippawan, Somsorn Singkarat, Thiraphat Vilaithong and Suvicha Ratanarin

อาคารวิจัยนิวตรอนพลังงานสูง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

และ

สถาบันวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University

All rights reserved

ได้รับทุนอุดหนุนโครงการวิจัยจาก สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (ส่วนงานกลาง)

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช)

โครงการทุนสนับสนุนนักวิจัยใหม่(ส่วนงานกลาง)

รายงานฉบับสมบูณ์(FINAL REPORT)

รหัสโครงการ CO-39-06-EMT-10-01

ชื่อโครงการ การจำลองเหตุการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ สำหรับการแก้ไขผลการกระเจิงหลายครั้งและการลดทอนฟลักซ์ในการศึกษาปฏิกิริยานิวเคลียร์ด้วยนิวตรอน

Computer Simulation on The Multiple Scattering and Attenuation Corrections in the Studies of Nuclear Reaction by Neutron

ชื่อหัวหน้าโครงการ นายอุดมรัตน์ ทิพวรรณ

Mr. Udomrat Tippawan

ตำแหน่ง อาจารย์ ระดับ 4

ที่ทำงาน อาคารวิจัยนิวตรอนพลังงานสูง

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

โทรศัพท์ (053) 94 3379 โทรสาร (053) 222776

ลายเซ็น .....

ชื่อหัวหน้าสถาบัน ศ. นพ. โชติ ธีตรานนท์

ตำแหน่ง อธิการบดี

ที่ทำงาน สำนักงานอธิการบดี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

โทรศัพท์ (053) 943001 โทรสาร (053) 217143,221932

ระยะเวลาของโครงการที่เสนอไว้ 2 ปี

เริ่มต้นการดำเนินโครงการเมื่อวันที่ 1 กรกฎาคม 2539

สิ้นสุดการดำเนินโครงการจริงเมื่อวันที่ 31 พฤษภาคม 2542

งบประมาณเสนอ 199,000 บาท

งบประมาณที่ใช้จริง 199,000 บาท

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University

All rights reserved

สรุปสำหรับผู้บริหาร

การประยุกต์เทคนิคมอนติคาร์โลทางด้านฟิสิกส์นิวเคลียร์ได้เริ่มอย่างจริงจังในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 "มอนติคาร์โล" เป็นชื่อรหัสลับของงานวิจัยเกี่ยวกับการสร้างระเบิดปรมาณูที่เมือง Los Alamos ซึ่ง von Neumann และUlam เป็นผู้ตั้งขึ้นตามชื่อเมืองที่เป็นแหล่งคาสิโนของประเทศโมนาโค โดยได้นำเทคนิคมอนติคาร์โลมาใช้แก้ปัญหาเกี่ยวกับการแพร่ของนิวตรอนในวัสดุเชื้อเพลิง ซึ่งนับว่าเป็นการจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาคำตอบก่อนการทดลองจริง

เทคนิคมอนติคาร์โลได้ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาสำคัญในการศึกษาอันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับวัตถุตัวอย่างที่เป็นธาตุหรือสารประกอบ แต่เนื่องจากวัตถุตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองจริงจำเป็นต้องมีขนาด ๆหนึ่ง จึงทำให้ความเป็นอุดมคติลดลง กล่าวคือเหตุการณ์ที่อนุภาคนิวตรอนมีอันตรกิริยาเพียงครั้งเดียวกับนิวเคลียสของวัตถุตัวอย่างก็มีโอกาสเกิดขึ้นน้อยลงเมื่อเทียบกับเหตุการณ์ที่นิวตรอนมีอันตรกิริยาหลายครั้ง ดังนั้นนิวตรอนที่วิ่งเข้าไปในวัตถุตัวอย่างจึงมีโอกาสที่จะเกิดการกระเจิงหลายครั้ง(Multiple scattering) และเกิดการลดทอน(Attenuation) ของจำนวนนิวตรอน

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้จำลองเหตุการณ์การกระเจิงหลายครั้ง และเกิดการลดทอนของจำนวนนิวตรอนสำหรับงานวิจัยนี้ คือโปรแกรมคอมพิวเตอร์ SYNTHIA ของมหาวิทยาลัย Tohoku ประเทศญี่ปุ่น ซึ่งเขียนขึ้นสำหรับงานทางด้านนี้โดยเฉพาะ และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MCNP ของ Los Alamos National Laboratory ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งเป็นโปรแกรมเอนกประสงค์สำหรับใช้ในงานการป้องกันรังสี โดยใช้ออกแบบเครื่องกำบังรังสี รวมทั้งคำนวณหาปริมาณรังสีที่บริเวณต่าง ๆ คณะผู้วิจัยมีประสบการณ์ในการใช้โปรแกรม MCNP ในการจำลองเหตุการณ์ต่าง ๆ อาทิ การกระเจิงของนิวตรอนปฐมภูมิภายในเป้าตริเตียม และการทดสอบคุณสมบัติของระบบกำบังรังสีสำหรับระบบวัดพลังงานนิวตรอน เป็นต้น

ผลการวิจัยสามารถจำลองการกระเจิงหลายครั้งและการลดทอนของนิวตรอนพลังงานสูงสำหรับธาตุบิสมัทที่มีขนาดต่าง ๆ และผลลัพธ์ของการจำลองสอดคล้องกับผลการทดลองจริง และสามารถประยุกต์โปรแกรม MCNP ใช้ในงานด้านนี้ได้อีกทางหนึ่ง

ส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้ได้เข้าร่วมแสดงและตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนิวเคลียร์ ครั้งที่ 7 ระหว่างวันที่ 1-2 ธันวาคม 2541 จัดโดยสำนักพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจาก ส่วนงานกลาง สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ และคณะผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณผู้มีรายนามดังต่อไปนี้ ซึ่งได้สนับสนุนและช่วยเหลือให้งานชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และมูลนิธิโทเรเพื่อการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ ประเทศไทย ที่ให้การสนับสนุนอย่างต่อเนื่อง

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ และสถาบันวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Prof. Dr. Mamoru Baba และ Dr. Masanobu Ibaraki ที่กรุณามอบโปรแกรม SYNTHIA และคำแนะนำในการใช้

Prof. Dr. Akito Takahashi ที่เอื้อเฟื้อในการสั่งและให้ยืมวัตถุตัวอย่างบิสมัทขนาดต่าง ๆ

Dr. Fujio Maekawa และอาจารย์ดุษฎี สุวรรณขจรที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการใช้โปรแกรม MCNP

คุณปรียาพร อินทะวัน และคุณสุมัทนา ธารารักษ์ที่ได้ช่วยพิมพ์รายงานฉบับนี้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

คณะผู้วิจัย

1. หัวหน้าโครงการ นายอุดมรัตน์ ทิพวรรณ**

Mr.Udomrat Tippawan

ตำแหน่ง อาจารย์ ระดับ 4

2 ผู้ช่วยวิจัย

นายสุวิชา รัตนรินทร์**

Mr. Suvicha Ratanarin

ตำแหน่ง พนักงานวิทยาศาสตร์ ระดับ 3

3. ที่ปรึกษาโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร.ถิรพัฒน์ วิลัยทอง**

Asso. Prof. Dr. Thiraphat Vilaithong

ตำแหน่ง รองศาสตราจารย์ ระดับ 9

รองศาสตราจารย์ ดร.สมศร สิงขรัตน์**

Asso. Prof. Dr. Somsorn Singkarat

ตำแหน่ง รองศาสตราจารย์ ระดับ 9

** สถานที่ติดต่อ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

โทรศัพท์ (053) 221699 ต่อ 3379

โทรสาร (053) 222776

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University

All rights reserved

บทคัดย่อ

การเกิดการกระเจิงหลายครั้ง และการลดทอนฟลักซ์ของรังสีนิวตรอนพลังงานสูง เมื่อเข้าไปในวัตถุตัวอย่างรูปทรงกระบอกตันที่เป็นธาตุหนักชนิดเดี่ยว ได้ถูกจำลองขึ้นโดยใช้เทคนิคมอนติคาร์โล ผ่านทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ SYNTHIA ของมหาวิทยาลัย Tohoku ประเทศญี่ปุ่น และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MCNP ของ Los Alamos National Laboratory ประเทศสหรัฐอเมริกา

การจำลองได้เน้นพิจารณาถึงผลจากขนาดของวัตถุตัวอย่าง และรังสีนิวตรอนปนเปื้อนของแหล่งกำเนิดนิวตรอน โดยทั้งนี้ได้ใช้ ขนาด รูปร่าง ตำแหน่ง และระยะห่างของเป้าตริเตียมกับวัตถุตัวอย่าง รวมทั้งตำแหน่งของหัววัดนิวตรอน ให้เหมือนกับสถานการณ์จริง ผลลัพธ์จากการจำลองได้นำไปเปรียบเทียบกับผลจากการทดลองจริงของการวัดค่า Double Differential Neutron Emission Cross Section ของธาตุบิสมัท(^{209}Bi)

ABSTRACT

The multiple scattering and the flux attenuation of penetrating fast neutrons in a solid cylindrical sample of single nuclei was simulated by using Monte Carlo technique. The calculation was done through two computer codes ,i.e., SYNTHIA of Tohoku University, Japan and MCNP of Los Alamos National Laboratory, USA.

The effect from sample-size and source related background were the aim of this investigation. The simulation used actual dimensions and geometry of a tritium target-sample-detector system. Results of simulation will be shown in comparison with the experimental results of a Double Differential Neutron Emission Cross Section of Bismuth (^{209}Bi) at 14 MeV neutron.

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญเรื่อง

		หน้า
บทที่ 1	บทนำ	1
บทที่ 2	หลักการ	3
บทที่ 3	ผลการจำลอง	10
	-ผลการจำลองสเปกตรัมของการกระเจิงหลายครั้งจากโปรแกรม SYNTHIA	10
	-ผลการจำลองสเปกตรัมการกระเจิงอุดมคติ สเปกตรัมการกระเจิงจริงจากนิวตรอน 14 MeVและสเปกตรัมการกระเจิงจริงจากนิวตรอนปนเปื้อน โดยใช้โปรแกรม SYNTHIA	27
	-ผลการจำลองสเปกตรัมการกระเจิงอุดมคติ สเปกตรัมการกระเจิงจริงจากนิวตรอน 14 MeVและสเปกตรัมการกระเจิงจริงจากนิวตรอนปนเปื้อน โดยใช้โปรแกรม MCNP	36
	-ผลการจำลองด้วยโปรแกรม SYNTHIA เทียบกับผลที่ได้จากการทดลองจริง	44
	-ผลการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP เทียบกับผลที่ได้จากการทดลองจริง	51
	-ผลของการจำลองด้วยโปรแกรม SYNTHIA และโปรแกรม MCNP เทียบกับผลที่ได้จากการทดลองจริง เมื่อวัตถุตัวอย่างมีขนาดต่าง ๆ และนิวตรอนปนเปื้อนที่มีระดับต่างกัน	57
บทที่ 4	สรุป	63
เอกสารอ้างอิง		64
ภาคผนวก		65

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

บทที่ 1
บทนำ

ปัจจุบันการศึกษาทางด้านการออกแบบวัสดุที่ใช้เป็นโครงสร้าง และเกราะกำบังรังสี (radiation shielding) สำหรับการสร้างเตาปฏิกรณ์ปรมาณูแบบฟิวชัน ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการศึกษาปฏิกิริยานิวเคลียร์ระหว่างนิวตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยาฟิวชันกับธาตุต่างๆ โดยการวัด และการวิเคราะห์ค่า double differential cross sections (DDX) ของการปลดปล่อยนิวตรอน

เทคนิคการวัดพลังงานของนิวตรอนพลังงานสูงแบบ Time-of-Flight (TOF) ได้รับการยอมรับกันโดยทั่วไปแล้วว่าเป็นเทคนิคที่มีความแม่นยำสูงสุดในขณะนี้ โดยเทคนิคนี้ความแม่นยำหรืออำนาจการจำแนกพลังงาน (energy resolution) ของรังสีนิวตรอน จะผกผันกับระยะการเดินทาง (flight path) ของอนุภาคนิวตรอน ดังนั้นการเพิ่มระยะเดินทางของอนุภาคนิวตรอนมีข้อดีที่ทำให้ระบบการวัดมีอำนาจการจำแนกพลังงานสูงขึ้น แต่มีข้อเสียควบคู่ไปด้วยเนื่องจากจำนวนอนุภาคนิวตรอนที่ไปเข้าหัววัดลดลงตามกฎระยะทางยกกำลังสองผกผัน (inverse square law) ซึ่งส่งผลในทางปฏิบัติที่ทำให้ต้องใช้เวลาในการเก็บข้อมูลนานขึ้น ในทางปฏิบัติจึงแก้ไขโดยใช้วัตถุตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มจำนวนนิวเคลียสเป้า จึงทำให้มีโอกาสของการเกิดอันตรกิริยา (interaction) สูงขึ้น แต่เมื่อวัตถุตัวอย่างมีขนาดใหญ่ขึ้น ความเป็นอุดมคติก็ลดลง กล่าวคือเหตุการณ์ที่อนุภาคนิวตรอนมีอันตรกิริยาเพียงครั้งเดียวกับนิวเคลียสเป้าก็มีโอกาสเกิดขึ้นน้อยลง เมื่อเทียบกับเหตุการณ์ที่นิวตรอนมีอันตรกิริยาหลายครั้ง ทำให้เพิ่มโอกาสของการเกิดการกระเจิงหลายครั้ง (multiple scattering) และการลดทอน (attenuation) เมื่อนิวตรอนเข้าไปในธาตุตัวอย่างทั้งก่อนและหลังการกระเจิง

ดังนั้นจึงต้องมีการแก้ไขผลเนื่องจากการกระเจิงหลายครั้งและการลดทอน ทางเลือกหนึ่งที่นิยมใช้คือ การจำลองเหตุการณ์โดยใช้การคำนวณ (simulation calculation) ด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการคำนวณด้วยเทคนิคมอนติคาร์โล (Monte Carlo technique) แม้ว่าเดิมทีจะต้องใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีขนาดใหญ่ และสิ้นเปลืองเวลาในการคำนวณมากก็ตาม แต่ด้วยเทคโนโลยีสมัยใหม่ทำให้เครื่องคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กระดับ Workstation มีประสิทธิภาพสูงขึ้นมาก สามารถนำมาใช้ในการคำนวณแก้ปัญหาดังกล่าวได้อย่างสะดวก

โครงการวิจัยนี้จะศึกษาการจำลองการกระเจิงหลายครั้งและการลดทอนฟลักซ์ของนิวตรอนด้วยเทคนิคมอนติคาร์โล โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ SYNTHIA ของมหาวิทยาลัย Tohoku ประเทศญี่ปุ่น ซึ่งเขียนขึ้นสำหรับงานทางด้านนี้โดยเฉพาะ และประยุกต์โปรแกรมคอมพิวเตอร์ MCNP ของ Los Alamos National Laboratory ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งเป็นโปรแกรมเอนกประสงค์ เพื่อใช้ในงานด้านนี้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

วัตถุประสงค์และขอบเขตของการศึกษา

1.เพื่อศึกษาและพัฒนาทางด้านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการกระเจิงหลายครั้งและการลดทอนฟลักซ์ของนิวตรอน

2.เพื่อศึกษาผลจากขนาดของวัตถุตัวอย่าง(Sample-size effect) และผลจากนิวตรอนปนเปื้อน (Contaminant neutrons effect)

3.เพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองโดยเทคนิคมอนติคาร์โลกับผลการทดลองจริงของการวัดค่าDDX ของธาตุบิสมัท(^{209}Bi)

แผนงานวิจัย

กิจกรรมหลักต่างๆ และแผนงาน

ก. การจัดเตรียมระบบการวัดพลังงานของนิวตรอน

ติดตั้งหัววัดนิวตรอนหลัก และหัววัดนิวตรอนขนาดเล็ก สำหรับทำหน้าที่ตรวจนับ neutron flux ที่เกิดขึ้นในระหว่างการเก็บข้อมูล รวมทั้งระบบอิเล็กทรอนิกส์ และระบบการบันทึกข้อมูล

ข. การทดลอง และเก็บข้อมูล

เดินเครื่องกำเนิดนิวตรอนความถี่สูง เพื่อทดลองวัดการกระเจิงของนิวตรอนจากธาตุบิสมัท ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดต่างๆ และวิเคราะห์หาค่า DDX จากข้อมูลที่ได้ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับผลการคำนวณโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

ง. การศึกษา และการใช้งานโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ศึกษาการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ SYNTHIA ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าการกระเจิงหลายครั้งและ การลดทอนฟลักซ์ของนิวตรอน ซึ่งใช้เทคนิควิธีมอนติคาร์โล

ศึกษาการใช้งานโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MCNP และประยุกต์เพื่อให้สามารถที่จะใช้ในการคำนวณหาค่าการกระเจิงหลายครั้ง และการลดทอนฟลักซ์ของนิวตรอนได้

จากแผนงานเดิมและใหม่ในหน้าถัดไป ซึ่งสาเหตุความล่าช้าที่ทำให้ต้องเลื่อนออกไปถึง 2 ครั้ง เป็นเวลา 10 เดือน (โปรดดูรายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 1 และ 2) เพราะ

1. มีความจำเป็นต้องซ่อมบำรุงเครื่องกำเนิดนิวตรอนความถี่สูงและแก้ไขปัญหาเรื่องความชื้น ฝุ่น ที่ทำให้เกิดการสปาร์คขึ้นที่ส่วนของท่อเร่งอนุภาค ซึ่งมีผลเสียรุนแรง

2. ผลการจำลองที่ได้ไม่สอดคล้องกับผลการทดลองจริง จึงจำเป็นต้องทำการทดลองบางส่วนใหม่และทำการจำลองใหม่เกือบทั้งหมด ดังแสดงในข้อ 3.11

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางแผนงานวิจัยเดิม

กิจกรรม	เดือน								
	1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	11-18	19-20	21-22	23-24
1. การจัดเตรียมระบบการวัดพลังงานของนิวตรอนทั้งหมด	<--->								
2. ทดลองวัดการกระเจิงของนิวตรอนจากธาตุบิสมัท ที่มีขนาดต่าง ๆ กัน		<--------->							
3. วิเคราะห์หาค่า DDX ของธาตุบิสมัทจากข้อมูลที่ได้			<--------->						
4. ศึกษาการทำงานของโปรแกรม SYNTHIA และใช้งานโปรแกรมในการคำนวณหาค่าการกระเจิงหลายครั้งและการลดทอนของนิวตรอน รวมทั้งเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้				<--------->					
5. ศึกษาการใช้งานโปรแกรม MCNP และประยุกต์เพื่อให้สามารถที่จะใช้คำนวณหาค่าการกระเจิงหลายครั้งและการลดทอนของนิวตรอนได้						<---->			
6. วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลที่ได้จากโปรแกรม MCNP กับผลที่ได้จากโปรแกรม SYNTHIA รวมทั้งเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง							<--------->		
7. สรุปและรายงาน									<---->

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางแผนงานวิจัย

กิจกรรม	เดือน													
	1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	11-18	19-20	21-22	23-24	25-26	27-28	29-30	31-33	34-35
1. การจัดเตรียมระบบการวัดพลังงานของนิวตรอนทั้งหมด	<-->									<-->			<-->	
2. ทดลองวัดการกระเจิงของนิวตรอนจากธาตุบิสมัท ที่มีขนาดต่าง ๆ กัน		<-->	<-->							<-->	<-->			
3. วิเคราะห์หาค่า DDX ของธาตุบิสมัทจากข้อมูลที่ได้			<-->	<-->							<-->			
4. ศึกษาการทำงานของโปรแกรม SYNTHIA และใช้งานโปรแกรมในการคำนวณหาค่าการกระเจิงหลายครั้งและการลดทอนของนิวตรอน รวมทั้งเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้				<-->	<-->							<-->	<-->	
5. ศึกษาการใช้งานโปรแกรม MCNP และประยุกต์เพื่อให้สามารถที่จะใช้คำนวณหาค่าการกระเจิงหลายครั้งและการลดทอนของนิวตรอนได้						<-->						<-->	<-->	
6. วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลที่ได้จากโปรแกรม MCNP กับผลที่ได้จากโปรแกรม SYNTHIA รวมทั้งเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง							<-->	<-->					<-->	
7. ซ่อมบำรุงเครื่องกำเนิดนิวตรอน									<-->					
8. สรุปและรายงาน														<-->

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

บทที่ 2

หลักการ

การจำลองการกระเจิงหลายครั้งและการลดทอนฟลักซ์ของนิวตรอนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ SYNTHIA

สำหรับกระบวนการจำลองเหตุการณ์ที่จะเกิดขึ้นในการทดลองจริงนั้นจะพิจารณาถึง

(ก) ขนาด รูปร่าง ตำแหน่ง และระยะห่างระหว่างเป้าตริเตียม ธาตุตัวอย่าง และหัววัดรังสีนิวตรอน

(ข) รูปร่าง และลักษณะการกระจายพลังงานของแหล่งกำเนิดนิวตรอน

(ค)ชนิดของปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดขึ้นระหว่างนิวตรอนกับนิวเคลียสของวัตถุตัวอย่าง โดยจะใช้ฐานข้อมูลนิวเคลียร์(nuclear data libraries) จากฐานข้อมูล ENDF/B-VI และ JENDL-3.1

โดยเริ่มต้นจาก

1. <u>การจำลองนิวตรอนปฐมภูมิที่เกิดขึ้นในเป้าตริเตียม</u>

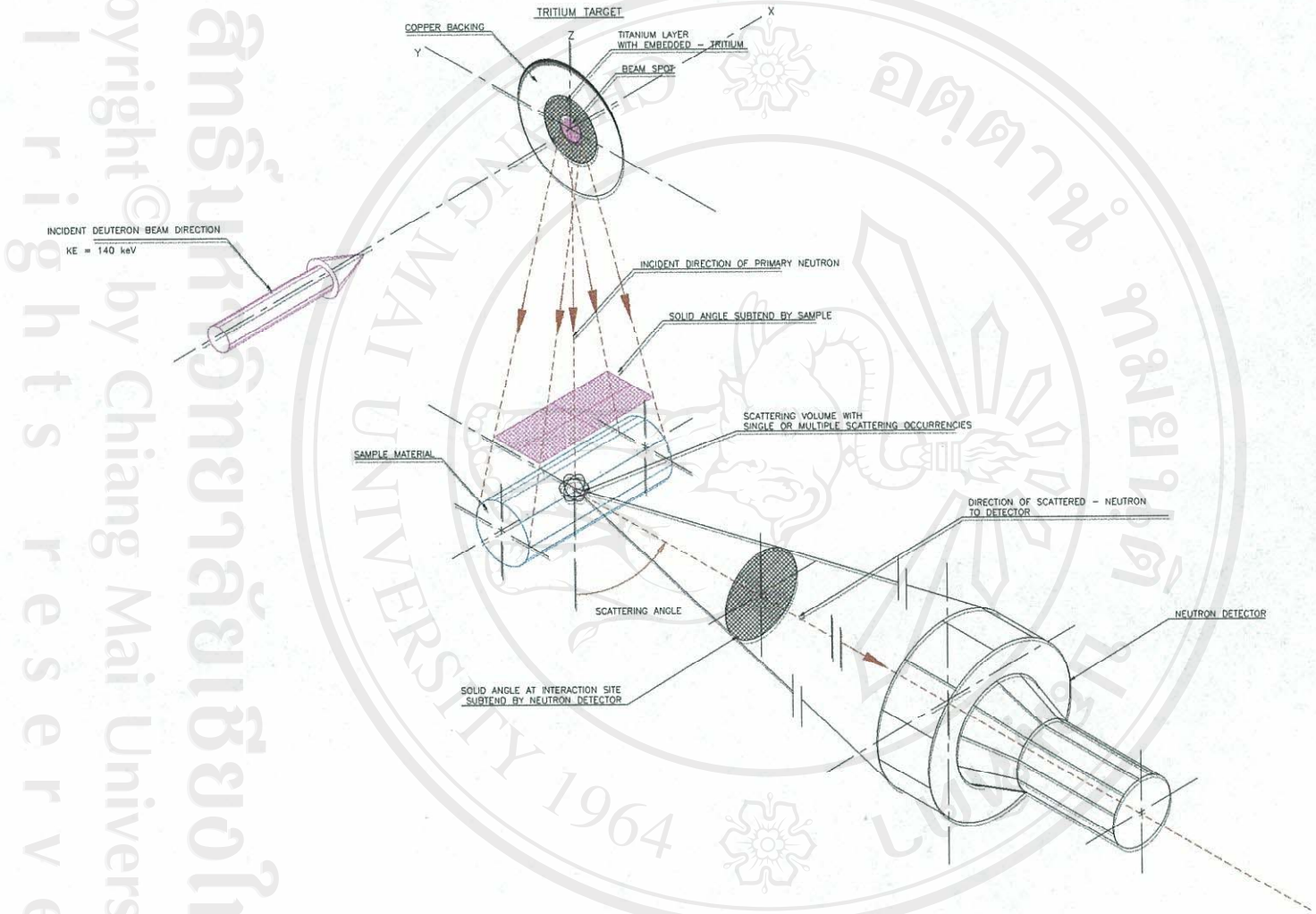
จากรูปที่ 1 เมื่อลำดิวเทอรอนตกกระทบเป้าตริเตียม เริ่มสุ่มตำแหน่งของการเกิดนิวตรอนปฐมภูมิภายในเป้า โดยคำนึงถึงพลังงาน และขนาดของลำดิวเทอรอน สำหรับพลังงานของนิวตรอนปฐมภูมินั้นคำนวณจาก kinematic และ angular distribution และคำนวณฟลักซ์ของนิวตรอนที่ตกกระทบวัตถุตัวอย่าง โดยอาศัยมุมตัน(solid angle) ที่รองรับของวัตถุตัวอย่าง

ขั้นตอนต่อมาคือสุ่มตำแหน่งและมุมที่นิวตรอนจะไปตกกระทบกับผิวของวัตถุตัวอย่าง ส่วนตำแหน่งที่เกิดอันตรกิริยานั้นได้จากการสุ่ม path length หรือระยะทางที่นิวตรอนปฐมภูมิสามารถเคลื่อนที่เข้าไปภายในวัตถุตัวอย่างได้ก่อนที่จะเกิดอันตรกิริยา ซึ่งหาได้จากการสุ่มค่า mean free path ซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานของนิวตรอนและค่า total cross section ของวัตถุตัวอย่าง รวมทั้งคำนวณค่าเฉลี่ยของการลดทอนของฟลักซ์นิวตรอน

2. <u>การจำลองการเกิดอันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับนิวเคลียสของวัตถุตัวอย่าง</u>

สำหรับกรณีที่วัตถุตัวอย่างเป็นสารประกอบเช่น สารโพลีเอทธิลีน[$(CH_2)_n$] ก็จะต้องมีการสุ่มชนิดนิวเคลียสก่อน เนื่องจากโอกาสที่นิวตรอนจะเกิดอันตรกิริยากับนิวเคลียสชนิดใดนั้น ขึ้นอยู่กับสัดส่วนโดยน้ำหนักและค่า total cross section ของนิวเคลียสชนิดนั้นๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานของนิวตรอนปฐมภูมิเช่นกัน หลังจากนั้นก็จะสุ่มชนิดของปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดขึ้นระหว่างนิวตรอนปฐมภูมิกับชนิดของนิวเคลียสที่สุ่มได้จากข้างต้น โดยอาศัยอัตราส่วนระหว่างค่า cross section ของแต่ละชนิดของปฏิกิริยานิวเคลียร์สำหรับนิวเคลียสชนิดนั้นๆ เช่น elastic(n,n) หรือ inelastic(n,n′) เป็นต้น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 1 แสดงลักษณะและหลักการสำคัญของการทดลองวัดค่า DDX ด้วยเทคนิค TOF แต่เพื่อความชัดเจน
ในที่นี้จึงไม่ได้แสดงรูปของ Shadow Bar, Collimator และ Shielding ของหัววัดรังสีนิวตรอนไว้ด้วย

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3. การจำลองการเกิดอันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนทุติยภูมิกับนิวเคลียสของวัตถุตัวอย่าง

นิวตรอนทุติยภูมิจากการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบต่าง ๆ โดยแต่ละแบบจะมีค่า angular distribution ซึ่งจะนำมาใช้ในการสุ่มทิศทางของนิวตรอนทุติยภูมิ ส่วนพลังงานของนิวตรอนทุติยภูมิหลังการกระเจิงกับวัตถุตัวอย่างสามารถคำนวณโดยอาศัย kinematic และ Q-value สำหรับในย่าน discrete และคำนวณโดยอาศัย energy distribution สำหรับในย่าน continuum

แต่เนื่องจากผลจากขนาดของวัตถุตัวอย่างดังที่กล่าวในข้างต้นนั้น ในขั้นตอนนี้จึงต้องมีการสุ่มค่า mean free path อีกครั้ง เพื่อดูว่านิวตรอนยังอยู่ภายในวัตถุตัวอย่างหรือไม่ ถ้ายังอยู่ก็แสดงว่านิวตรอนนั้นเกิดอันตรกิริยา(กระเจิง)ขึ้นอีก ซึ่งก็จะต้องกลับไปทำการสุ่มตามแบบกระบวนการที่ 2 อีกครั้ง จนกว่านิวตรอนออกพ้นจากวัตถุตัวอย่างไปได้

ดังนั้นนิวตรอนที่ออกพ้นจากวัตถุตัวอย่างแล้วไปเข้าหัววัดรังสีนิวตรอน จะถูกจำแนกตามจำนวนครั้งที่เกิดการกระเจิงในวัตถุตัวอย่าง ทิศทางหรือมุมกระเจิง และพลังงานของนิวตรอน และคำนวณจำนวนนิวตรอนทั้งหมดที่จะไปเข้าหัววัดรังสีนิวตรอนโดยอาศัยมุมตันที่รองรับของหัววัดรังสีนิวตรอน รวมทั้งคำนวณการลดทอนของฟลักซ์นิวตรอนที่ไปเข้าหัววัด

ผลลัพธ์ของการจำลองจะอยู่ในรูปของสเปกตรัมที่สัมพันธ์กับพลังงานของนิวตรอน โดยแบ่งได้เป็น 3 แบบ คือ

ก) $I(E,\theta,E')$ คือ สเปกตรัมการกระเจิงอุดมคติ(Ideal scattering spectrum) ซึ่งตัดผลที่จะเกิดจากการกระเจิงหลายครั้ง และการลดทอนของฟลักซ์ออกไป

ข) $N_n(E,\theta,E')$ คือ สเปกตรัมที่ได้หลังเกิดการกระเจิงในแต่ละ n ครั้ง โดยที่ n=1,2,3 และ 4 ซึ่งพิจารณาถึงผลเนื่องจากการลดทอนของฟลักซ์ด้วย

ค) $R(E,\theta,E')$ คือ สเปกตรัมกระเจิงจริง(Real scattering spectrum) ซึ่งเป็นผลรวม (Summation)ของ สเปกตรัม $N_n(E,\theta,E')$ สำหรับ n=1 ถึง 4

และเพื่อให้สเปกตรัมที่จำลองได้เหล่านี้สอดคล้องกับผลการทดลองจริง จึงต้องกระจาย (smeared) ออกด้วย Gaussian resolution function ที่ประกอบด้วยความกว้างของพีครังสีแกมมาที่วัดได้จากการทดลอง ทั้งนี้เนื่องจากการวัดพลังงานของนิวตรอนด้วยเทคนิค TOF คือการวัดพลังงานของนิวตรอนโดยการวัดเวลาที่นิวตรอนที่มีพลังงานต่าง ๆใช้ในการเคลื่อนที่ ซึ่งต้องอาศัยตำแหน่งของพีครังสีแกมมาเป็นจุดอ้างอิง เพราะฉะนั้นความกว้างของพีครังสีแกมมา จึงเปรียบเสมือนเป็นความคลาดเคลื่อนที่มีผลต่อพลังงานของนิวตรอนทุติยภูมิ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การพิจารณาผลจากนิวตรอนปนเปื้อนของแหล่งกำเนิดนิวตรอน

เนื่องจากแหล่งกำเนิดนิวตรอนมิสามารถผลิตนิวตรอนปฐมภูมิพลังงาน 14 MeVบริสุทธ์ แต่ยังประกอบด้วยนิวตรอนปนเปื้อนที่มีพลังงานต่ำกว่า 12 MeV ลงมา ซึ่งเกิดมาจากคุณสมบัติของแหล่งกำเนิดนิวตรอนเอง หรือเกิดจากการกระเจิงของนิวตรอนปฐมภูมิภายในเป้าตริเตียมก่อน (โปรดดูในภาคผนวก) ดังนั้นจึงมีโอกาสที่นิวตรอนปนเปื้อนเหล่านี้จะตกกระทบกับวัตถุตัวอย่างด้วย ยิ่งวัตถุตัวอย่างมีขนาดใหญ่ก็ย่อมมีโอกาสที่จะตกกระทบสูง และมีโอกาสที่จะเกิดอันตรกิริยากับนิวเคลียสในวัตถุตัวอย่าง แล้วกระเจิงไปเข้าหัววัดรังสีนิวตรอนได้เหมือนกัน รวมทั้งสามารถเกิดการกระเจิงหลายครั้ง และการลดทอนภายในวัตถุตัวอย่างได้อีกเช่นกัน

และการจำลองนิวตรอนที่เกิดในเป้าตริเตียมในขั้นตอนที่ 1 นั้นไม่ได้ครอบคลุมถึงนิวตรอนปนเปื้อน ดังนั้นในขั้นตอนนี้ก็จะเปลี่ยนไปใช้วิธีสุ่มพลังงานและจำนวนของนิวตรอนจากสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดนิวตรอนที่วัดได้โดยตรงจากเป้าตริเตียมแทน ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยจะแยกเป็นการจำลอง 2 กรณี (โปรดดูรูปที่ 3) คือ

(ก) กรณีนิวตรอนปฐมภูมิพลังงาน 14 MeV ที่มีลักษณะเป็นพีค

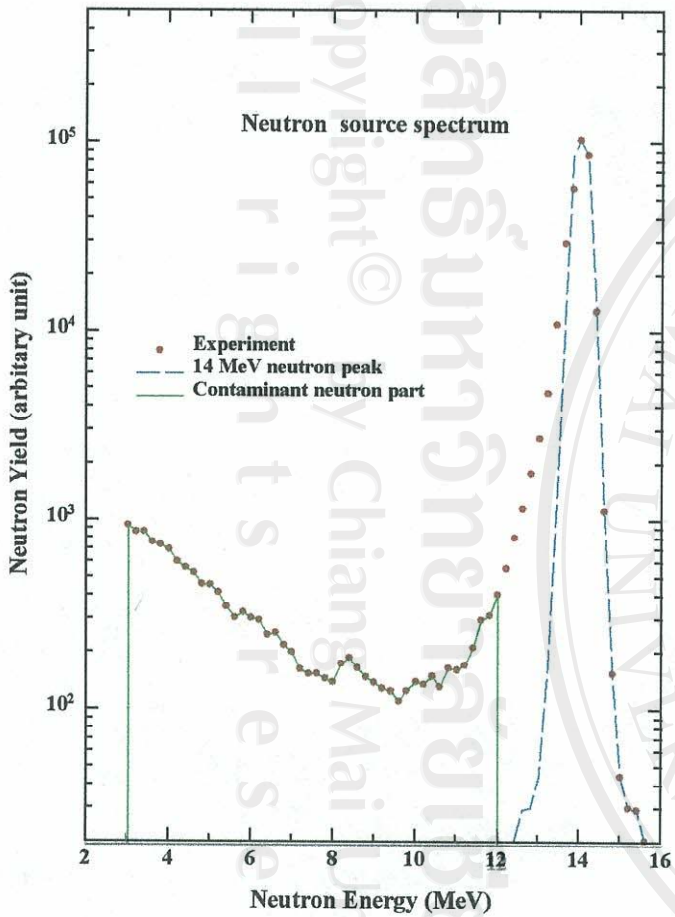
(ข) กรณีนิวตรอนปนเปื้อนที่มีพลังงานตั้งแต่ 3.0 ถึง 12.0 MeV

ซึ่งผลรวมของสเปกตรัมการกระเจิงจริงจากทั้งสองกรณีที่จำลองได้นั้น จะต้องสอดคล้องกับสเปกตรัม DDX ที่วัดได้จากการทดลองจริง จึงจะถือว่าผลของการจำลองเหตุการณ์นี้มีความถูกต้องตามความเป็นจริง

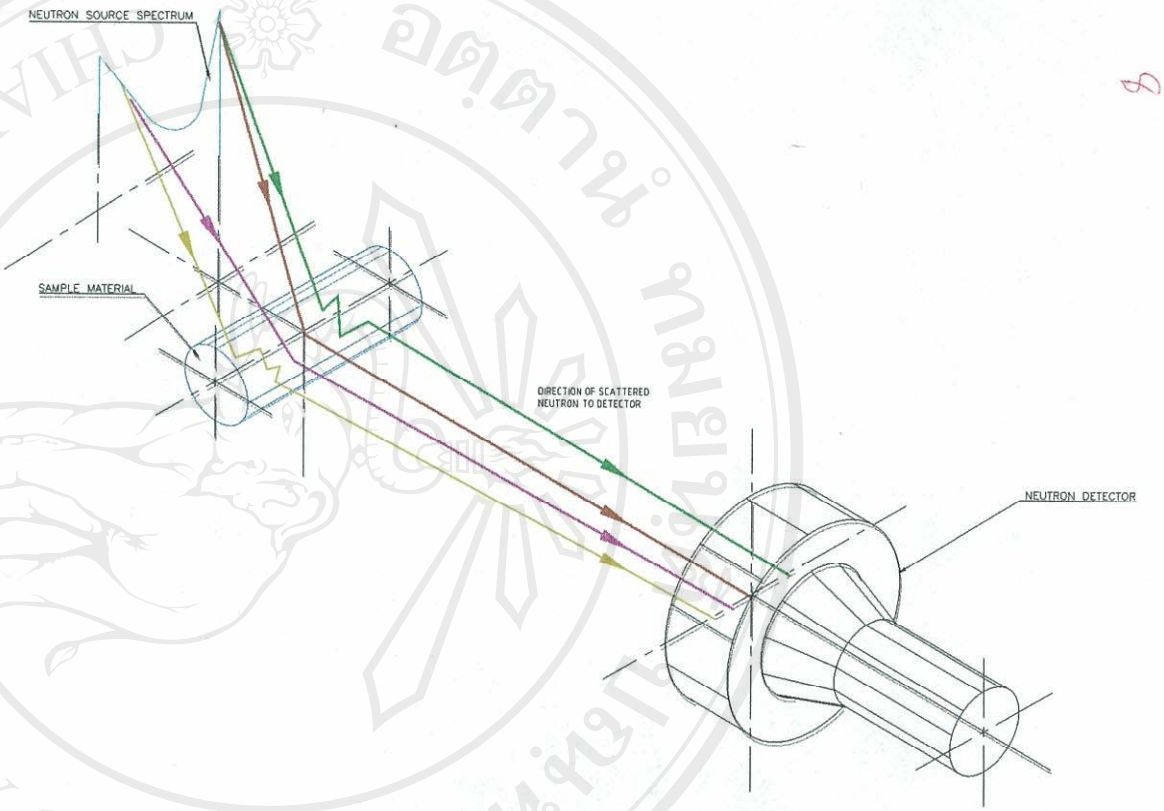
แต่ก่อนที่จะทำการเปรียบเทียบกัน จะต้อง normalized สเปกตรัมทั้งหมดที่จำลองได้ด้วยค่าคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งหาได้จากการเฉลี่ยตลอดทุกมุมกระเจิง ดังนั้นทำให้ผลของการเปรียบเทียบจึงเป็นเพียงเพื่อที่จะใช้เป็นแนวทางเท่านั้น

ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาดเนื่องจากการใช้ค่าคงที่ที่ไม่ถูกต้องในการ normalize นั้น ก็จะเปลี่ยนไปใช้วิธีการหาค่าอัตราส่วนระหว่างสเปกตรัมการกระเจิงอุดมคติจากนิวตรอนปฐมภูมิพลังงาน 14 MeV กับผลรวมของสเปกตรัมการกระเจิงจริงจากนิวตรอนปฐมภูมิพลังงาน 14 MeV กับสเปกตรัมการกระเจิงจริงจากนิวตรอนปนเปื้อน แล้วจึงนำค่าอัตราส่วนที่ได้ไปคูณกับสเปกตรัม DDX ที่วัดได้จากการทดลองจริง สำหรับการแก้ไขผลของการกระเจิงหลายครั้งและการลดทอนฟลักซ์ของนิวตรอน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 2 สเปกตรัมของแหล่งกำเนิดของนิวตรอนที่วัดได้จากการทดลอง ซึ่งประกอบด้วยพีคของนิวตรอนปฐมภูมิพลังงาน 14 MeV และ นิวตรอนปนเปื้อนที่มีพลังงานตั้งแต่ 3 ถึง 12 MeV



รูปที่ 3 ภาพจำลองการกระเจิงครั้งเดียว และการกระเจิงหลายครั้งจากนิวตรอนปฐมภูมิ14 MeV และจากนิวตรอนปนเปื้อน เนื่องจากผลของขนาดของวัตถุตัวอย่าง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การจำลองการกระเจิงหลายครั้งและการลดทอนฟลักซ์ของนิวตรอนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MCNP

หลักการส่วนใหญ่จะคล้ายกับโปรแกรม SYNTHIA ส่วนการใช้งานนั้นผู้ใช้มีอิสระที่จะกำหนดโดยต้องเป็นไปตามรูปแบบที่มีไว้ให้ อาทิ ชนิด สมบัติ และรูปทรงของวัตถุ ลักษณะของแหล่งกำเนิดอนุภาค และหัววัดอนุภาค เป็นต้น (โปรดดูภาคผนวก)

สำหรับขั้นตอนในการประยุกต์โปรแกรม MCNP เพื่อใช้การจำลองการกระเจิงหลายครั้งและการลดทอนฟลักซ์ของนิวตรอนนั้น กระทำโดยเลียนแบบโปรแกรม SYNTHIA คือ

(ก) กรณีสเปกตรัมการกระเจิงจริง ใน input file ของ MCNP จะกำหนดให้

- Cell และ Surface cards เป็นรูปทรงกระบอกเหมือนกับวัตถุตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองจริงทุกประการ
- Material card เป็นของธาตุบิสมัท
- Source card เป็นนิวตรอนปฐมภูมิพลังงาน 14 MeV ที่มีลักษณะเป็นพีค

(ข) กรณีสเปกตรัมการกระเจิงจริงจากนิวตรอนปนเปื้อน

- Cell และSurface cards - เหมือนกรณี (ก)
- Material card เหมือนกรณี (ก)
- Source card เป็นนิวตรอนปนเปื้อนที่มีพลังงานตั้งแต่ 3.0 ถึง 12.0 MeV

(ค) กรณีสเปกตรัมการกระเจิงอุดมคติ

- Material card เหมือนกรณี (ก)
- Source card- เหมือนกรณี (ก)
- Cell และSurface cards จะกำหนดให้รูปทรงกระบอกนั้นมีขนาดที่เล็กมาก คือมีรัศมีเพียง 0.00001 ซม และยาว 0.00001 ซม เพื่อหลีกเลี่ยงการกระเจิงหลายครั้งและการลดทอนฟลักซ์ของนิวตรอนโดยใช้วิธี Variance reduction ของ MCNP คือ Force collision ซึ่งวิธีนี้จะเป็นการบังคับให้นิวตรอนเข้าไปใน cell ที่ต้องการ ซึ่งเหมาะสำหรับกรณีที่วัตถุมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับ mean free path

และผลลัพธ์จากการจำลองสามารถคำนวณได้ว่าโอกาสที่จะเกิดการกระเจิงมากกว่าหนึ่งครั้งมีเพียง 0.0002 เปอร์เซ็นต์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

บทที่ 3

ผลการจำลอง

ผลการจำลองสเปกตรัมของการกระเจิงหลายครั้งจากโปรแกรม SYNTHIA

โดยจะแสดงสเปกตรัมที่จำลองได้ของแต่ละครั้งของการกระเจิง คือ

-สเปกตรัมของการกระเจิง 1 ครั้ง(Single scattering)

-สเปกตรัมของการกระเจิง 2 ครั้ง(Double scattering)

-สเปกตรัมของการกระเจิง 3 ครั้ง (Triple scattering) และ

-สเปกตรัมของการกระเจิง 4 ครั้ง(Quadruple scattering)

ที่มุมกระเจิงตั้งแต่ 30 ถึง 150 องศา สำหรับแต่ละกรณีต่างๆ

3.1 <u>เมื่อวัตถุตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.0 เซนติเมตร</u>

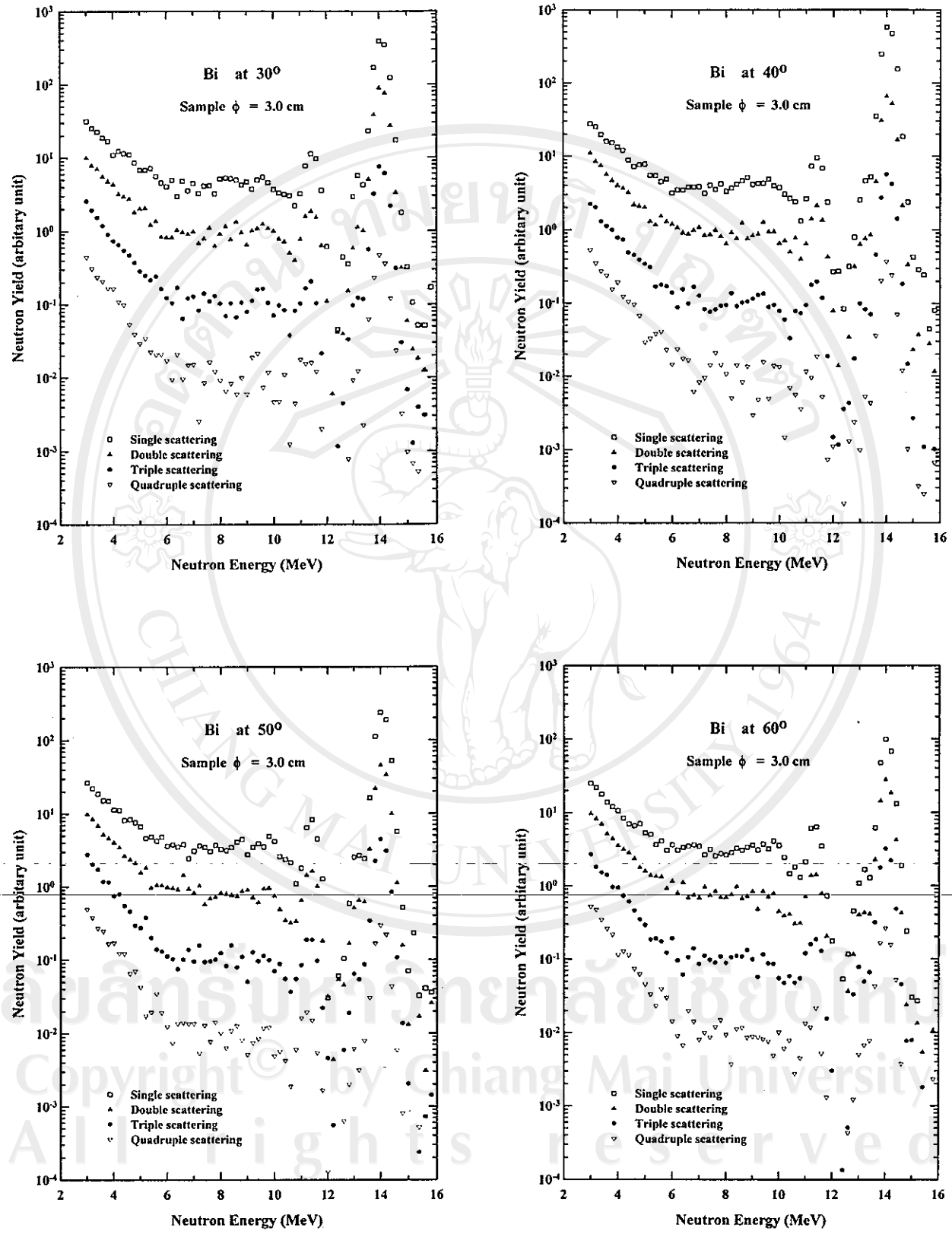
-กรณีนิวตรอนปฐมภูมิพลังงาน 14 MeV (พีค)

จากรูปที่ 4 ถึง 7 จะสังเกตได้ว่า ตลอดทุกมุมกระเจิง สเปกตรัมที่จำลองได้ของการกระเจิง 2 ครั้ง มีผลกระทบต่อสเปกตรัมที่จำลองได้ของการกระเจิง 1 ครั้ง คือในช่วงนิวตรอนพลังงาน 3 ถึง 6 MeV มีผลทำให้เพิ่มขึ้นประมาณ 25 ถึง 34 เปอร์เซ็นต์ และในช่วงนิวตรอนพลังงาน 6 MeV ขึ้นไป มีผลทำให้เพิ่มขึ้นประมาณ 19 ถึง 22 เปอร์เซ็นต์

ส่วนสเปกตรัมของการกระเจิง 3 ครั้งมีผลกระทบต่อการกระเจิง 1 ครั้ง คือในช่วงนิวตรอนพลังงาน 3 ถึง 6 MeV มีผลทำให้เพิ่มขึ้นประมาณ 4 ถึง 7 เปอร์เซ็นต์ และในช่วงนิวตรอนพลังงาน 6 MeV ขึ้นไป มีผลทำให้เพิ่มขึ้นประมาณ 1 ถึง 2 เปอร์เซนต์

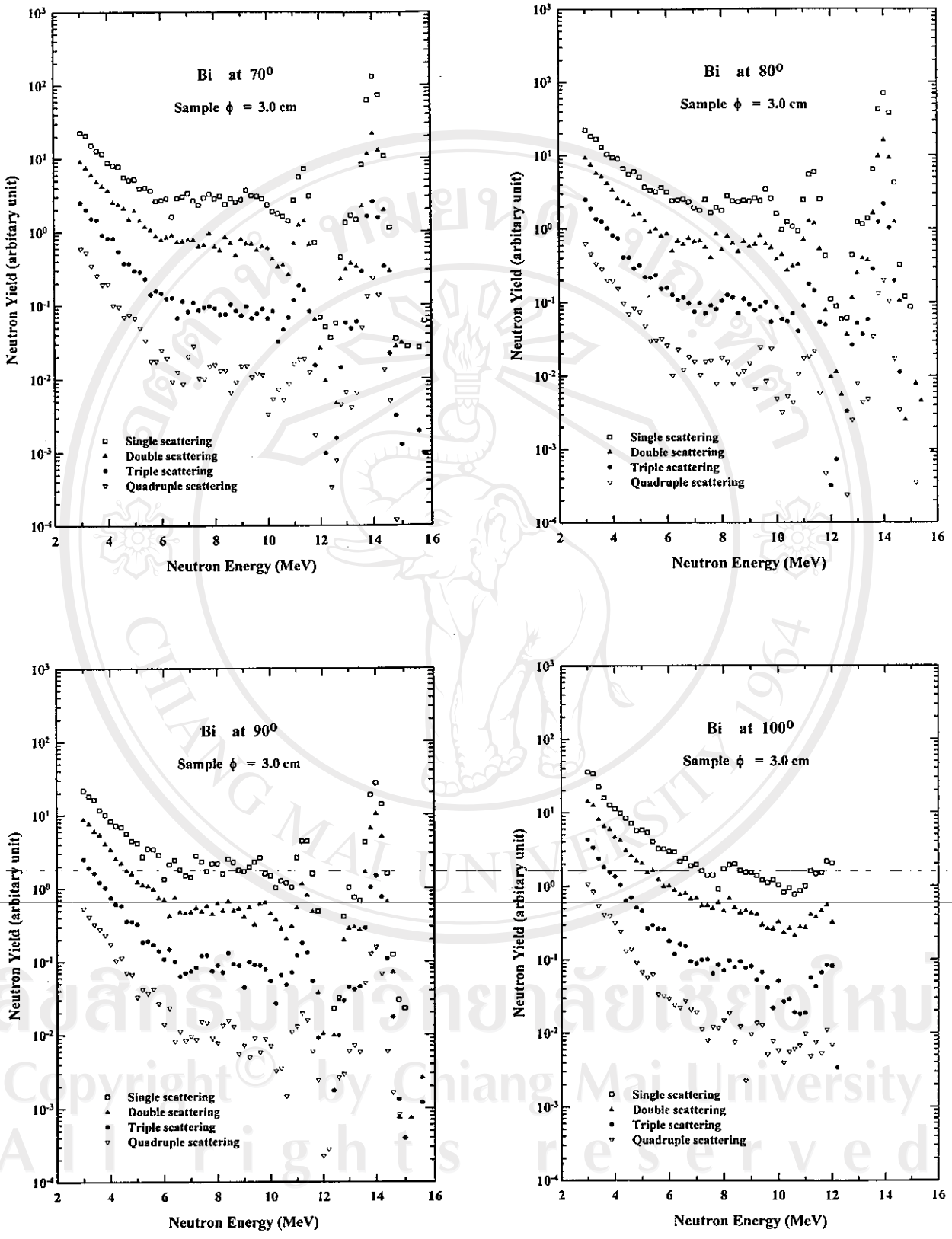
และสำหรับสเปกตรัมของการกระเจิง 4 ครั้งนั้นจะสังเกตได้ว่าน้อยกว่าสเปกตรัมของการกระเจิง 1 ครั้งมากๆ ดังนั้นผลกระทบจึงไม่มีเลย

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



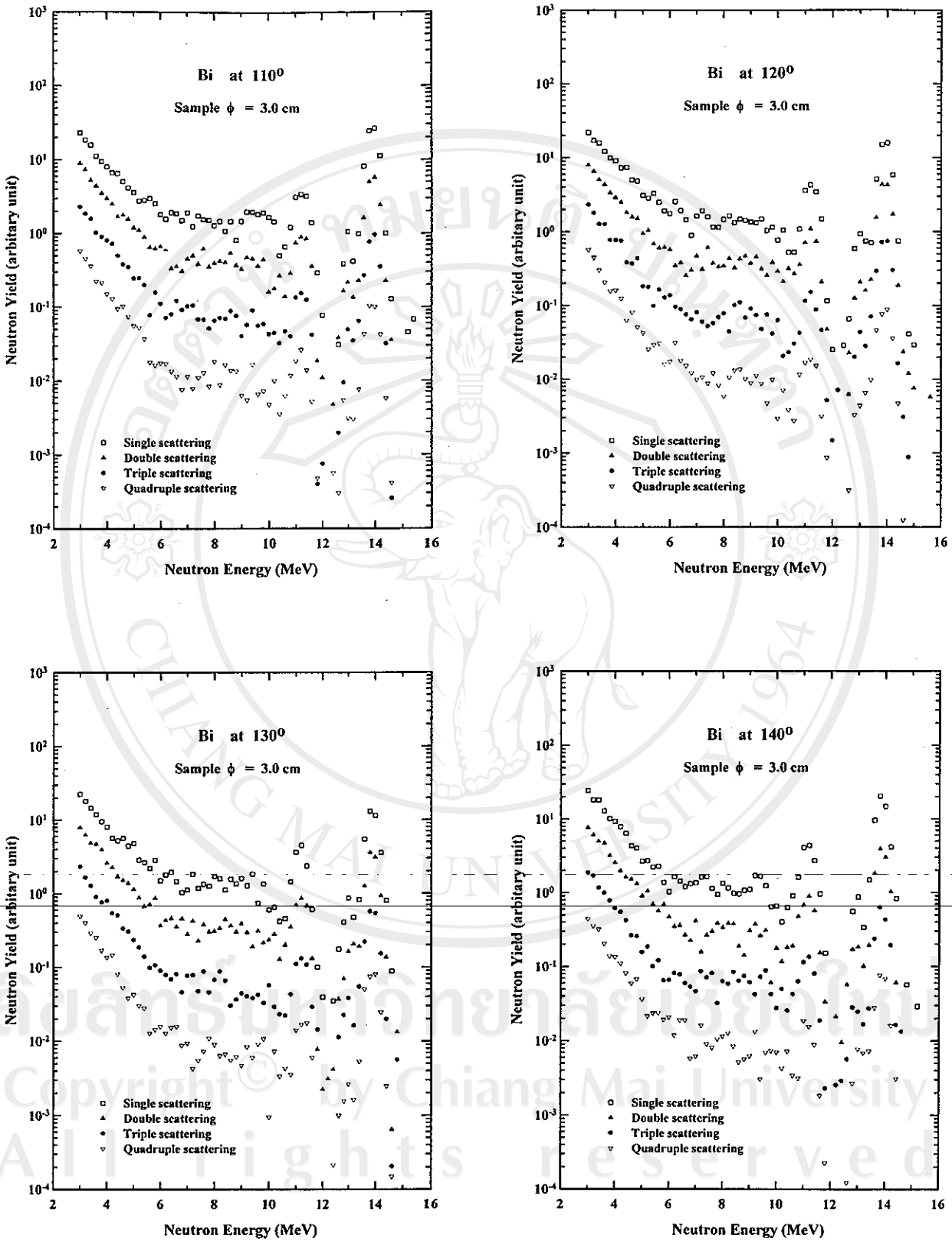
รูปที่ 4 สเปกตรัมการกระเจิง 1 2 3 และ 4 ครั้งของนิวตรอน 14 MeV ในวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.0 ซม ที่มุมกระเจิง 30 40 50 และ 60 องศา โดยใช้โปรแกรม SYNTHIA

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



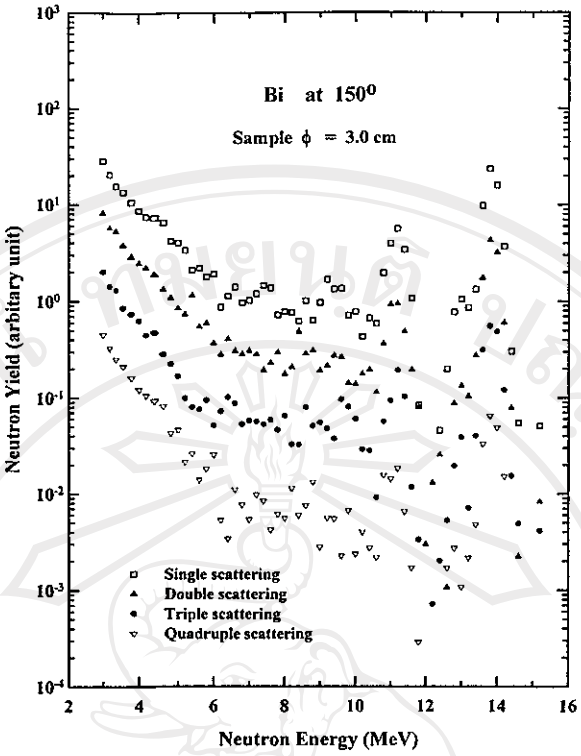
รูปที่ 5 สเปกตรัมการกระเจิง 1 2 3 และ 4 ครั้งของนิวตรอน 14 MeV ในวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.0 ซม ที่มุมกระเจิง 70 80 90 และ 100 องศา โดยใช้โปรแกรม SYNTHIA

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 6 สเปกตรัมการกระเจิง 1 2 3 และ 4 ครั้งของนิวตรอน 14 MeV ในวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.0 ซม ที่มุมกระเจิง 110 120 130 และ 140 องศา โดยใช้โปรแกรม SYNTHIA

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 7 สเปกตรัมการกระเจิง 1 2 3 และ 4 ครั้งของนิวตรอน 14 MeV ในวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.0 ซม ที่มุมกระเจิง 150 องศา โดยใช้โปรแกรม SYNTHIA

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

-กรณีนิวตรอนปนเปื้อน

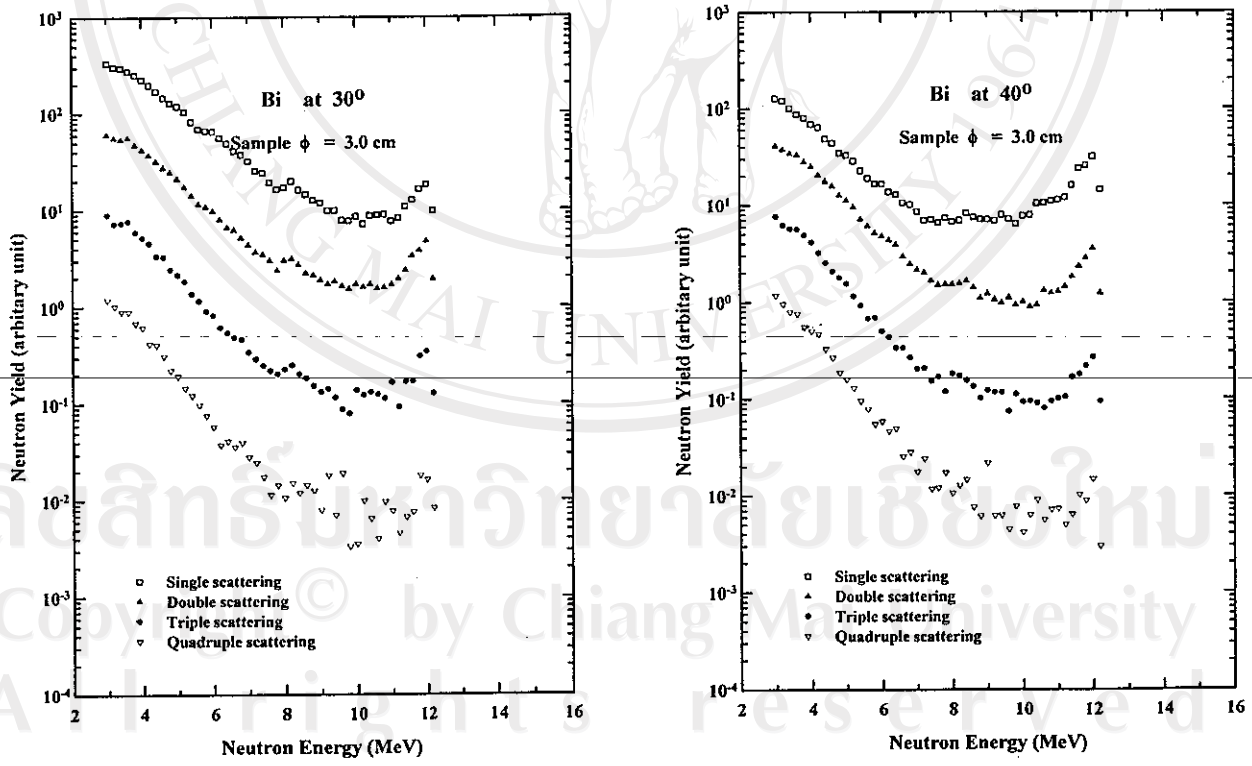
จากรูปที่ 8 ถึง 11 จะสังเกตได้ว่า ที่มุมกระเจิง 30 และ 40 องศานั้น สเปกตรัมของการกระเจิง 2 ครั้ง มีผลกระทบต่อการกระเจิง 1 ครั้ง คือในตลอดช่วงพลังงานของนิวตรอน มีผลทำให้เพิ่มขึ้นประมาณ 14 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์

ส่วนสเปกตรัมของการกระเจิง 3 ครั้งมีผลกระทบต่อการกระเจิง 1 ครั้ง คือในตลอดช่วงพลังงานของนิวตรอน มีผลทำให้เพิ่มขึ้นประมาณ 1 ถึง 2 เปอร์เซ็นต์

และสำหรับสเปกตรัมของการกระเจิง 4 ครั้งนั้นก็ไม่มีผลกระทบต่อสเปกตรัมของการกระเจิง 1 ครั้งเหมือนกับกรณีนิวตรอน 14 MeV (พีค)

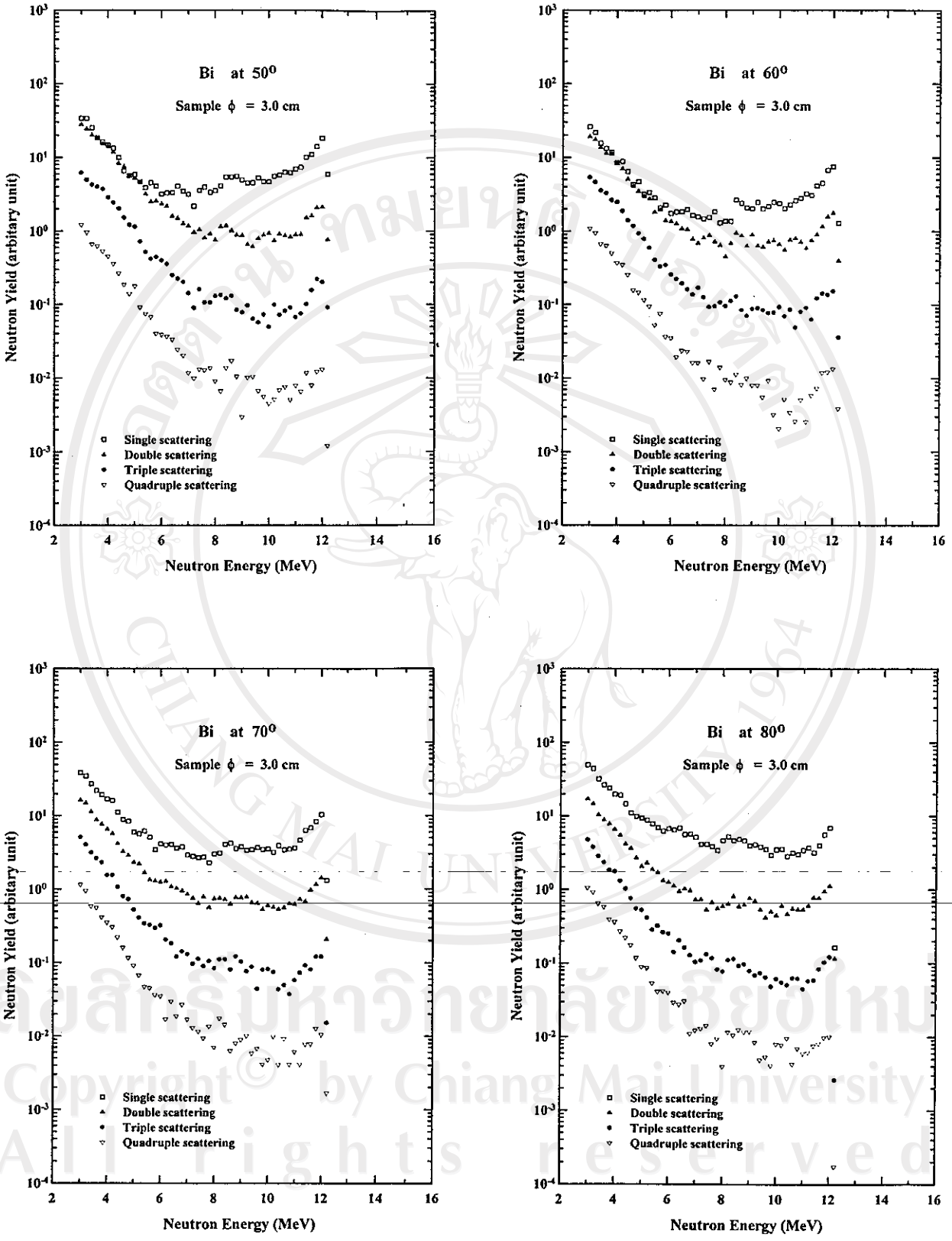
แต่ที่มุมกระเจิงตั้งแต่ 50 องศาขึ้นไปนั้นกลับพบว่า สเปกตรัมที่จำลองได้ของการกระเจิง 2 ครั้ง มีผลกระทบต่อสเปกตรัมที่จำลองได้ของการกระเจิง 1 ครั้งมากขึ้น คือในช่วงนิวตรอนพลังงาน 3 ถึง 6 MeV มีผลกระทบเพิ่มขึ้นมากกว่า 30 เปอร์เซ็นต์

และโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่มุมกระเจิง 50 และ 60 องศานั้นกลับเพิ่มขึ้นเกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ แต่ทั้งนี้แล้วถ้าพิจารณาให้ละเอียดจะพบว่าเป็นเพราะสเปกตรัมของการกระเจิง 1 ครั้งลดต่ำลงมามากต่างหาก ทั้งเป็นเพราะว่าโอกาสของการเกิดการกระเจิงของนิวตรอนพลังงานต่ำ ที่มุมกระเจิงมากกว่า 50 องศานั้นมีค่าน้อยมาก ซึ่งจะทำให้ผลกระทบจากกรณีนิวตรอนปนเปื้อนที่มีต่อกรณีนิวตรอน 14 MeV (พีค)ก็จะลดลงมากตามไปด้วย (ดูในหัวข้อที่ 3.3)



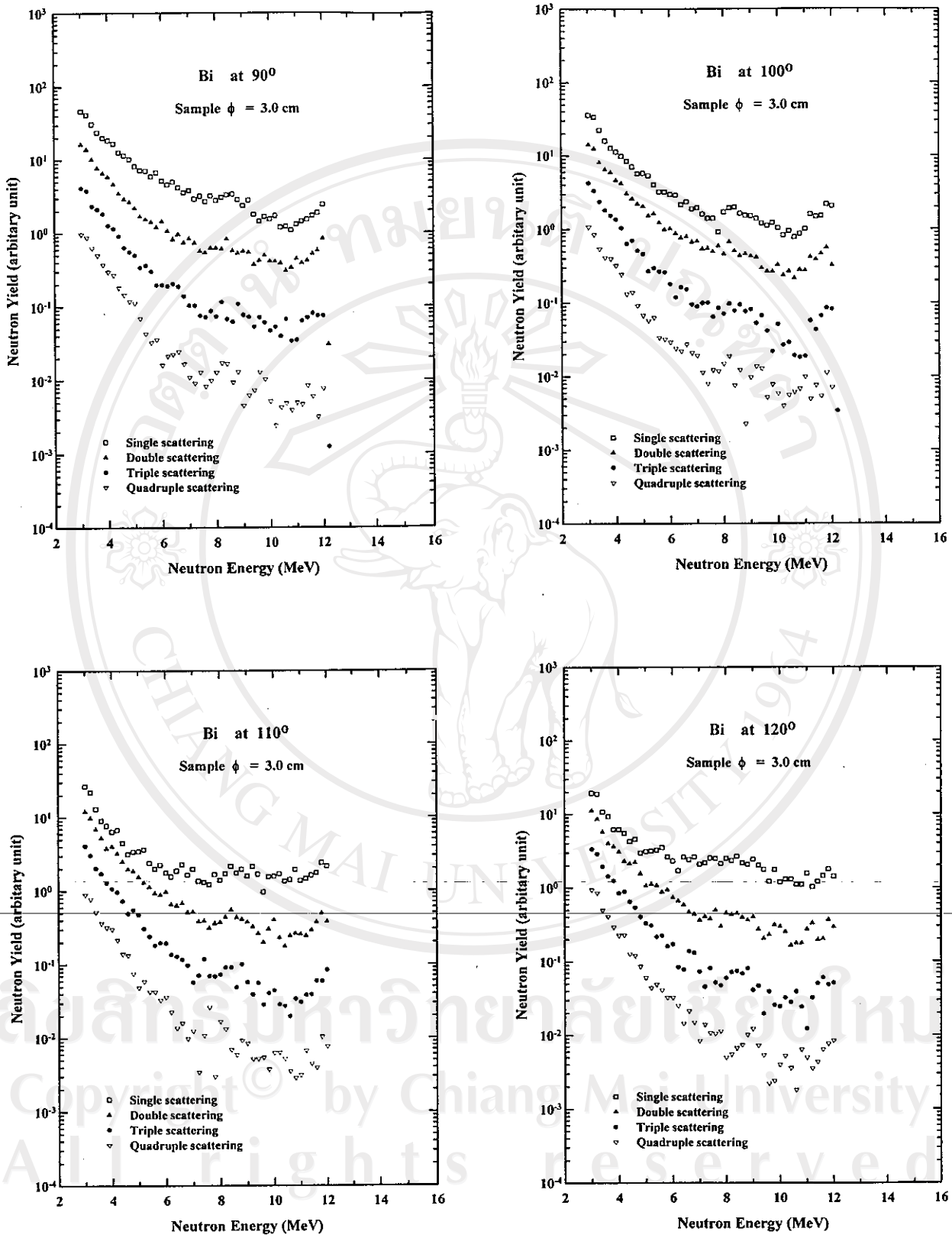
รูปที่ 8 สเปกตรัมการกระเจิง 1 2 3 และ 4 ครั้งของนิวตรอนปนเปื้อน ในวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.0 ซม ที่มุมกระเจิง 30 และ 40 องศา โดยใช้โปรแกรม SYNTHIA

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



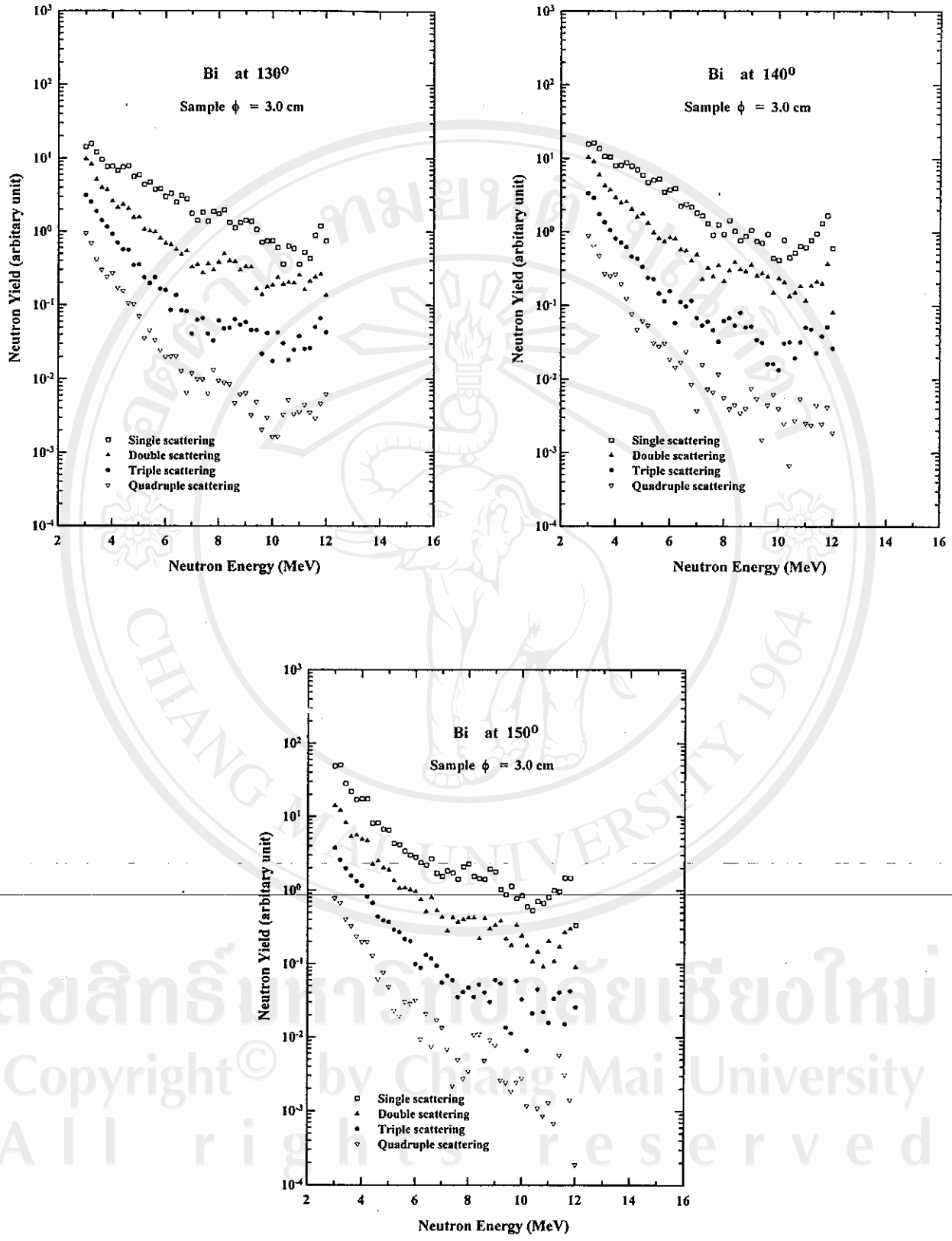
รูปที่ 9 สเปกตรัมการกระเจิง 1 2 3 และ 4 ครั้งของนิวตรอนปนเปื้อน ในวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.0 ซม ที่มุมกระเจิง 50 60 70 และ 80 องศา โดยใช้โปรแกรม SYNTHIA

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 10 สเปกตรัมการกระเจิง 1 2 3 และ 4 ครั้งของนิวตรอนปนเปื้อน ในวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.0 ซม ที่มุมกระเจิง 90 100 110 และ 120 องศา โดยใช้โปรแกรม SYNTHIA

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



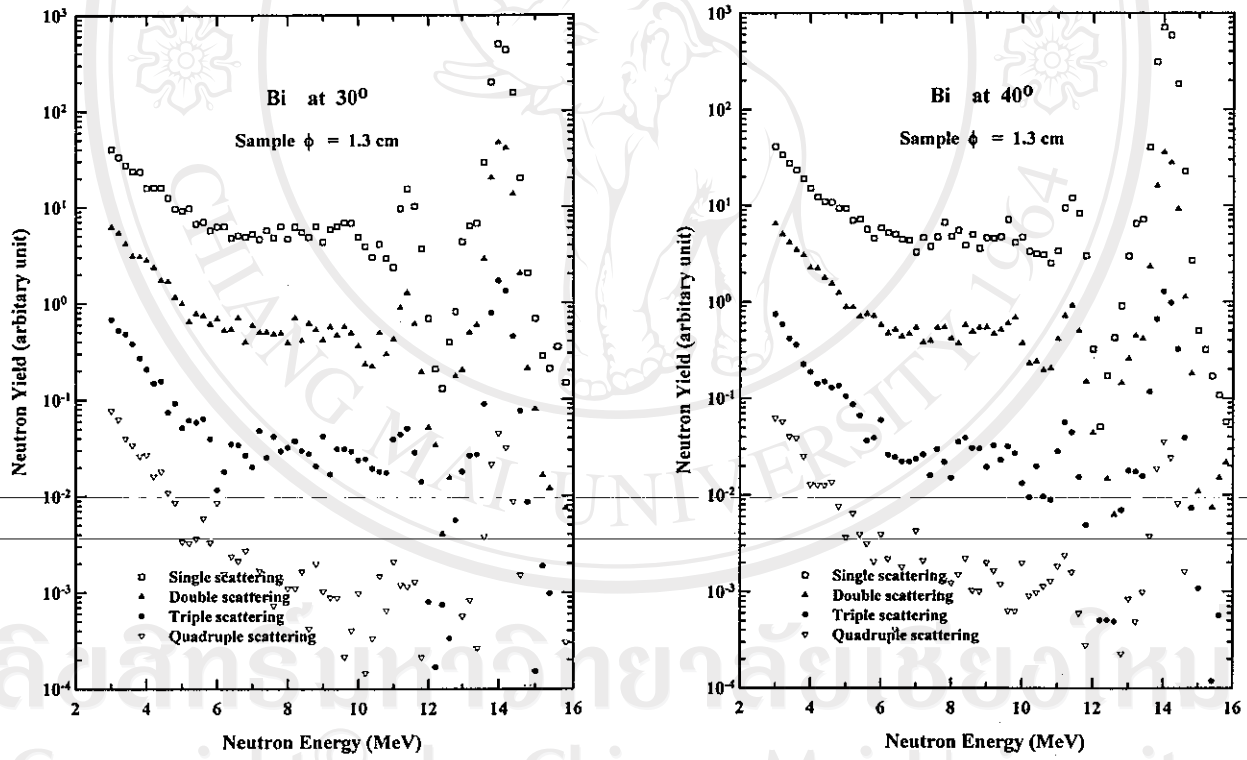
รูปที่ 11 สเปกตรัมการกระเจิง 1 2 3 และ 4 ครั้งของนิวตรอนปนเปื้อน ในวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.0 ซม ที่มุมกระเจิง 130 140 และ 150 องศา โดยใช้โปรแกรม SYNTHIA

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3.2 <u>เมื่อวัตถุตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3 เซนติเมตร</u>

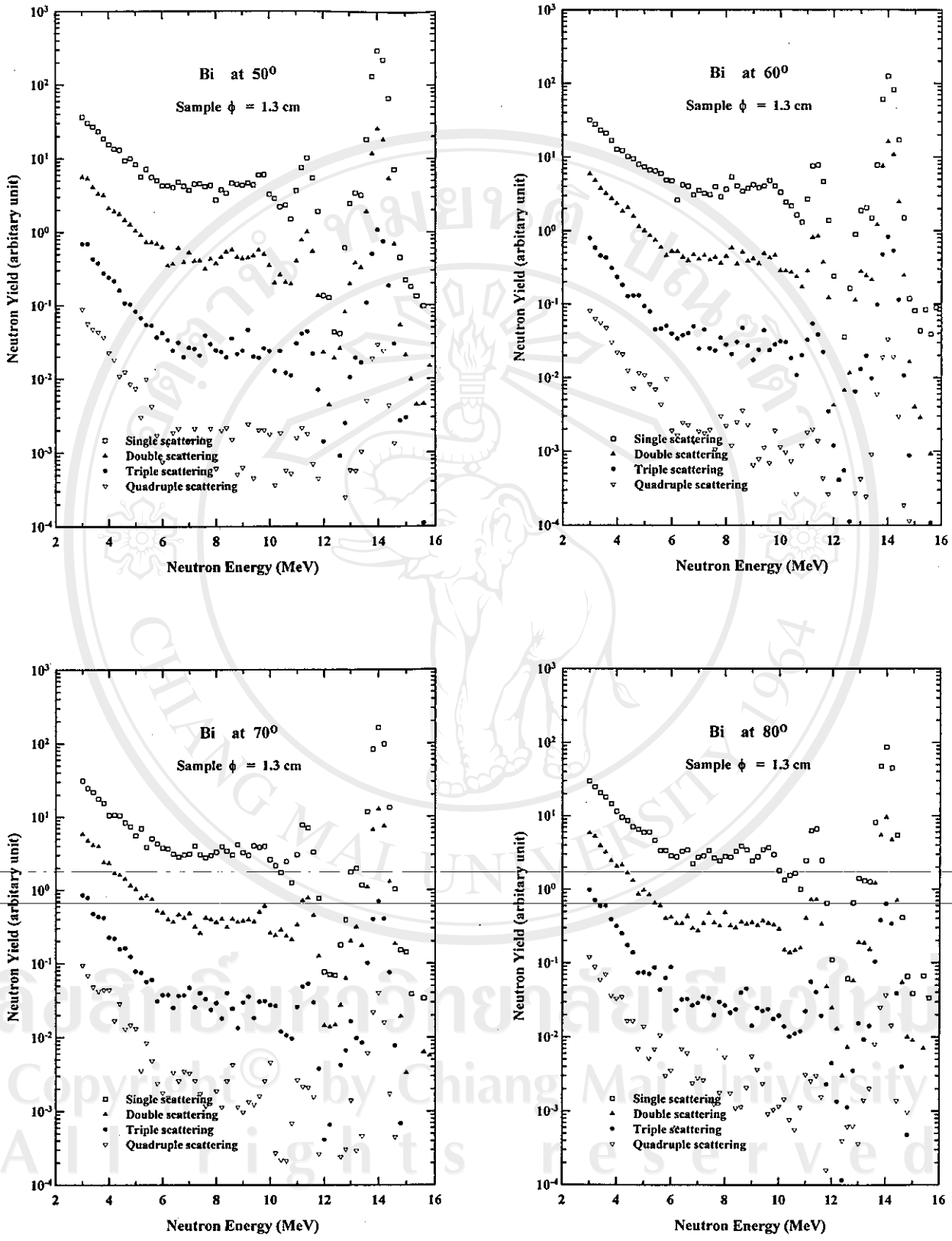
-กรณีนิวตรอนพลังงาน 14 MeV (พีค)

จากรูปที่ 12 ถึง 15 จะสังเกตได้ว่า ตลอดทุกมุมกระเจิง สเปกตรัมของการกระเจิง 2 ครั้งมีผลกระทบต่อการกระเจิง 1 ครั้งลดลงมากเมื่อเทียบกับกรณีวัตถุตัวอย่างขนาด 3 ซม คือในช่วงนิวตรอนพลังงาน 3 ถึง 6 MeV มีผลกระทบลดลงเหลือเพียงประมาณ 10 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น และในช่วงนิวตรอนพลังงาน 6 MeV ขึ้นไป มีผลกระทบเพียงประมาณ 1 เปอร์เซนต์ ส่วนสเปกตรัมของการกระเจิงมากกว่า 2 ครั้งขึ้นไปนั้น มีผลกระทบน้อยกว่า 1 เปอร์เซนต์



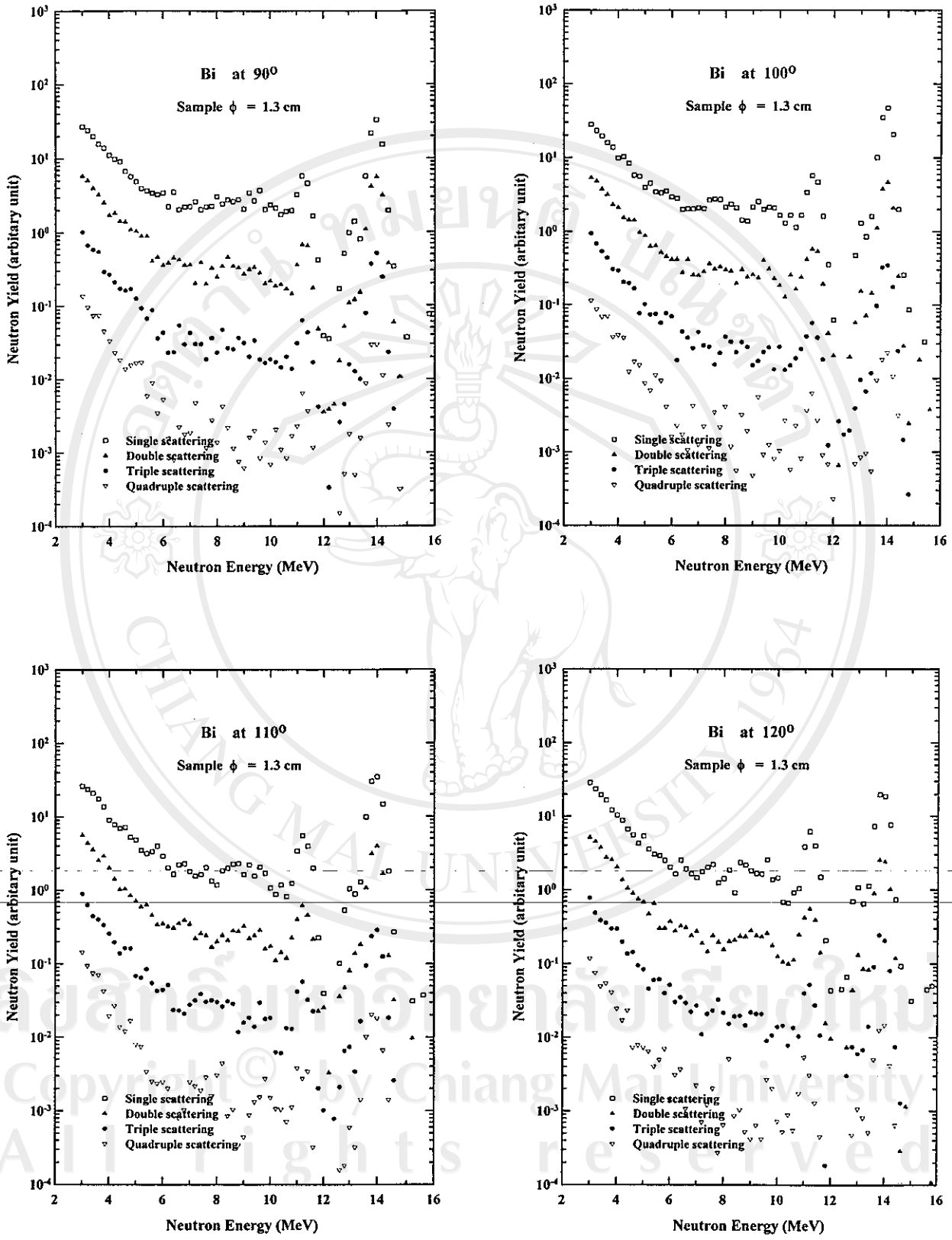
รูปที่ 12 สเปกตรัมการกระเจิง 1 2 3 และ 4 ครั้งของนิวตรอน 14 MeV ในวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3 ซม ที่มุมกระเจิง 30 และ 40 องศา โดยใช้โปรแกรม SYNTHIA

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



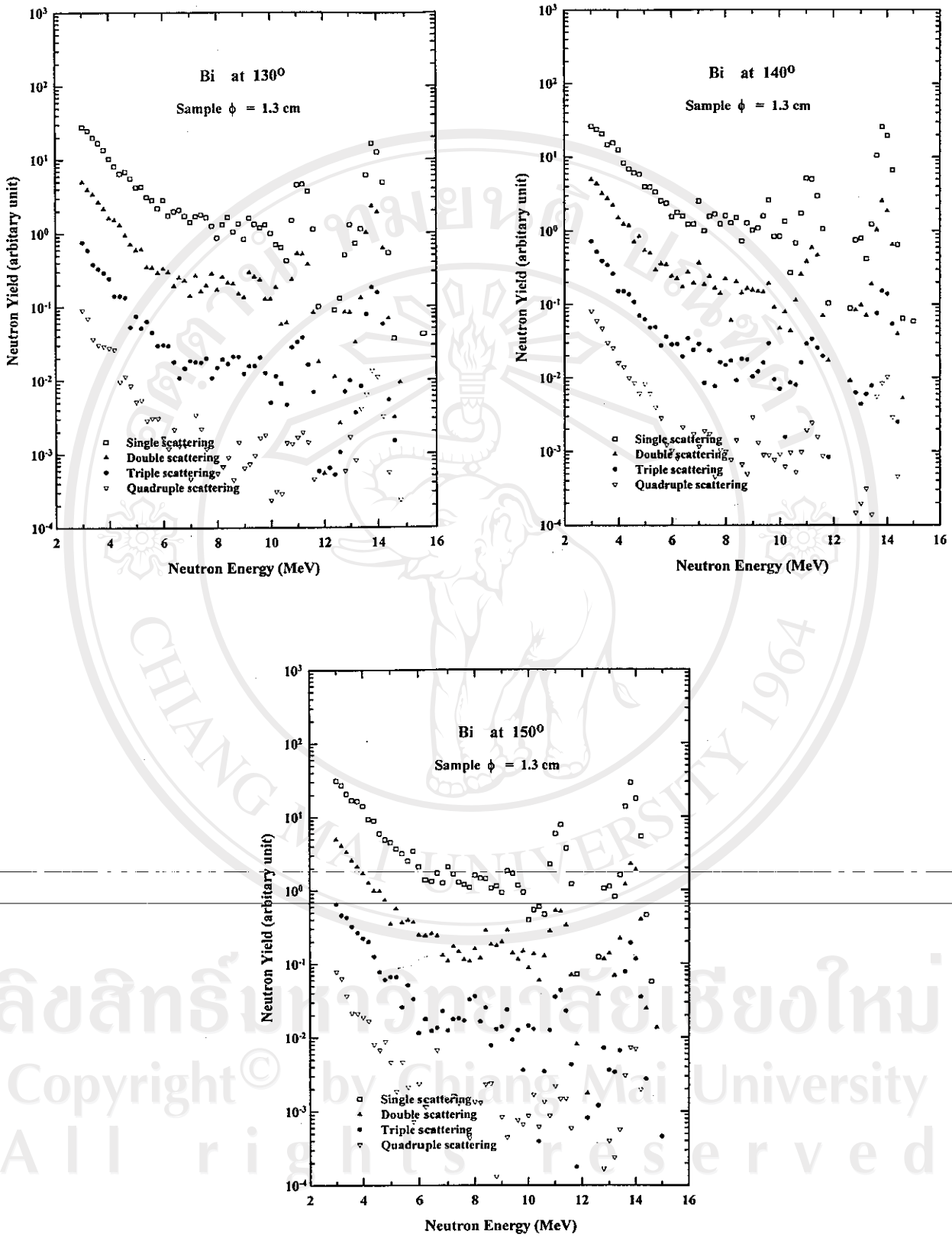
รูปที่ 13 สเปกตรัมการกระเจิง 1 2 3และ 4 ครั้งของนิวตรอน 14 MeV ในวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3 ซม ที่มุมกระเจิง 5060 70และ 80 องศา โดยใช้โปรแกรม SYNTHIA

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 14 สเปกตรัมการกระเจิง 1 2 3 และ 4 ครั้งของนิวตรอน 14 MeV ในวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3 ซม ที่มุมกระเจิง 90 100 110 และ 120 องศา โดยใช้โปรแกรม SYNTHIA

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

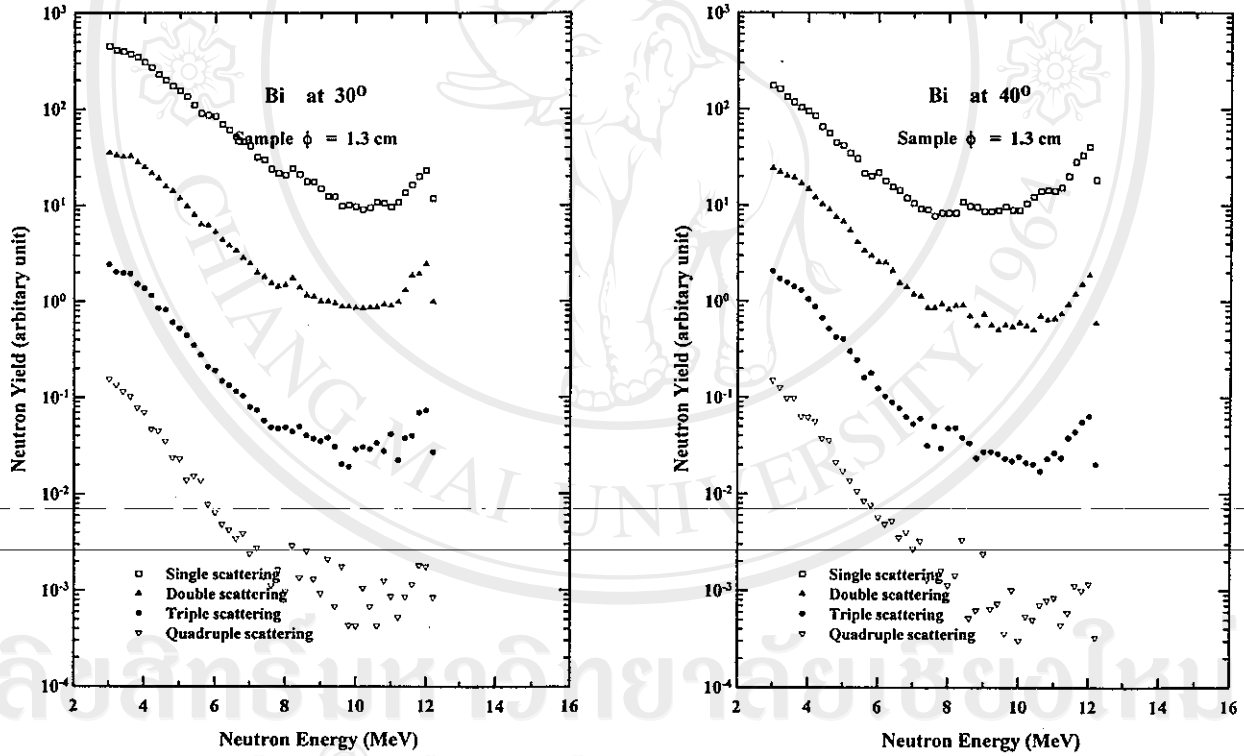


รูปที่ 15 สเปกตรัมการกระเจิง 1 2 3 และ 4 ครั้งของนิวตรอน 14 MeV ในวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3 ซม ที่มุมกระเจิง 130 140 และ 150 องศา โดยใช้โปรแกรม SYNTHIA

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

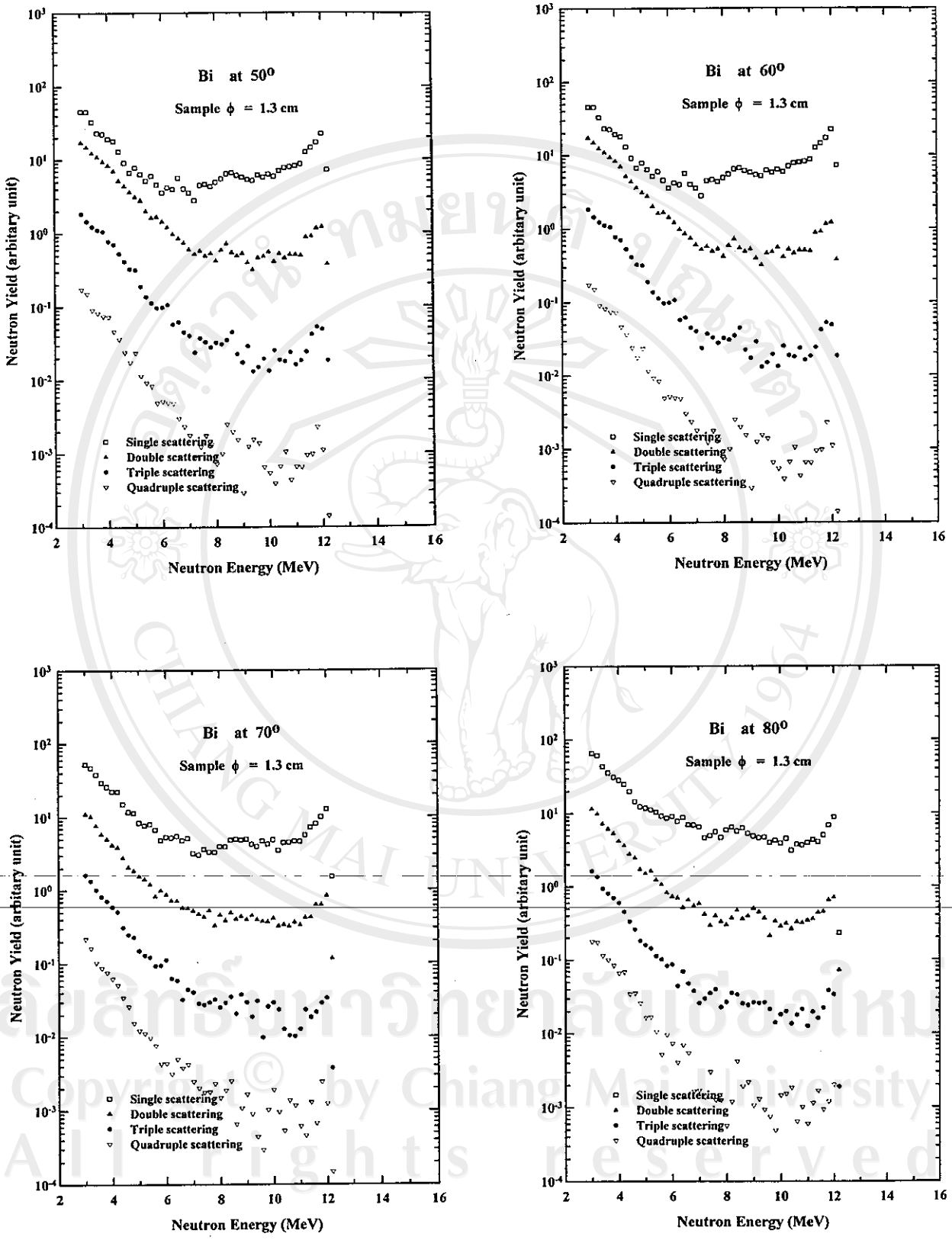
-กรณีนิวตรอนปนเปื้อน

จากรูปที่ 16 ถึง 19 จะสังเกตได้ว่า ที่มุมกระเจิง 30 และ 40 องศานั้น สเปกตรัมของการกระเจิง 2 ครั้ง มีผลกระทบต่อการกระเจิง 1 ครั้งลดลงมากเมื่อเทียบกับกรณีวัตถุตัวอย่างขนาด 3 ซม คือในตลอดช่วงพลังงานของนิวตรอน มีผลกระทบลดลงเหลือเพียงประมาณ 6 ถึง 8 เปอร์เซ็นต์ ส่วนสเปกตรัมของการกระเจิงมากกว่า 1 ครั้งขึ้นไปนั้น แทบจะไม่มีผลกระทบเลย ส่วนที่มุมกระเจิงตั้งแต่ 50 องศาขึ้นไปนั้นพบว่าคล้ายกับกรณีวัตถุตัวอย่างขนาด 3 ซม แต่ผลกระทบ สเปกตรัมของการกระเจิง 2 ครั้งต่อการกระเจิง 1 ครั้งลดลงเหลือเพียงประมาณ 20 เปอร์เซนต์



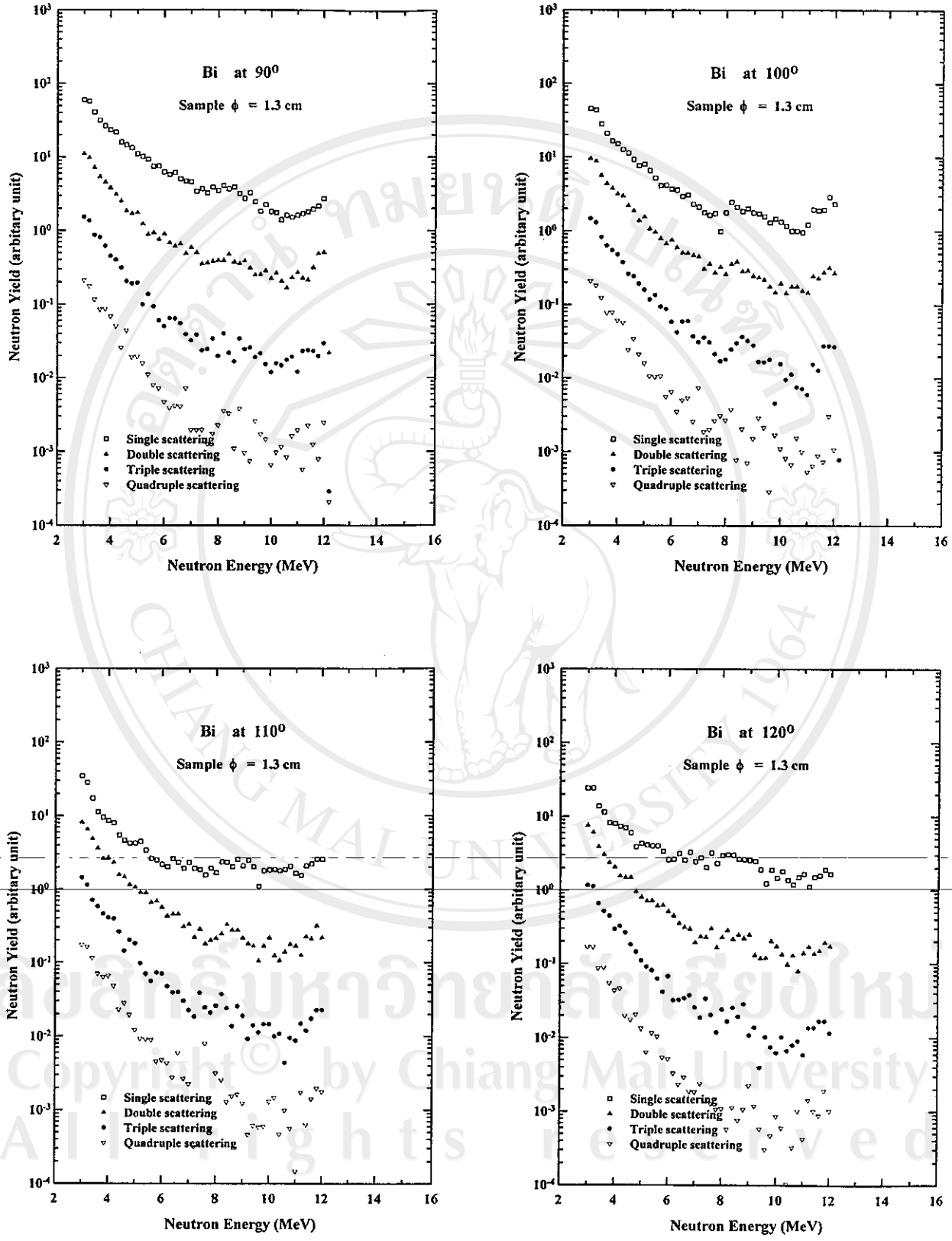
รูปที่ 16 สเปกตรัมการกระเจิง 1 2 3 และ 4 ครั้งของนิวตรอนปนเปื้อน ในวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3 ซม ที่มุมกระเจิง 30 และ 40 องศา โดยใช้โปรแกรม SYNTHIA

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



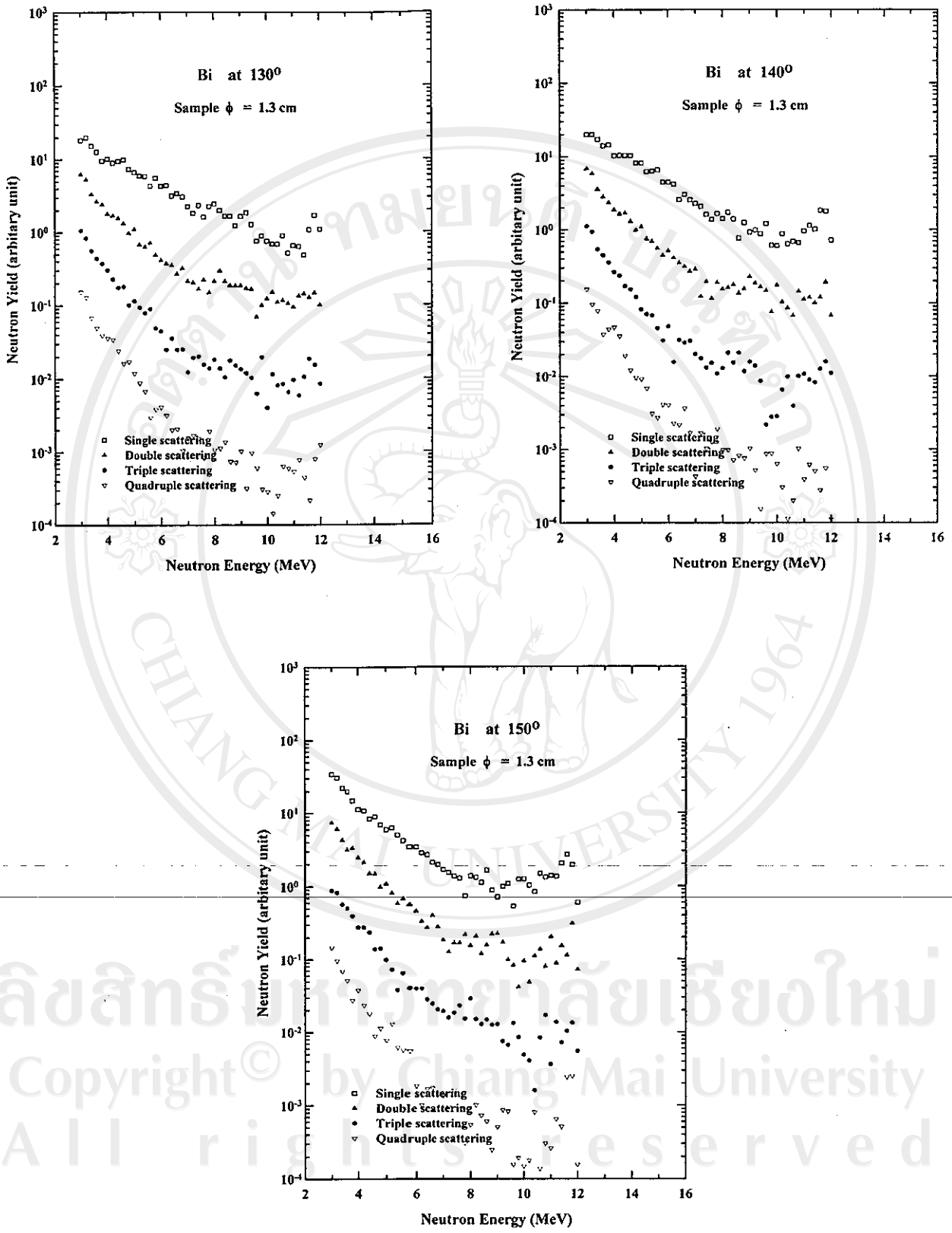
รูปที่ 17 สเปกตรัมการกระเจิง 1 2 3 และ 4 ครั้งของนิวตรอนปนเปื้อน ในวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3 ซม ที่มุมกระเจิง 50 60 70 และ 80 องศา โดยใช้โปรแกรม SYNTHIA

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 18 สเปกตรัมการกระเจิง 1 2 3 และ 4 ครั้งของนิวตรอนปนเปื้อน ในวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3 ซม ที่มุมกระเจิง 90 100 110 และ 120 องศา โดยใช้โปรแกรม SYNTHIA

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 19 สเปกตรัมการกระเจิง 1 2 3 และ 4 ครั้งของนิวตรอนปนเปื้อน ในวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3 ซม ที่มุมกระเจิง 90 100 110 และ 120 องศา โดยใช้โปรแกรม SYNTHIA

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ผลการจำลองสเปกตรัมการกระเจิงอุดมคติ สเปกตรัมการกระเจิงจริงจากนิวตรอน 14 MeV และสเปกตรัมการกระเจิงจริงจากนิวตรอนปนเปื้อนโดยใช้โปรแกรม SYNTHIA

3.3 เมื่อวัตถุตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร

กรณีนิวตรอนพลังงาน 14 MeV (พีค)

จากรูปที่ 20 ถึง 23 จะสังเกตได้ว่า ตลอดทุกมุมกระเจิง สเปกตรัมการกระเจิงจริงจะต่ำกว่าสเปกตรัมการกระเจิงอุดมคติ ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากเกิดการลดทอนฟลักซ์ของนิวตรอน

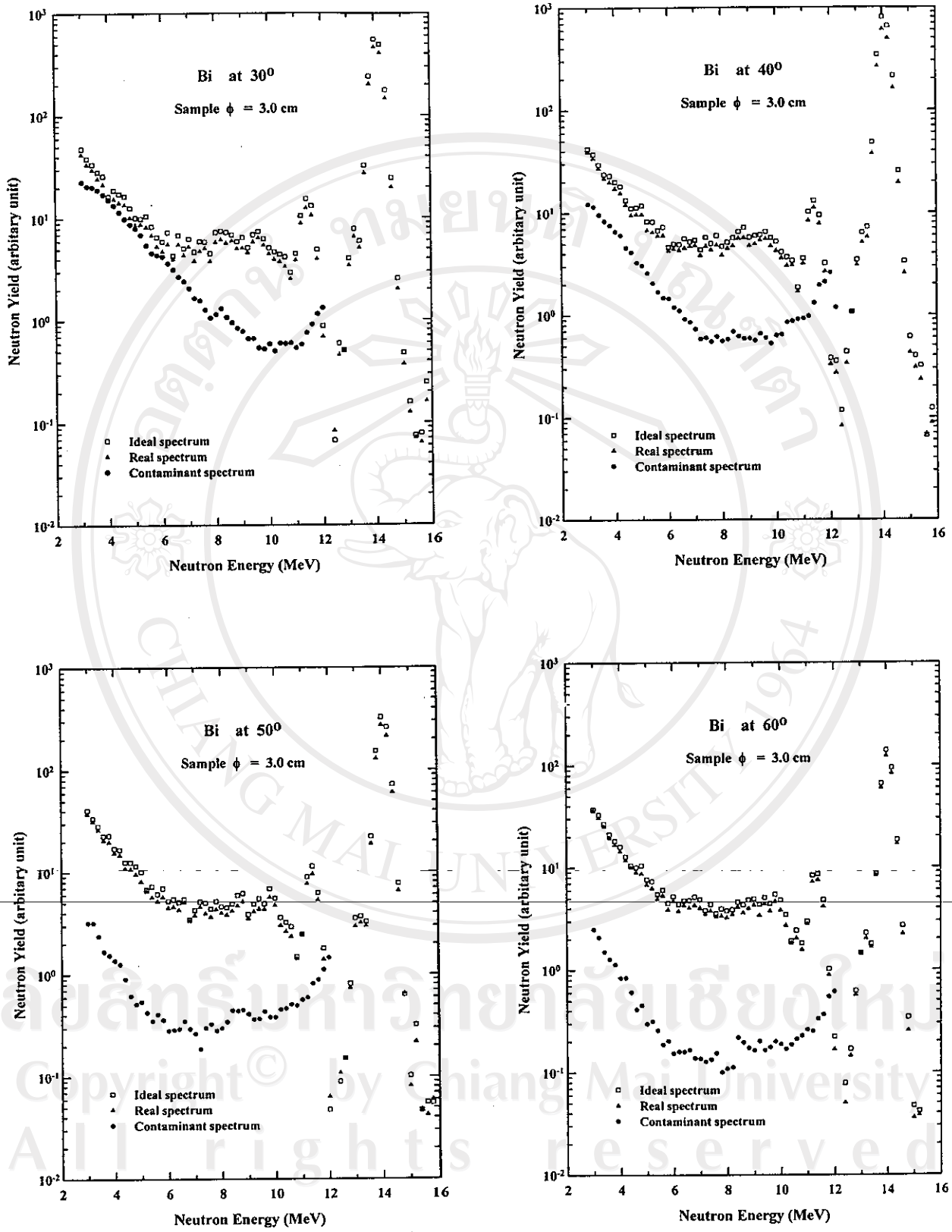
แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่มุมกระเจิงต่ำๆตั้งแต่ 30 ถึง 60 องศากับกรณีที่มุมกระเจิงสูงๆตั้งแต่ 90 องศาขึ้นไป พบว่าสเปกตรัมการกระเจิงจริงที่มุมกระเจิงต่ำมีค่าต่ำกว่าที่มุมกระเจิงสูง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าที่มุมกระเจิงต่ำ ๆนั้น การเกิดการกระเจิงมักจะเป็นแบบยืดหยุ่น(Elastic scattering) เสียเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นการกระเจิงแบบอื่นๆจึงมีค่าลดลง ดังจะเห็นได้จากพีคของการกระเจิงแบบยืดหยุ่น(ที่พลังงาน 14 MeV) ที่มุมกระเจิงต่ำมีค่าสูงกว่าที่มุมกระเจิงสูงมาก

-กรณีนิวตรอนปนเปื้อน

จากรูปที่ 20 ถึง 23 ได้แสดงสเปกตรัมการกระเจิงจริงจากนิวตรอนปน ซึ่งจะสังเกตได้ว่า ที่มุมกระเจิง 30 และ 40 องศา จะมีผลกระทบต่อสเปกตรัมการกระเจิงจริงจากนิวตรอน 14 MeV มาก จนเกือบถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงที่พลังงานตั้งแต่ 3 ถึง 6 MeV ทั้งนี้อาจจะเป็นเพราะว่าที่มุมกระเจิงต่ำๆ และพลังงานต่ำๆนั้น โอกาสของการเกิดการกระเจิงแบบยืดหยุ่นของนิวตรอนที่มีพลังงานต่ำ มีค่าสูงมากและมากกว่าอันตรกิริยาแบบอื่น

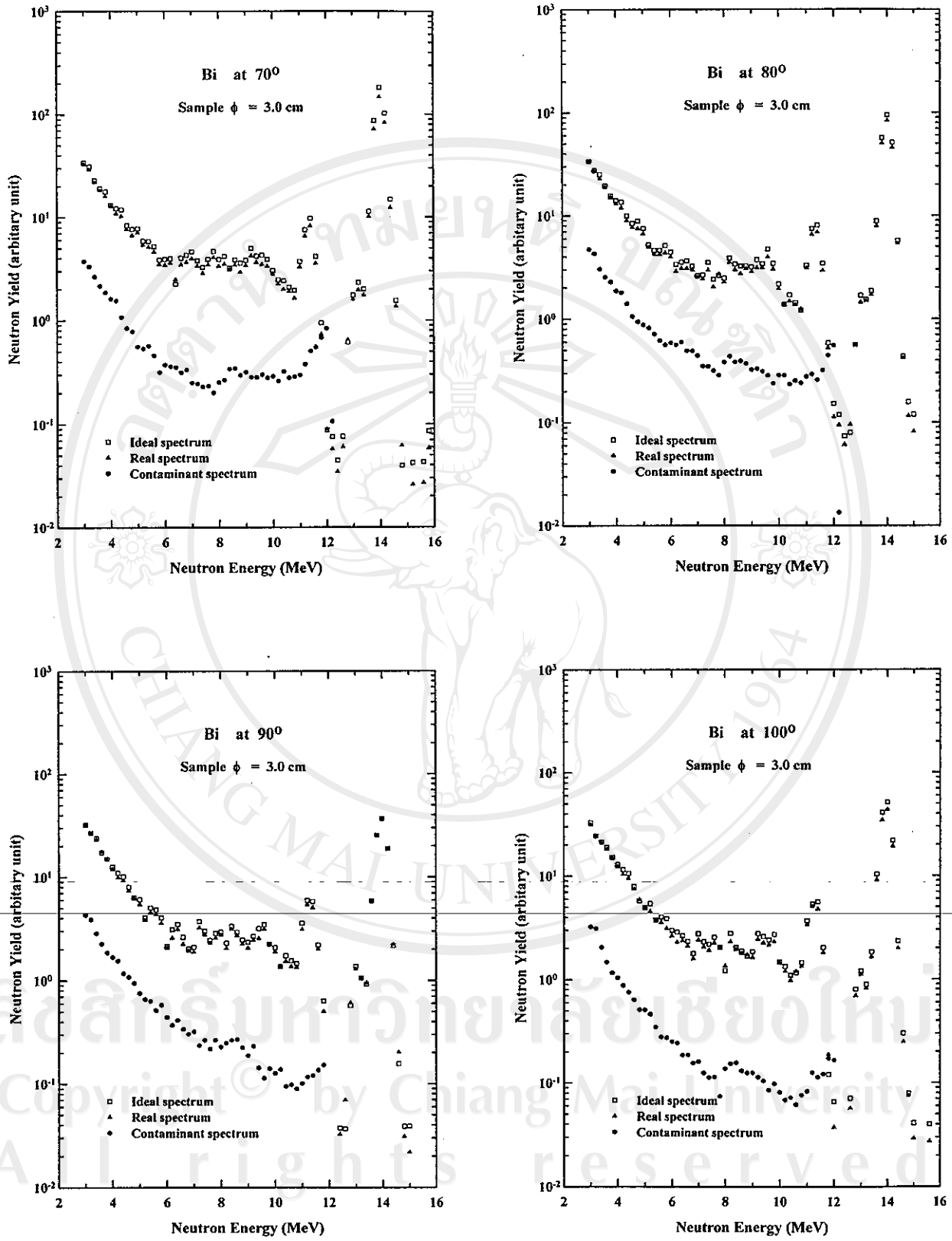
แต่ที่มุมกระเจิงตั้งแต่ 50 องศาขึ้นไปนั้น พบว่าต่ำมากจึงแทบจะไม่มีผลกระทบเลย

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



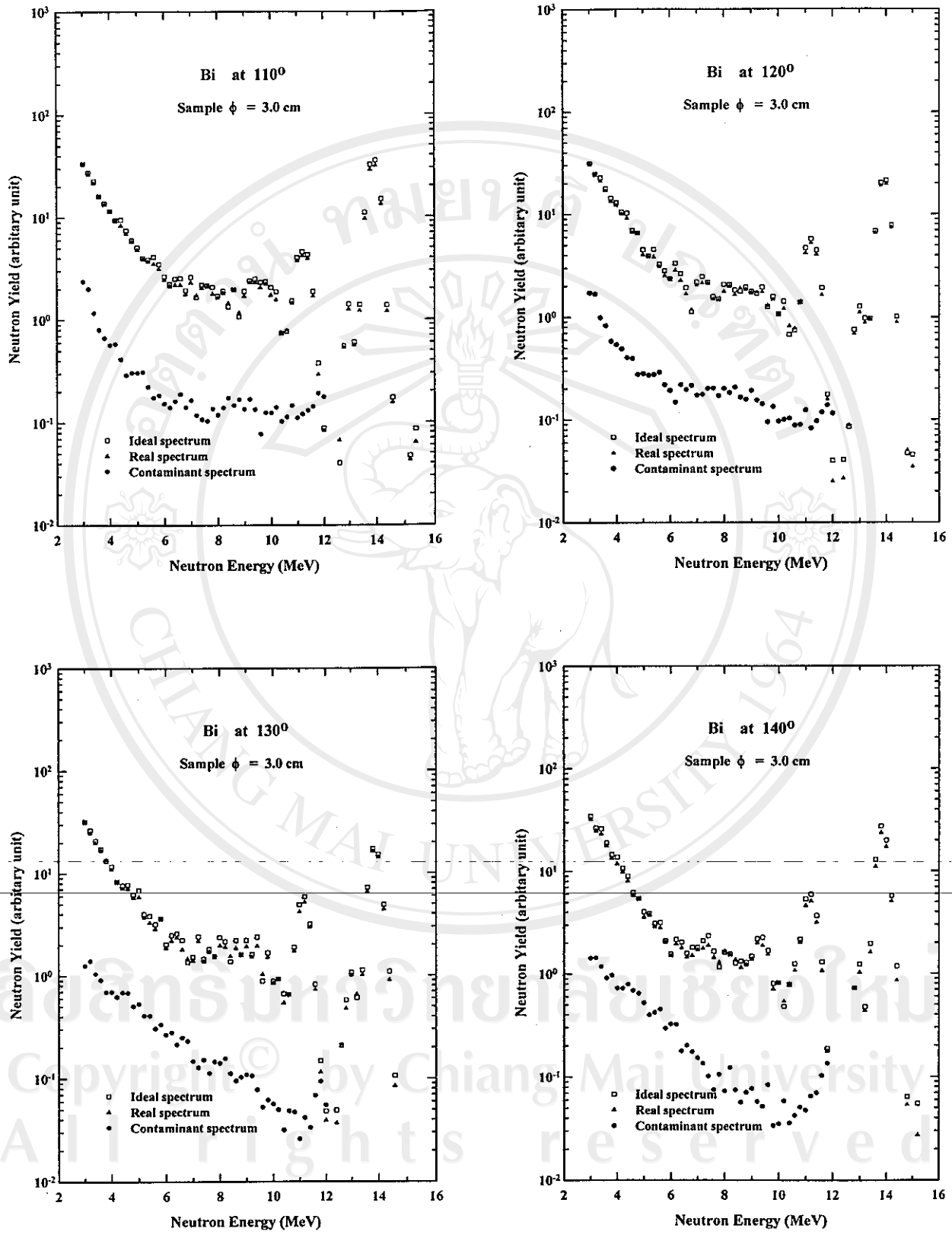
รูปที่ 20 สเปกตรัมการกระเจิงอุดมคติ และสเปกตรัมการกระเจิงจริง ของนิวตรอน 14 MeV และสเปกตรัมการกระเจิงจริง ของนิวตรอนปนเปื้อน ในวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.0 ซม ที่มุมกระเจิง 30 40 50 และ 60 องศา โดยใช้โปรแกรม SYNTHIA

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



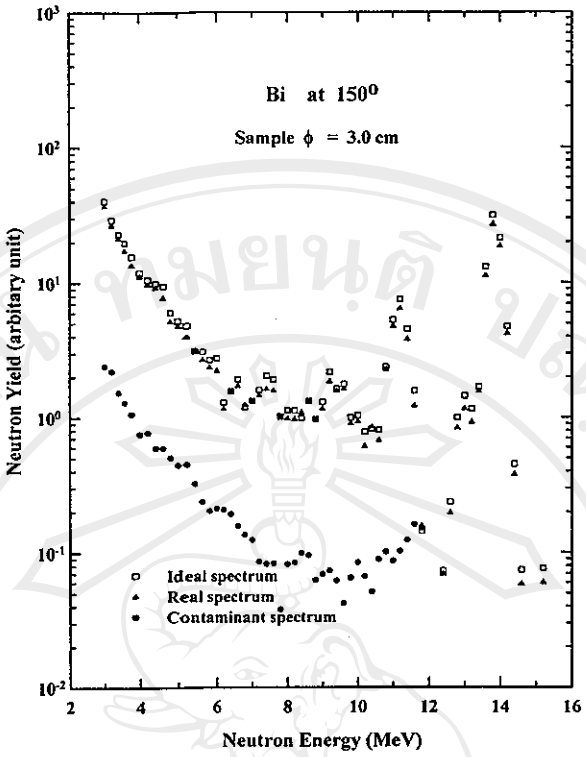
รูปที่ 21 สเปกตรัมการกระเจิงอุดมคติ และสเปกตรัมการกระเจิงจริง ของนิวตรอน 14 MeV และสเปกตรัมการกระเจิงจริง ของนิวตรอนปนเปื้อน ในวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.0 ซม ที่มุมกระเจิง 70 80 90 และ 100 องศา โดยใช้โปรแกรม SYNTHIA

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 22 สเปกตรัมการกระเจิงอุดมคติ และสเปกตรัมการกระเจิงจริง ของนิวตรอน 14 MeV และสเปกตรัมการกระเจิงจริง ของนิวตรอนปนเปื้อน ในวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.0 ซม ที่มุมกระเจิง 100 110 120 และ 130 องศา โดยใช้โปรแกรม SYNTHIA

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 23 สเปกตรัมการกระเจิงอุดมคติ และสเปกตรัมการกระเจิงจริง ของนิวตรอน 14 MeV และสเปกตรัมการกระเจิงจริง ของนิวตรอนปนเปื้อน ในวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.0 ซม ที่มุมกระเจิง 150 องศา โดยใช้โปรแกรม SYNTHIA

3.4 <u>เมื่อวัตถุตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3 เซนติเมตร</u>

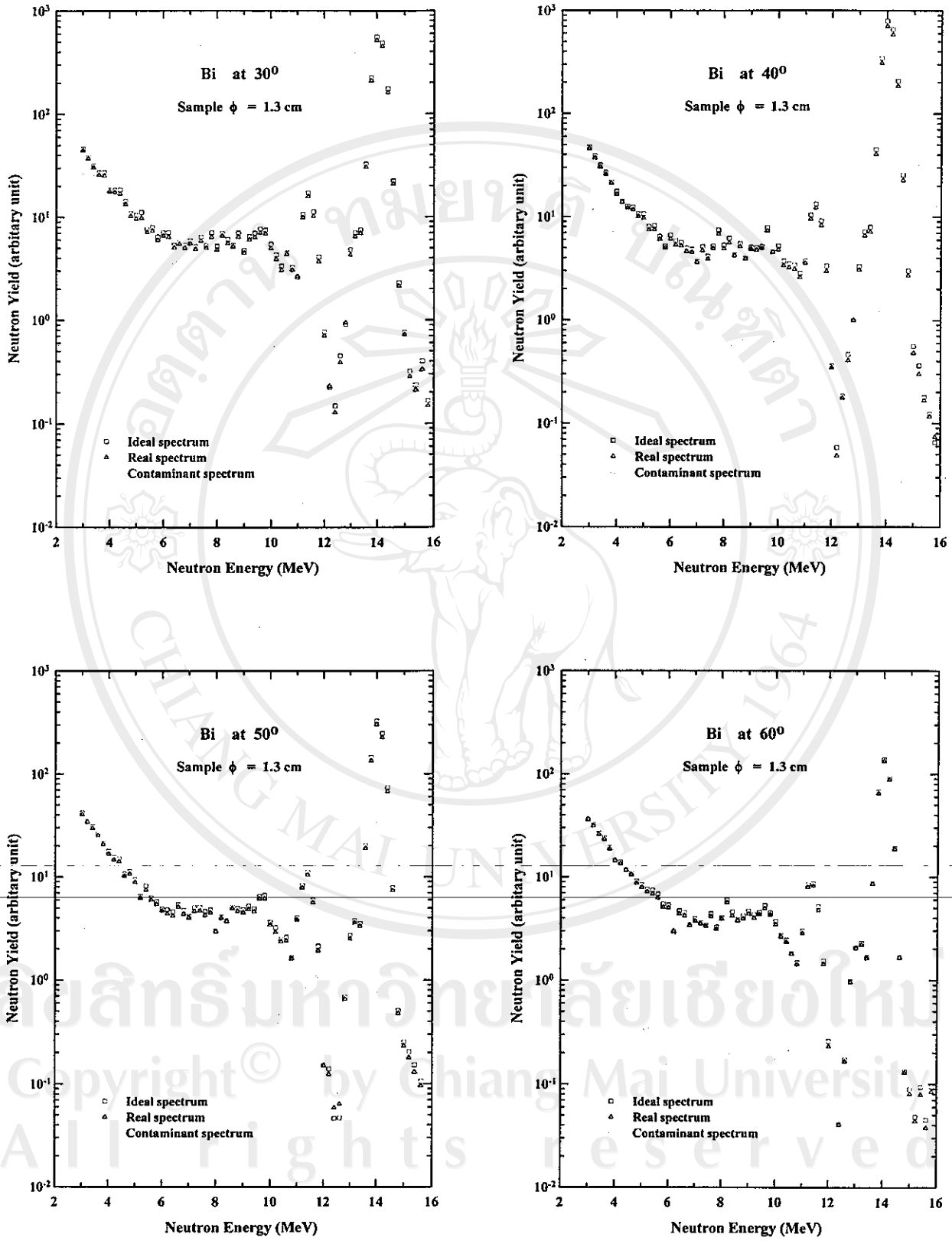
กรณีนิวตรอนพลังงาน 14 MeV (พีค)

จากรูปที่ 24 ถึง 27 จะสังเกตได้ว่า ตลอดทุกมุมกระเจิง สเปกตรัมการกระเจิงจริงแทบจะเท่ากับสเปกตรัมการกระเจิงอุดมคติ แสดงว่าเกิดการลดทอนฟลักซ์ของนิวตรอนน้อยมาก เนื่องจากว่าวัตถุตัวอย่างมีขนาดเล็กลง

-กรณีนิวตรอนปนเปื้อน

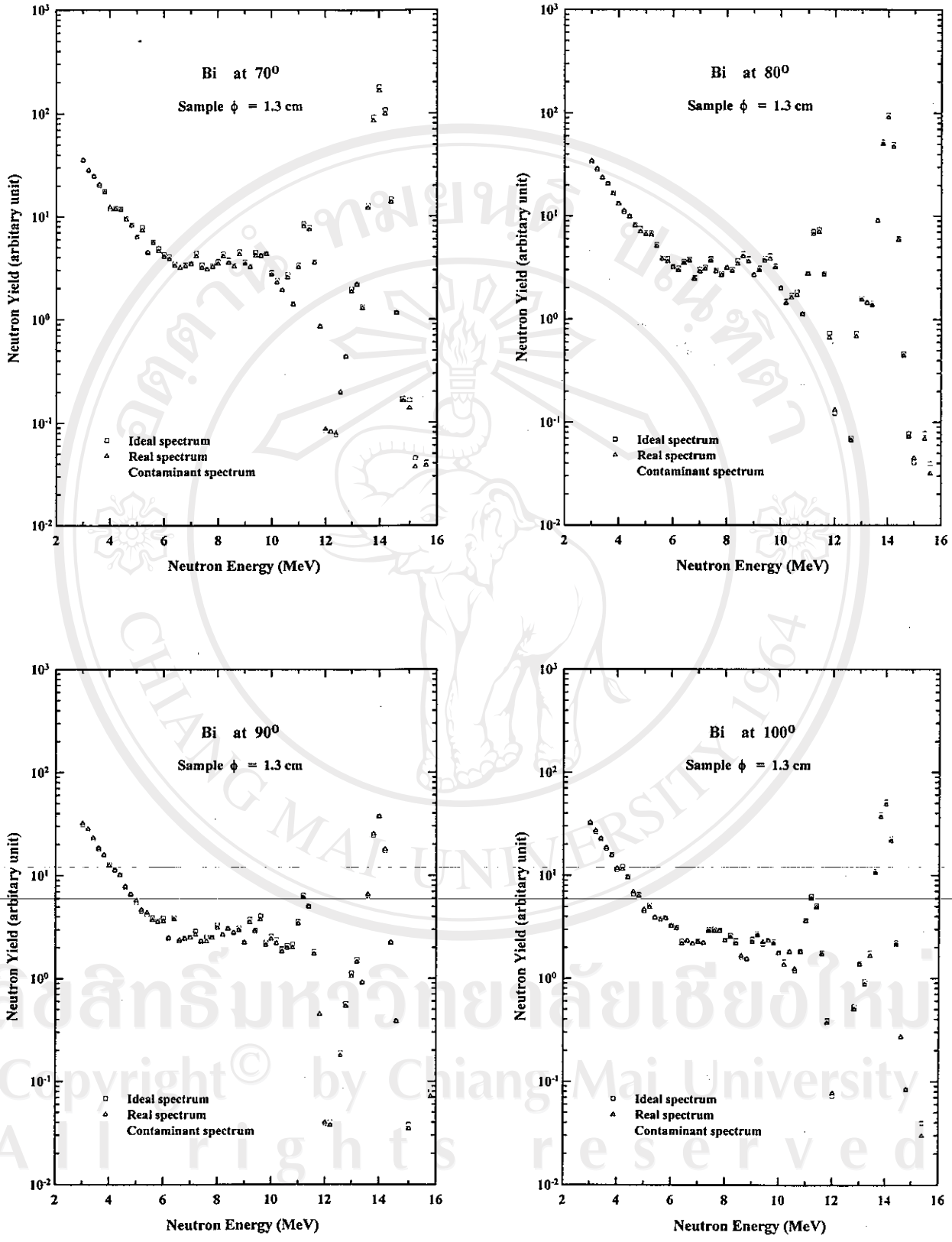
ผลที่ได้คล้ายกับผลเมื่อวัตถุตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.0 เซนติเมตร แต่ผลจากการลดทอนฟลักซ์ของนิวตรอนน้อยลง เนื่องจากว่าวัตถุตัวอย่างมีขนาดเล็กลง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



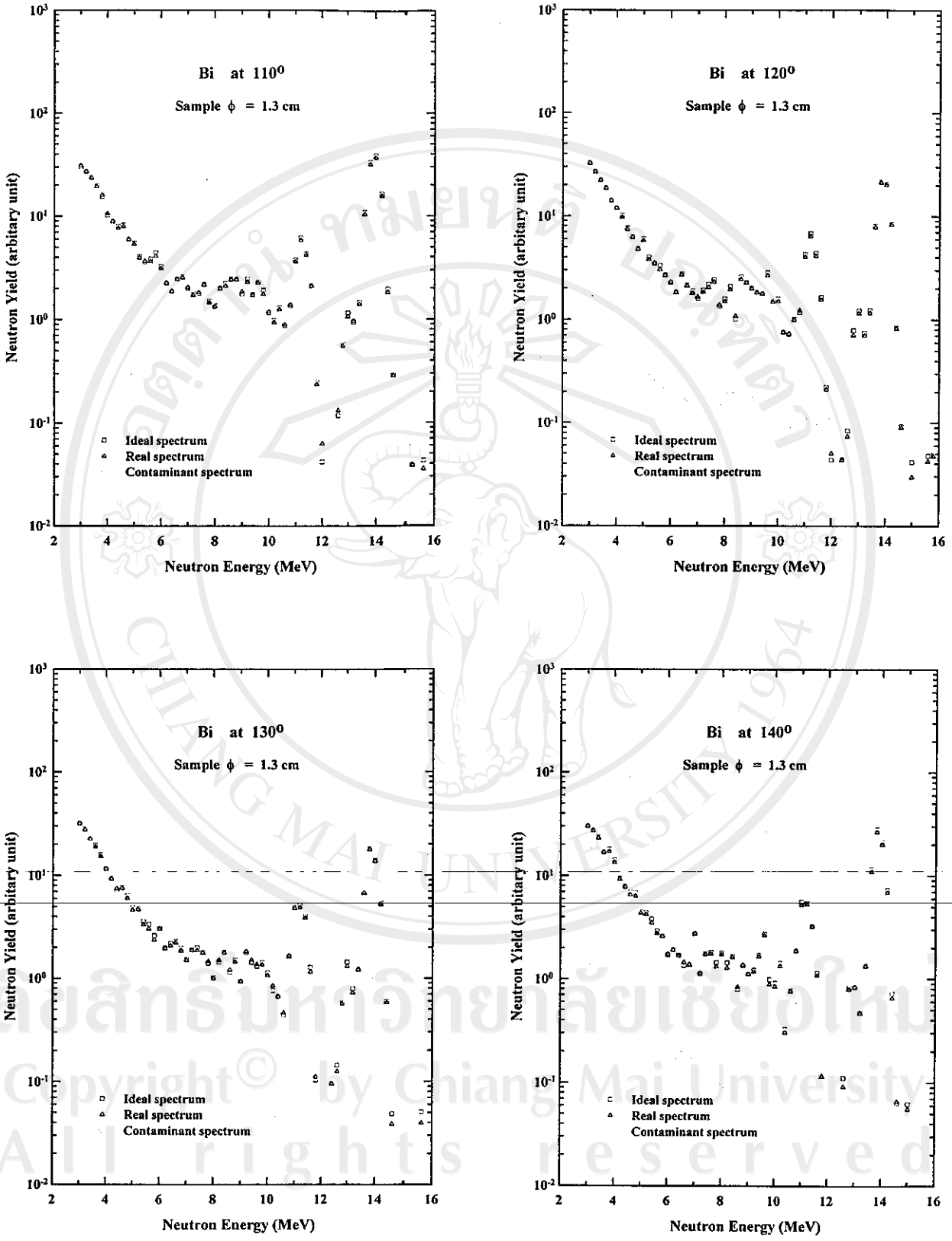
รูปที่ 24 สเปกตรัมการกระเจิงอุดมคติ และสเปกตรัมการกระเจิงจริง ของนิวตรอน 14 MeV และสเปกตรัมการกระเจิงจริง ของนิวตรอนปนเปื้อน ในวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3 ซม ที่มุมกระเจิง 30 40 50 และ 60 องศา โดยใช้โปรแกรม SYNTHIA

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



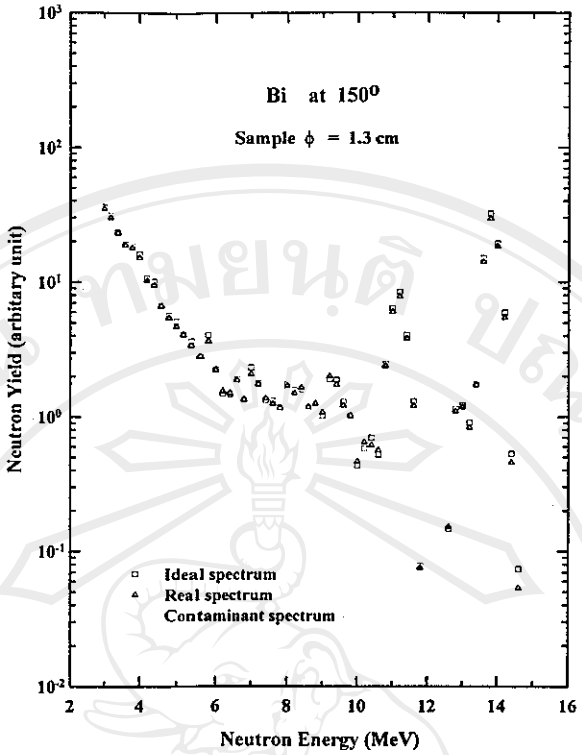
รูปที่ 25 สเปกตรัมการกระเจิงอุดมคติ และสเปกตรัมการกระเจิงจริง ของนิวตรอน 14 MeV และสเปกตรัมการกระเจิงจริง ของนิวตรอนปนเปื้อน ในวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3 ซม ที่มุมกระเจิง 70 80 90 และ 100 องศา โดยใช้โปรแกรม SYNTHIA

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 26 สเปกตรัมการกระเจิงอุดมคติ และสเปกตรัมการกระเจิงจริง ของนิวตรอน 14 MeV และสเปกตรัมการกระเจิงจริง ของนิวตรอนปนเปื้อน ในวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3 ซม ที่มุมกระเจิง 110 120 130 และ 140 องศา โดยใช้โปรแกรม SYNTHIA

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



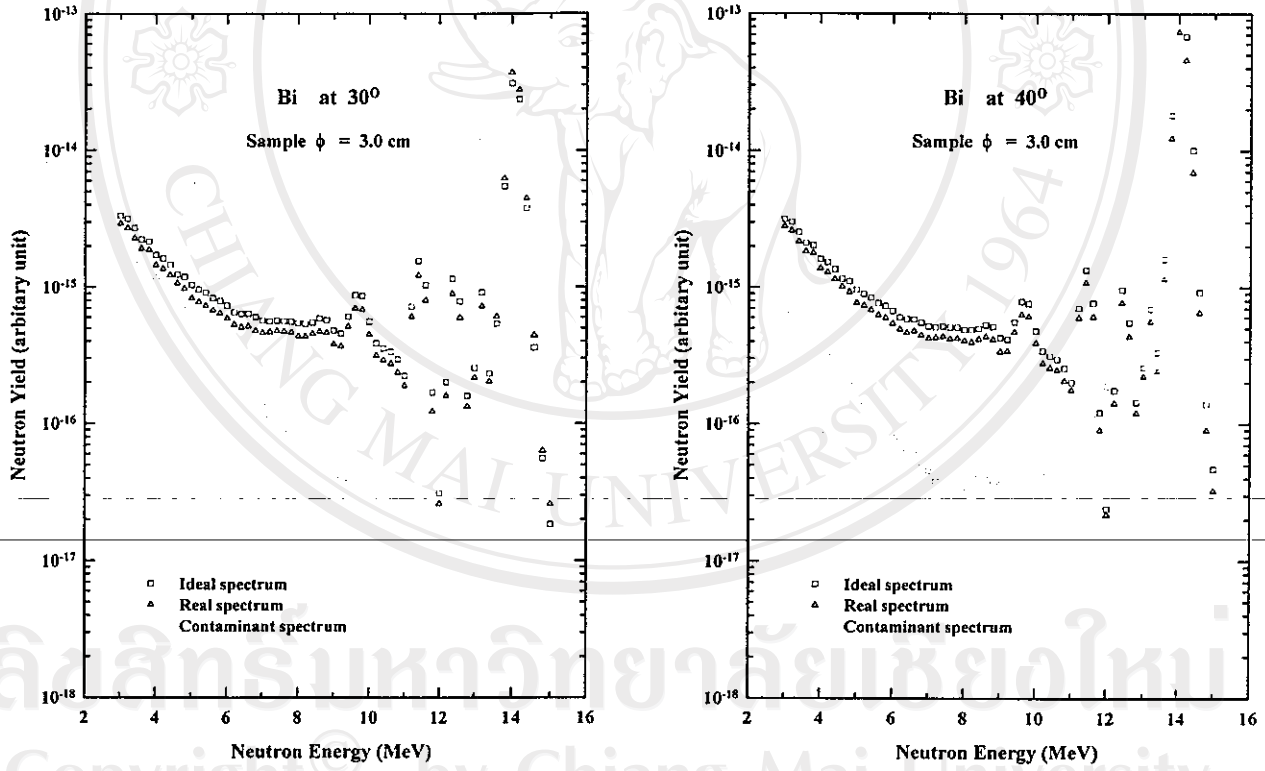
รูปที่ 27 สเปกตรัมการกระเจิงอุดมคติ และสเปกตรัมการกระเจิงจริง ของนิวตรอน 14 MeV และสเปกตรัมการกระเจิงจริง ของนิวตรอนปนเปื้อน ในวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3 ซม ที่มุมกระเจิง 150 องศา โดยใช้โปรแกรม SYNTHIA

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ผลการจำลองสเปกตรัมการกระเจิงอุดมคติ สเปกตรัมการกระเจิงจริงจากนิวตรอน 14 MeV และสเปกตรัมการกระเจิงจริงจากนิวตรอนปนเปื้อนโดยใช้โปรแกรม MCNP

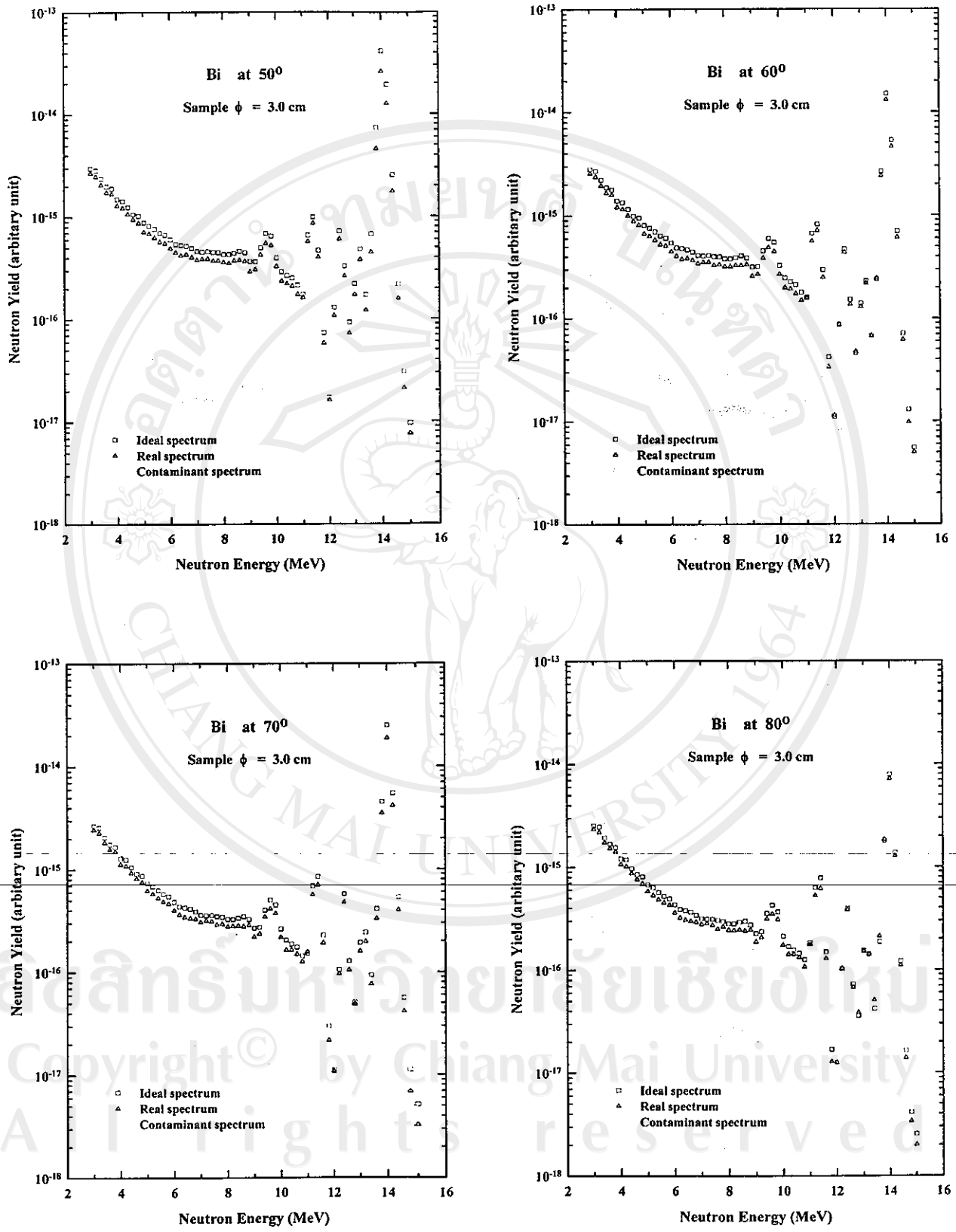
3.5 เมื่อวัตถุตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร

จากรูปที่ 28 ถึง 31 ผลที่ได้ส่วนใหญ่ใกล้เคียงกับผลจากโปรแกรม SYNTHIA ทั้งผลจากการลดทอน และผลจากนิวตรอนปนเปื้อน(ที่มุมกระเจิงต่ำ) ยกเว้นในช่วงพลังงาน 12 ถึง 14 MeV และที่ประมาณ 10 MeV เท่านั้นที่ผลจาก MCNP แสดงความเป็นพีคอย่างชัดเจน และในช่วงพลังงานตั้งแต่ 3 ถึง 8 MeVนั้น มีความราบเรียบกว่า



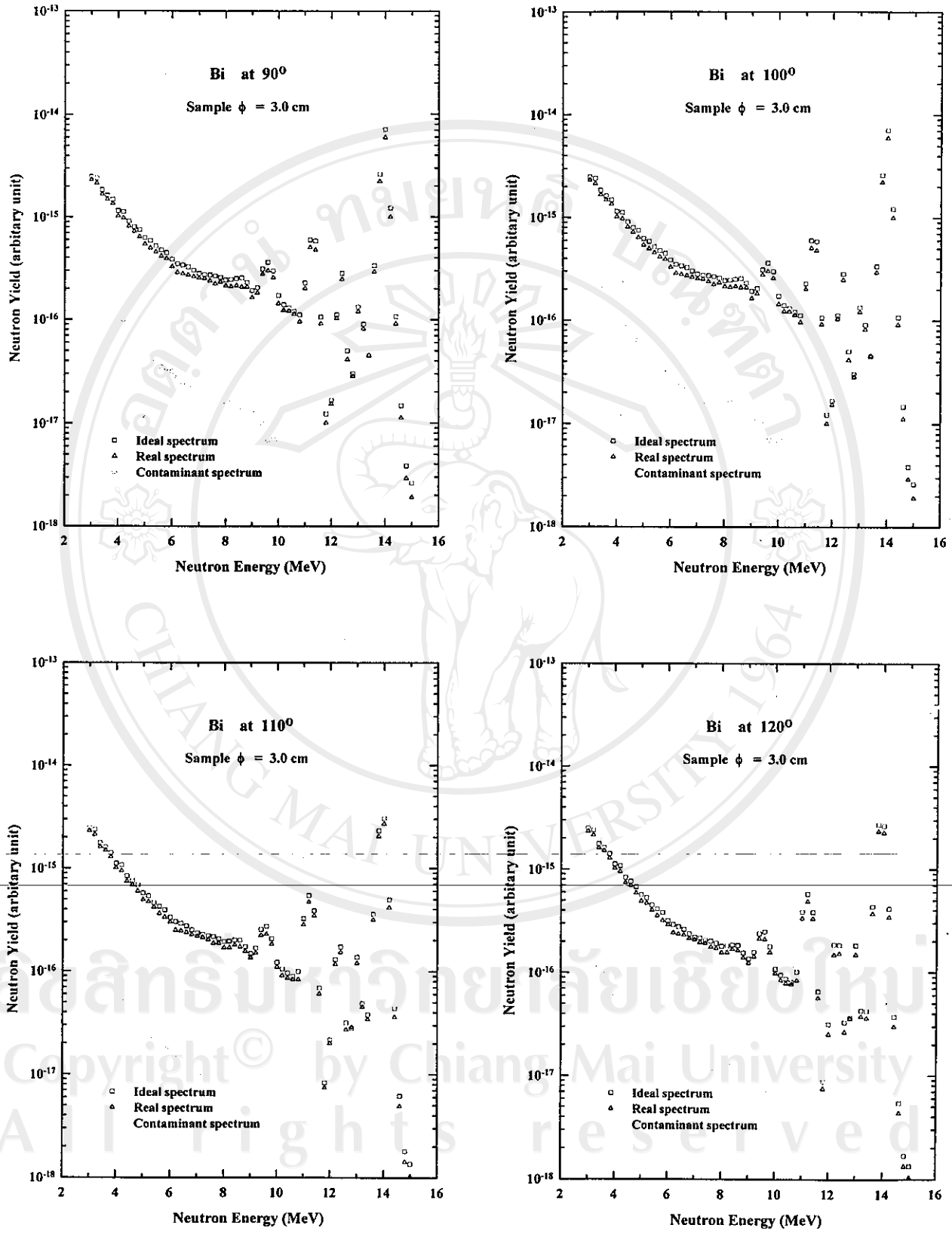
รูปที่ 28 สเปกตรัมการกระเจิงอุดมคติ และสเปกตรัมการกระเจิงจริง ของนิวตรอน 14 MeV และสเปกตรัมการกระเจิงจริง ของนิวตรอนปนเปื้อน ในวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.0 ซม ที่มุมกระเจิง 30 และ 40 องศา โดยใช้โปรแกรม MCNP

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



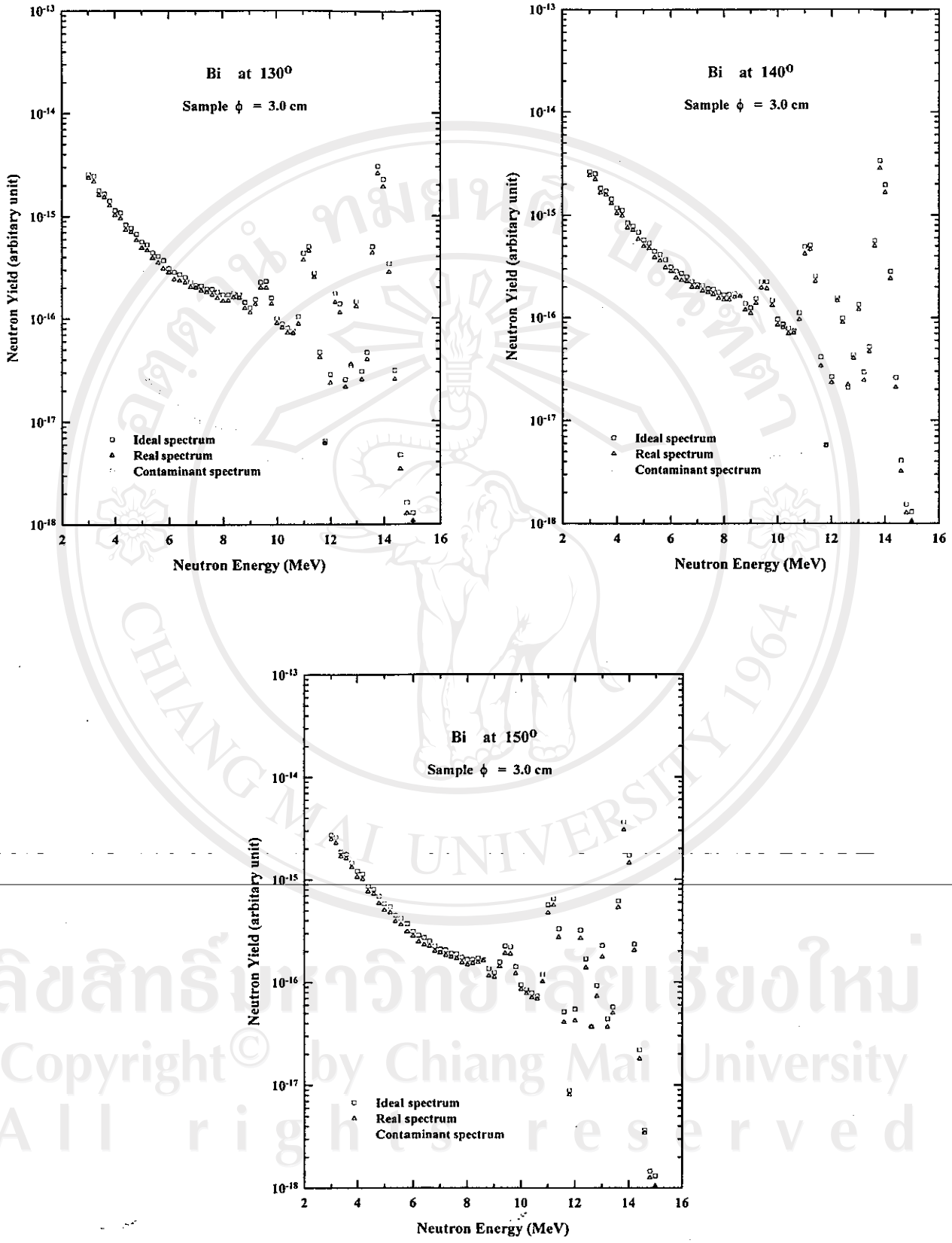
รูปที่ 29 สเปกตรัมการกระเจิงอุดมคติ และสเปกตรัมการกระเจิงจริง ของนิวตรอน 14 MeV และสเปกตรัมการกระเจิงจริง ของนิวตรอนปนเปื้อน ในวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.0 ซม ที่มุมกระเจิง 50 60 70 และ 80 องศา โดยใช้โปรแกรม MCNP

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 30 สเปกตรัมการกระเจิงอุดมคติ และสเปกตรัมการกระเจิงจริง ของนิวตรอน 14 MeV และสเปกตรัมการกระเจิงจริง ของนิวตรอนปนเปื้อน ในวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.0 ซม ที่มุมกระเจิง 90 100 110 และ 120 องศา โดยใช้โปรแกรม MCNP

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

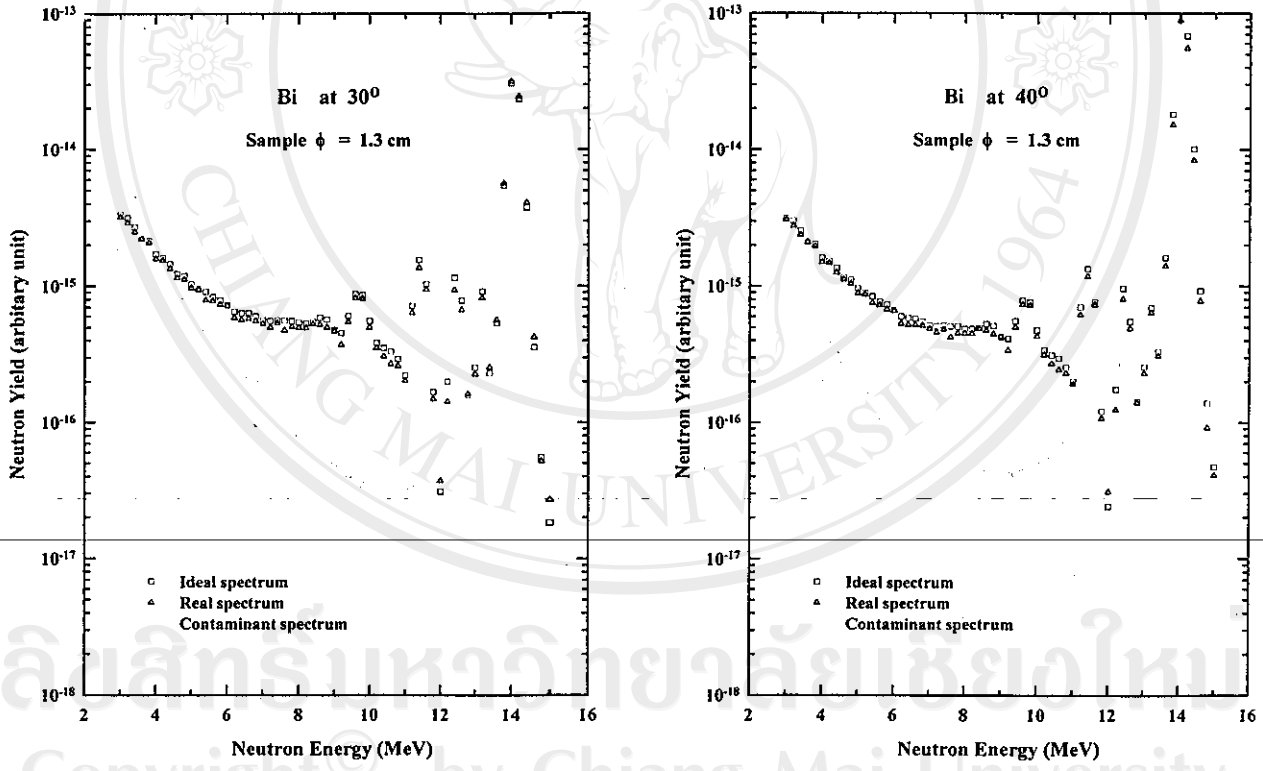


รูปที่ 31 สเปกตรัมการกระเจิงอุดมคติ และสเปกตรัมการกระเจิงจริง ของนิวตรอน 14 MeV และสเปกตรัมการกระเจิงจริง ของนิวตรอนปนเปื้อน ในวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.0 ซม ที่มุมกระเจิง 130 140 และ 150 องศา โดยใช้โปรแกรม MCNP

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

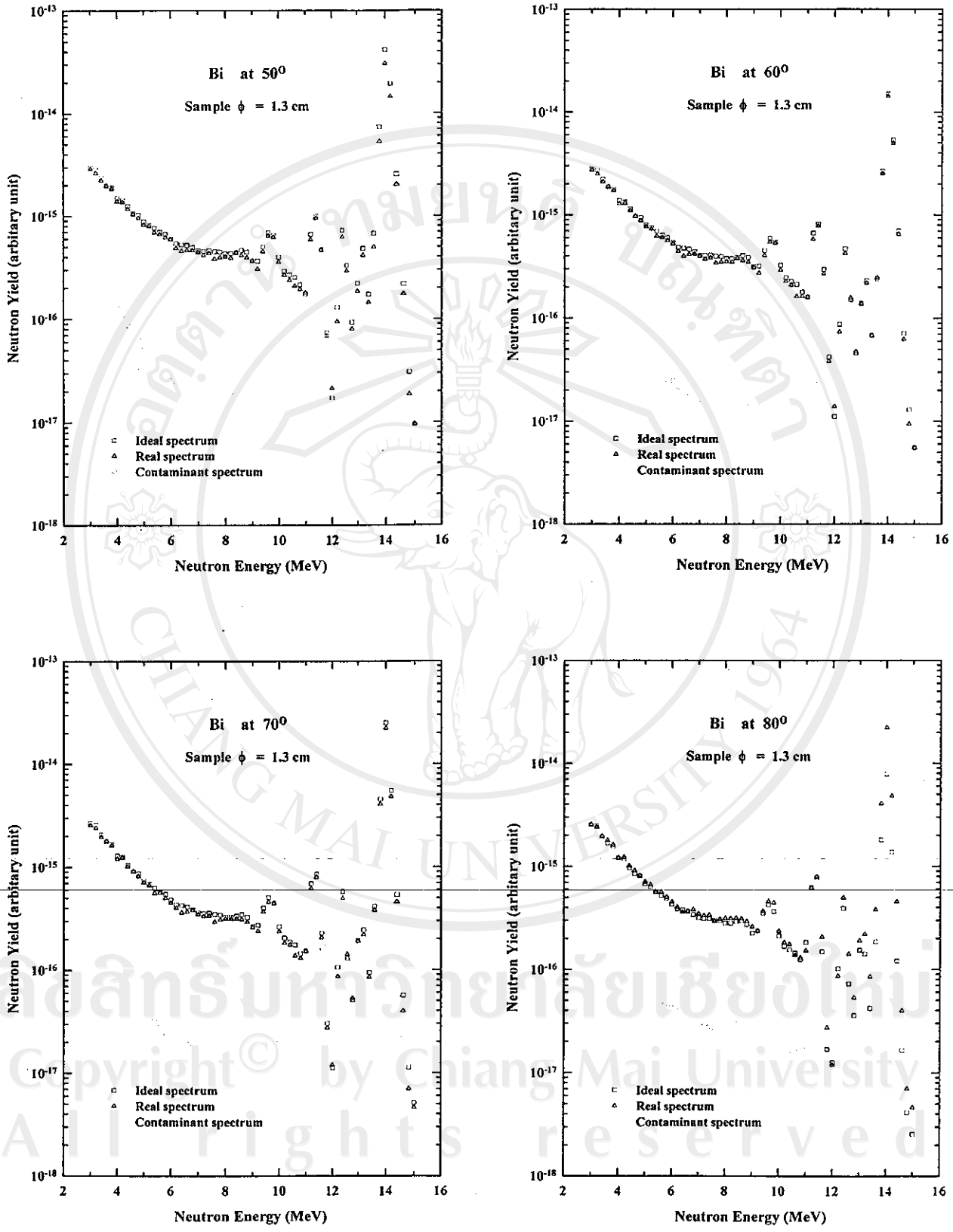
3.6 <u>เมื่อวัตถุตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3 เซนติเมตร</u>

ผลของการลดทอนของฟลักซ์นิวตรอนเหมือนกับผลที่จำลองได้จากโปรแกรม SYNTHIA ส่วนที่มีพีคปรากฏในช่วงพลังงาน 12 ถึง 14 MeV และที่ 10 MeV ก็เหมือนกับในกรณีที่ใช้วัตถุตัวอย่างขนาด 3 ซมในข้างต้นดังจะเห็นจากรูปที่ 32 ถึง 35



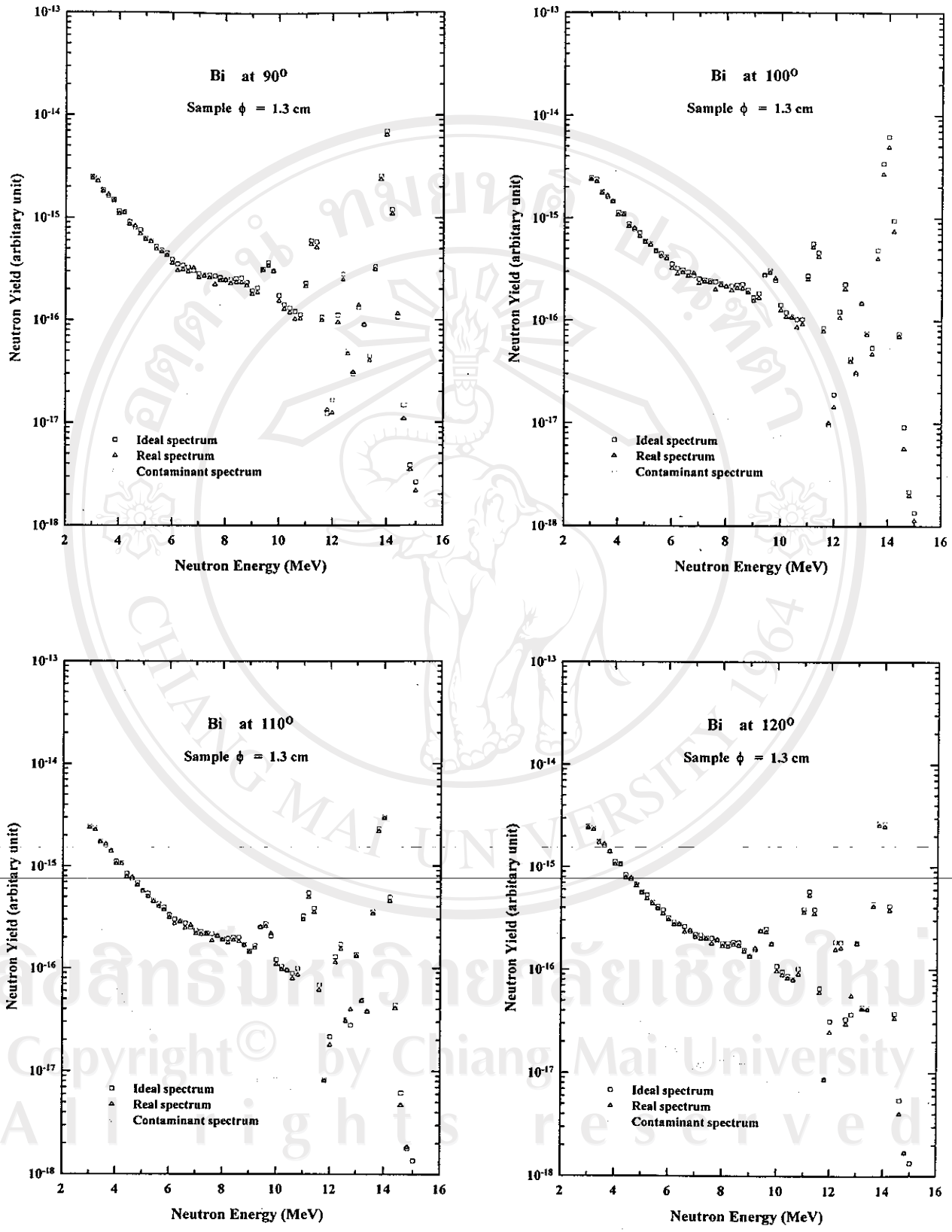
รูปที่ 32 สเปกตรัมการกระเจิงอุดมคติ และสเปกตรัมการกระเจิงจริง ของนิวตรอน 14 MeV และสเปกตรัมการกระเจิงจริง ของนิวตรอนปนเปื้อน ในวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3 ซม ที่มุมกระเจิง 30 และ 40 องศา โดยใช้โปรแกรม MCNP

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



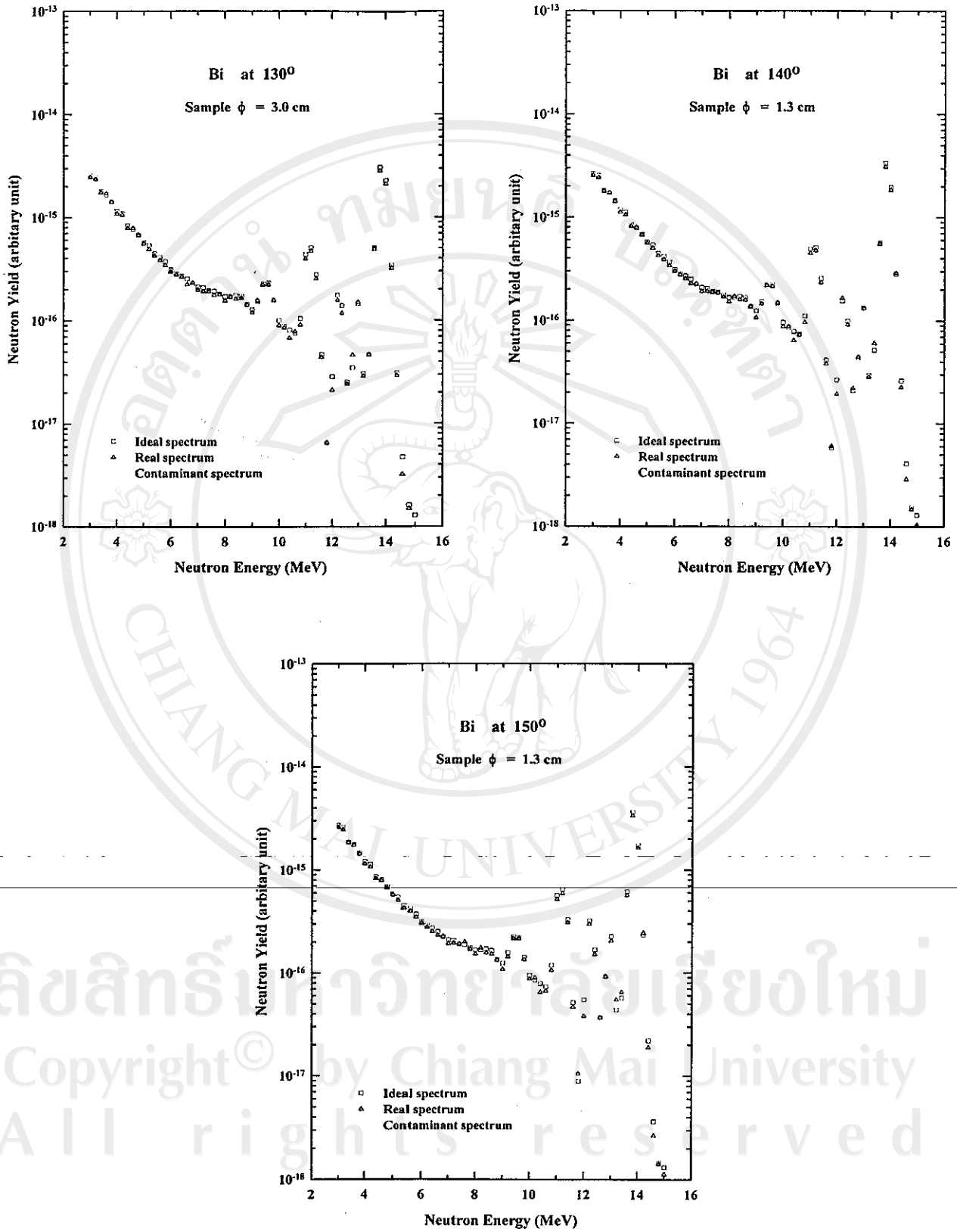
รูปที่ 33 สเปกตรัมการกระเจิงอุดมคติ และสเปกตรัมการกระเจิงจริง ของนิวตรอน 14 MeV และสเปกตรัมการกระเจิงจริง ของนิวตรอนปนเปื้อน ในวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3 ซม ที่มุมกระเจิง 50 60 70 และ 80 องศา โดยใช้โปรแกรม MCNP

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 34 สเปกตรัมการกระเจิงอุดมคติ และสเปกตรัมการกระเจิงจริง ของนิวตรอน 14 MeV และสเปกตรัมการกระเจิงจริง ของนิวตรอนปนเปื้อน ในวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3 ซม ที่มุมกระเจิง 90 100 110 และ 120 องศา โดยใช้โปรแกรม MCNP

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 35 สเปกตรัมการกระเจิงอุดมคติ และสเปกตรัมการกระเจิงจริง ของนิวตรอน 14 MeV และสเปกตรัมการกระเจิงจริง ของนิวตรอนปนเปื้อน ในวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3 ซม ที่มุมกระเจิง 130 140 และ 150 องศา โดยใช้โปรแกรม MCNP

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ผลของการจำลองด้วยโปรแกรม SYNTHIA เทียบกับผลที่ได้จากการทดลองจริง

เนื่องจากผลท้ายสุดของการจำลองสเปกตรัมที่มุมกระเจิงต่าง ๆและได้ถูกกระจายแล้วนั้น จะต้องสอดคล้องกับสเปกตรัม DDX ที่วัดได้จากการทดลองจริง (แต่แก้ไขผลของการกระเจิงหลายครั้งและการลดทอนฟลักซ์ของนิวตรอน) จึงจะถือว่าผลของการจำลองเหตุการณ์นี้มีความถูกต้องตามความเป็นจริง

แต่ก่อนที่จะทำการเปรียบเทียบกัน จะต้อง normalized สเปกตรัมทั้งหมดที่จำลองได้ด้วยค่าคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งหาได้จากการเฉลี่ยตลอดทุกมุมกระเจิง ดังนั้นทำให้ผลของการเปรียบเทียบจึงเป็นเพียงเพื่อที่จะใช้เป็นแนวทางเท่านั้น

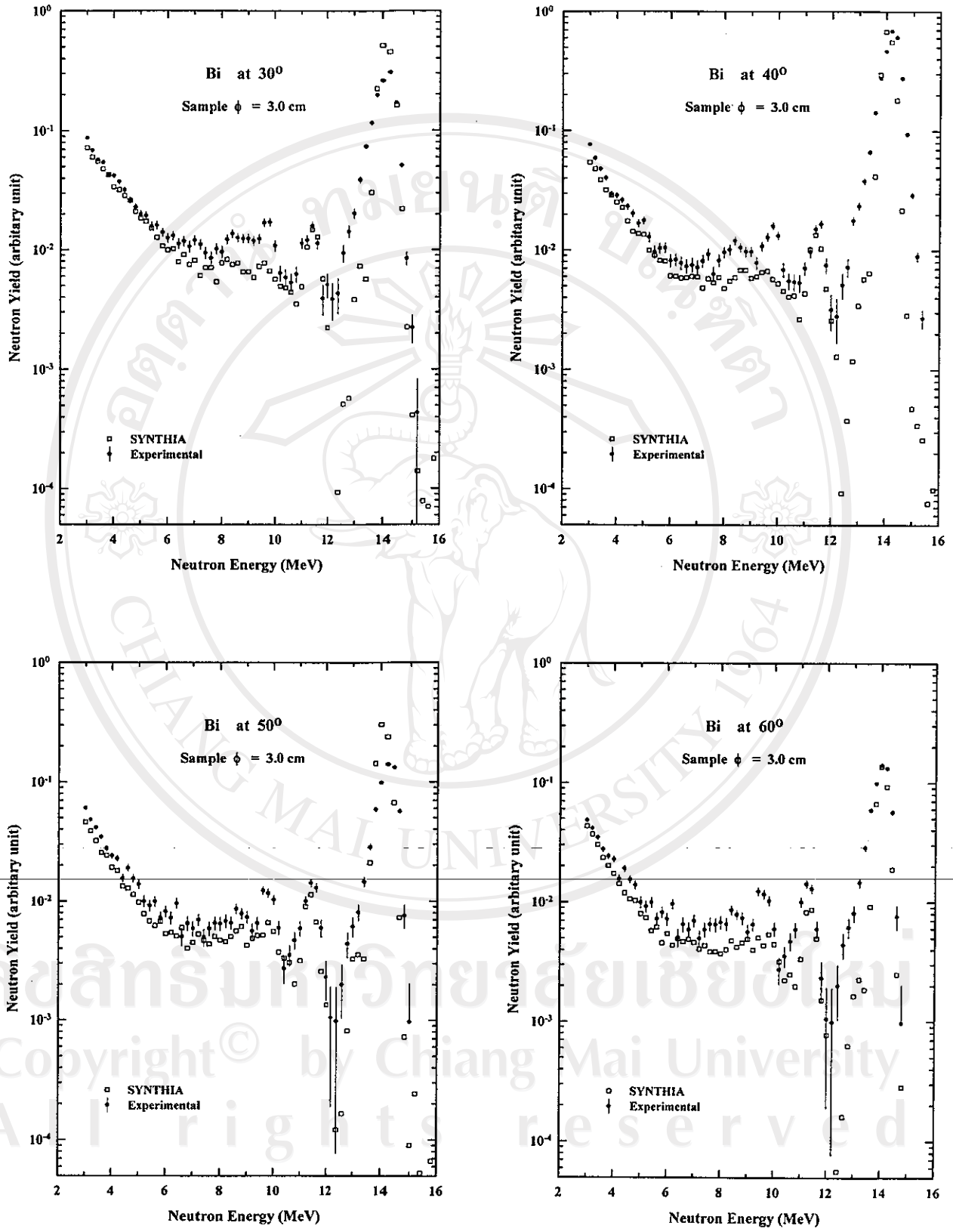
ส่วนขั้นตอนในการแก้ไขผลของการกระเจิงหลายครั้งและการลดทอนฟลักซ์ของนิวตรอนนั้น ก็จะเปลี่ยนไปใช้วิธีการหาค่าอัตราส่วนระหว่างสเปกตรัมการกระเจิงอุดมคติกับสเปกตรัมการกระเจิงจริงจากผลรวมทั้งกรณีผลจากขนาดของวัตถุตัวอย่างจากนิวตรอน 14 MeV (พีค)และกรณีผลจากนิวตรอนปนเปื้อน ซึ่งเป็นวิธีการที่จะหลีกเลี่ยงความผิดพลาดเนื่องจากการใช้ค่าคงที่ที่ไม่ถูกต้องในการ normalize

3.7 <u>เมื่อวัตถุตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร</u>

จากรูปที่ 36 และ 39 พบว่าตลอดทุกมุมกระเจิง ผลของการจำลองด้วยโปรแกรม SYNTHIA เทียบกับผลที่ได้จากการทดลองจริง ส่วนใหญ่มีความสอดคล้องกันดี จะแตกต่างกันบ้างในเฉพาะบางมุมเท่านั้น ทั้งนี้อาจจะเป็นเพราะค่าที่นำมาใช้ normalized สเปกตรัมที่ได้จากการจำลองนั้นเป็นค่าเฉลี่ย ซึ่งอาจจะทำให้เกิดความผิดพลาดดังที่กล่าวไว้ในข้างต้น

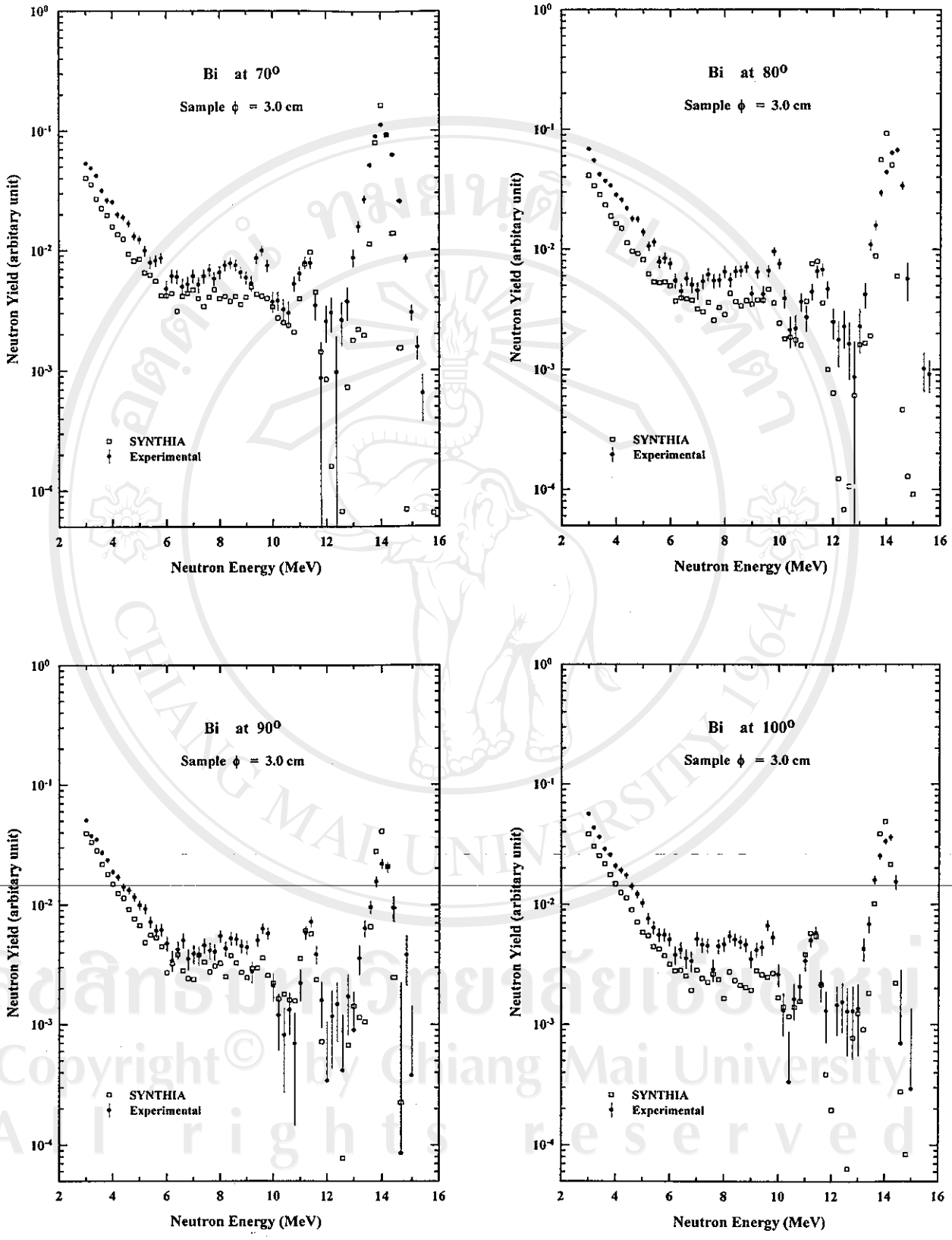
แต่ที่น่าสังเกต คือในช่วงของพลังงานนิวตรอนประมาณ 8 ถึง 10 ผลจากการทดลองมีลักษณะเป็นพีคต่าง ๆ ทั้งนี้อาจจะเป็นเพราะว่าระบบอำนาจการจำแนกพลังงานของเครื่องนิวตรอนที่มหาวิทยาลัยเชียงใหม่มีค่าสูง (Vilaithong et al.,1997) จึงทำให้สามารถแยกแยะได้เด่นชัดขึ้น รวมทั้งเป็นเพราะว่าข้อมูล energy distribution สำหรับนิวตรอนทุติยภูมิในช่วง Continuum ที่ใช้ในโปรแกรม SYNTHIA นั้นแม้ว่าจะมีลักษณะคล้ายพีคแต่เตี้ยมาก

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



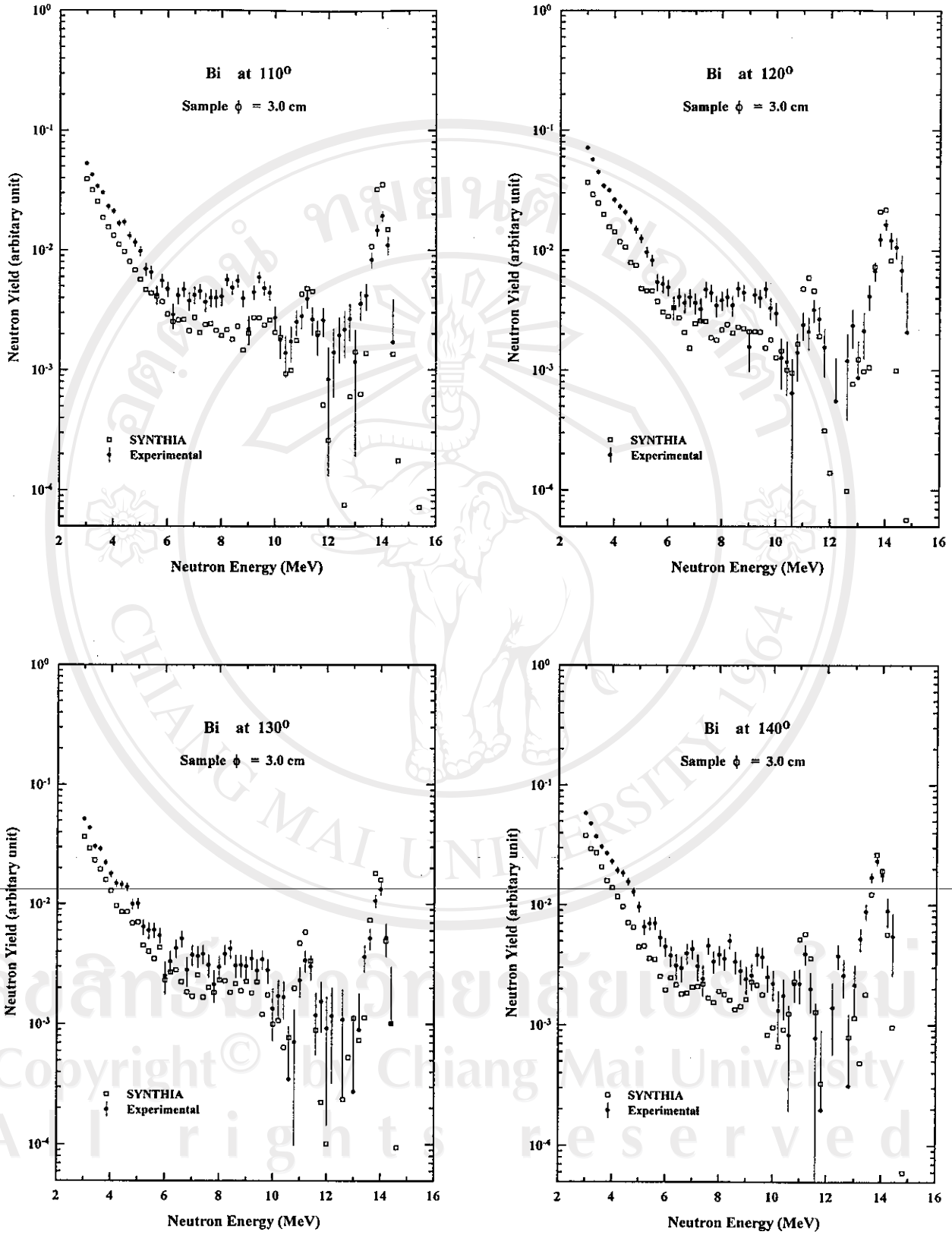
รูปที่ 36 ผลการจำลองโดยใช้โปรแกรม SYNTHIA เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง ของวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.0 ซม ที่มุมกระเจิง 30 40 50 และ 60 องศา

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



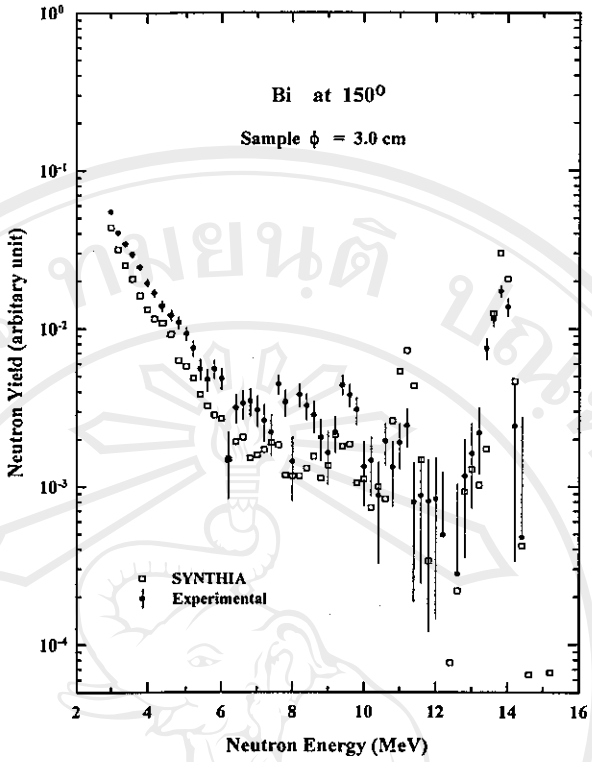
รูปที่ 37 ผลการจำลองโดยใช้โปรแกรม SYNTHIA เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง ของวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.0 ซม ที่มุมกระเจิง 70 80 90 และ 100 องศา

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 38 ผลการจำลองโดยใช้โปรแกรม SYNTHIA เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง ของวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.0 ซม ที่มุมกระเจิง 110 120 130 และ 140 องศา

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 39 ผลการจำลองโดยใช้โปรแกรม SYNTHIA เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง ของวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.0 ซม ที่มุมกระเจิง 150 องศา

3.8 เมื่อวัตถุตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3 เซนติเมตร

จากรูปที่ 40 และ 41 ผลการเปรียบเทียบจะขอแบ่งเป็น 2 กรณี คือ

-กรณีที่มุมกระเจิงต่ำๆ คือ 30,50 และ 70 องศา

ผลจากการจำลองสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง จะแตกต่างกันบ้างในเฉพาะบางช่วงของพลังงานเท่านั้น ทั้งนี้อาจจะเป็นเพราะค่าที่นำมาใช้ normalized ยังไม่ถูกต้อง ดังที่กล่าวไว้ในข้างต้น

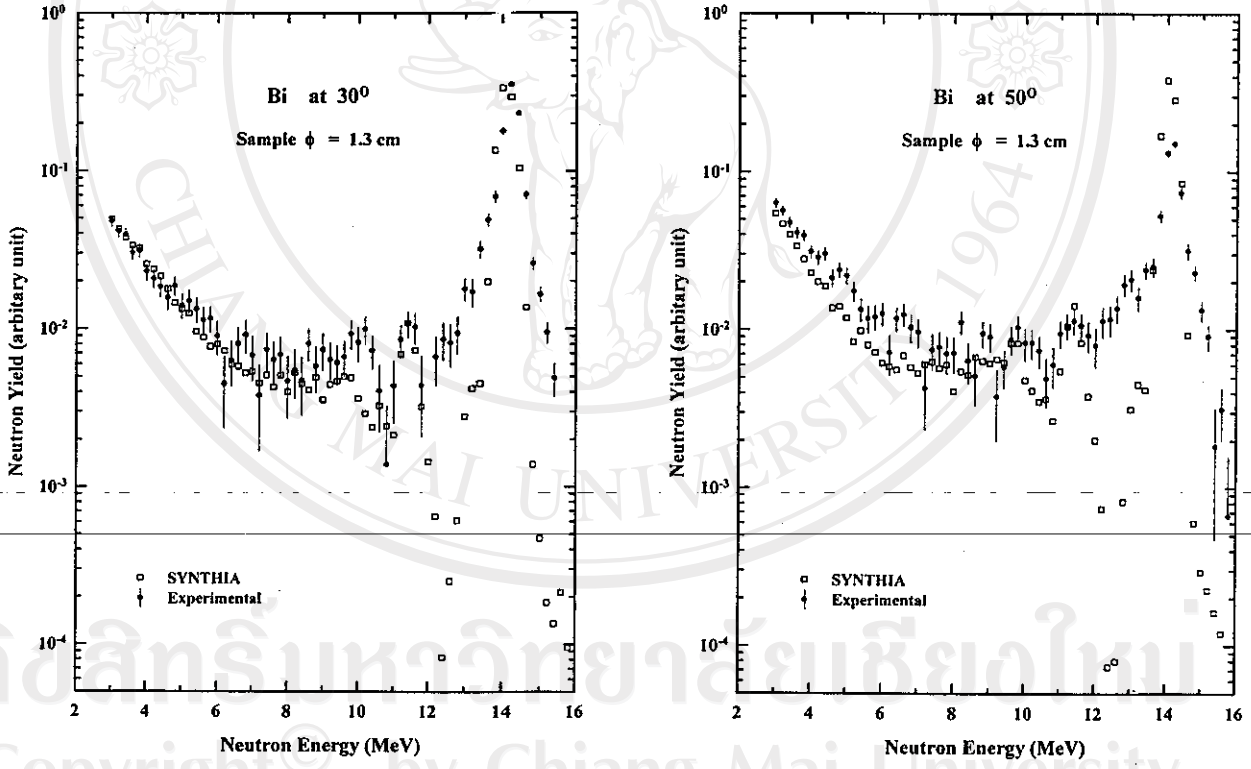
-กรณีที่มุมกระเจิงสูงๆ คือ 110 และ 150 องศา

อาจจะเป็นเพราะว่าเวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูลไม่เพียงพอ แม้ว่าในการทดลองนั้นจะใช้เวลาเก็บข้อมูลมากถึงประมาณ 30 ชั่วโมงแล้วก็ตาม ทั้งนี้คงเป็นเพราะว่าโอกาสของการเกิดการกระเจิงที่มุมกระเจิงสูงๆมีค่าน้อยมาก (ซึ่งสังเกตได้จากเมื่อทำการทดลองโดยใช้วัตถุตัวอย่างขนาดใหญ่) ดังนั้นเมื่อใช้วัตถุตัวอย่างขนาดเล็ก ทำให้จำนวนนิวตรอนที่กระเจิงไปหัววัดมีค่าน้อย

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ลงมาก และการวัดค่า DDX นั้น ในขั้นตอนการเก็บข้อมูลต้องมีการเก็บสเปกตรัม TOF ของ background(Sample-out) แล้วนำมาลบออกจากสเปกตรัม TOF ของ Bismuth(Sample-in) เพื่อที่จะขจัดนิวตรอนที่มิได้มาจากการกระเจิงกับวัตถุตัวอย่างทิ้งไป ซึ่งโดยปกติมักจะใช้เวลาเก็บกรณี Sample-out เพียง 1/3 ถึง 1/2 ของเวลาที่ใช้เก็บกรณี Sample-in แล้วใช้วิธี normalized ให้เท่ากันด้วยค่า neutron flux monitor

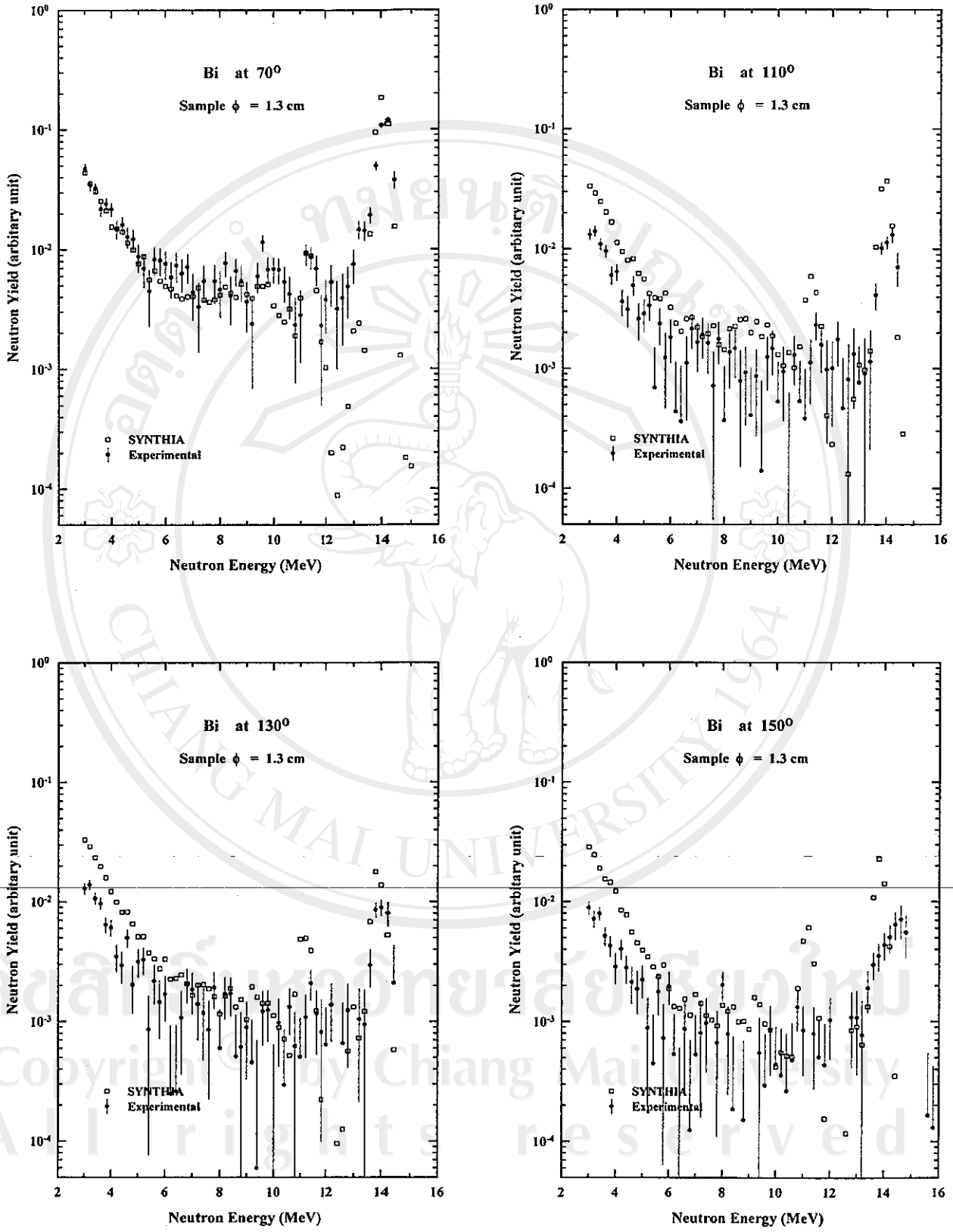
ดังนั้นเมื่อใช้วัตถุตัวอย่างขนาดเล็ก และใช้เวลาเก็บข้อมูลไม่มากเพียงพอที่จะทำให้ทั้งสองกรณีมีความแตกต่างกันในเชิงสถิติแล้ว เมื่อนำมาลบกันก็จะทำให้มีความคลาดเคลื่อนสูง



รูปที่ 40 ผลการจำลองโดยใช้โปรแกรม SYNTHIA เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง ของวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3 ซม ที่มุมกระเจิง 30 และ 50 องศา

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สร.
539.7213
ส 446 ก
เลขทะเบียน.....เลขหมู่.....
สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยเชียงใหม่



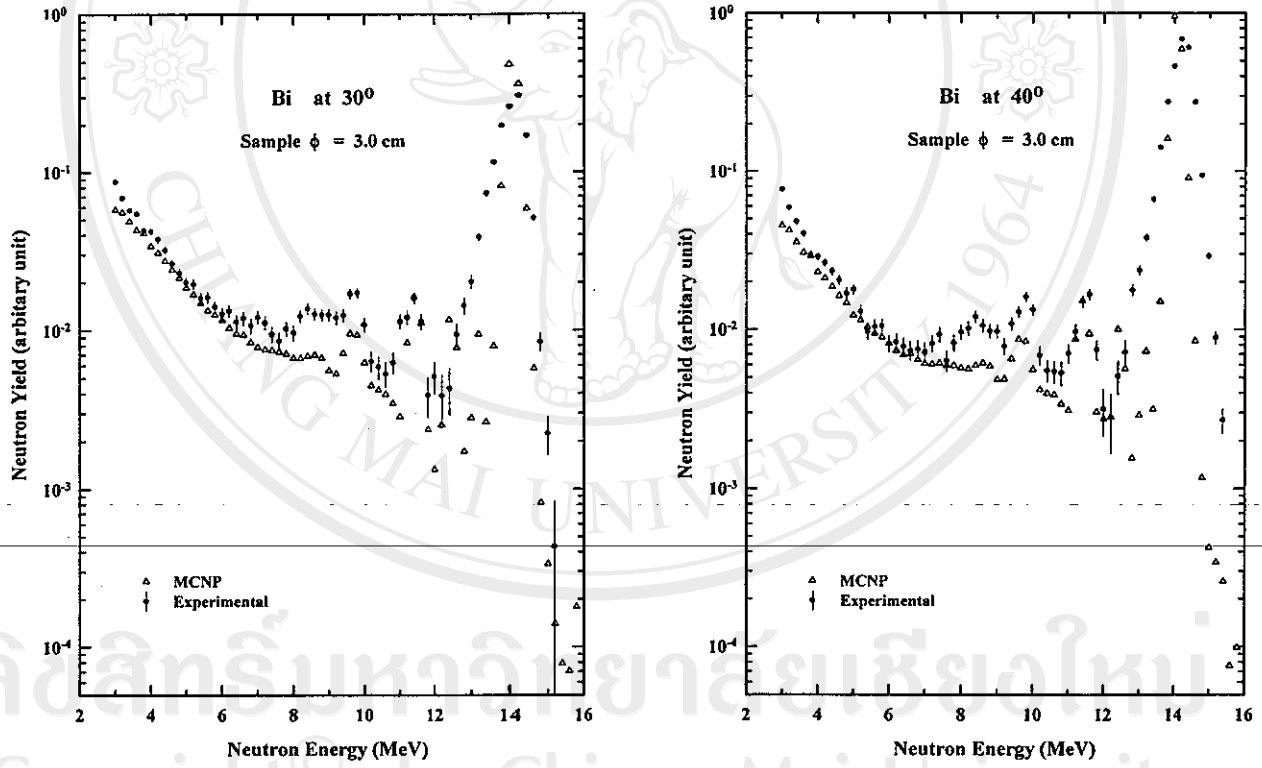
รูปที่ 41 ผลการจำลองโดยใช้โปรแกรม SYNTHIA เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง ของวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3 ซม ที่มุมกระเจิง 70 110 130 และ 150 องศา

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ผลของการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP เทียบกับผลที่ได้จากการทดลองจริง

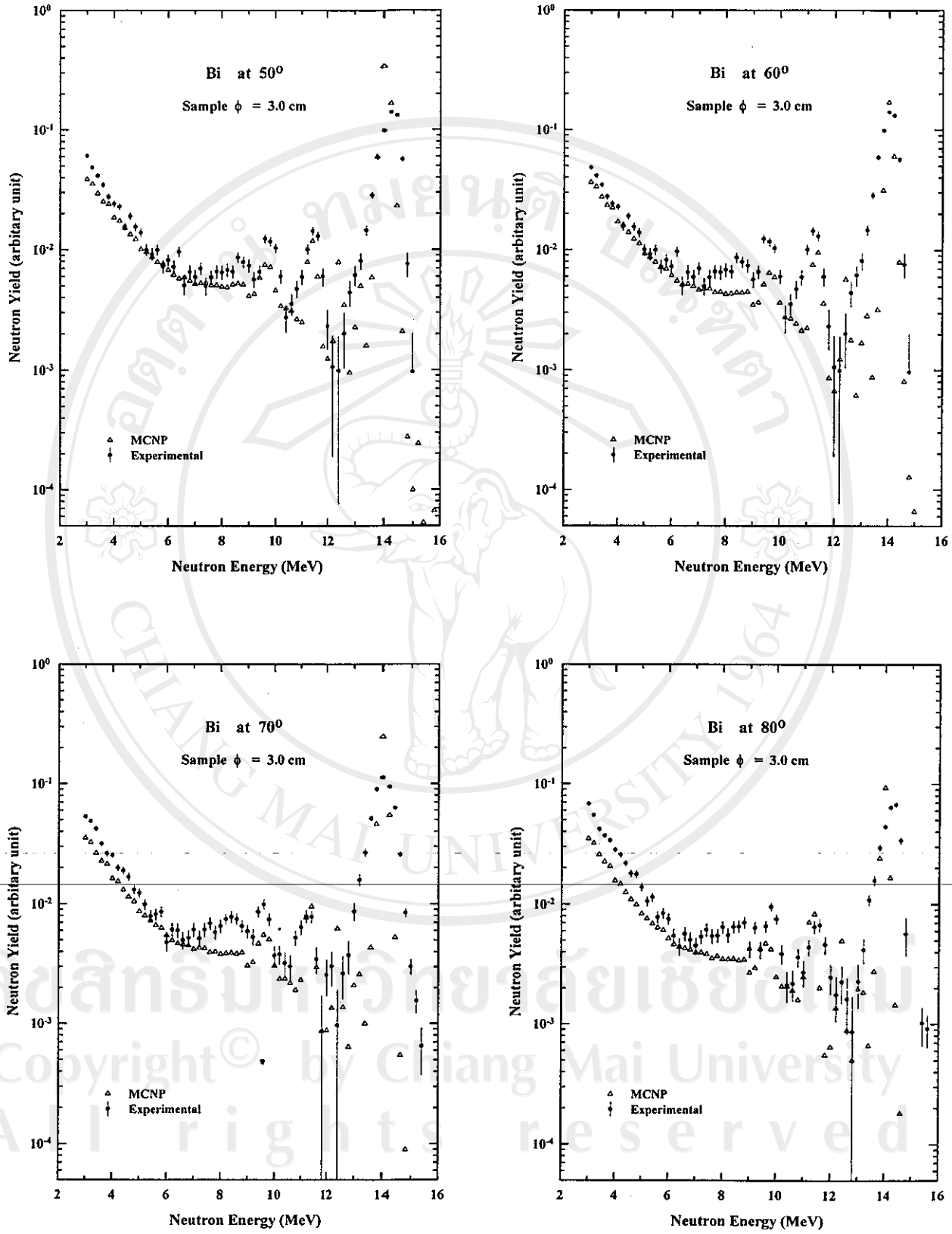
3.9 เมื่อวัตถุตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร

จากรูปที่ 41 ถึง 44 พบว่า ตลอดทุกมุมกระเจิงกระเจิง ผลของการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP เทียบกับเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงแล้ว พบว่าสอดคล้องกันเหมือนกับในกรณีใช้โปรแกรม SYNTHIA ยกเว้นแต่ที่บริเวณพลังงานของนิวตรอนประมาณ 12 MeV ซึ่งปรากฏลักษณะของพีค แต่ผลการจำลองจากโปรแกรม SYNTHIA ไม่มีปรากฏให้เห็น ทั้งนี้อาจจะเนื่องจากว่าโปรแกรม MCNP ใช้ฐานข้อมูล JENDL-FUSION FILES ซึ่งทันสมัยกว่า และประกอบด้วยข้อมูลที่สัมพันธ์กับค่า DDX โดยตรง



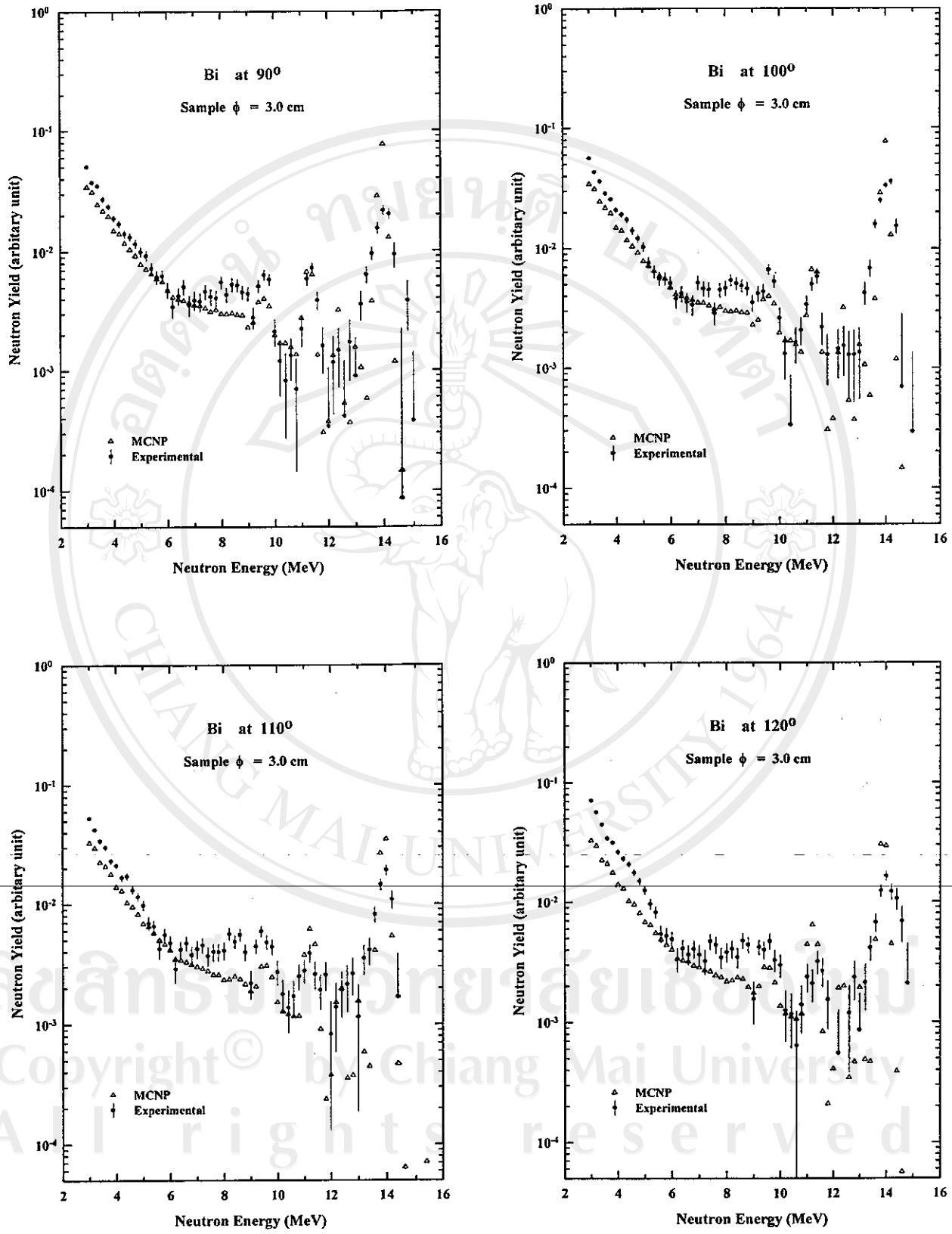
รูปที่ 41 ผลการจำลองโดยใช้โปรแกรม MCNP เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง ของวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.0 ซม ที่มุมกระเจิง 30 40 50 และ 60 องศา

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



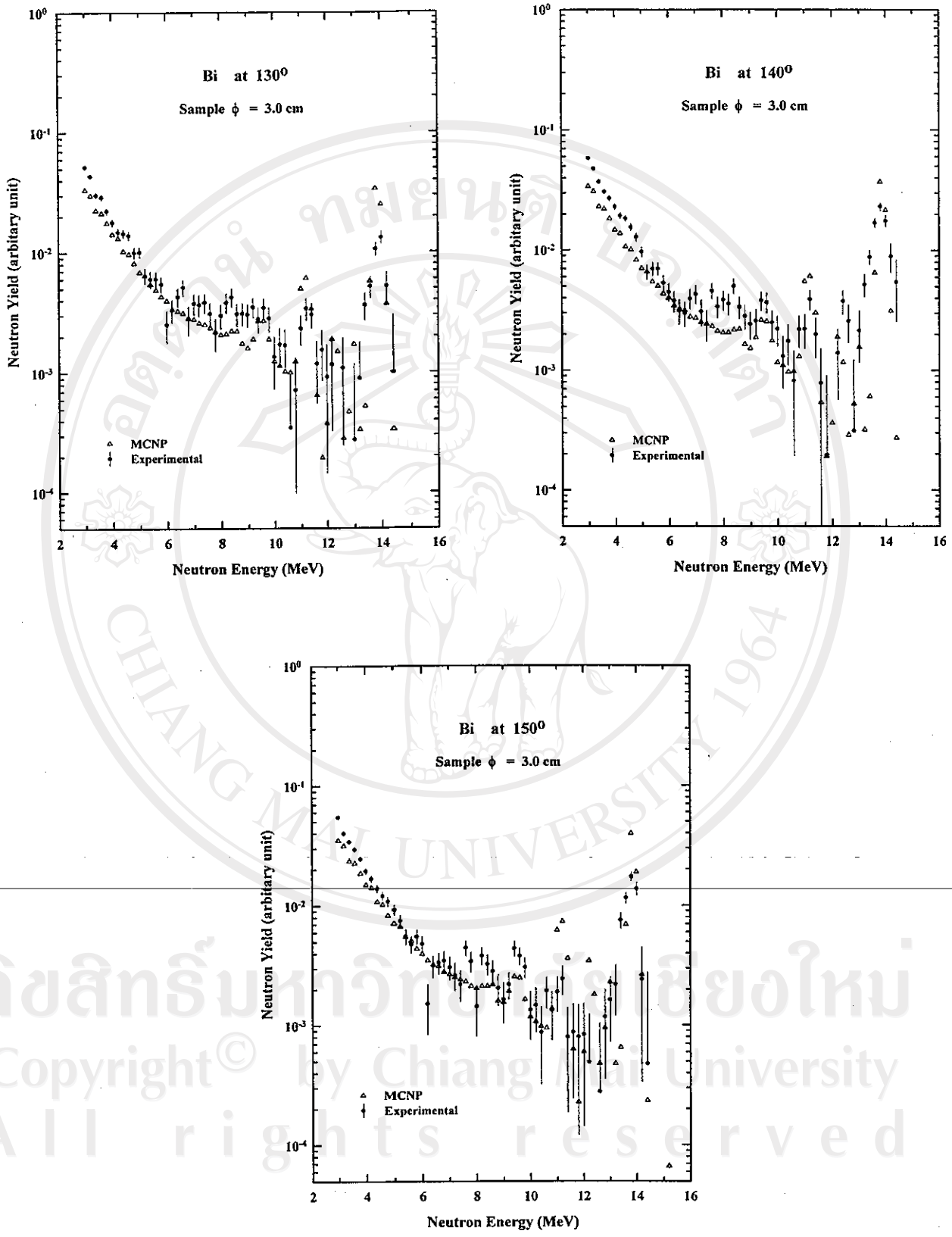
รูปที่ 42 ผลการจำลองโดยใช้โปรแกรม MCNP เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง ของวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.0 ซม ที่มุมกระเจิง 70 80 90 และ 100 องศา

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 43 ผลการจำลองโดยใช้โปรแกรม MCNP เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง ของวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.0 ซม ที่มุมกระเจิง 90 100 110 และ 120 องศา

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



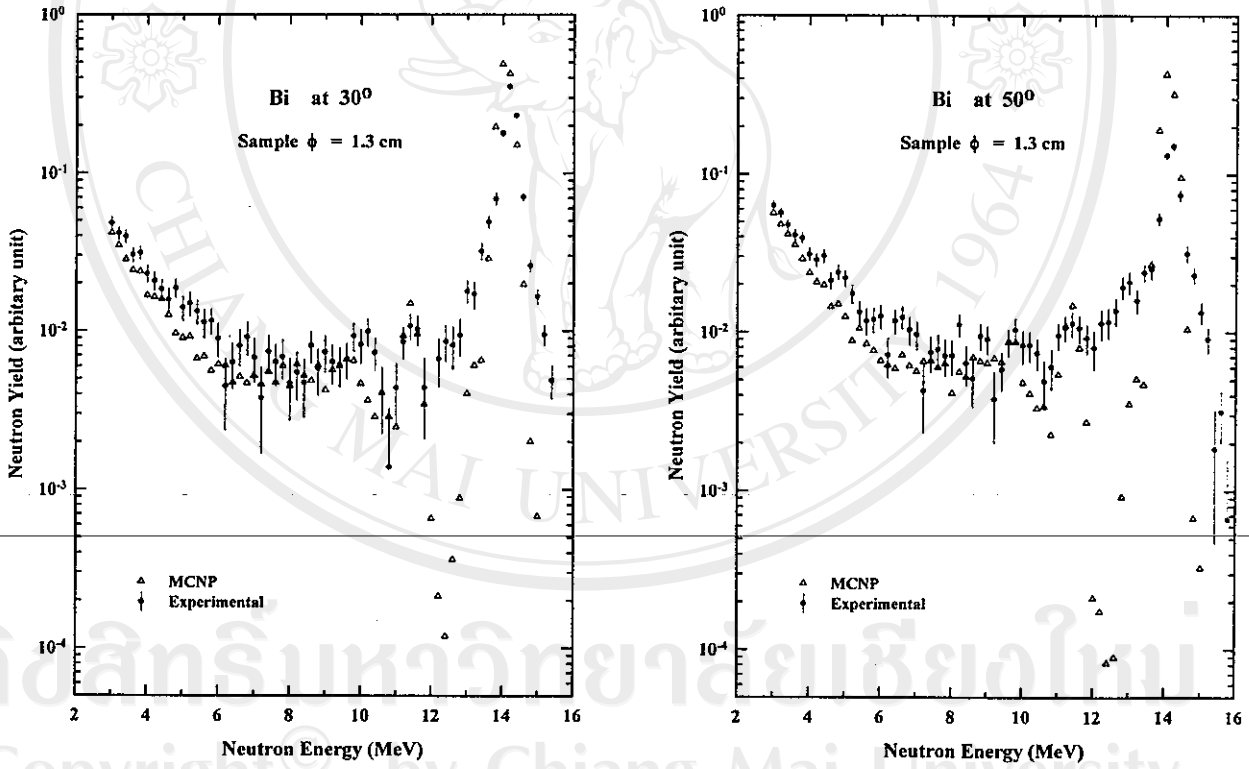
รูปที่ 44 ผลการจำลองโดยใช้โปรแกรม MCNP เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง ของวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.0 ซม ที่มุมกระเจิง 130 140 และ 150 องศา

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3.10 <u>เมื่อวัตถุตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3 เซนติเมตร</u>

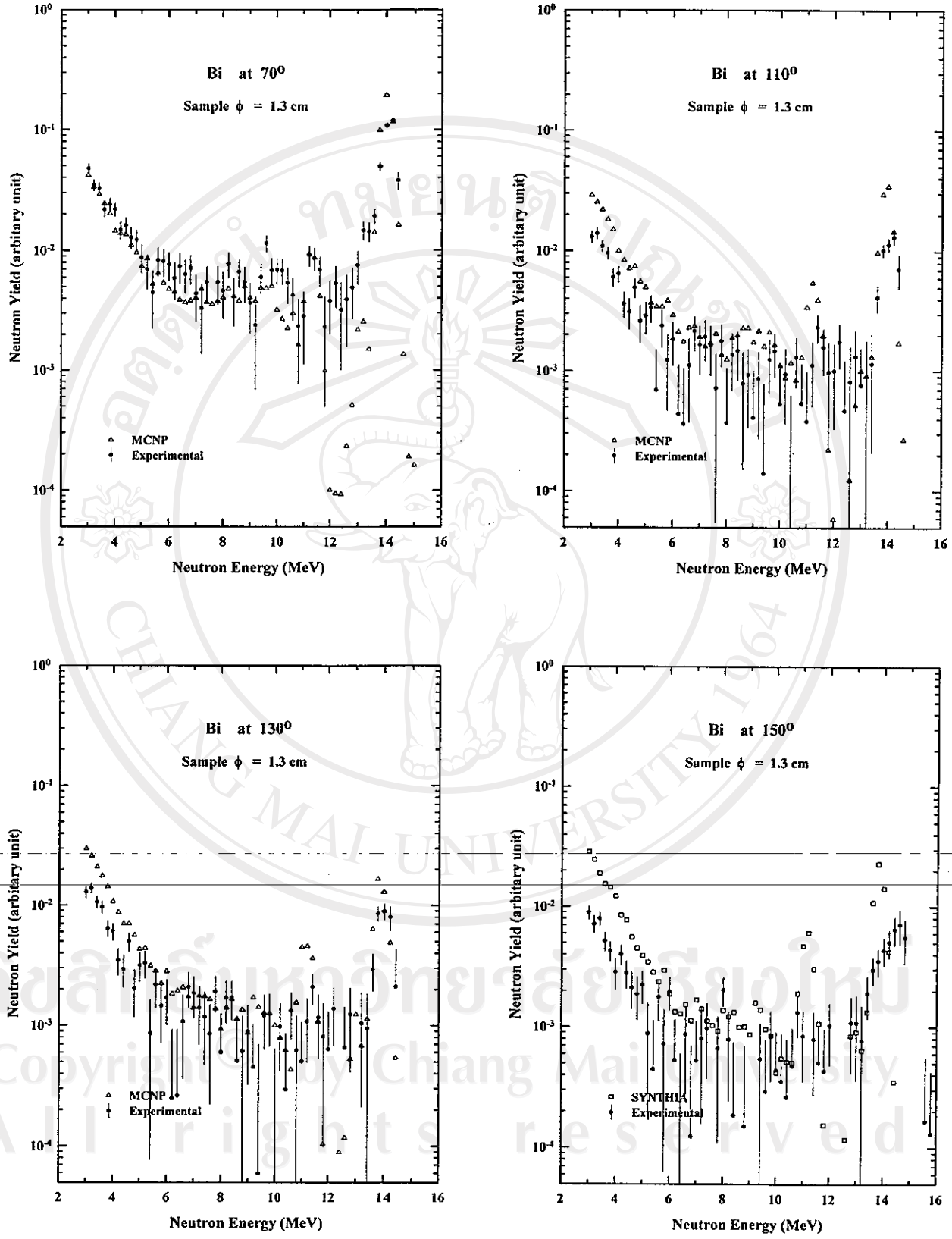
จากรูปที่ 45 พบว่า ผลของการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP เทียบกับเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงแล้ว พบว่าให้ผลลัพธ์เช่นเดียวกับในกรณีใช้โปรแกรม SYNTHIA ในหัวข้อ 3.8 กรณีที่มุมกระเจิงต่ำๆ คือ 30,50 และ 70 องศา

แต่สำหรับกรณีที่มุมกระเจิงสูงๆ พบว่าไม่สอดคล้องกัน ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 46 ซึ่งคงเนื่องมาจากสาเหตุเดียวกัน



รูปที่ 45 ผลการจำลองโดยใช้โปรแกรม MCNP เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง ของวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3 ซม ที่มุมกระเจิง 30 และ 50 องศา

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 46 ผลการจำลองโดยใช้โปรแกรม MCNP เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง ของวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3 ซม ที่มุมกระเจิง 70 110 130 และ 150 องศา

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ผลของการจำลองด้วยโปรแกรม SYNTHIA และโปรแกรม MCNP เทียบกับผลที่ได้จากการทดลองจริง เมื่อวัตถุตัวอย่างมีขนาดต่างๆ และนิวตรอนปนเปื้อนที่มีระดับต่างกัน

3.11 ปัญหาประสบ

หลังจากที่ได้ทดลองวัดค่า DDX (ยังไม่ได้แก้ไขผลของการกระเจิงหลายครั้งและการลดทอนของฟลักซ์นิวตรอน) แต่เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองที่ด้วยโปรแกรม SYNTHIA ดังแสดงในรูปที่ 47 และเปรียบเทียบกับผลการจำลองที่ด้วยโปรแกรม MCNP ดังแสดงในรูปที่ 48 กลับพบว่าไม่สอดคล้องกัน คือในช่วงพลังงานต่ำ ตั้งแต่ 3.0-6.0 MeV ค่าที่วัดได้ต่ำกว่าค่าจากการจำลองมาก แต่เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Takahashi และคณะ ซึ่งเป็นที่ยอมรับและใช้อ้างอิงในงานด้านนี้(ค่าเหล่านี้ได้แก้ไขผลของการกระเจิงหลายครั้งและการลดทอนฟลักซ์แล้ว)กลับพบว่าให้ผลที่สอดคล้องกัน

และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองครั้งที่ผ่านมาในรูปที่ 49 ก็พบว่าในช่วงพลังงานดังกล่าว ค่าที่ได้ในทดลองครั้งนี้ต่ำกว่ามาก จากผลการเปรียบเทียบดังกล่าวในข้างต้นทำให้คาดการณ์ได้ว่าผลกระทบจากนิวตรอนปนเปื้อนมีค่าลดลงมาก ดังนั้นจึงไม่สอดคล้องกับผลการทดลองครั้งที่ผ่านมา และสาเหตุที่จะทำให้ผลกระทบส่วนนี้น้อยลงได้ ก็คือแหล่งกำเนิดนิวตรอนปฐมภูมิอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและลักษณะการกระจายของพลังงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าส่วนที่เป็นนิวตรอนปนเปื้อนนั้นลดลง ซึ่งอาจจะเป็นไปได้เพราะตลอดเวลาที่ผ่านมาระบบการวัดพลังงานนิวตรอนได้รับการปรับปรุงประสิทธิภาพหลายประการ คือ

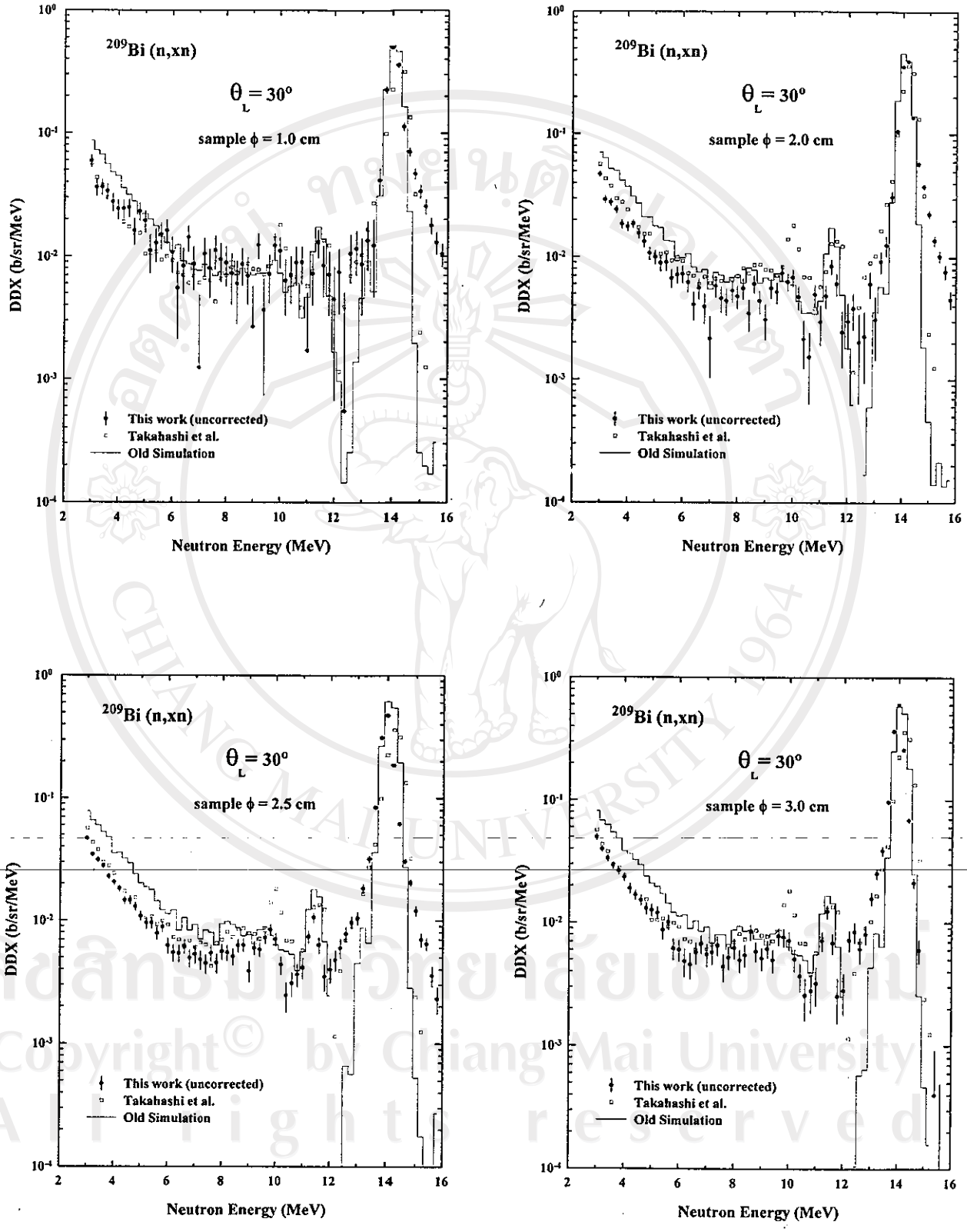
- ระบบคอลลิเมเตอร์ ได้เพิ่มเติมบางส่วนเพื่อลดนิวตรอนที่กระเจิงมาจากวัสดุรอบข้าง
- ตำแหน่งของเป้าตริเตียม เนื่องจากได้เปลี่ยน Pick off ซึ่งเป็นอุปกรณ์สร้างสัญญาณเริ่มต้น (Start) ให้แก่ระบบอิเล็กทรอนิกส์
- แท่งกำบัง(Shadow bar) ที่ทำหน้าที่กำบังไม่ให้นิวตรอนปฐมภูมิผ่านไปเข้าหัววัดโดยตรง ซึ่งได้เปลี่ยนจากเหล็กมาเป็นทังสเตนและทองแดง

3.12 การแก้ไขและผลลัพธ์

ได้ทดลองวัดสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดนิวตรอนใหม่ โดยพิจารณานิวตรอนปนเปื้อนเป็นพิเศษ ซึ่งพบว่าระดับของนิวตรอนปนเปื้อนในสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดนิวตรอนที่วัดใหม่ ต่ำกว่าเดิมมากเกือบ 2 เท่าตัว ดังเห็นได้จากรูปที่ 50 ซึ่งเป็นไปตามที่คาดไว้

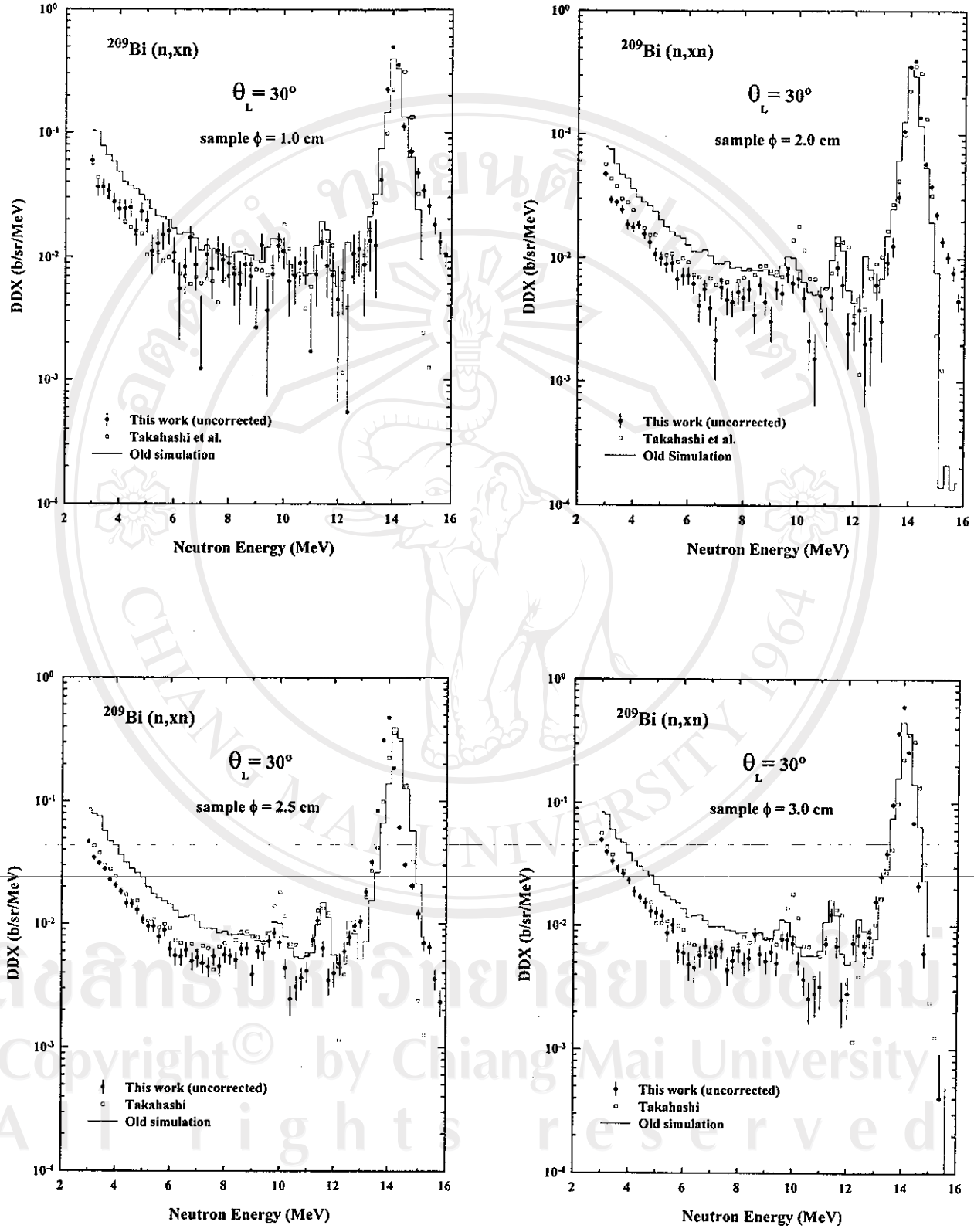
หลังจากนั้นก็ทำการจำลองใหม่โดยใช้สเปกตรัมของแหล่งกำเนิดนิวตรอนใหม่ ซึ่งผลการจำลองใหม่ที่ได้นี้ทั้งจากโปรแกรม SYNTHIA และ MCNP สอดคล้องกับผลการทดลองจริงที่วัดได้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



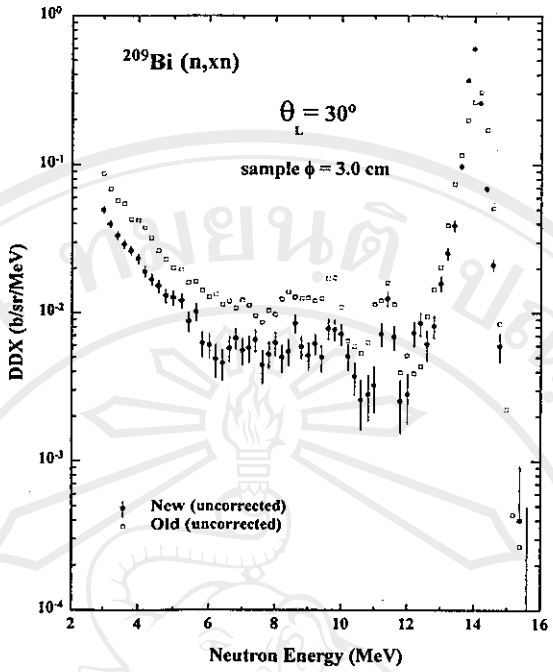
รูปที่ 47 ผลการจำลองโดยใช้โปรแกรม SYNTHIA เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง ของวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.0 2.0 2.5 และ3.0 ซม ที่มุมกระเจิง 30 องศา เมื่อใช้สเปกตรัมของแหล่งกำเนิดนิวตรอนที่วัดได้เดิม

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

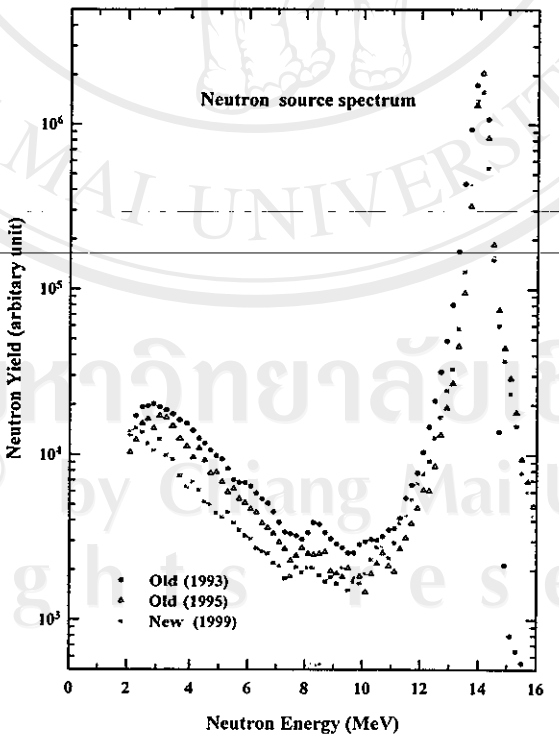


รูปที่ 48 ผลการจำลองโดยใช้โปรแกรม MCNP เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง ของวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.0 2.0 2.5 และ3.0 ซม ที่มุมกระเจิง 30 องศา เมื่อใช้สเปกตรัมของแหล่งกำเนิดนิวตรอนที่วัดได้เดิม

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

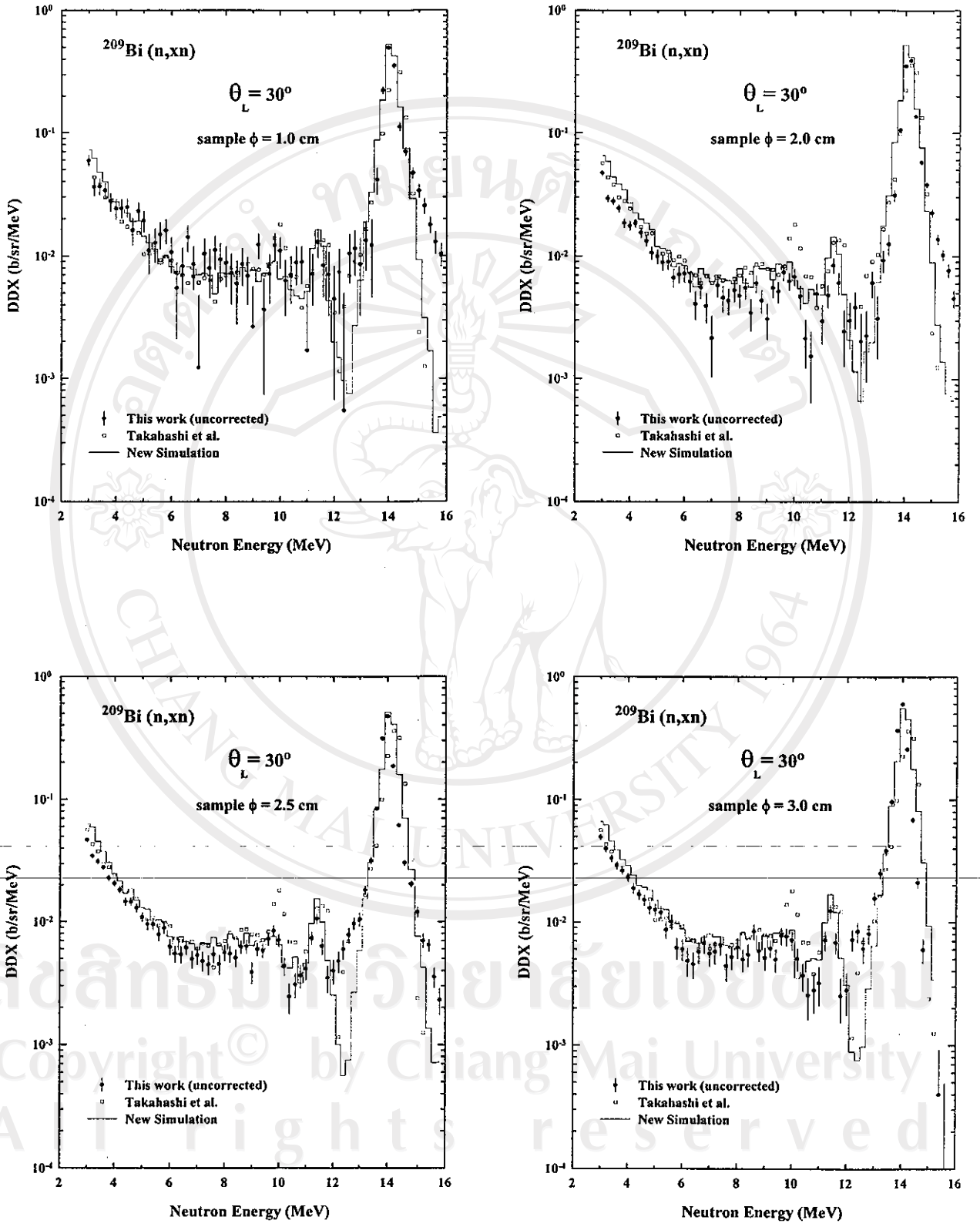


รูปที่ 49 ค่า DDX ที่วัดได้จากการทดลองจริง ของวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.0 ซม ที่มุมกระเจิง 30 องศา โดยเปรียบเทียบระหว่างครั้งเก่ากับครั้งใหม่ (ยังไม่ได้แก้ไขผลจากการเกิดการกระเจิงหลายครั้งและการลดทอนของฟลักซ์นิวตรอน)



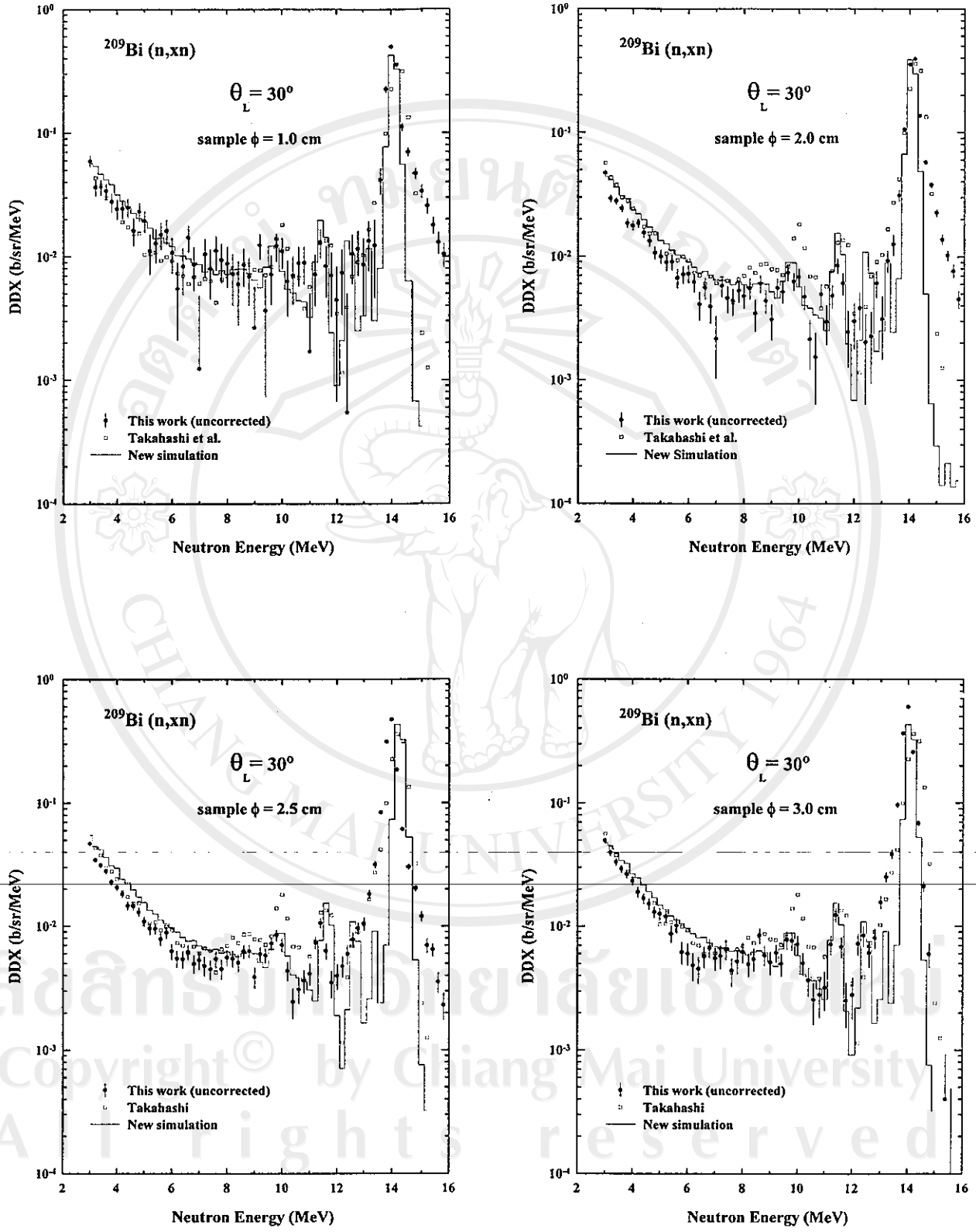
รูปที่ 50 สเปกตรัมของแหล่งกำเนิดนิวตรอนที่วัดได้จากการทดลองจริง โดยเปรียบเทียบระหว่างครั้งเก่ากับครั้งใหม่

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 51 ผลการจำลองโดยใช้โปรแกรม SYNTHIA เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง ของวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.0 2.0 2.5 และ3.0 ซม ที่มุมกระเจิง 30 องศา เมื่อใช้สเปกตรัมของแหล่งกำเนิดนิวตรอนที่วัดได้ใหม่

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 52 ผลการจำลองโดยใช้โปรแกรม MCNP เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง ของวัตถุตัวอย่าง Bi ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.0 2.0 2.5 และ3.0 ซม ที่มุมกระเจิง 30 องศา เมื่อใช้สเปกตรัมของแหล่งกำเนิดนิวตรอนที่วัดได้ใหม่

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

บทที่ 4
สรุป

การศึกษาผลของการกระเจิงหลายครั้งและการลดทอนฟลักซ์ของนิวตรอน ด้วยเทคนิคมอนติคาร์โล โดยใช้โปรแกรม SYNTHIA ซึ่งเขียนขึ้นสำหรับงานทางด้านนี้โดยเฉพาะ และประยุกต์โปรแกรมคอมพิวเตอร์ MCNP ซึ่งเป็นโปรแกรมเอนกประสงค์ แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้บิสมัทขนาดเล็กกว่าเดิม 4 เท่า สามารถลดผลของการกระเจิงหลายครั้งได้ประมาณร้อยละ 85 ถึง 90 และผลของการลดทอนฟลักซ์ของนิวตรอนได้ประมาณร้อยละ 90 ถึง 95

สำหรับการศึกษาผลจากนิวตรอนปนเปื้อนนั้นจะขึ้นอยู่กับระดับขนาดของจำนวนนิวตรอนปนเปื้อนในสเปกตรัมของแหล่งกำเนิด กล่าวคือถ้ายิ่งมีระดับขนาดของนิวตรอนปนเปื้อนอยู่สูงมากก็จะส่งผลกระทบมากตามลำดับ และรุนแรงกว่าผลจากการเกิดการกระเจิงหลายครั้ง แต่ผลจากนิวตรอนปนเปื้อนนี้จะไม่ขึ้นกับขนาดของวัตถุตัวอย่าง เนื่องจากบิสมัทเป็นธาตุหนักดังนั้นโอกาสการกระเจิงแบบยืดหยุ่นสำหรับนิวตรอนพลังงานต่ำจึงมีค่าสูง และโดยเฉพาะการกระเจิงที่มุมต่ำ ๆแล้วยิ่งมีมากขึ้น

การเปรียบเทียบผลการจำลองการกระเจิงหลายครั้งและการลดทอนฟลักซ์ของนิวตรอนจากโปรแกรม SYNTHIA กับ MCNP พบว่าให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกัน แม้ว่าจะแตกต่างกันในบางช่วงของพลังงานนิวตรอน ทั้งนี้คงเป็นเพราะว่าใช้ข้อมูลทางนิวเคลียร์ที่แตกต่างกัน และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงในการวัดค่า DDX แล้ว พบว่าโดยส่วนใหญ่สอดคล้องกันดี จะแตกต่างก็เฉพาะในช่วงของพลังงานนิวตรอนประมาณ 6 ถึง 10 MeV ซึ่งอาจจะเป็นเพราะค่า cross section ของช่วงพลังงานนี้มีค่าต่ำ ทำให้ค่าที่ได้มาจากการวิเคราะห์จากผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อนทางสถิติสูง

ข้อเสนอแนะ คือ ควรจะทำการการศึกษาผลของการกระเจิงหลายครั้งและการลดทอนฟลักซ์ของนิวตรอน ด้วยเทคนิคมอนติคาร์โลสำหรับธาตุเบา อาทิ ไฮโดรเจน คาร์บอน และธาตุปานกลาง อาทิ เหล็ก วานาเดียม รวมทั้งทดสอบด้วยการใช้รูปทรงกระบอก 2 ชั้นที่แกนกลางสามารถถอดประกอบได้ ซึ่งในอดีตนิยมใช้ในการศึกษาทางด้านนี้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เอกสารอ้างอิง

1. M.Baba, S.Matsuyama, T.Ishikawa, M.Chiba, S.Sakase and N.Hirakawa, Nucl. Instr. And Meth., A366 (1995) 354.

2. Los Alamos National Laboratory, "RSIC COMPUTER CODE COLLECTION",(1994)

3. A.Pavlik, private communication (1988).

4. T.Vilaithong, S.Singkarat, U.Tippawan, D.Boonyawan, S.Aumkaew and S.Ratanarin, "A Neutron Collimator System for Nuclear Energy Measurement Program," Report submitted to National Research Council (1995).

5. A.Takahashi, E.Ichimura, Y.Sasaki and H.Sugimoto, J. Nuc. Sci Technol.25 (1988) 215.

6. T.Vilaithong, U.Tippawan and S.Singkarat, "A High Resolution of Double Differential Neutron Emission Cross Section for ^{209}Bi at 14 MeV Incident Energy,"Italian Physical Society,Conference Proceedings, 59, Part I (1997) 574.

7. U.Tippawan, S.Singkarat, S.Ratanarin and T.Vilaithong,"A Study of Multiple Scattering and Flux Attenuation of Fast Neutrons Inside a Cylindrical Sample by Using Monte Carlo Simulation Technique,The 7th Nuclear Science and Technology Conference,(1998)628.

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ภาคผนวก

1. แหล่งกำเนิดนิวตรอนปฐมภูมิ (Primary Neutron Source)

-รูปร่างและลักษณะการกระจายพลังงานของนิวตรอนปฐมภูมิ

ในทางทฤษฎี พลังงานของนิวตรอนปฐมภูมิที่เกิดจากปฏิกิริยารวมตัว(Fusion reaction) แบบดิวเทอรอนกับตริเตียม(d-T) จะมีลักษณะเป็นแบบพลังงานเดี่ยว(monoenergetic) แต่ในทางการทดลองจริงแล้วพลังงานของนิวตรอนจะมีลักษณะการกระจายเป็นรูปเกาส์เซียนพีค (Gaussian peak) เนื่องจากผลกระทบต่าง ๆดังต่อไปนี้

(ก) ผลเนื่องจากการลดทอน (attenuation) กล่าวคือพลังงานของดิวเทอรอนตกกระทบกับเป้าตริเตียมชนิด solid target ซึ่งเป็นเป้าแบบที่ตริเตียมถูกดูดกลืนอยู่ในชั้นของโลหะที่มีสมบัติดูดกลืนก๊าซกลุ่มไฮโดรเจนได้ดี เช่น ไททาเนียม เป็นต้น ดังนั้นดิวเทอรอนที่เข้าไปทำปฏิกิริยากับตริเตียม จะถูกลดทอนพลังงานลงในชั้นความหนาของเป้า

(ข) ผลเนื่องจากมุมตกกระทบของดิวเทอรอนที่เปลี่ยนไป เพราะเกิดการกระเจิงหลายครั้ง (multiple scattering) ภายในเป้า ทำให้มุมกระเจิงของนิวตรอนที่ออกมาคลาดเคลื่อนไปจากความจริง

(ค) ผลเนื่องจากขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลำดิวเทอรอนที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ขนาดของบีมมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตร

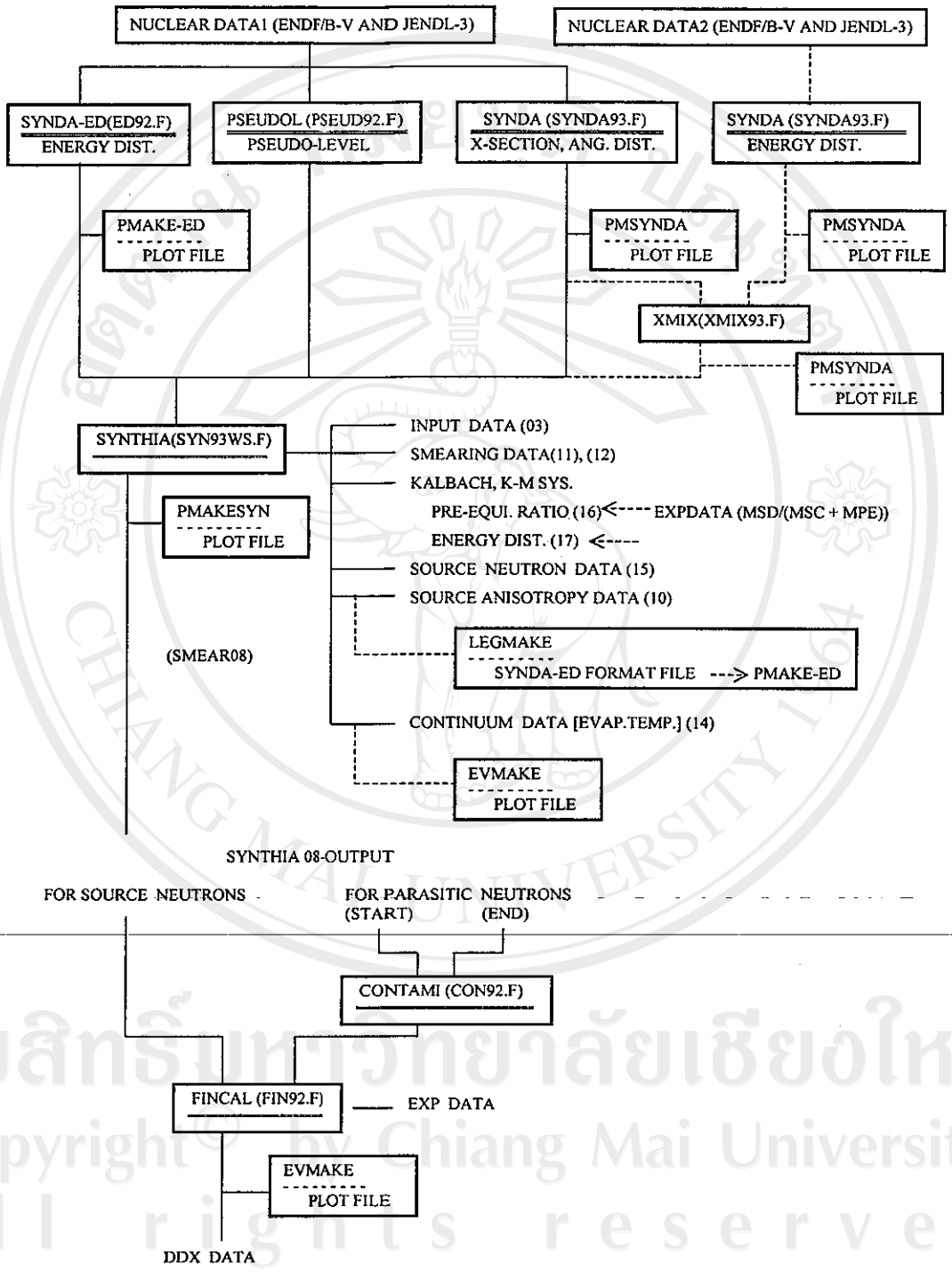
(ง) ผลเนื่องจากการกระเจิงหลายครั้งของนิวตรอนภายในเป้า ทำให้พลังงานและมุมกระเจิงของนิวตรอนที่ออกมาคลาดเคลื่อนไปจากความจริง

นอกจากนี้ผลเนื่องมาจากกระเจิงหลายครั้งของนิวตรอนภายในที่รองรับ(Supporting Backing) ซึ่งชั้นของไททาเนียม-ตริเตียมเคลือบติดอยู่ รวมทั้งที่ยึดเป้าตริเตียม อาทิ วงแหวนยาง (O-ring)และท่อนำลำอนุภาคดิวเทอรอน และจากการ in-scatter ของนิวตรอนทุติยภูมิภายใน collimator (Vilaithong et al., 1995) รวมทั้งอาจจะเป็นนิวตรอนที่เกิดจาก parasitic reaction (d-D, d-C และ d-O) ซึ่งทำให้ลักษณะการกระจายของพลังงานมีค่าแผ่ออกไปในช่วงพลังงานต่ำ ๆ

จากการทดลองวัดสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดนิวตรอนโดยตรงจากเป้าตริเตียม โดยใช้หัววัดนิวตรอนชนิด NE-213 ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5.1 เซนติเมตร หนา 5.1 เซนติเมตร ซึ่งนำไปวางแทนที่ในตำแหน่งของหัววัดนิวตรอนหลัก โดยที่สเปกตรัมของแหล่งกำเนิดนิวตรอนมีการกระจายของพลังงานตั้งแต่ 3.0 ถึง 15.0 MeV ซึ่งเป็นการผสมอยู่ด้วยกันของนิวตรอนแท้พลังงาน 14 MeV (purely 14 MeV neutrons) ที่มีลักษณะเป็นพีค และนิวตรอนปนเปื้อน (contaminant neutrons) ที่มีพลังงานตั้งแต่ 3.0 ถึง 12.0 MeV ส่วนนิวตรอนที่บริเวณไหล่ที่มีพลังงานประมาณ 13 MeV เกิดจากการกระเจิงของนิวตรอนทุติยภูมิภายในหัววัดนิวตรอนเอง (Takahashi et al.,1988) ซึ่งไม่เกี่ยวข้องดังนั้นจึงตัดออกไป

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2 รายละเอียดเกี่ยวกับโปรแกรม SYNTHIA



รูปแผนผังการทำงานของโปรแกรม SYNTHIA

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

โปรแกรม SYNTHIA ประกอบด้วยโปรแกรมภาษาฟอร์แทรนที่สำคัญ คือ

1. SYNDA-ED(ED92.F) สำหรับอ่านและจัดข้อมูล Energy distribution จากฐานข้อมูลนิวเคลียร์ ENDF/B-V JENDL-3

2. SYNDA(SYNDA93.F) สำหรับอ่านและจัดข้อมูล Total cross section และ Angular distribution จากฐานข้อมูลนิวเคลียร์ ENDF/B-V JENDL-3

3. PSEUDOL(PSEUD92.F) สำหรับอ่านและจัดข้อมูล Pseudo-level จากฐานข้อมูลนิวเคลียร์ ENDF/B-V JENDL-3

4. SYNTHIA(SYN98WS.F) สำหรับจำลองการเกิดการกระเจิงหลายครั้งและการลดทอนฟลักซ์ของนิวตรอนพลังงานสูง

5. โปรแกรมสนับสนุน ได้แก่ XMIX93.F , CON92.F , FIN92.F และโปรแกรมสำหรับผลกราฟต่างๆ ซึ่งบางโปรแกรมเขียนขึ้นเฉพาะกับระบบการทดลองของมหาวิทยาลัย Tohoku จึงต้องเขียนโปรแกรมใหม่มาเสริมแทน

Input file ของ SYN98WS.F คือ INPUT DATA (03)

```
BI-209 EN = 14.1 MEV ;for Fast Neutron Research Facility
3 5 1 1 0 0
1
0.5968
1.52  3.505  18.0  1200.0   0.  0.
0.2  0.2
0.14  2.0   16.0
5  1  2
2  5.E6  1  30000
5
17
30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150
0.028337 208.98
7
 0.0  -0.8964  -2.5645  -2.6017  -2.617  -2.822  -2.85
 2    2      2      2      2      2      4
 0    0      0      0      0      0      7
 0  0  1
10.0  1          2  0
KM
```

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

```
0  1  1
4  0  1 90  0
90.0
2  1. 1
0.03
1    1     1    1     1    1    1
```

คำอธิบายเกี่ยวกับ Input fileของ SYN98WS.F

```
--For SYNTHIA 93
      Main Input Parameters for SYNTHIA [File:03] (cm, MeV unit)
No
1     TITLE   title, arbitrary (A80)
2     ICM     =3; calculation in energy domain, recommended
              =4; same as 3 but consider the time difference in source- target distance, recommended
              =1,2; Calculation in TOF domain, not available in this version
      INS     any, (not used)
      IEMPH   =1; weighted tracking for some reaction
              =0; no weight
      ISNS1   =1; start up the subroutine to read in the energy spectrum data,
              SYNDA-ED output(file:01) [SUBROUTINE READAP]
      ISNS2   =1; start up the subroutine for calculation of evaporation
            spectrum [SUBROUTINE EVAPSP]
      ISM     =0; no smearing
              =1; smear both the REAL and IDEAL spectra with the same resolution function
[file: 11--REAL, IDEAL]
              =2; smear the REAL and IDEAL spectra with different resolution functions
[file: 11--REAL, file:12 IDEAL]
3 (ISNS1=1)
      NNK1    number of the energy spectrum data, SYNDA-ED output
            read by [SUBROUTINE READSP]
4     DAGL    half of the angle subtended by the detector (deg.)
5     RS      radius of the sample
      HS      half height of the sample
      SD      sample-target center distance
      FPATH   sample-detector distance (flight path)
      SR      half-size of the beam spot, 3of Gaussian function
      SL      full target length
6     CWIDTH  energy mesh of output spectra
      SWIDTH  energy mesh of output for incident neutrons energy spectrum
7     EO      energy of incident charged-particle beam
```

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

EMIN cutoff energy of secondary neutrons

EMAX maximum energy of secondary neutrons to consider

8 NK maximum number of collisions within sample (<6)

NF =0; count all the events which collided more than NK times

=1; abandon the events which collided more than (NK+1) times, usually recommended

INMULTI =0; no considering neutron multiplication reaction

=1; consideration of neutron multiplication reactions (parameter inputs)

=2; same as 1 but data are input by [SYNDA (sub-program)] table, see the figure of the program system

9 IHS terminate the calculation for STR(IHS)>XLIMT

XLIMT number of history

NCAL =0; calculate only the neutron spectrum in the sample, incident flux attenuation and fluence factor Fx

=1; calculate multiple-scattering

TLIMT limit of the CPU time

********** Meanings of STR(i) **********

STR(1) total histories

STR(2) number of total incident neutrons = $\int S(\phi).(R/r)^2$, the spectrum of incident neutrons is SW(1,Y)

STR(3) number of neutrons which experienced collision, $= \int S(\phi) \cdot (R/r)^2 \cdot \exp(-\Sigma t \cdot l) \cdot t$

STR(4) number of neutrons which experienced no collision, $= \int S(\phi) \cdot (R/r)^2 \cdot \exp(-\Sigma t \cdot l) \cdot (1-\Sigma t)$, recommended

STR(5) number of neutrons which were not incident on sample

STR(6) number of neutrons absorbed

STR(8) number of neutrons lower than EMIN

STR(9) number of neutrons collided more than NK times

****

10 NOUT output of collision distribution in the sample

=0; no output

=1; output the history distribution

=2; output the IDEAL flux

=3; output the REAL flux

=4; output the IDEAL reaction rate

=5; output the REAL reaction rate

11 NDT1 number of detectors (scattering angles),

=0; 20 points with equal step in cos

12 (NDT=1) (THETA(I), I=1, NDT1) scattering angles (deg)

********** 13 ~ 21 Reaction Control Cards **********

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

13 D(14) sample atomic or molecular density (atoms/barn Ecm)

ATM(0) sample mass number

14 IRMAX number of reaction type to consider;

0 for single atom sample, +10 for compound sample

15 (Q(I), I=1,IRMAX); Q-vale of I-th reaction

16 (STAD(I), I=1,IRMAX); angular distribution of I-th reaction

=0; isotropic in CM system

=1; isotropic in Lab system

=2; provide data in CM system

=3; provide data in Lab system

=4; Kalbach-Mann systematics or

Kalbach systematics

17 (STED(I),I=1,IRMAX); energy distribution of I-th reaction

=0; calculate by the kinematics, used for STAD=0~3

=1-5; type of energy spectrum for STAD=1,3

1; evaporation spectrum

2; numerical data 1 (1st data of SYNDA-ED output)

3; numerical data 2 (2nd data of SYNDA-ED output)

4; numerical data 3 (3rd data of SYNDA-ED output)

5; numerical data 4 (4th data of SYNDA-ED output)

6; pseudo-level, isotropic in CM (STAD=0)

7; Kalbach-Mann systematics (STAD=4) ; Kalbach systematics

8; Phase-space, not available in this version

18 (IRMAX>10) (ATM(I), I=1,IRMAX-10); mass number for I-th reaction channel

19 IFSI =1; adopt phase-space for the IRMAX-th reaction channel, not available

IPSU =1; adopt pseudo-levels for the IRMAX-th reaction channel, 30 levels

IKM =1; adopt Kalbach-Mann systematics for the IRMAX-th

channel, < 100 meshes

=2; adopt Kalbach systematics for the IRMAX-th channel, 100 meshes

*NOTE: only one of IFSI, IPSU, IKM can be adopted

20 (IKM=1,2; when Kalbach-Mann or Kalbach systematic is adopted)

EKMLIM low limit of neutron energy to apply Kalbach-Mann or Kalbach systematics

STAD01 angular distribution of the IRMAX-th reaction in the energy region lower than EKMLIM (=STAD(IR))

STED01 energy distribution of the IRMAX-th reaction in the energy region lower than EKMLIM (=STED(IR))

EISO energy of secodary neutrons to switch to isotropic angular distribution

21 (IKM=2; when kalbach-systematic is adopted)

AB mass number of the target

NB neutron number of the target

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ZB atomic number of the target

22 LACOM comment for IDEAL-flux on the IRMAX-th reaction channel (A10)

ex.) IDEA-CONTI, IDEA-4BP.S

23 LEX any, not used

IDATA =0; adopt lethargy unit

=1; adopt energy unit, usually employed

LGD =0; $\sigma(\theta)=\exp(\Sigma_l(2l+1)A_lP_l(\theta))$ or $\exp(\Sigma_lA_lP_l(\theta)$

=1; $\sigma(\theta)=(\Sigma_l(2l+1)A_lP_l(THETA))$ or $(\Sigma_lA_lP_l(\theta)$, usually employed

24 IIS =0; other source reaction, input mass and Q-value in card 28

=1; p-T reaction source

=2; d-T reaction source

=3; d-D reaction source

=4; numerical input (spectrum is independent of incident energy and emission angle)

=5; numerical input (spectrum is dependent of incident energy and emission angle)

NS1 any, not used

N9 =0; neutron source is anisotropic

=1; neutron source is isotropic

NEMIT =0; employ source neutrons to 0 degree

=90;employ source neutrons to around 90 degree

NPOSI =0; horizontal sample orientation

=1; vertical sample orientation

25 (IIS=5) NE, NA number of incident energy, angle for input source energy spectrum

26 (ICM=4) EREF reference energy to take account the flight time difference

(usually primary neutron energy is employed)

27 (NEMIT=90)

ANGNM exact emission angle (ex. 97.5

28 (IIS=0) FA mass of incident particle

FX mass of target

FB mass of neutron

FY mass of residual nucleus

Q5 Q-value of the reaction

29 ITHLIM =0; score all the secondary neutrons irrespective of azimuth angle ϕ

=1; score secondary neutrons only for ϕ <DAGL*PHNORM

=2; score secondary neutrons for ϕ > DAGL*PHNORM with applying weight of $[\exp(-RSS*\Sigma t)/\exp(-SX*\Sigma t)]$

=3; score secondary neutrons with the weight of $[\exp(-RSS*\Sigma t)/\exp(-SX*\Sigma t)]$

NOTE : ITHLIM=0,computer time is shortest but attenuation of outgoing neutronsis overemphasized for θ around 90-deg

=1,most accurate but statistical error becomes large for θ around 90-deg

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

=2&3,results are similar with ITHLIM=1, and statistical error is comparable with ITHLIM=0, recommended, but angular resolution is inferior, then for light elements like CH2, ITHLIM=1 should be used

PHNORM limiting value for FAI, see 29 ITHLIM

IQ =0; no consideration of energy width of incident charged particle beam

=1; consideration of energy width by Gaussian function, but no correlation with the neutron energy and its production point (ex. metal target)

=2; consideration of energy width by uniform distribution, but no correlation with the neutron energy and its production point

=20;consideration of energy width by uniform distribution and correlation with the neutron energy and its production point (gas target)

30 (IQ>1) DE standard deviation or total width for energy width of incdent beam (MeV)

31 (IEMPH=1)

(MULT(I), I=1,IRMAX); weighing factor of the I-th reaction

32 (IMULT=1)

(NMULT(I),I=1,IRMAX); multiplication factor of the I-th reaction

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3 โปรแกรม Monte Carlo N-Particle Transport Code System(MCNP)

การจำลองเหตุการณ์ด้วยเทคนิควิธีมอนติคาร์โล โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ MCNP ซึ่งพัฒนาโดย Radiation Shielding Information Center (RSIC) Oak Ridge, USA เขียนด้วยภาษาฟอร์แทรน โปรแกรมนี้เป็นโปรแกรมเอนกประสงค์ สำหรับการประยุกต์ต่าง ๆที่เกี่ยวกับการคำนวณการส่งผ่านอนุภาค(particle transport)ในวัสดุต่าง ๆ

ไฟล์ต่าง ๆของโปรแกรม MCNP

โดยปกติ MCNP จะต้องมีไฟล์ที่จำเป็นต่อการใช้งานทุกไฟล์อยู่ใน directory เดียวกัน ซึ่งประกอบด้วยไฟล์หลัก ๆดังต่อไปนี้

MCNP	:	source program
XSLISTF	:	list of all available cross section tables
XSDIR1	:	directory of all available cross section table
BMCCS1	:	neutron cross section table
ENDL851	:	neutron cross section table
D91	:	neutron cross section table
MCPLIB1	:	photon cross section table

ส่วนที่สำคัญที่สุดในการทำงานของโปรแกรม MCNP คือ Input file (INP) เพราะเป็นไฟล์ที่กำหนดลักษณะของปัญหาที่ต้องการจะจำลอง และผลลัพธ์ที่ต้องการจะได้จากการจำลองนี้ โดยผู้ใช้จะต้องเขียนไฟล์นี้ขึ้นเองตามรูปแบบที่โปรแกรมได้กำหนดไว้

ส่วนประกอบหลักของ INP สำหรับโปรแกรม MCNP มีดังต่อไปนี้ คือ

1. Cell Cards บ่งบอกถึงรูปร่างและสมบัติต่าง ๆของ cell ประกอบด้วย

-cell material number เป็นตัวเลขสำหรับอ้างถึงชนิดของวัสดุที่บ่งบอกอยู่ใน material card ซึ่งผู้ใช้สามารถกำหนดได้อย่างอิสระ

-cell material density สำหรับบ่งบอกความหนาแน่นของวัสดุ โดยขึ้นกับเครื่องหมายข้างหน้า คือ

ถ้าเป็น + จะหมายถึง atomic density ในหน่วย 10 atom/cm^3

ถ้าเป็น - จะหมายถึง mass density ในหน่วย g/cm^3

-A complete of specification of geometry เป็นตัวเลขสำหรับอ้างถึงชนิดของพื้นผิวที่บ่งบอกอยู่ใน surface card และเครื่องหมาย Boolean: intersection(ที่ว่าง), union(:) และ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

complement(#) เพื่อสร้างเป็นรูปทรงตามที่ต้องการ

-cell parameter(เป็นส่วนเสริม เพื่อให้เห็นได้ชัดเจน กว่าการบ่งบอกใน Data cards)

2. Surface Cards บ่งบอกชนิดของพื้นผิวที่จะนำมาประกอบให้เป็น cell ต่าง ๆตามที่ต้องการ มี 2 ส่วนคือ

-ตัวอักษร ที่บ่งบอกถึงชนิดของพื้นผิว

-ตัวเลข ที่บ่งบอกถึงค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆสำหรับแต่ละชนิดของพื้นผิว

3. Data Cards บ่งบอกข้อมูลต่าง ๆที่เกี่ยวกับชนิดของอนุภาคที่ส่งผ่าน ตัวแปรต่าง ๆของ cell และ surface คุณสมบัติของแหล่งกำเนิดอนุภาค ชนิดและสัดส่วนของวัสดุตัวกลาง รวมทั้งรูปแบบและลักษณะของผลลัพธ์ที่ต้องการได้จากการคำนวณ โดยจะแบ่งย่อยออกเป็นส่วน ๆ

3.1 MODE card มี 4 ประเภท คือ

Mode N สำหรับการส่งผ่านของนิวตรอน

N P สำหรับการส่งผ่านของนิวตรอน และโฟตอนจากการเหนี่ยวนำของนิวตรอน

P สำหรับการส่งผ่านของโฟตอน

E สำหรับการส่งผ่านของอิเล็กตรอน

P E สำหรับการส่งผ่านของโฟตอน และอิเล็กตรอน

N P E สำหรับการส่งผ่านของนิวตรอน, โฟตอนที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของนิวตรอน และอิเล็กตรอน

หมายเหตุ Mode N P ไม่รวมนิวตรอนที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของโฟตอน

3.2 Cell และ Surface parameter cards บ่งบอกค่าตัวแปรต่าง ๆของ cell และ surface โดยจะต้องเรียงกันสัมพันธ์กับ Cell และ Surface cards ที่ปรากฏในข้างต้น

3.3 Source specification cards บ่งบอกลักษณะและสมบัติต่าง ๆของแหล่งกำเนิดอนุภาคเริ่มต้น มีอยู่ 4 แบบ คือ

-general source(SDEF card)

-surface source(SSR card)

-criticality source(KCODE)

-user supplied source

ส่วนตัวแปรต่าง ๆของแหล่งกำเนิดอนุภาคเริ่มต้น สำหรับ SDEF ได้แก่

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

POS	คือ ตำแหน่งเริ่มต้นของอนุภาค
CEL	คือ cell ที่อนุภาคถูกปลดปล่อย
ERG	คือ พลังงานของอนุภาค ในหน่วย MeV
WGT	คือ statistical weight ของอนุภาค
TME	คือ เวลา ณ จุดเริ่มต้นของอนุภาค ในหน่วย shakes
PAR	คือ ประเภทของอนุภาค

3.4 Tally specification cards บ่งบอกรูปแบบและลักษณะของผลลัพธ์ที่ต้องการได้จากการคำนวณ ซึ่งมีแบบมาตราฐานที่โปรแกรม MCNP จัดสรรไว้ให้ คือ

F1:N หรือ F1:P หรือ F1:E	คือ Surface current
F2:N หรือ F2:P หรือ F2:E	คือ Surface flux
F4:N หรือ F4:P หรือ F4:E	คือ Track length estimate of cell flux
F5a:N หรือ F5a:P	คือ Flux at a point (point detector)
F6:N หรือ F6:N,P หรือ F6:P	คือ Track length estimate of energy deposition
F7:N	คือ Track length estimate of fission energy deposition
F8:P หรือ F8:E หรือ F1:P,E	คือ Energy distribution of pulse created in a detector

หมายเหตุ ทั้งหมดจะถูก normalized ด้วยจำนวนอนุภาคเริ่มต้น

3.5 Material specification บ่งบอกทั้งองค์ประกอบของวัสดุ และ cross section evaluation ที่ถูกใช้ใน cell ประกอบด้วย

a. Material (Mm) บ่งบอกวัสดุทุกตัวที่ประกอบอยู่ในแต่ละ cell จะเขียนในรูปแบบดังนี้

Mm ZAID fraction ZAID fraction

โดยที่ m จะสัมพันธ์กับ material number ที่บ่งบอกใน cell card แล้วตามคู่ลำดับระหว่าง identification(ZAID) กับ atomic fraction (หรือ weight fraction ถ้าเครื่องหมายเป็น -) สำหรับแต่ละธาตุหรือนิวไคลด์ทุกตัวที่มีอยู่ใน cell นั้น ๆ

i Nuclide Identification number(ZAID) คือ เลขที่บ่งชี้ถึงธาตุหรือนิวไคลด์ที่ต้องการในรูปตัวเลขแบบ ZZZAAA.nnX

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ZZZ คือ atomic number ของธาตุหรือนิวไคลด์

AAA คือ mass number ของธาตุหรือนิวไคลด์ โดยตัดโฟตอนและอิเล็กตรอนทิ้ง

nn คือ ตัวบ่งชี้ข้อมูล cross-section evaluation

X คือ class ของข้อมูล โดย C : continuous energy; D : discrete reaction; T : Thermal; Y : dosimetry; P : photon; E : electron; และ M : Multi group

ii Nuclide fraction ซึ่งอาจจะ normalized หรือไม่ก็ได้ ระบุได้ทั้งเป็นอัตราส่วนที่เทียบจำนวนอะตอมทั้งหมดเป็น 1 หรือเป็นอัตราส่วนของจำนวนอะตอมเลยก็ได้

b. VOID card หมายถึงที่ว่าง โดยการลบวัสดุทุกชนิดและ cross section ออก แล้วเปลี่ยนค่าnonzero importance ให้เป็น 1 ดังนั้นเมื่อทำการคำนวณ อนุภาคจะถูกส่งผ่านไปทั่วทั้งรูปทรงอย่างรวดเร็วจึงมีประโยชน์อย่างมากในการหาข้อผิดพลาดของรูปทรง ที่มีผลทำให้เกิดการสูญหายของอนุภาค

3.6 Problem Cutoffs บ่งบอกขีดจำกัดต่าง ๆที่ต้องการให้โปรแกรมหยุดการคำนวณ เมื่อค่าเหล่านั้นพ้นขีดจำกัดดังกล่าว ประกอบด้วย

CUT	คือ cutoffs
ELPT	คือ Cell-by cell energy cutoff
NPS	คือ History cutoff
CTME	คือ Computer time cutoff

และเมื่อทำงาน(คำนวณ)เสร็จแล้วจะมีการสร้าง output file ใหม่ 2 ไฟล์ คือ

OUTP : Output file ที่ประกอบด้วยผลลัพธ์ทั้งหมดจากการคำนวณ

RUNTPE : Unreadable file ที่ประกอบด้วยข้อมูลสำหรับการคำนวณแบบต่อเนื่องและการสร้างกราฟของ tally ต่าง ๆ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

Input file สำหรับโปรแกรม MCNP ที่ใช้ในการคำนวณการกระเจิงอุดมคติ

```
Estimation of Correction Factor for DDX Measurement -- Ideal Bi Sample --
1    1  -9.8  -1 -2 +3  imp:n=1 $ sample
2    0       -4 #1     imp:n=1 $ void
3    0       +4        imp:n=0 $ outer world

1    cx   0.00001
2    px  +0.00001
3    px  -0.00001
4    so 2000.0

fcl:n -1 0 0
mode  n
m1    83209.41c 1
sdef  erg=14.1  pos=18 0 0  vec=-1 0 0  dir=1  ara=1
fc135    30 degree
f135:n  -1039.23 600.000   0 0
fc145    40 degree
f145:n  -919.253 771.345   0 0
fc155    50 degree
f155:n  -771.345 919.253   0 0
fc165    60 degree
f165:n  -600.000 1039.23   0 0
fc175    70 degree
f175:n  -410.424 1127.63   0 0
fc185    80 degree
f185:n  -208.379 1181.77   0 0
fc195    90 degree
f195:n    0.000 1200.00   0 0
fc205   100 degree
f205:n   208.379 1181.77   0 0
fc215   110 degree
f215:n   410.424 1127.63   0 0
fc225   120 degree
f225:n   600.000 1039.23   0 0
fc235   130 degree
f235:n   771.345 919.253   0 0
fc245   140 degree
```

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

```
f245:n   919.253 771.345   0 0
fc255   150 degree
f255:n   1039.23 600.000   0 0
e0    1.0  69i  15.0
cut:n 0 1.0
nps   10000000
ctme  20
prdmp 10000000 1000000 0 1
print
```

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

แบบแสดงรายการใช้จ่ายเงิน

รายงานการใช้จ่ายเงิน ตั้งแต่วันที่ 1 เดือน กรกฎาคมพศ. 2539 ถึง วันที่ 30 เดือน มิถุนายน พศ. 2541

รหัสโครงการ CO - 39-60-EMI-10-01

ชื่อโครงการ การจำลองเหตุการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ สำหรับการแก้ไขผลการกระเจิงหลายครั้ง และการลดทอนฟลักซ์ในการศึกษาปฏิกิริยานิวเคลียร์ด้วยนิวตรอน

สถาบัน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ระยะเวลา ...2..... ปี ...-..... เดือน

รายการ	งบประมาณทั้งโครงการ	จำนวนเงินที่ได้รับแล้ว	ค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น	คงเหลือ
	(1)	(2)	(3)	(4) = (2) - (3)
1. ค่าตอบแทน	63,600.-	53,700.-	47,400.-	6,300.-
2. ค่าจ้างผู้ช่วยวิจัย	14,400.-	14,400.-	14,400.-	-
3. ค่าครุภัณฑ์	-	-	-	-
4. ค่าวัสดุ	96,000.-	96,000.-	106,300.-	-10,300.-
5. ค่าหาข้อมูล	4,000.-	4,000.-	3,000.-	1,000.-
6. ค่าวิเคราะห์ตัวอย่าง	-	-	-	-
7. ค่าทำรายงาน, ค่าเดินทาง	11,000.-	11,000.-	8,000.-	3,000.-
รวม	189,000.-	179,100.-	179,100.-	-
ค่าตอบแทน 10 % ที่หักไว้	10,000.- บาท			

ลงชื่อ .....

(นายอุดมรัตน์ ทิพวรรณ)

หัวหน้าโครงการ

การศึกษาผลของการกระเจิงหลายครั้ง และการลดทอนของนิวตรอน ในวัตถุตัวอย่างรูปทรงกระบอก โดยเทคนิคมอนติคาร์โล

อุดมรัตน์ ทิพวรรณ สมศร สิงขรัตน์ สุวิชา รัตนรินทร์ และ ถิรพัฒน์ วิลัยทอง

อาคารวิจัยนิวตรอนพลังงานสูง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 50200

โทร. (053)943379 โทรสาร (053)222776

บทคัดย่อ

โดยเทคนิคมอนติคาร์โล ได้ทำการจำลองเหตุการณ์ของการเกิดการกระเจิงหลายครั้ง และการลดทอนฟลักซ์ของรังสีนิวตรอนพลังงานสูง เมื่อเข้าไปในวัตถุตัวอย่างรูปทรงกระบอกตันที่เป็นธาตุหนักชนิดเดี่ยว การจำลองได้เน้นพิจารณาถึงผลจากขนาดของวัตถุตัวอย่าง และรังสีนิวตรอนปนเปื้อนจากเป้าตริเตียม โดยทั้งนี้ได้ใช้ ขนาด รูปร่าง ตำแหน่ง และระยะห่างของเป้าตริเตียมกับวัตถุตัวอย่าง รวมทั้งตำแหน่งของหัววัดนิวตรอน ให้เหมือนกับสถานการณ์จริง ผลลัพธ์จากการจำลองได้นำไปเปรียบเทียบกับผลจากการทดลองจริง ของการวัดค่า Double Differential Neutron Emission Cross Section ของธาตุบิสมัท (^{209}Bi)

A Study of Multiple Scattering and Flux Attenuation of Fast Neutrons Inside a Cylindrical Sample by Using Monte Carlo Simulation Technique

Udomrat Tippawan, Somsorn Singkarat, Suvicha Ratanarin and Thiraphat Vilaithong

Fast Neutron Research Facility, Department of Physics, Faculty of Science,

Chiang Mai University, 50200

ABSTRACT

Monte Carlo Simulation was used to simulate the multiple scattering and the flux attenuation of penetrating fast neutrons in a solid cylindrical sample of single nuclei. The sample-size effect and the source related background effect are the aim of this investigation. The simulation used actual dimension and geometry of a tritium target-sample-detector. Results of simulation will be shown in comparison with the experimental results on a Double Differential Neutron Emission Cross Section of Bismuth (^{209}Bi) at 14 MeV neutron.

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

บทนำ

เทคนิคการวัดพลังงานของนิวตรอนพลังงานสูงแบบ Time-of-Flight (TOF) ได้รับการยอมรับกันโดยทั่วไปแล้วว่าเป็นเทคนิคที่มีความแม่นยำสูงสุดในขณะนี้ โดยเทคนิคนี้ความแม่นยำหรืออำนาจการจำแนกพลังงาน (energy resolution) ของรังสีนิวตรอน จะผกผันกับระยะการเดินทาง (flight path) ของอนุภาคนิวตรอนในรูปของสมการต่อไปนี้

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{(E+m_n)(E+2m_n)}{m_n^2}\sqrt{\left\{\frac{\Delta X(1-\beta\eta)}{X}\right\}^2+\left\{\frac{\Delta t}{t}\right\}^2}$$

เมื่อ E และ m_n คือพลังงานและมวลนิ่งของอนุภาคนิวตรอน $\beta = \frac{v}{c}$ เมื่อ v คือ ความเร็วของอนุภาคนิวตรอน, c คือ ความเร็วแสงในสุญญากาศ, η คือ ดรรชนีหักเหของสารเรืองแสงที่ใช้ทำหัววัดรังสีนิวตรอน, t คือเวลาที่อนุภาคนิวตรอนใช้ในการเดินทางที่มีระยะทาง X ซึ่งมีความคลาดเคลื่อน ΔX และ Δt คือความคลาดเคลื่อนของระบบการวัดเวลาของระบบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

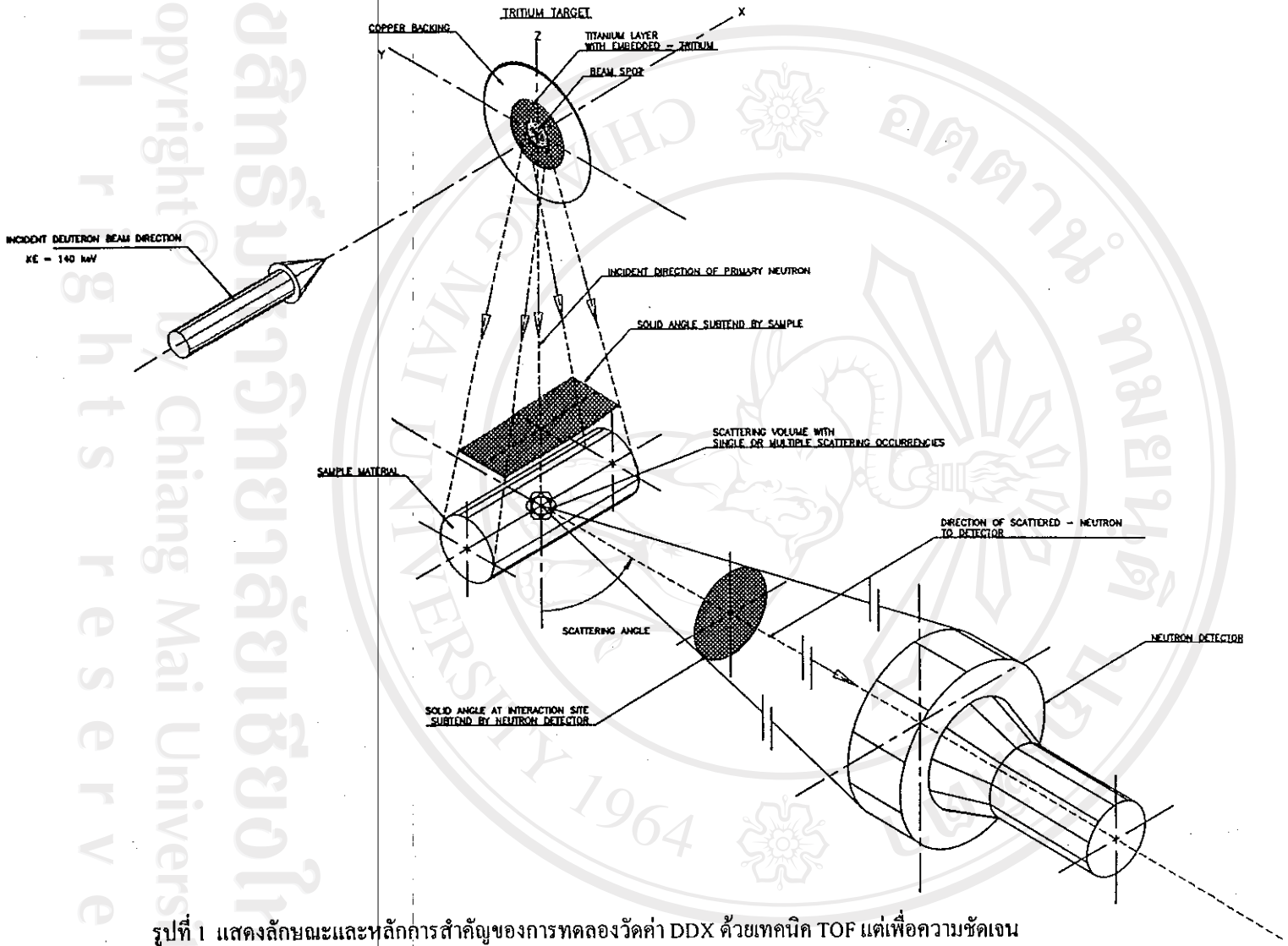
การเพิ่มระยะเดินทางของอนุภาคนิวตรอนมีข้อดีที่ทำให้ระบบการวัดมีอำนาจการจำแนกพลังงานสูงขึ้น ($\Delta E/E$ มีค่าน้อยลง) แต่มีข้อเสียควบคู่ไปด้วยเนื่องจากจำนวนอนุภาคนิวตรอนที่ไปเข้าหัววัดลดลงตามกฎระยะทางยกกำลังสองผกผัน (inverse square law) ซึ่งส่งผลในทางปฏิบัติที่ทำให้ต้องใช้เวลาในการเก็บข้อมูลนานขึ้น

การแก้ปัญหานี้ที่สิ้นเปลืองน้อยที่สุดสำหรับการวัดค่า Double Differential Cross Section (DDX) ก็คือใช้วัตถุตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่ขึ้น (ดูรูปที่ 1) ซึ่งเป็นการเพิ่มจำนวนนิวเคลียสเป้านั่นเองจะทำให้มีโอกาสของการเกิดอันตรกิริยา (interaction) สูงขึ้น แต่เมื่อวัตถุตัวอย่างมีขนาดใหญ่ขึ้นความเป็นอุดมคติก็ลดลง กล่าวคือเหตุการณ์ที่อนุภาคนิวตรอนมีอันตรกิริยาเพียงครั้งเดียวกับนิวเคลียสเป้าก็มีโอกาสเกิดขึ้นน้อยลง เมื่อเทียบกับเหตุการณ์ที่นิวตรอนมีอันตรกิริยาหลายครั้ง

เพื่อความชัดเจนในการวิเคราะห์จะแยกผลกระทบเนื่องจากขนาดของวัตถุตัวอย่างออกเป็น 2 ประการด้วยกัน ดังต่อไปนี้

(i) ผลจากขนาดของวัตถุตัวอย่าง(Sample-size effect) เนื่องจากวัตถุตัวอย่าง เช่นในกรณีนี้คือธาตุบิสมัทและสารโพลีเอทธิลีนจำเป็นต้องมีขนาดจำกัดค่าหนึ่ง กล่าวคือมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร ยาว 7 เซนติเมตร ดังนั้นเมื่อนิวตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้าไปในวัตถุตัวอย่างจึงมีโอกาสที่จะเกิดการกระเจิงหลายครั้ง(Multiple scattering)และเกิดการลดทอน(Attenuation)ของฟลักซ์นิวตรอน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 1 แสดงลักษณะและหลักการสำคัญของการทดลองวัดค่า DDX ด้วยเทคนิค TOF แต่เพื่อความชัดเจน ในที่นี้จึงไม่ได้แสดงรูปของ Shadow Bar, Collimator และ Shielding ของหัววัดรังสีนิวตรอนไว้ด้วย

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

(ii) ผลจากนิวตรอนปนเปื้อน(Contaminant neutrons effect) เนื่องจากแหล่งกำเนิดนิวตรอนมิสามารถผลิตนิวตรอนปฐมภูมิพลังงาน 14 MeV บริสุทธ์ แต่ยังประกอบด้วยนิวตรอนปนเปื้อนที่มีพลังงานต่ำกว่า 12 MeV ลงมา ซึ่งเกิดมาจากคุณสมบัติของแหล่งกำเนิดนิวตรอนเอง หรือเกิดจากการกระเจิงของนิวตรอนปฐมภูมิภายในเป้าตริเตียมก่อน ดังนั้นจึงมีโอกาสที่นิวตรอนปนเปื้อนเหล่านี้จะตกกระทบกับวัตถุตัวอย่างด้วย ยิ่งวัตถุตัวอย่างมีขนาดใหญ่ก็ย่อมมีโอกาสที่จะตกกระทบสูง และมีโอกาสที่จะเกิดอันตรกิริยากับนิวเคลียสในวัตถุตัวอย่าง แล้วกระเจิงไปเข้าหัววัดรังสีนิวตรอนได้เหมือนกัน รวมทั้งสามารถเกิดการกระเจิงหลายครั้ง และการลดทอนภายในวัตถุตัวอย่างได้อีกเช่นกัน

ดังนั้นในการวิเคราะห์ค่า DDX จึงจำเป็นที่ต้องมีการแก้ไขผลของการกระเจิงหลายครั้งและการลดทอนของฟลักซ์ของนิวตรอนเนื่องจากสาเหตุดังกล่าวข้างต้น โดยการจำลองเหตุการณ์ (Simulation) ด้วยเทคนิคมอนติคาร์โล (Monte Carlo Technique) โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ SYNTHIA ของ Baba และคณะ[1] แห่งมหาวิทยาลัย Tohoku ประเทศญี่ปุ่น ผลลัพธ์จากการจำลองได้นำไปเปรียบเทียบกับผลจากการทดลองจริงของการวัดค่าDDX ของธาตุบิสมัท(^{209}Bi)[2]

วิธีการ

2.1 รูปร่างและลักษณะการกระจายพลังงานของนิวตรอนปฐมภูมิ

ในทางทฤษฎี พลังงานของนิวตรอนปฐมภูมิที่เกิดจากปฏิกิริยารวมตัว(Fusion reaction) แบบดิวเทอรอนกับตริเตียม(d-T) จะมีลักษณะเป็นแบบพลังงานเดี่ยว(monoenergetic) แต่ในทางการทดลองจริงแล้วพลังงานของนิวตรอนจะมีลักษณะการกระจายเป็นรูปเกาส์เซียนพีค (Gaussian peak) เนื่องจากผลกระทบต่างๆดังต่อไปนี้[3] (ดูรูปที่ 1)

(ก) ผลเนื่องจากการลดทอนของพลังงานของดิวเทอรอนที่ตกกระทบกับเป้าตริเตียมชนิด solid target ซึ่งเป็นเป้าแบบที่ตริเตียมถูกดูดกลืนอยู่ในชั้นของโลหะที่มีสมบัติดูดกลืนก๊าซกลุ่มไฮโดรเจนได้ดี เช่น ไททาเนียม เป็นต้น ดังนั้นเมื่อดิวเทอรอนวิ่งเข้าไปจะถูกลดทอนพลังงานลงโดยชั้นความหนาของไททาเนียม ก่อนที่จะทำปฏิกิริยากับตริเตียม

(ข) ผลเนื่องจากมุมตกกระทบของดิวเทอรอนที่เปลี่ยนไป เพราะเกิดการกระเจิงหลายครั้งภายในเป้า ทำให้มุมกระเจิงของนิวตรอนที่ออกมาคลาดเคลื่อนไปจากความจริง

(ค) ผลเนื่องจากขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลำดิวเทอรอนที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ขนาดของบีมมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตร

(ง) ผลเนื่องจากการกระเจิงหลายครั้งของนิวตรอนภายในเป้า ทำให้พลังงานและมุมกระเจิงของนิวตรอนที่ออกมาคลาดเคลื่อนไปจากความจริง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

นอกจากนี้ผลเนื่องมาจากกระเจิงหลายครั้งของนิวตรอนภายในที่รองรับ(Supporting Backing) ซึ่งชั้นของไททาเนียม-ตริเตียมเคลือบติดอยู่ รวมทั้งที่ยึดเป้าตริเตียม อาทิ วงแหวนยาง(O-ring)และท่อนำลำอนุภาคดิวเทอรอน[4]รวมทั้งอาจจะเป็นนิวตรอนที่เกิดจาก parasitic reaction (d-D, d-C และ d-O) ซึ่งทำให้ลักษณะการกระจายของพลังงานมีค่าแผ่ออกไปในช่วงพลังงานต่ำๆ

จากการทดลองวัดสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดนิวตรอนโดยตรงจากเป้าตริเตียมโดยใช้หัววัดรังสีนิวตรอนชนิด NE-213 ที่เป็นรูปทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5.1 เซนติเมตร หนา 5.1 เซนติเมตร โดยนำไปวางแทนที่ในตำแหน่งของหัววัดรังสีนิวตรอนหลักชนิด BC-501 ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 เซนติเมตร หนา 10 เซนติเมตร ซึ่งวัดได้รูปร่างและลักษณะการกระจายของพลังงาน ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยที่สเปกตรัมของแหล่งกำเนิดนิวตรอน มีการกระจายของพลังงานตั้งแต่ 3.0 ถึง 15.0 MeV ซึ่งเป็นการผสมอยู่ด้วยกันของนิวตรอนปฐมภูมิพลังงาน 14 MeV ที่มีลักษณะเป็นพีค และนิวตรอนปนเปื้อนที่มีพลังงานตั้งแต่ 3.0 ถึง 12.0 MeV ส่วนนิวตรอนที่บริเวณไหล่ที่มีพลังงานประมาณ 13 MeV เกิดจากการกระเจิงของนิวตรอนทุติยภูมิภายในหัววัดนิวตรอนเอง[5]

2.2 การจำลองสเปกตรัมของนิวตรอนทุติยภูมิ ที่พลังงานต่างๆและมุมกระเจิง θ ต่างๆ ซึ่งจะพิจารณาถึง

(ก) ขนาด รูปร่าง ตำแหน่ง และระยะห่างระหว่างเป้าตริเตียม ธาตุตัวอย่าง และหัววัดรังสีนิวตรอน

(ข) รูปร่าง และลักษณะการกระจายพลังงานของแหล่งกำเนิดนิวตรอน

(ค)ชนิดของปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดขึ้นระหว่างนิวตรอนกับนิวเคลียสของวัตถุตัวอย่าง โดยจะใช้ฐานข้อมูลนิวเคลียร์(nuclear data libraries) จากฐานข้อมูล ENDF/B-VI และ JENDL-3.1

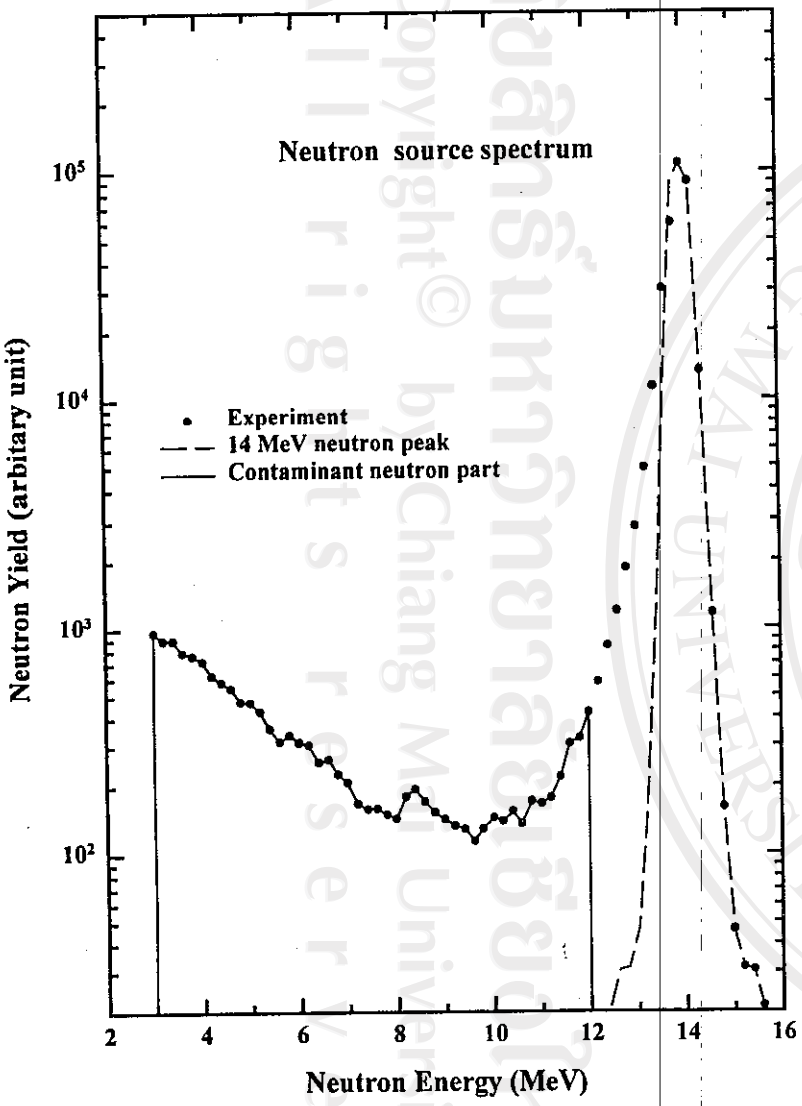
สำหรับกระบวนการจำลองเหตุการณ์ที่จะเกิดขึ้นในการทดลองจริงนั้นจะเริ่มจาก

1. <u>การจำลองนิวตรอนปฐมภูมิที่เกิดขึ้น ในเป้าตริเตียม</u>

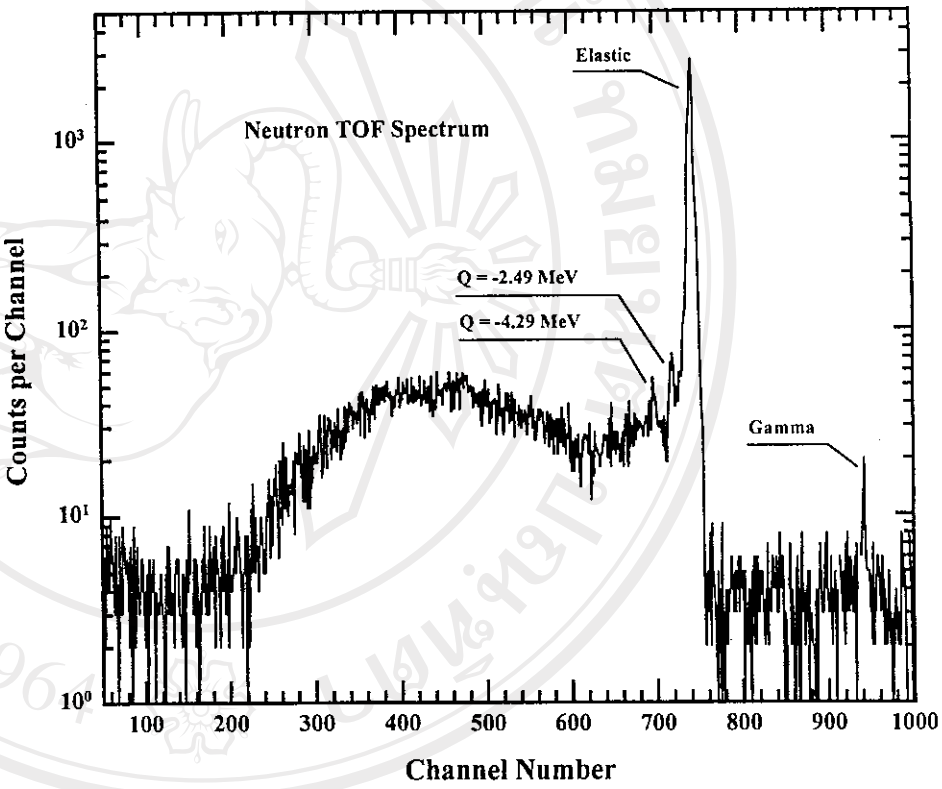
จากรูปที่ 1 เมื่อลำดิวเทอรอนตกกระทบเป้าตริเตียม เริ่มสุ่มตำแหน่งของการเกิดนิวตรอนปฐมภูมิภายในเป้า โดยคำนึงถึงพลังงาน และขนาดของลำดิวเทอรอน สำหรับพลังงานของนิวตรอนปฐมภูมินั้นคำนวณจาก kinematic และ angular distribution และคำนวณฟลักซ์ของนิวตรอนที่ตกกระทบวัตถุตัวอย่าง โดยอาศัยมุมตัน(solid angle) ที่รองรับของวัตถุตัวอย่าง

ขั้นตอนต่อมาคือสุ่มตำแหน่งและมุมที่นิวตรอนจะไปตกกระทบกับผิวของวัตถุตัวอย่าง ส่วนตำแหน่งที่เกิดอันตรกิริยานั้นได้จากการสุ่ม path length หรือระยะทางที่นิวตรอนปฐมภูมิสามารถเคลื่อนที่เข้าไปภายในวัตถุตัวอย่างได้ก่อนที่จะเกิดอันตรกิริยา ซึ่งหาได้จากการสุ่มค่า mean free path ซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานของนิวตรอนและค่า total cross section ของวัตถุตัวอย่าง รวมทั้งคำนวณค่าเฉลี่ยของการลดทอนของฟลักซ์นิวตรอน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 2 สเปกตรัมของแหล่งกำเนิดของนิวตรอนที่วัดได้จากการทดลอง ซึ่งประกอบด้วยพีคของนิวตรอนปฐมภูมิพลังงาน 14 MeV และนิวตรอนปนเปื้อนที่มีพลังงานตั้งแต่ 3 ถึง 12 MeV



รูปที่ 3 สเปกตรัม TOF ของนิวตรอน ของ Bi sample ซึ่งประกอบด้วยพีคของแกมมา

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2. การจำลองการเกิดอันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับนิวเคลียสของวัตถุตัวอย่าง

สำหรับกรณีที่วัตถุตัวอย่างเป็นสารประกอบเช่น สารโพลีเอทธิลีน[$(CH_2)_n$] ก็จะต้องมีการสุ่มชนิดนิวเคลียสก่อน เนื่องจากโอกาสที่นิวตรอนจะเกิดอันตรกิริยากับนิวเคลียสชนิดใดนั้น ขึ้นอยู่กับสัดส่วนโดยน้ำหนักและค่า total cross section ของนิวเคลียสชนิดนั้นๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานของนิวตรอนปฐมภูมิเช่นกัน หลังจากนั้นก็จะสุ่มชนิดของปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดขึ้นระหว่างนิวตรอนปฐมภูมิกับชนิดของนิวเคลียสที่สุ่มได้จากข้างต้น โดยอาศัยอัตราส่วนระหว่างค่า cross section ของแต่ละชนิดของปฏิกิริยานิวเคลียร์สำหรับนิวเคลียสชนิดนั้นๆ เช่น elastic(n,n) หรือ inelastic(n,n′) เป็นต้น

3. การจำลองการเกิดอันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนทุติยภูมิกับนิวเคลียสของวัตถุตัวอย่าง

นิวตรอนทุติยภูมิจากการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบต่างๆ โดยแต่ละแบบจะมีค่า angular distribution ซึ่งจะนำมาใช้ในการสุ่มทิศทางของนิวตรอนทุติยภูมิ ส่วนพลังงานของนิวตรอนทุติยภูมิหลังการกระเจิงกับวัตถุตัวอย่างสามารถคำนวณโดยอาศัย kinematic และ Q-value สำหรับในย่าน discrete และคำนวณโดยอาศัย energy distribution สำหรับในย่าน continuum

แต่เนื่องจากผลจากขนาดของวัตถุตัวอย่างดังที่กล่าวในข้างต้นนั้น ในขั้นตอนนี้จึงต้องมีการสุ่มค่า mean free path อีกครั้ง เพื่อดูว่านิวตรอนยังอยู่ภายในวัตถุตัวอย่างหรือไม่ ถ้ายังอยู่ก็แสดงว่านิวตรอนนั้นเกิดอันตรกิริยา(กระเจิง)ขึ้นอีก ซึ่งก็จะต้องกลับไปทำการสุ่มตามแบบกระบวนการที่ 2 อีกครั้ง จนกว่านิวตรอนออกพ้นจากวัตถุตัวอย่างไปได้

ดังนั้นนิวตรอนที่ออกพ้นจากวัตถุตัวอย่างแล้วไปเข้าหัววัดรังสีนิวตรอน จะถูกจำแนกตามจำนวนครั้งที่เกิดการกระเจิงในวัตถุตัวอย่าง ทิศทางหรือมุมกระเจิง และพลังงานของนิวตรอน และคำนวณจำนวนนิวตรอนทั้งหมดที่จะไปเข้าหัววัดรังสีนิวตรอนโดยอาศัยมุมตันที่รองรับของหัววัดรังสีนิวตรอน รวมทั้งคำนวณการลดทอนของฟลักซ์นิวตรอนที่ไปเข้าหัววัด

ผลลัพธ์ของการจำลองจะอยู่ในรูปของสเปกตรัมที่สัมพันธ์กับพลังงานของนิวตรอน โดยแบ่งได้เป็น 3 แบบ คือ

ก) $I(E,\theta,E')$ คือ สเปกตรัมการกระเจิงอุดมคติ(Ideal scattering spectrum) ซึ่งตัดผลที่จะเกิดจากการกระเจิงหลายครั้ง และการลดทอนของฟลักซ์ออกไป

ข) $N_n(E,\theta,E')$ คือ สเปกตรัมที่ได้หลังเกิดการกระเจิงในแต่ละ n ครั้ง โดยที่ n=1,2,3 และ 4 ซึ่งพิจารณาถึงผลเนื่องจากการลดทอนของฟลักซ์ด้วย

ค) $R(E,\theta,E')$ คือ สเปกตรัมกระเจิงจริง(Real scattering spectrum) ซึ่งเป็นผลรวม (Summation)ของ สเปกตรัม $N_n(E,\theta,E')$ สำหรับ n=1 ถึง 4

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

และเพื่อให้สเปกตรัมที่จำลองได้เหล่านี้สอดคล้องกับผลการทดลองจริง จึงต้องกระจาย (smeared) ออกด้วย Gaussian resolution function ที่ประกอบด้วยความกว้างของพีครังสีแกมมาที่วัดได้จากการทดลอง ทั้งนี้เนื่องจากการวัดพลังงานของนิวตรอนด้วยเทคนิค TOF คือการวัดพลังงานของนิวตรอนโดยการวัดเวลาที่นิวตรอนที่มีพลังงานต่างๆใช้ในการเคลื่อนที่ ซึ่งต้องอาศัยตำแหน่งของพีครังสีแกมมาเป็นจุดอ้างอิง (ดูรูปที่ 3) เพราะฉะนั้นความกว้างของพีครังสีแกมมาจึงเปรียบเสมือนเป็นความคลาดเคลื่อนที่มีผลต่อพลังงานของนิวตรอนทุติยภูมิ

2.3 การพิจารณาผลกระทบจากนิวตรอนปนเปื้อน

เนื่องจากการจำลองนิวตรอนที่เกิดในเป้าตริเตียมในขั้นตอนที่ 1 ของหัวข้อ 2.2 นั้นไม่ได้ครอบคลุมผลกระทบต่างๆที่กล่าวในหัวข้อ 2.1 ดังนั้นในขั้นตอนนี้ก็จะเปลี่ยนไปใช้วิธีสุ่มพลังงานและจำนวนของนิวตรอนจากสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดนิวตรอนที่วัดได้โดยตรงจากเป้าตริเตียมแทน โดยจะแยกเป็นการจำลอง 2 กรณี คือ

(ก) กรณีนิวตรอนปฐมภูมิพลังงาน 14 MeV ที่มีลักษณะเป็นพีค

(ข) กรณีนิวตรอนปนเปื้อนที่มีพลังงานตั้งแต่ 3.0 ถึง 12.0 MeV

ซึ่งผลรวมของสเปกตรัมการกระเจิงจริงจากทั้งสองกรณีที่จำลองได้นั้น จะต้องสอดคล้องกับสเปกตรัม DDX ที่วัดได้จากการทดลองจริง จึงจะถือว่าผลของการจำลองเหตุการณ์นี้มีความถูกต้องตามความเป็นจริง

แต่ก่อนที่จะทำการเปรียบเทียบกัน จะต้อง normalized สเปกตรัมทั้งหมดที่จำลองได้ด้วยค่าคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งหาได้จากการเฉลี่ยตลอดทุกมุมกระเจิง ดังนั้นทำให้ผลของการเปรียบเทียบจึงเป็นเพียงเพื่อที่จะใช้เป็นแนวทางเท่านั้น

ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาดเนื่องจากการใช้ค่าคงที่ที่ไม่ถูกต้องในการ normalize นั้น ก็จะเปลี่ยนไปใช้วิธีการหาค่าอัตราส่วนระหว่างสเปกตรัมการกระเจิงอุดมคติจากนิวตรอนปฐมภูมิพลังงาน 14 MeV กับผลรวมของสเปกตรัมการกระเจิงจริงจากนิวตรอนปฐมภูมิพลังงาน 14 MeV กับสเปกตรัมการกระเจิงจริงจากนิวตรอนปนเปื้อน แล้วจึงนำค่าอัตราส่วนที่ได้ไปคูณกับสเปกตรัม DDX ที่วัดได้จากการทดลองจริง สำหรับการแก้ไขผลของการกระเจิงหลายครั้งและการลดทอนฟลักซ์ของนิวตรอน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ผลการศึกษาและวิจัย

3.1 ผลการจำลองสเปกตรัมการกระเจิงในแต่ละครั้งจากนิวตรอน 14 MeV

-เมื่อวัตถุตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.0 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4 สเปกตรัมที่จำลองได้ของการกระเจิง 2 ครั้ง มีผลกระทบต่อสเปกตรัมที่จำลองได้ของการกระเจิง 1 ครั้ง มีผลทำให้เพิ่มขึ้นประมาณ 19 ถึง 34 เปอร์เซ็นต์ ส่วนสเปกตรัมของการกระเจิง 3 ครั้งมีผลกระทบต่อการกระเจิง 1 ครั้ง มีผลทำให้เพิ่มขึ้นประมาณ 2 ถึง 7 เปอร์เซ็นต์ และสำหรับสเปกตรัมของการกระเจิง 4 ครั้งนั้นจะสังเกตได้ว่าต่ำกว่ามากเมื่อเทียบกับสเปกตรัมของการกระเจิง 1 ครั้ง ดังนั้นผลกระทบนี้จึงตัดทิ้งไปได้

-เมื่อวัตถุตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3 เซนติเมตร

จากรูปที่ 5 จะสังเกตได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีวัตถุตัวอย่างขนาด 3 ซมแล้ว สเปกตรัมของการกระเจิง 2 ครั้งมีผลกระทบต่อการกระเจิง 1 ครั้งลดลงมากคือในช่วงนิวตรอนพลังงาน 3 ถึง 6 MeV มีผลกระทบลดลงเหลือเพียงประมาณ 10 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น และในช่วงนิวตรอนพลังงาน 6 MeV ขึ้นไป มีผลกระทบเพียงประมาณ 1 เปอร์เซนต์ ส่วนสเปกตรัมของการกระเจิงมากกว่า 2 ครั้งขึ้นไปนั้นมีค่าต่ำ ดังนั้นผลกระทบนี้จึงตัดทิ้งไปได้

3.2 ผลการจำลองสเปกตรัมการกระเจิงอุดมคติ, สเปกตรัมการกระเจิงจริงจากนิวตรอน 14 MeV และสเปกตรัมการกระเจิงจริงจากนิวตรอนปนเปื้อน

-เมื่อวัตถุตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร

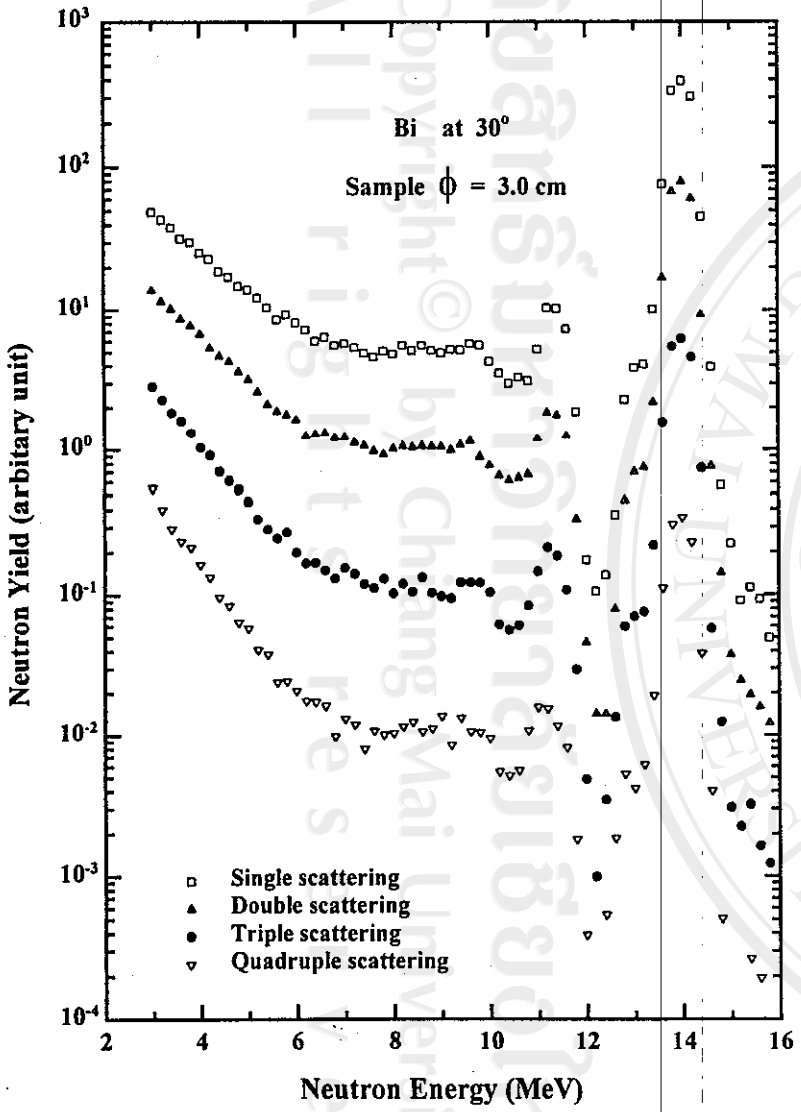
(i) ผลจากขนาดของวัตถุตัวอย่างจากนิวตรอนปฐมภูมิ 14 MeV

สเปกตรัมการกระเจิงจริงจากนิวตรอนปฐมภูมิ 14 MeV จะต่ำกว่าสเปกตรัมการกระเจิงอุดมคติ ดังรูปที่ 6 ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากเกิดการลดทอนฟลักซ์ของนิวตรอน

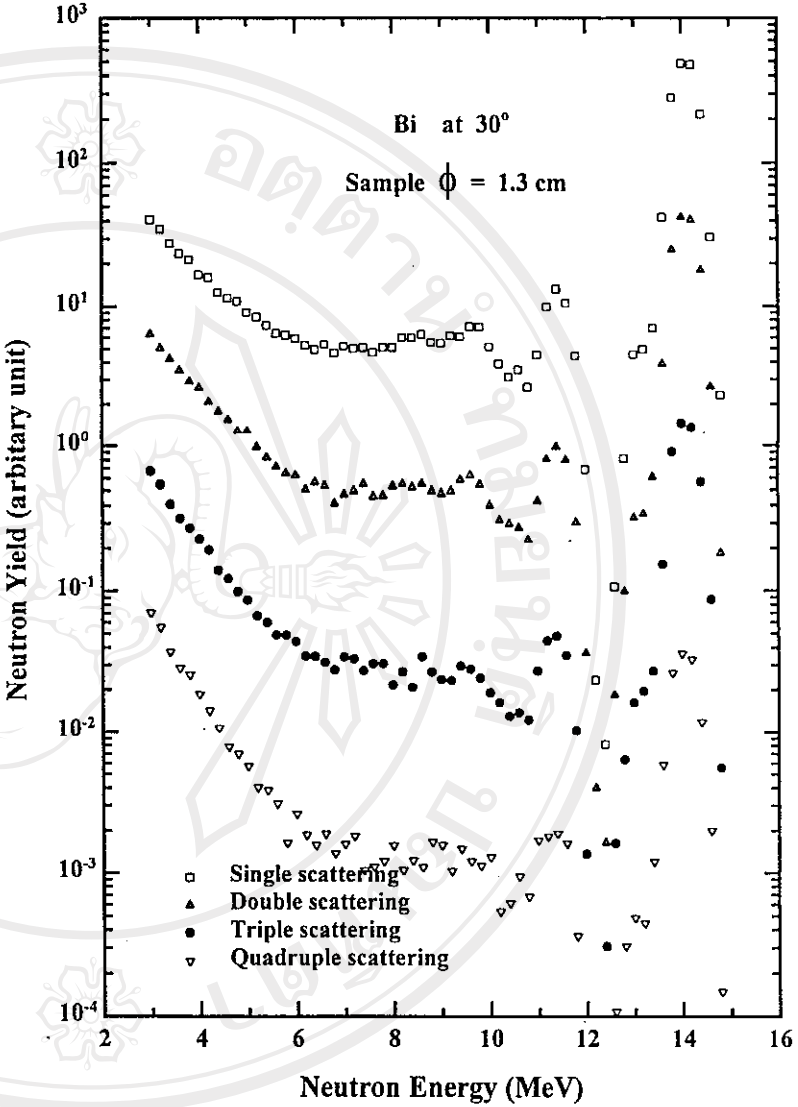
(ii) ผลจากนิวตรอนปนเปื้อน

สำหรับสเปกตรัมการกระเจิงจริงจากนิวตรอนปนเปื้อน ในช่วงที่พลังงานตั้งแต่ 3 ถึง 6 MeV จะมีผลกระทบต่อสเปกตรัมการกระเจิงจริงจากนิวตรอน 14 MeV มากจนเกือบถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้คงเป็นเพราะว่าที่มุมกระเจิงต่ำๆนั้น โอกาสของการเกิดการกระเจิงแบบยืดหยุ่น (Elastic scattering)ของนิวตรอนที่มีพลังงานต่ำ มีค่าสูงมากและมากกว่าอันตรกิริยาแบบอื่น รวมทั้งเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2 จะเห็นว่านิวตรอนปนเปื้อนในช่วงพลังงานนี้ก็มีมากกว่าช่วงอื่น ดังนั้นเมื่อเกิดการกระเจิงแบบยืดหยุ่นกับบิสมัทซึ่งเป็นธาตุหนัก ทำให้นิวตรอนทุติยภูมิลดพลังงานลงเพียงเล็กน้อย จึงเป็นผลให้สเปกตรัมการกระเจิงจริงจากนิวตรอนปนเปื้อนในช่วงนี้มีค่ามาก

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

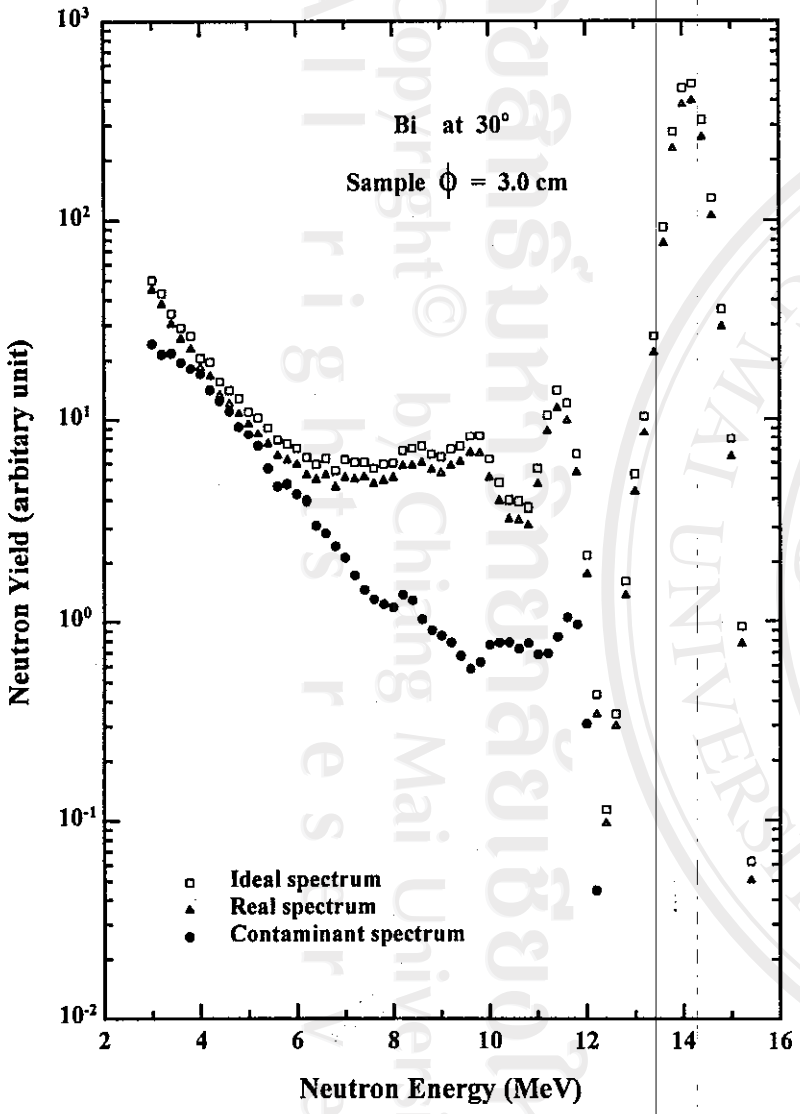


รูปที่ 4 ผลการจำลองสเปกตรัมการกระเจิง 1, 2, 3 และ 4 ครั้ง ที่มุมกระเจิง 30 องศา ของ Bi sample ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.0 ซม

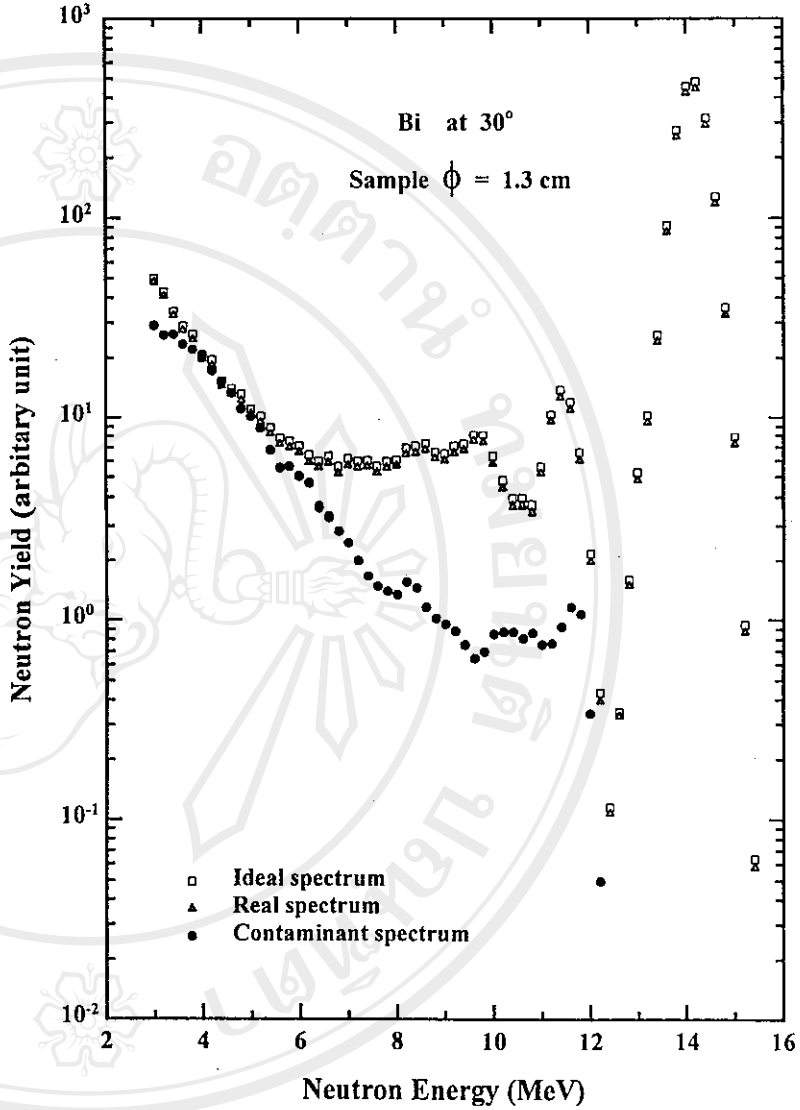


รูปที่ 5 ผลการจำลองสเปกตรัมการกระเจิง 1, 2, 3 และ 4 ครั้ง ที่มุมกระเจิง 30 องศา ของ Bi sample ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3 ซม

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 6 ผลการจำลองสเปกตรัมการกระเจิงอุดมคติ, สเปกตรัมการกระเจิงจริงจากนิวตรอนปฐมภูมิ14 MeV และสเปกตรัมการกระเจิงจริงจากนิวตรอนปนเปื้อนที่มุมกระเจิง 30 องศาของ Bi sample ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.0 ซม



รูปที่ 7 ผลการจำลองสเปกตรัมการกระเจิงอุดมคติ, สเปกตรัมการกระเจิงจริงจากนิวตรอนปฐมภูมิ14 MeV และสเปกตรัมการกระเจิงจริงจากนิวตรอนปนเปื้อนที่มุมกระเจิง 30 องศาของ Bi sample ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3 ซม

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

-เมื่อวัตถุตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3 เซนติเมตร

(i) ผลจากขนาดของวัตถุตัวอย่างจากนิวตรอนปฐมภูมิ 14 MeV

พบว่าสเปกตรัมการกระเจิงจริงแทบจะเท่ากับสเปกตรัมการกระเจิงอุดมคติ ดังแสดงในรูปที่ 7 แสดงว่าเกิดการลดทอนฟลักซ์ของนิวตรอนน้อยมาก ทั้งนี้เนื่องจากวัตถุตัวอย่างมีขนาดเล็กลง

(ii) ผลจากนิวตรอนปนเปื้อน

จะสังเกตได้ว่าสเปกตรัมการกระเจิงจริงจากนิวตรอนปนเปื้อนเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีวัตถุตัวอย่างขนาด 3 ซมแล้วผลที่ได้คล้ายกับผลเมื่อวัตถุตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.0 เซนติเมตร แต่มีค่าสูงกว่าเล็กน้อย ซึ่งเป็นเพราะการลดทอนฟลักซ์ของนิวตรอนน้อยลง

3.3 ผลของการจำลองด้วยโปรแกรม SYNTHIA เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองจริง

เนื่องจากผลท้ายสุดของการจำลองสเปกตรัมที่มุมกระเจิงต่างๆและได้ถูกกระจายแล้วนั้น จะต้องสอดคล้องกับสเปกตรัม DDX ที่วัดได้จากการทดลองจริง จึงจะถือว่าผลของการจำลองเหตุการณ์นี้มีความถูกต้องตามความเป็นจริง

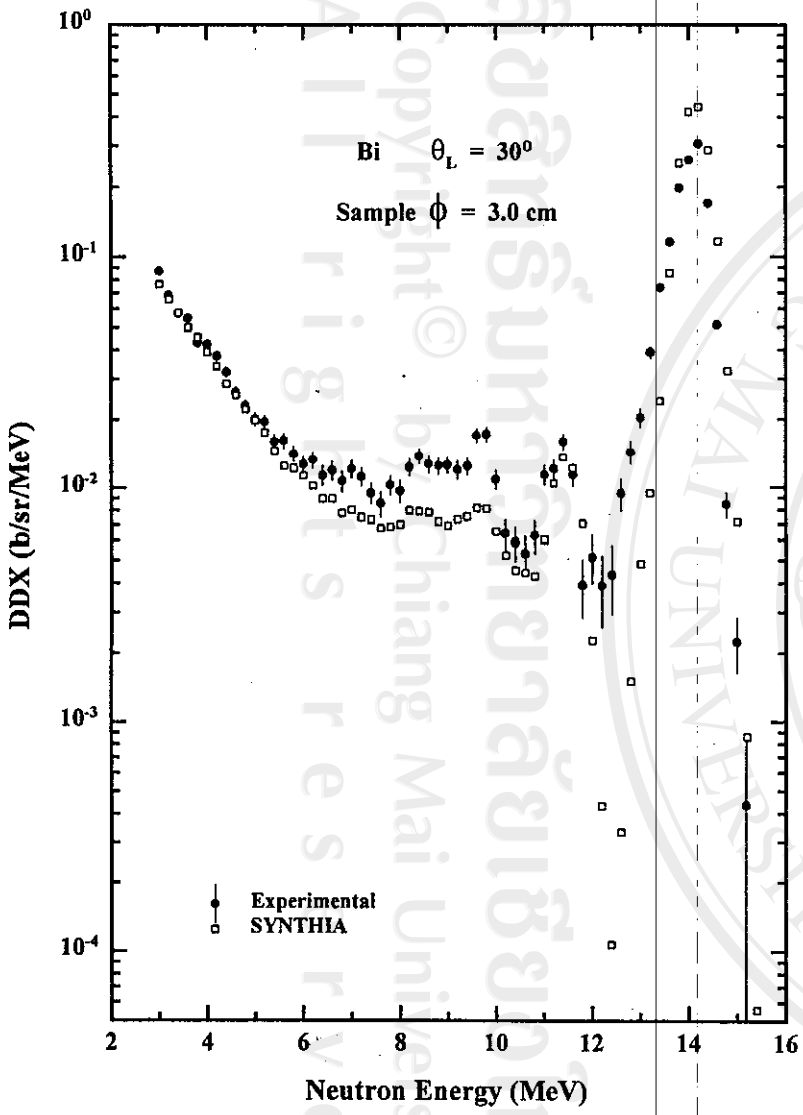
-เมื่อวัตถุตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร

จากรูปที่ 8 พบว่าโดยรวมแล้วผลของการจำลองด้วยโปรแกรม SYNTHIA สอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองจริง แต่ที่น่าสังเกต คือในช่วงของพลังงานนิวตรอนประมาณ 6 ถึง 10 MeV ซึ่งผลจากการจำลองมีลักษณะราบเรียบ แต่ผลจากการทดลองมีลักษณะเป็นพีคต่างๆ ทั้งนี้อาจจะเป็นเพราะการเพิ่มระยะเดินทางของนิวตรอนนั้น ทำให้ระบบอำนาจการจำแนกพลังงานของเครื่องนิวตรอนที่มหาวิทยาลัยเชียงใหม่มีค่าสูง[2],[6] จึงทำให้สามารถแยกแยะได้เด่นชัดขึ้น

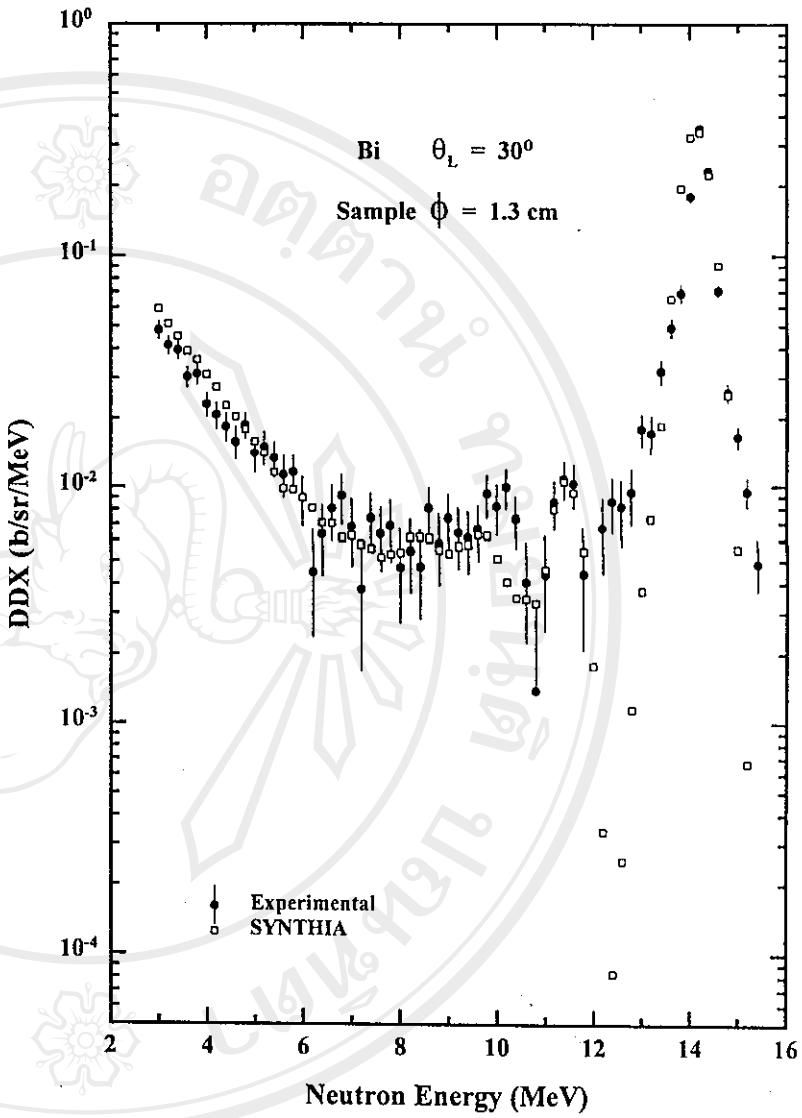
-เมื่อวัตถุตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3 เซนติเมตร

ผลของการจำลองอาจจะดูเสมือนว่าเท่ากับผลที่ได้จากการทดลองจริง ดังจะเห็นได้รูปที่ 9 แต่ถ้านำค่าความคลาดเคลื่อนมาพิจารณาประกอบด้วย จะพบว่ามีค่าสูงกว่าผลเมื่อวัตถุตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.0 เซนติเมตร ทั้งนี้คงเพราะค่า cross section ของช่วงพลังงานนี้มีค่าต่ำ ดังนั้นเมื่อใช้วัตถุตัวอย่างที่มีขนาดเล็กลง ซึ่งเวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูลก็จะนานมากขึ้น ทำให้ประสบปัญหาเกี่ยวกับ Background มากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นค่าที่ได้มาจากการวิเคราะห์จากผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อนทางสถิติสูง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 8 ผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม SYNTHIA เปรียบเทียบกับ
ผลที่ได้จากการทดลองจริง ที่มุมกระเจิง 30 องศา
ของ Bi sample ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.0 ซม



รูปที่ 9 ผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม SYNTHIA เปรียบเทียบกับ
ผลที่ได้จากการทดลองจริง ที่มุมกระเจิง 30 องศา
ของ Bi sample ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3 ซม

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

บทวิจารณ์และสรุปผล

การศึกษาผลของการกระเจิงหลายครั้งและการลดทอนฟลักซ์ของนิวตรอน แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้บิสมัทขนาดเล็กกว่าเดิม 4 เท่า สามารถลดผลของการกระเจิงหลายครั้งได้ประมาณร้อยละ 85 ถึง 90 และผลของการลดทอนฟลักซ์ของนิวตรอนได้ประมาณร้อยละ 90 ถึง 95

ส่วนผลจากนิวตรอนปนเปื้อนนั้นไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้คงเพราะบิสมัทเป็นธาตุหนักดังนั้นโอกาสการกระเจิงแบบยืดหยุ่นสำหรับนิวตรอนพลังงานต่ำจึงมีค่าสูง และโดยเฉพาะการกระเจิงที่มุมต่ำๆแล้วยิ่งมีมากขึ้น

และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงในการวัดค่า DDX แล้ว พบว่าโดยส่วนใหญ่สอดคล้องกันดี จะแตกต่างก็เฉพาะในช่วงของพลังงานนิวตรอนประมาณ 6 ถึง 10 MeV ซึ่งอาจจะเป็นเพราะค่า cross section ของช่วงพลังงานนี้มีค่าต่ำ ทำให้ค่าที่ได้มาจากการวิเคราะห์จากผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อนทางสถิติสูง

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจาก ส่วนงานกลาง สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ และคณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และมูลนิธิโทเรเพื่อการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ ประเทศไทย ที่ให้การสนับสนุนอย่างต่อเนื่อง และขอขอบคุณ Prof. Dr. Mamoru Baba ที่กรุณามอบโปรแกรม SYNTHIA สำหรับใช้ในงานวิจัยนี้ และ Prof. Dr. Akito Takahashi ที่เอื้อเฟื้อในการสั่งและให้ยืมวัตถุตัวอย่างบิสมัทขนาดต่างๆ

เอกสารอ้างอิง

1. M.Baba, S.Matsuyama, T.Ishikawa, M.Chiba, S.Sakase and N.Hirakawa, Nucl. Instr. And Meth., A366 (1995) 354.
2. U.Tippawan, "Measurement and Analysis of Double Differential Neutron Emission Cross Section for Bi-209 at 14 MeV, M.S. Thesis, Chiang Mai University (1995).
3. A.Pavlik, private communication (1988).
4. T.Vilaithong, S.Singkarat, U.Tippawan, D.Boonyawan, S.Aumkaew and S.Ratanarin, "A Neutron Collimator System for Nuclear Energy Measurement Program," Report submitted to National Research Council (1995).
5. A.Takahashi, E.Ichimura, Y.Sasaki and H.Sugimoto, J. Nuc. Sci Technol.25 (1988) 215.
6. T.Vilaithong, U.Tippawan and S.Singkarat, "A High Resolution of Double Differential

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

Neutron Emission Cross Section for ^{209}Bi at 14 MeV Incident Energy,"Italian Physical Society, Conference Proceedings, 59, Part I (1997) 574.

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved