

539.77
ก 7677
ร 3

การวัดสเปกตรัมของนิวตรอนจากเครื่องกำเนิดนิวตรอน 14 MeV ด้วยหัววัดเทอร์ชิลด์

ปริญญาโท

ของ

เกรียงไกร นิตยสุทธิ์

๒๕๓๕ พ.ศ. ๒๕๓๕

เสนอต่อมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร

เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต

กันยายน 2530

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

178662

การวัดสเปกตรัมของนิวตรอนจากเครื่องกำเนิดนิวตรอน 14 MeV ด้วยหัววัดเทอร์ชิสเลตต์

บทคัดย่อ

ของ

เกรียงไกร นิตยสุทธิ์

เสนอต่อมหาวิทยาลัยเกรินครินทร์วิโรฒ ประสานมิตร

เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต

กันยายน 2530

การวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการวัดนิวตรอนสเปกตรัมของ 14 MeV นิวตรอนจากเครื่อง
กำเนิดนิวตรอน J-25 150 keV/2.5 mA โดยวิธี threshold detectors ด้วย
การใช้ปฏิกิริยาต่าง ๆ 7 ปฏิกิริยา threshold energies อยู่ในพิสัยระหว่าง 3.75 -
13.00 MeV และวิเคราะห์ข้อมูลออกมาเป็นสเปกตรัมของนิวตรอนด้วย modified
SAND II code ผลที่ได้จากวิธีนี้ ได้นำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้โดยวิธี time of
flight ที่ทำไว้แล้ว ณ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

MEASUREMENT OF 14 MeV NEUTRON SPECTRUM WITH THRESHOLD DETECTORS

AN ABSTRACT

BY

KRIANGKRAI NITTAYASUTTI

Presented in partial fulfillment of the requirements
for the Master of Education degree
at Srinakharinwirot University
September 1986

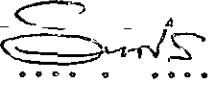
The neutron spectrum of 14 MeV neutron from J-25 150 keV/2.5 mA neutron generator has been measured for seven different reactions, with threshold energies in the range 3.75 - 13.0 MeV, by multiple - foil activation technique or threshold detectors. The measured activation rates were unfolded with the modified SAND II code. The result was compared with one from TCF measurement at Chiang Mai University.

คณะกรรมการที่ปรึกษาประจำตัวนิสิตและคณะกรรมการสอบ ได้พิจารณาปฏิญานินทน์ฉบับนี้แล้ว เห็นว่าสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิตของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

คณะกรรมการที่ปรึกษา

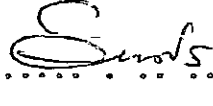
คณะกรรมการสอบ






ประธาน





ประธาน






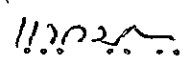
กรรมการ







กรรมการ






กรรมการ





กรรมการ





กรรมการ

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับคำปรึกษา ชี้แนะ และ
คอบคุมดูแลด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างดีจาก รองศาสตราจารย์อรรถวิทย์ อินทร ประธาน
กรรมการคณุปริญญานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิวัฒน์ ทิยาสุเทรานนท์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์
สุรีย์ แขวงโสภา กรรมการคณุปริญญานิพนธ์ และได้รับความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์
จิตปราณี วีระพงษ์ ในการตรวจแก้ไขและสอบปริญญานิพนธ์ การทดลองสามารถดำเนินไปจน
เรียบร้อย เนื่องด้วยได้รับความเอื้อเฟื้อเป็นอย่างดีนี้จึงจาก รองศาสตราจารย์ ดร. ถิรพัฒน์
วิสัยทอง และคณาจารย์ของอาคารวิจัยนิวตรอนพลังงานสูงทุกท่าน ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ
ท่านเหล่านี้ไว้เป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ คุณสุรพล ธรรมสุวรรณ คุณมันทนา รัตนกมฺพ และเจ้าหน้าที่ทุกท่าน
ในศูนย์ประมวลผลด้วยเครื่องจักร ฯ สำนักงานสถิติแห่งชาติ ที่กรุณาให้คำแนะนำ และให้
บริการการใช้เครื่องคอมพิวเตอร์

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ผู้ให้ทั้งความเมตตา และกำลังใจ
ในการศึกษาแก่ข้าพเจ้า

เกรียงไกร นิตยสุทธิ

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ	1
ภูมิหลัง	1
ความมุ่งหมายของการวิจัย	3
ความสำคัญของการวิจัย	4
ขอบเขตของการวิจัย	4
นิยามศัพท์เฉพาะ	4
2 ทฤษฎี และเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
ทฤษฎี	6
พลังงานขีดเริ่ม	6
อัตราการผลิตไอโซโทปกัมมันตรังสี	8
อัตราการสลายตัวไอโซโทปกัมมันตรังสี	9
โปรแกรมคอมพิวเตอร์ SAND II	11
ข้อพิจารณาในการเลือกปฏิกิริยาที่เหมาะสมเพื่อเป็น threshold detectors	13
เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15
3 เครื่องมือ และวิธีดำเนินการ	18
4 ผลการทดลอง	21
5 บทย่อ สรุปผลการทดลอง อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	27
บทย่อ	27
สรุปผลการทดลอง	28

บทที่	หน้า
อภิปรายผล	28
ข้อเสนอแนะ	29
บรรณานุกรม	33
ภาคผนวก	36
ภาคผนวก ก โปรแกรมคอมพิวเตอร์ TIME	37
ภาคผนวก ข ผังงาน (flowchart) ของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ SAND II	38

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 แสดงการจับคู่ระหว่าง input spectrum และข้อมูลก่ากาศตัดขวาง ที่ใช้ในการคำนวณ	16
2 แสดงระยะเวลาในการสลายตัว และระยะเวลาในการวัดรังสีแกมมา ของปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่ใช้เป็น threshold detectors	20
3 แสดงคุณสมบัติ และข้อมูลทางนิวเคลียร์ของปฏิกิริยาที่ใช้	23
4 แสดงผลการวัดรังสีแกมมา และค่ากัมมันตภาพจำเพาะจากการทดลอง .	24
5 แสดงผลการคำนวณพลักร์ของนิวตรอนที่ระดับพลังงาน E ต่าง ๆ จาก การคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ SAND II	25

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ

หน้า

1	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาคตัดขวาง และพลังงานจลน์ของ นิวตรอนในปฏิกิริยา $Al^{27}(n,\alpha)Na^{24}$ และ $Ti^{46}(n,2n)Ti^{45}$	7
2	แสดงสเปกตรัมของนิวตรอนที่ได้จากการทดลองครึ่งนี้	26
3	แสดงสเปกตรัมของนิวตรอนที่ได้จากการวัดด้วยวิธี time of flight	26

ภูมิหลัง

หลังจากการค้นพบนิวตรอนในปี ค.ศ. 1932 ได้มีการนำนิวตรอนมาใช้ในการศึกษาวิจัยในด้านต่าง ๆ เช่น การศึกษาโครงสร้างนิวเคลียส นอกจากนั้นแล้วความรู้เกี่ยวกับอันตรกิริยากับสสารได้มีการนำไปประยุกต์ใช้ทางด้าน Neutron Activation Analysis อย่างกว้างขวาง ซึ่งนิวตรอนที่ใช้ในการศึกษานั้นได้มาจากแหล่งกำเนิดประเภทต่าง ๆ เช่น นิวตรอนจากปฏิกิริยา (α, n) ของแหล่งกำเนิดชนิด Am - Be, Pu - Be นิวตรอนจากปฏิกิริยาฟิชชันในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ และนิวตรอนที่ได้จากเครื่องเร่งอนุภาคมีประจุวิ่งเข้าชนเป้า เป็นต้น ซึ่งวิธีการผลิตนิวตรอนแต่ละแบบให้นิวตรอนที่มีพลังงาน และความเข้มของลำนิวตรอนแตกต่างกันออกไป

สำหรับนิวตรอนที่ได้จากเครื่องเร่งอนุภาคนั้นเป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอนพลังงานเดี่ยว โดยอาศัยปฏิกิริยาต่าง ๆ เช่น ${}^3\text{H}(\alpha, n){}^3\text{He}$ ${}^2\text{H}(\alpha, n){}^3\text{He}$ และ ${}^3\text{H}(\alpha, n){}^4\text{He}$ เป็นต้น ซึ่งปฏิกิริยา ${}^3\text{H}(\alpha, n){}^4\text{He}$ เป็นแหล่งกำเนิดที่ดีที่สุดในปัจจุบัน เพราะสามารถผลิตนิวตรอนพลังงานสูงได้โดยการเร่งอนุภาคดิวเทอรอน (deuteron) ด้วยพลังงานต่ำกว่า 1 Mev ให้อัตราการผลิตสูง เป้าตรีเทียมสามารถทำให้เป็นสารประกอบในสถานะของแข็งได้ และราคาไม่แพง เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องเร่งอนุภาคชนิดอื่น นอกจากนั้นยังสามารถผลิตนิวตรอนพลังงานต่ำกว่า 14 Mev ได้ โดยการกระเจิงที่มุมต่าง ๆ ซึ่งเราสามารถวัดพลังงานเหล่านี้ได้ แต่เนื่องด้วยนิวตรอนเป็นอนุภาคที่แสดงสมบัติเป็นกลางทางไฟฟ้า จึงไม่เบี่ยงเบนในสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้า ไม่สามารถทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน (ionization) การวัดสเปกตรัมของนิวตรอนจึงเป็นวิธีการเฉพาะ วิธีที่ค่อนข้างแพร่หลายก็คือการใช้ระบบ time of flight spectrometer ด้วยวิธีการวัดเวลาที่นิวตรอนใช้เคลื่อนที่เมื่อทราบระยะทางที่แน่นอน ทำให้สามารถหาค่า ความเร็ว พลังงานจลน์ และสเปกตรัมของนิวตรอนได้ ข้อดีของวิธีการแบบนี้คือมีความแม่นยำสูง และปราศจากสัญญาณรบกวน

ในประเทศไทยได้มีการนำระบบ time of flight spectrometer เข้ามาใช้แล้ว ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ ศุภฤกษ์ สุวรรณขจร (ศุภฤกษ์ สุวรรณขจร 2526 : 1 - 49) ได้ทำการวัดสเปกตรัมของนิวตรอน จากเครื่องเร่งอนุภาคแบบปฏิกิริยา ${}^3\text{H}(d,n){}^4\text{He}$ ชนิด sealed tube โดยอาศัย double scintillator spectrometer ระบบดังกล่าวประกอบด้วยหัววัดรังสีสองหัววางห่างกันที่ระยะทางคงที่ อนุภาคนิวตรอนที่ออกจากแหล่งกำเนิด เมื่อชนกับหัววัดตัวแรกจะเกิดอันตรกิริยาแบบยืดหยุ่นกับนิวเคลียสของไฮโดรเจนในหัววัดเกิด recoil proton ซึ่งจะเป็นตัวสร้างสัญญาณในหัววัด ส่วนนิวตรอนที่กระเจิงออกไปเมื่อชนกับหัววัดตัวที่สองก็จะให้สัญญาณอีกสัญญาณช่วงระยะเวลาที่สัญญาณทั้งสองเกิดขึ้นนั้นก็คือ time of flight ของนิวตรอนกระเจิงทำให้สามารถคำนวณหา พลังงานของนิวตรอนตกกระทบได้ แต่วิธีการดังกล่าวมีข้อจำกัดคือยุ่งยากเนื่องจากขนาดของอุปกรณ์เพราะระบบที่ใช้ในการตรวจวัดมีขนาดใหญ่ บางครั้งไม่สามารถตรวจวัดสเปกตรัมของนิวตรอนในบางสภาวะได้ เช่น ใน phantom นอกจากนี้วิธีการ time of flight ต้องใช้หัววัดนิวตรอน โดยเฉพาะต่อเข้ากับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ค่อนข้างซับซ้อนทำให้หน่วยงานทางราชการ และสถานศึกษาที่มีเงินทุนไม่มากนักไม่สามารถจัดหามาได้

เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงข้อจำกัดดังกล่าว การวัดสเปกตรัมของนิวตรอนสามารถทำได้ด้วยวิธีการ threshold detectors โดยมีหลักการพื้นฐานคือ การเกิดอันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับนิวเคลียสในแต่ละปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้เมื่อนิวตรอนมีพลังงานสูงกว่าค่าพลังงานขีดเริ่ม (threshold energy) เท่านั้น โดยพลังงานขีดเริ่มของแต่ละปฏิกิริยาจะมีค่าแตกต่างกันออกไป ในการวัดสเปกตรัมของนิวตรอนด้วยวิธีนี้จึงต้องเลือกใช้หลายปฏิกิริยา เพื่อให้สามารถครอบคลุมได้ตลอดช่วงของพลังงานนิวตรอน

ข้อได้เปรียบของวิธีการ threshold detectors

1. นิวเคลียสเป้าหมายนำมาใช้ จัดทำให้อยู่ในลักษณะแผ่นบางได้ทำให้ไม่เป็นการรบกวนสนามนิวตรอน
2. ผลการรบกวนจากรังสีแกมมามีน้อย
3. สามารถนำไปใช้ในบริเวณที่มีพื้นที่จำกัด ซึ่งเครื่องมืออื่นไม่สามารถเข้าไปได้

4. ระบบการตรวจนับ (counting system) อันประกอบด้วยตัววัดรังสีแกมมาและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ไม่ต้องเข้าไปอยู่ในบริเวณที่มีการแผ่รังสี (radiation area)

ข้อจำกัดของวิธีการนี้คือ การวิเคราะห์ข้อมูลค่อนข้างยุ่งยาก และได้ผลไม่ค่อยแม่นยำนัก

สำหรับการคำนวณสเปกตรัมของนิวตรอน ซึ่งแบ่งเป็นนิวตรอนฟลักซ์ (neutron flux) ในช่วงพลังงานต่าง ๆ m ช่วง ด้วยการเลือกใช้ threshold detectors n ปฏิบัติ ในกรณีที่ $m > n$ การคำนวณสเปกตรัมของนิวตรอนสามารถทำได้ โดยใช้กระบวนการแก้ไขสเปกตรัมของนิวตรอนที่คาดว่าจะป็น หรือ input spectrum ให้สอดคล้องกับค่ากัมมันตภาพที่ได้จากการทดลองมากที่สุด ซึ่งผลการคำนวณด้วยวิธีนี้ ความแม่นยำจะขึ้นอยู่กับกาหนด input spectrum และการเลือกใช้ปฏิกิริยาที่เหมาะสม ส่วนค่าความคลาดเคลื่อนของการคำนวณเกิดขึ้นเนื่องจาก ความคลาดเคลื่อนในการตรวจวัดกัมมันตภาพ และความคลาดเคลื่อนของข้อมูลค่าภาคตัดขวางของปฏิกิริยา จากหลักการดังกล่าว ได้มีการสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขึ้นมาเพื่อใช้ในการคำนวณสเปกตรัมของนิวตรอน เช่น SAND II, SPECTRA และ RDMN เป็นต้น Nicholas Isoufanisdís (Isoufanisdís. 1976 : 455) ได้ให้ข้อสังเกตว่าโปรแกรม SAND II ใช้ได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ SPECTRA และ RDMN

ในงานทดลองครั้งนี้จะทำการตรวจวัดสเปกตรัมของนิวตรอนด้วยวิธีการ threshold detectors และวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ SAND II ผลการทดลองจะเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดสเปกตรัมของนิวตรอนด้วยระบบ time of flight

ความมุ่งหมายของก เรววิจัย

1. เพื่อศึกษาเทคนิคการใช้ threshold detectors ในการวัดสเปกตรัมของนิวตรอน

2. เพื่อทดสอบความถูกต้องแม่นยำของวิธีการ threshold detectors เมื่อ
คำนวณสเปกตรัมของนิวตรอนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ SAND II

ความสำคัญของการวิจัย

จะทำให้ได้เทคนิคการใช้ threshold detectors ในการตรวจวัดสเปกตรัม
ของนิวตรอนขึ้นในประเทศไทย ซึ่งจะสามารถนำไปใช้ในการตรวจวัดสเปกตรัมของนิวตรอน
ในระบบอื่น ๆ ต่อไป

ขอบเขตของการวิจัย

1. ทำการวัดสเปกตรัมของนิวตรอนเร็ว จากแหล่งกำเนิดนิวตรอนแบบเครื่องเร่ง
อนุภาค ปฏิกิริยา ${}^3\text{H}(d,n){}^4\text{He}$ Model J-25 ของอาคารวิจัยนิวตรอนพลังงานสูง
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ด้วยวิธีการ threshold detectors และวิเคราะห์ข้อมูลจาก
การทดลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ SAND II
2. เปรียบเทียบสเปกตรัมของนิวตรอนที่ได้จากข้อ 1 กับผลการวัดสเปกตรัมของ
นิวตรอนที่ได้จากวิธีการ time of flight

นิยามศัพท์เฉพาะ

1. threshold detectors หมายถึง ธาตุซึ่งทำปฏิกิริยากับนิวตรอนแล้วให้
ไอโซโทปกัมมันตรังสี เมื่อนิวตรอนที่เข้าทำปฏิกิริยานั้นมีพลังงานจลน์เท่ากับ หรือสูงกว่าค่า
พลังงานขีดเริ่มของปฏิกิริยาเท่านั้น นั่นคืออัตราการเกิดปฏิกิริยาจะมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่อนิวตรอน
มีพลังงานจลน์ต่ำกว่าพลังงานขีดเริ่ม กล้วยเงื่อนไขนี้ทำให้การเกิดกัมมันตภาพ เป็นสัดส่วนกับ
นิวตรอนหลักที่มีพลังงานสูงกว่าพลังงานขีดเริ่มเท่านั้น
2. ไอโซโทปกัมมันตรังสี (radioisotope) หมายถึง ไอโซโทปที่ไม่เสถียร
ของธาตุ จะสลายตัวให้รังสีแกมมา หรืออนุภาคมูลฐาน
3. กัมมันตภาพ (activity) หมายถึง อัตราการสลายตัวในหนึ่งวินาที

4. นิวตรอนแฟล็กซ์ (neutron flux) หมายถึง จำนวนนิวตรอนซึ่งเคลื่อนที่ตกตั้งฉากกับพื้นที่ 1 cm^2 ในเวลา 1 วินาที

5. ภาคตัดขวาง (cross section) หมายถึง ความน่าจะเป็นของการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ โดยที่อนุภาค σ ตัวเข้าชนนิวเคลียสเป้า (target nucleus) ที่มี N อะตอมในหนึ่งหน่วยพื้นที่ ซึ่งมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ ภายใน 1 วินาทีจะทำให้เกิดปฏิกิริยาขึ้น P ครั้ง จะได้

$$\sigma = \frac{P}{\sigma N}$$

ในที่นี้ σ = ค่าภาคตัดขวางมีหน่วยเป็นพื้นที่ตามปกติวัดเป็น บาร์น (barn) โดย $1 \text{ บาร์น} = 10^{-24} \text{ cm}^2$

6. ค่าคงที่การสลายตัว (decay constant) หมายถึง ความน่าจะเป็นในการสลายตัวของไอโซโทปกัมมันตรังสีหนึ่งนิวเคลียส ภายในเวลาหนึ่งวินาที มีหน่วยเป็นวินาที⁻¹

7. ครึ่งชีวิต (half life) หมายถึง เวลาที่นิวเคลียสไอโซโทปกัมมันตรังสีใช้ในการสลายให้ปริมาณเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของปริมาณเดิม ครึ่งชีวิตมีความสัมพันธ์กับค่าคงที่การสลายตัวด้วยสมการ

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } T_{1/2} &= \text{ครึ่งชีวิต} \\ \lambda &= \text{ค่าคงที่การสลายตัว} \end{aligned}$$

8. ประสิทธิภาพ (efficiency) หมายถึง อัตราส่วนการนับของหัววัดต่ออัตราการสลายตัว หรือกัมมันตภาพของสารกัมมันตรังสี

พลังงานขีดเริ่ม

นิวตรอนเป็นอนุภาคที่แสดงสมบัติทางไฟฟ้าเป็นกลาง จึงแทบไม่มีอันตรกิริยากับกลุ่มอิเล็กตรอน (electron cloud) และไม่ต้องผ่านกัณฑ์ขวางกันคูลอมบ์ (coulomb barrier) ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์โดยนิวตรอนจึงสามารถเป็นไปได้โดยง่าย แต่ในบางปฏิกิริยาที่มีค่าคิว (Q - value) เป็นลบนิวตรอนจำเป็นต้องมีพลังงานจลน์ อย่างน้อยค่าหนึ่งจึงจะสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยานั้นได้ พลังงานจลน์ของนิวตรอนปริมาณน้อยที่สุดที่จะสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาขึ้นได้เรียกว่า "พลังงานขีดเริ่ม (threshold energy)" ในทางทฤษฎีสามารถคำนวณพลังงานขีดเริ่มของแต่ละปฏิกิริยาได้โดยใช้หลักการคงตัวของโมเมนตัม และหลักการคงตัวของพลังงาน ทำให้ได้

$$E_{th} = -Q \left[1 + \frac{M_n}{M_x} \right] \quad (2.1)$$

- โดยที่ E_{th} = พลังงานขีดเริ่ม
- Q = ค่าคิวของปฏิกิริยา
- M_n = มวลของนิวตรอน
- M_x = มวลของนิวเคลียสเป้า

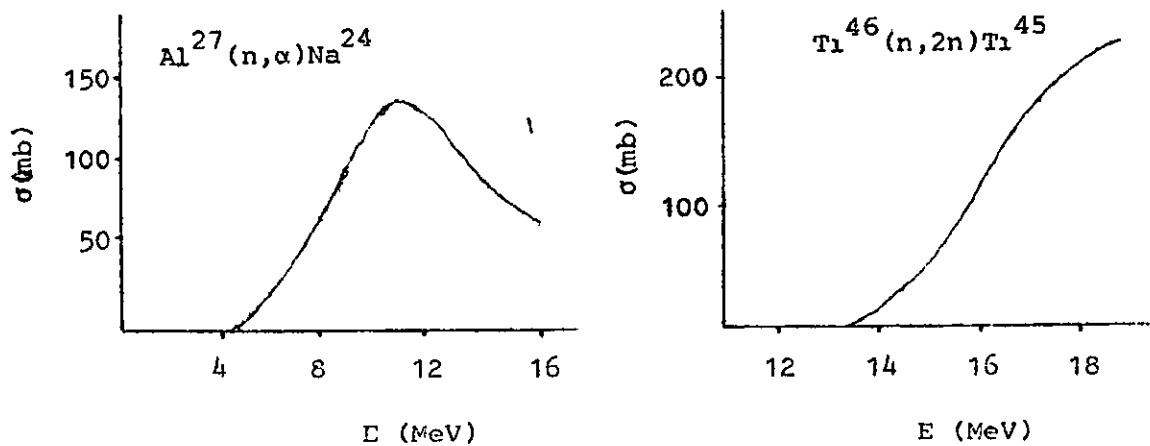
ถ้าพิจารณาความหมายของพลังงานขีดเริ่มนี้ในลักษณะของความน่าจะเป็นของการเกิดปฏิกิริยา นั่นคือ ความน่าจะเป็นของปฏิกิริยามีค่ามากกว่าศูนย์เมื่อพลังงานจลน์ของนิวตรอนมีค่ามากกว่า หรือเท่ากับพลังงานขีดเริ่ม แต่ในทางนิวเคลียร์ฟิสิกส์ความน่าจะเป็นของการเกิดปฏิกิริยามักกล่าวในเทอมของภาคตัดขวาง (cross section) ของปฏิกิริยา ดังนั้นเงื่อนไขของการเกิดปฏิกิริยาเมื่อเขียนในเทอมของภาคตัดขวางจะได้ว่า

$$\sigma = 0 \quad E < E_{th} \quad (2.1)$$

$$\sigma > 0 \quad E \geq E_{th} \quad (2.2)$$

โดยที่ σ = ค่าภาคตัดขวางของปฏิกิริยา

E = พลังงานจลน์ของนิวตรอนที่เข้าทำปฏิกิริยา (incident neutron)

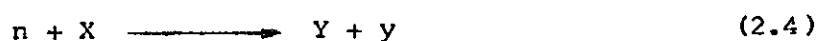


ภาพประกอบ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาคตัดขวาง (σ) และพลังงานจลน์ของนิวตรอน (E) ของปฏิกิริยา $Al^{27}(n, \alpha)Na^{24}$ และ $Ti^{46}(n, 2n)Ti^{45}$

จากภาพประกอบ 1 จะเห็นว่า ในปฏิกิริยา $Al^{27}(n, \alpha)Na^{24}$ และ $Ti^{46}(n, 2n)Ti^{45}$ มีพลังงานขีดเริ่มประมาณ 5 และ 13 MeV ตามลำดับ นั่นคือถ้านำ Al และ Ti ไปอบรังสีในสนามนิวตรอน (irradiation in neutron field) ปฏิกิริยา $Al^{27}(n, \alpha)Na^{24}$ จะสามารถใช้วัดนิวตรอนฟลักซ์ในช่วงที่นิวตรอนมีพลังงานจลน์ตั้งแต่ 5 MeV ขึ้นไป ในทำนองเดียวกัน ปฏิกิริยา $Ti^{46}(n, 2n)Ti^{45}$ จะสามารถใช้วัดนิวตรอนฟลักซ์เฉพาะส่วนที่มีพลังงานจลน์ตั้งแต่ 13 MeV ขึ้นไป และจากภาพประกอบ 1 นี้ จะเห็นว่าเมื่อพลังงานจลน์ของนิวตรอนมีค่าเปลี่ยนไป ค่าภาคตัดขวางของปฏิกิริยาจะมีขนาดเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้นอาจเขียนภาคตัดขวางสำหรับนิวตรอนพลังงานจลน์ E ได้เป็น $\sigma(E)$ ภาคตัดขวางมีหน่วยเป็นบารน์ (barn) โดยที่ 1 บารน์ = 10^{-24} cm^2

อัตราการผลิตไอโซโทปกัมมันตรังสี

พิจารณาการเกิดปฏิกิริยาโดยนิวตรอน (n) เข้าทำอันตรกิริยากับนิวเคลียสเป้า (X) ทำให้ได้นิวเคลียสใหม่ (Y) และอนุภาคใหม่ (y) ดังสมการ



อัตราในการเกิดปฏิกิริยาหรืออัตราการเกิดนิวเคลียสใหม่เขียนแทนได้ด้วย R ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$R = N_0 \int_{E=0}^{\infty} \sigma(E) \phi(E) dE \quad (2.5)$$

โดยที่ N_0 = จำนวนนิวเคลียสทั้งหมดของเป้า
 $\sigma(E)$ = ภาคตัดขวางของปฏิกิริยา เมื่อนิวตรอนมีพลังงานจลน์เท่ากับ E
 $\phi(E)$ = ฟลักซ์ของนิวตรอน เมื่อนิวตรอนนั้นมีพลังงานจลน์เท่ากับ E
 มีหน่วยเป็นนิวตรอน/(พื้นที่ \times เวลา)

แต่นิวเคลียสใหม่ (Y) ที่เป็นไอโซโทปกัมมันตรังสี (radioisotope) จะมีการสลายตัวต่อไป โดยมีอัตราการสลายตัว เป็นสัดส่วนกับจำนวนไอโซโทปกัมมันตรังสีดังสมการ

$$\text{อัตราการสลายตัว} = \lambda N \quad (2.6)$$

โดยที่ λ = ค่าคงที่การสลายตัว (decay constant) ของไอโซโทปกัมมันตรังสี
 N = จำนวนทั้งหมดของไอโซโทปกัมมันตรังสี

ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงของจำนวนนิวเคลียสใหม่ในหนึ่งหน่วยเวลา $\frac{dN}{dt}$ จะมีค่าเท่ากับ

$$\frac{dN}{dt} = R - \lambda N \quad (2.7)$$

แก้สมการดิฟเฟอเรนเชียล (2.7) โดยใช้เงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) เมื่อเริ่มอาบรังสี $t = 0$ จำนวนไอโซโทปกัมมันตรังสี $N = 0$ จะได้

$$N(t) = \frac{R}{\lambda} \{1 - \exp(-\lambda t)\} \quad (2.8)$$

โดยที่ $N(t)$ = จำนวนไอโซโทปกัมมันตรังสีที่ผลิตได้สุทธิ เมื่อใช้เวลาในการอาบรังสีเท่ากับ t

อัตราการสลายตัวไอโซโทปกัมมันตรังสี

ในทางปฏิบัติจำนวนไอโซโทปกัมมันตรังสีจะทราบได้เมื่อมีการสลายตัว และปลดปล่อยอนุภาคหรือรังสีแกมมาเท่านั้น ซึ่งอัตราการสลายตัวเป็นไปตามสมการ (2.7) ดังนั้นหลังจากการอาบรังสีเป็นเวลา t_{1r} อัตราการสลายตัวของไอโซโทปกัมมันตรังสีจะมีค่าเท่ากับ

$$\lambda N(t) = R \{1 - \exp(-\lambda t_{1r})\}$$

เรียกอัตราการสลายตัวนี้ว่า "กัมมันตภาพ (activity)" ถ้าแทนด้วยสัญลักษณ์ A_0 จะได้

$$A_0 = R \{1 - \exp(-\lambda t_{1r})\} \quad (2.9)$$

ถ้าทำการอาบรังสีเป็นเวลานาน $t \rightarrow \infty$ จะได้ $A_0 \rightarrow A_\infty$ โดยที่ A_∞ คือกัมมันตภาพอิ่มตัว (saturation activity) จากสมการ (2.9) จะเห็นได้ว่า $A_\infty = R$ สามารถเขียนสมการ (2.9) ใหม่ได้เป็น (Price, 1964 : 333)

$$A_0 = A_\infty \{1 - \exp(-\lambda t_{1r})\} \quad (2.10)$$

เมื่อสารรังสีจนได้กัมมันตภาพมีค่ากำหนดให้เท่ากับ A_0 แล้วหยุดสารรังสี หลังจากนั้นปล่อยให้มีการสลายตัวไปเป็นเวลา t นับแต่หยุดสารรังสี กัมมันตภาพจะมีค่าลดลงดังสมการ

$$A(t) = A_0 \exp(-\lambda t) \quad (2.11)$$

ถ้า t_1 เป็นช่วงเวลาดั้งแต่หยุดสารรังสีจนถึงเวลาเริ่มนับ และ t_2 เป็นช่วงเวลาดั้งแต่หยุดสารรังสีจนถึงเวลาสิ้นสุดการนับ ภายในช่วงเวลาที่มีการวัดรังสีแกมมา t_1 ถึง t_2 จะมีการสลายตัวของไอโซโทปกัมมันตรังสีไปเป็นจำนวน $D(t_1, t_2)$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$D(t_1, t_2) = \int_{t=t_1}^{t_2} A(t) dt \quad (2.12)$$

แทนค่า $A(t)$ จาก (2.11) ลงใน (2.12) ได้

$$D(t_1, t_2) = A_0 \int_{t=t_1}^{t_2} \exp(-\lambda t) dt \quad (2.13)$$

$$D(t_1, t_2) = \frac{A_0}{\lambda} \{ \exp(-\lambda t_1) - \exp(-\lambda t_2) \} \quad (2.14)$$

แทนค่า A_0 จาก (2.10) ใน (2.14) จะได้

$$D(t_1, t_2) = \frac{A_\infty}{\lambda} \{1 - \exp(-\lambda t_{1r})\} \{ \exp(-\lambda t_1) - \exp(-\lambda t_2) \} \quad (2.15)$$

โดยทั่วไปไอโซโทปกัมมันตรังสีเมื่อสลายตัวจะปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมา จึงนิยมตรวจวัดการสลายตัวจากรังสีแกมมา ถ้าความน่าจะเป็นของการปลดปล่อยรังสีแกมมาพลังงานค่าหนึ่งของการสลายตัว 1 ครั้งมีค่าเท่ากับ F (ค่า F ของรังสีแกมมาที่มีพลังงานต่างกัน อาจมีค่าไม่เท่ากันแม้จะได้จากการสลายตัวของไอโซโทปชนิดเดียวกัน) และในการตรวจวัดรังสีแกมมานี้ใช้ระบบการวัดซึ่งมีประสิทธิภาพ (efficiency) เท่ากับ ϵ ระบบนี้จะสามารถแสดงปริมาณการนับรังสีแกมมาที่เราสนใจมีค่าเท่ากับ G โดยที่

$$G = \epsilon F D(t_1, t_2)$$

$$\text{หรือ } G = \epsilon F \frac{A_\infty}{\lambda} \{1 - \exp(-\lambda t_{1r})\} \{\exp(-\lambda t_1) - \exp(-\lambda t_2)\} \quad (2.16)$$

จัดรูปใหม่ได้

$$A_\infty = \frac{\lambda G}{\epsilon F \{1 - \exp(-\lambda t_{1r})\} \{\exp(-\lambda t_1) - \exp(-\lambda t_2)\}} \quad (2.17)$$

จากสมการ (2.17) สามารถคำนวณหาค่ากัมมันตภาพจำเพาะ (specific activity) จากการทดลอง (A_{mea}) ได้ดังนี้

$$A_{\text{mea}} = \frac{\lambda G}{N_0 \epsilon F \{1 - \exp(-\lambda t_{1r})\} \{\exp(-\lambda t_1) - \exp(-\lambda t_2)\}} \quad (2.18)$$

โดยค่า A_{mea} นี้จะได้นำไปใช้เป็น input ของการคำนวณในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ SAND II ต่อไป

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ SAND II

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ SAND II ที่ได้ถูกดัดแปลงโดย Dr. R. Wolfle ให้เป็นภาษาเบสิก และใช้หน่วยความจำขนาดเล็กลง เพื่อให้สามารถใช้ได้ในไมโครคอมพิวเตอร์ มีหลักการโดยย่อดังนี้

การคำนวณสเปกตรัมของนิวตรอนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ SAND II เกี่ยวข้องกับปริมาณสำคัญ 2 ปริมาณคือ

1. A_{mca} เป็นกัมมันตภาพจำเพาะของ threshold detectors ที่ได้จากการทดลอง

2. A_{cal} เป็นกัมมันตภาพจำเพาะที่คำนวณได้จากโปรแกรม ปริมาณทั้งสองมีความสัมพันธ์กับสมการ

$$A_1 = \int_{E=0}^{\infty} \sigma_1(E) \varphi(E) dE \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (2.19)$$

โดยที่ A_1 = ค่ากัมมันตภาพอิ่มตัว (saturation activity) ต่อหนึ่งนิวเคลียสของเป้า สำหรับปฏิกิริยาที่ 1

$\sigma_1(E)$ = ค่าภาคตัดขวางของปฏิกิริยาเมื่อนิวตรอนมีพลังงานจลน์เท่ากับ E สำหรับปฏิกิริยาที่ 1

$\varphi(E)$ = ฟลักซ์ของนิวตรอนพลังงานจลน์ E

n = จำนวนปฏิกิริยาที่ใช้เป็น threshold detectors

ถ้าทำการวัดสเปกตรัมของนิวตรอนภายในพิสัยของพลังงานนิวตรอน E_{min} ถึง E_{max} สามารถเขียนสมการ (2.19) ใหม่ได้เป็น

$$A_1 = \int_{E=E_{min}}^{E_{max}} \sigma_1(E) \varphi(E) dE \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (2.20)$$

โดยที่ E_{min} = ขีดจำกัดล่างของสเปกตรัมนิวตรอน ค่า E_{min} มีค่าเท่ากับพลังงานขีดเริ่มที่ต่ำสุดในชุดของปฏิกิริยาที่นำมาใช้เป็น threshold detectors

E_{max} = ขีดจำกัดบนของสเปกตรัมนิวตรอน เป็นขอบเขตที่แสดงให้
ทราบว่ามีนิวตรอนใดในสเปกตรัมที่มีพลังงานจลน์สูงกว่า
ค่าดังกล่าว หรือ $\sigma(E) = 0$ เมื่อ $E > E_{max}$

สำหรับปริมาณ A_{mea} สามารถหาค่าได้ด้วยการแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้จากการ
ทดลองลงในตัวแปรทางขวามือของสมการ (2.18) กล่าวคือ

$$A_{mea}^{(1)} = \frac{\lambda G}{\epsilon F N_0 \{1 - \exp(-\lambda t_{ir})\} \{\exp(-\lambda t_1) - \exp(-\lambda t_2)\}} \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (2.21)$$

แล้วนำค่า A_{mea} ที่คำนวณได้ไปใช้เป็น input ตัวหนึ่งของโปรแกรม ฯ

ส่วนปริมาณ A_{cal} โปรแกรมคอมพิวเตอร์ SAND II จะคำนวณขึ้นมาด้วยสมการ
(2.20) โดยใช้ $\sigma_c(E)$ ซึ่งเป็น input spectrum ฉะนั้น A_{cal} คำนวณได้จากสมการ

$$A_{cal}^{(1)} = \int_{E=E_{min}}^{E_{max}} \sigma_1(E) \sigma_c(E) dE \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (2.22)$$

หลังจากนั้นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ SAND II จะทำการเปรียบเทียบปริมาณ A_{cal}
กับ A_{mea} แล้วทำการปรับปรุงแก้ไขค่า input spectrum $\sigma_c(E)$ ด้วยวิธีการ
iterative method (McElroy, 1969 : 234) ทำเช่นนี้ซ้ำหลายครั้งจนในที่สุดโปรแกรม
จะให้ $\sigma_c(E)$ ที่ทำให้ A_{cal} มีค่าใกล้เคียงกับ A_{mea} ซึ่ง $\sigma_c(E)$ ที่เป็น output
ของโปรแกรมนี้คือ ผลการคำนวณสเปกตรัมของนิวตรอนจากแหล่งกำเนิดที่ทำการวัดนั่นเอง

ข้อพิจารณาในการเลือกปฏิบัติที่เหมาะสมเพื่อเป็น threshold detectors

ในการเลือกปฏิบัติใดมาเป็น threshold detectors จากคำแนะนำของ
Jozsa V. Sandberg (Sandberg, 1983 : 228 - 231) และ L. Kuljpers
และคณะ (Kuljpers and other, 1977 : 215 - 216) มีหลักการพิจารณา
ดังต่อไปนี้

1. ภาคตัดขวางของปฏิกิริยาในช่วงพลังงานจลน์ของนิวตรอนที่ต้องการวัดนั้นเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป และควรมีค่าสูงพอที่จะทำให้เกิดกัมมันตภาพซึ่งตรวจวัดแล้ว ให้ค่าที่เชื่อถือได้ เมื่อนำไปใช้กับแหล่งกำเนิดนิวตรอนที่ต้องการวัดสเปกตรัม

2. f_{011} ที่นำมาใช้เมื่อทำการอาบรังสีแล้วควรจะให้ไอโซโทปกัมมันตรังสีที่มีการแผ่รังสีแกมมาไม่ยุ่งยากต่อการวิเคราะห์ นั่นคือ ไม่ก่อให้เกิดรังสีแกมมาจากไอโซโทปกัมมันตรังสีอื่นที่ไม่ต้องการมากจนเกินไป ไอโซโทปกัมมันตรังสีที่ต้องการศึกษาถ้าเป็นไปได้ ควรเกิดจากปฏิกิริยาเดี่ยว และให้รังสีแกมมาที่ปราศจากการรบกวนจาก background รังสีแกมมาพลังงานใกล้เคียงกัน และ escape peak ซึ่งอาจเกิดขึ้นในระหว่างการตรวจวัดรังสีแกมมา

3. ข้อมูลค่า branching ratio หรือความน่าจะเป็นของการปลดปล่อยรังสีแกมมาต่อการสลายตัวหนึ่งครั้งควรมีค่าสูง และมีความถูกต้องแม่นยำ

4. ความยาวนานของค่าครึ่งชีวิตไอโซโทปกัมมันตรังสีมีความเหมาะสม นั่นคือ ค่าครึ่งชีวิตของปฏิกิริยาควรมีความยาวนานอยู่ในอันดับ (order) เดียวกันกับระยะเวลาในการอาบรังสี หรือมีค่ามากกว่าระยะเวลาทำการอาบรังสี เนื่องจากผลที่ได้จากภาววัดสเปกตรัมของนิวตรอนด้วย threshold detectors จะเป็นค่าเฉลี่ยของนิวตรอนฟลักซ์ในช่วงเวลาที่ทำการอาบรังสี ถ้าค่าครึ่งชีวิตมีค่าน้อยกว่าระยะเวลาในการอาบรังสีมากแล้ว เมื่อนำปฏิกิริยานี้ไปใช้กับแหล่งกำเนิดนิวตรอนที่มีฟลักซ์ไม่คงที่ มีการแปรผันตามเวลา จะทำให้ได้ผลการตรวจวัดสเปกตรัมของนิวตรอน เฉพาะช่วงปลายของการอาบรังสีเท่านั้น อีกประการหนึ่งข้อมูลของค่าครึ่งชีวิตควรมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 2 %

5. เนื้อสารที่นำมาใช้ในการทดลองควรมีค่าความบริสุทธิ์สูง เพื่อลดการรบกวนจากปฏิกิริยาที่ไม่ต้องการ และเนื้อสารที่นำมาใช้นี้ควรอยู่ในลักษณะแผ่นบาง (f_{011}) เพื่อให้รับกานสนามนิวตรอน

6. เลือกใช้ปฏิกิริยาหลายปฏิกิริยา โดยที่แต่ละปฏิกิริยามีค่าพลังงานขีดเริ่มแตกต่างกัน สามารถครอบคลุมได้ตลอดช่วงสเปกตรัมของนิวตรอนที่ต้องการวัด

เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

K. Shin, T. Saito และ M. Fujii (Shin, Saito and Fujii. 1981 : 587 - 594) ได้ทำการวัดสเปกตรัมของนิวตรอนจากเครื่องกำเนิดนิวตรอนแบบเครื่องเร่งอนุภาคโปรตรอนพลังงาน 52 MeV เข้าชนเป้าหมาย (thick target) 3 ชนิด อันได้แก่ C, Al และ Pb ด้วยวิธีการ threshold detectors คณะผู้วิจัยได้ทำการตัดแปลงโปรแกรมคอมพิวเตอร์ SAND II เพื่อใช้คำนวณสเปกตรัมของนิวตรอนในเทอมของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (reaction rate) จากการเปรียบเทียบผลการวัดสเปกตรัมด้วยวิธี threshold detectors กับผลการวัดสเปกตรัมของนิวตรอนด้วยวิธี time of flight อาศัยหัววัด scintillator NE-213 พบว่าการวัดสเปกตรัมด้วยวิธีทั้งสองให้ผลสอดคล้องกันเป็นอย่างดีเฉพาะในช่วงพลังงานสูงกว่า 10 MeV จากผลการทดลองในครั้งนี้ พบว่าการวัดสเปกตรัมของนิวตรอนด้วยวิธี threshold detectors ใช้ได้ดีในช่วงสเปกตรัมของนิวตรอนพลังงานสูงกว่า 10 MeV

— L. Kuipers และคณะ (Kuipers and others. 1977 : 215 - 224) ได้ทำการวัดสเปกตรัมของนิวตรอนจากปฏิกิริยา $D + T \rightarrow {}^4\text{He} + n(14 \text{ MeV})$ ใน fusion reactor blanket model โดยใช้วิธีการ threshold detectors ประกอบด้วย 21 ปฏิกิริยาที่ระยะ 0.100, 0.308 และ 0.528 เมตร ห่างจากแกนของแหล่งกำเนิด ตามลำดับ แล้วทำการคำนวณสเปกตรัมของนิวตรอนในพิสัย 1.0 - 14.1 ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ SAND II ในการคำนวณคณะผู้วิจัยได้ทำการทดลองใช้ input spectrum 2 แบบคือ constant flux density และ reference spectrum ประกอบกับใช้ข้อมูลภาคตัดขวางจาก 2 แหล่งคือ CCC112B และ ENDF/B IV + CCC112B ในการคำนวณ โดยจัดเข้าคู่กันได้ 3 แบบดังต่อไปนี้

ตาราง 1 แสดงการจับคู่ระหว่าง input spectrum และข้อมูลค่าภาคตัดขวางที่ใช้ในการคำนวณ

แบบที่	input spectrum	ค่าภาคตัดขวาง
1	constant flux density	ENDF/B + CCC112B
2	reference blanket model	ENDF/B + CCC112B
3	constant flux density	CCC112B

เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ SAND II กับผลการคำนวณสเปกตรัมของนิวตรอนจากแหล่งกำเนิดชนิดเดียวกันด้วยวิธีการ Monte Carlo พบว่าการคำนวณด้วยการใช้ input spectrum แบบ reference blanket model ประกอบกับข้อมูลค่าภาคตัดขวางแบบ ENDF/B IV + CCC112B ให้ผลการคำนวณที่สอดคล้องกับสเปกตรัมของนิวตรอนที่คำนวณได้จากวิธี Monte Carlo มากกว่าอีก 2 วิธี

- L.S. Chuang, H.K. Wong และ K.C. Wong (Chuang, Wong and Wong. 1979 : 487 - 492) ได้ทำการวัดสเปกตรัมของนิวตรอนจากเครื่องกำเนิดแบบเครื่องเร่งอนุภาค อาศัยปฏิกิริยา $^3\text{H}(d,n)^4\text{He}$ โดยใช้ 2 วิธีร่วมกันคือ วิธีแรก time of flight อาศัย liquid scintillation recoil-proton spectrometer เพื่อวัดสเปกตรัมนิวตรอนสัมพัทธ์ (relative neutron spectrum $S(E)$) เมื่อทราบสเปกตรัมของนิวตรอนสัมพัทธ์นี้แล้ว จะสามารถคำนวณสเปกตรัมของนิวตรอนสัมบูรณ์ (absolute spectrum $F(E)$) ได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ $F(E) = k S(E)$ ค่าคงที่ k คำนวณได้จากผลการทดลองด้วยการใช้วิธีที่สอง threshold detectors เพียงปฏิกิริยาเดียว แต่เพื่อเป็นการยืนยัน ผลการคำนวณ คณะผู้วิจัยชุดนี้ได้เลือกใช้ปฏิกิริยา 5 ปฏิกิริยามาเป็น threshold detector จากผลการคำนวณด้วยวิธีนี้พบว่า มีค่าความคลาดเคลื่อนของผลการคำนวณประมาณ $\pm 8\%$

M. Hyvönen-Dabek และ P. Nakkinen-Vilkkı (Hyvonen-Dabek and Nakkinen-Vilkkı. 1980 : 451 - 458) ได้ทำการวัดสเปกตรัมของนิวตรอนจากแหล่งกำเนิด

นิวตรอนแบบเครื่องเร่งอนุภาคอาศัยปฏิกิริยา $^3\text{H}(\alpha, n)^4\text{He}$ ที่ระยะติดกับเป้า และ 15 ซม. ห่างจากเป้าของแหล่งกำเนิดนิวตรอนด้วยการใช้ threshold detectors 10 ปฏิกิริยา โดยมีพลังงานขีดเริ่มในพิสัย 1.3 - 13.9 MeV และทำการคำนวณสเปกตรัมของนิวตรอนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ LOUHI จากผลการทดลองพบว่า ที่ระยะติดกับเป้าทริเทียม (tritium target) ของแหล่งกำเนิดนิวตรอน สเปกตรัมมีลักษณะเป็นยอดแหลมค่อนข้างแคบมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ 14.6 MeV ที่ระยะ 15 ซม. ห่างจากเป้าสเปกตรัมของนิวตรอนมีลักษณะคล้ายกับระยะติดกับเป้าแต่มียอดต่ำกว่า และยอดแหลมมีขนาดกว้างกว่าเล็กน้อย นอกจากนี้คณะผู้วิจัยได้ทำการวัดสเปกตรัมของนิวตรอนที่ผ่านออกมาจากแบบจำลองเนื้อเยื่อของเหลว (tissue equivalent fluid) ความหนา 5 ซม. พบว่ามีบางส่วนประมาณ 32 % ของนิวตรอนจากแหล่งกำเนิดซึ่งมีพลังงานอยู่ในช่วง 1 - 6 MeV เกิดขึ้น

บทที่ 3

เครื่องมือ และวิธีดำเนินการ

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. แหล่งกำเนิดนิวตรอนแบบเครื่องเร่งอนุภาคปฏิกิริยา ${}^3\text{H}(d,n){}^4\text{He}$ model J-25 150 keV/2.5 mA ให้ 14 MeV นิวตรอน 2×10^{11} นิวตรอนต่อวินาที
2. Activation foil เพอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ประมาณ 99 % เส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 - 24.5 mm. ความหนาของ foil ประมาณ 0.10 - 0.20 mm. ผลิตโดยบริษัท Reactor Experiments
3. ระบบการวัดรังสีแกมมาประกอบด้วย
 - 3.1 HPGe detector 74 cm³ FWHM 1.91 keV ที่ 1.33 MeV
 - 3.2 เครื่องจ่ายไฟโวลต์เตจสูง Canberra model 3105
 - 3.3 แอมพลิฟายเออร์ Canberra model 2021
 - 3.4 เครื่องวิเคราะห์สัญญาณหลายช่อง (MCA) Canberra 85 ต่อเข้ากับไมโครคอมพิวเตอร์ Apple II plus เพื่อเก็บบันทึกข้อมูล
4. เมนเฟรมคอมพิวเตอร์ IBM CPU model 3031 เพื่อใช้คำนวณประสิทธิภาพของ HPGe detector ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ PEAK code
5. ไมโครคอมพิวเตอร์ Cannon AS 100 เพื่อใช้คำนวณสเปกตรัมของนิวตรอนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ SAND II

วิธีดำเนินการ

1. คัดเลือกปฏิกิริยาที่เหมาะสมเพื่อใช้เป็น threshold detectors โดยพิจารณาจากชนิดของ foil ที่มีอยู่ในห้องทดลอง และใช้ข้อพิจารณาในการเลือกปฏิกิริยาที่เหมาะสมเพื่อเป็น threshold detectors ดังได้กล่าวไว้ในบทที่ 2

2. จัดหาข้อมูลภาคตัดขวางของปฏิกิริยา ในการทดลองครั้งนี้ใช้ข้อมูลค่าภาคตัดขวางของทุกปฏิกิริยาด้วยการอ่านค่าจากกราฟใน Neutron Cross sections (BNL 325) volume II third edition (Garber and Kinsey. 1976 : 1 - 491)

3. คำนวณประสิทธิภาพของ HPGe detector สำหรับรังสีแกมมาพลังงานค่าต่าง ๆ ที่ต้องการวัดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ PEAK Code ของ T. Nakamura (Nakamura. 1975 : 521 - 527) โดยขนาดและรูปร่างของ HPGe Detector ที่ใช้ได้มาจากคู่มือของบริษัท EG & G ORTEC และรายงานการวิจัยของ S. Itagaki, M. Yoshida และ K. Sugiyama ในการคำนวณใช้เมนเฟรมคอมพิวเตอร์ IBM CPU model 3031 ของสำนักงานสถิติแห่งชาติ

4. วางแผนการอบรังสีนิวตรอน และแผนการวัดรังสีแกมมา โดยขั้นตอนมีตัวแปรสำคัญที่มีความเกี่ยวพันกัน สามตัวแปรคือ ระยะเวลาในการอบรังสี (irradiation time) ระยะเวลาในการสลายตัว (decay time) และระยะเวลาในการวัดรังสีแกมมา (counting time) ข้อพิจารณาเบื้องต้นระยะเวลาทั้งสามให้เหมาะสมมีหลักการดังนี้

4.1 ระยะเวลาในการฉายรังสี มีความยาวนานพอ เพียงที่จะทำให้ทุกปฏิกิริยาที่ได้เลือกมาแล้วนั้นสามารถผลิตไอโซโทปกัมมันตรังสีได้มากพอที่จะให้ทำการวัดรังสีแกมมาได้ แต่ระยะเวลาในการอบรังสีนี้ต้องพิจารณาร่วมกับรายละเอียดในข้อ 2 ของเรื่องข้อพิจารณาในการเลือกปฏิกิริยาที่เหมาะสมเพื่อเป็น threshold detectors ในบทที่ 2

4.2 ระยะเวลาในการสลายตัว ควรมีความยาวนานเพียงพอที่จะทำให้ไอโซโทปกัมมันตรังสีอื่นสลายตัวไป โดยเฉพาะไอโซโทปกัมมันตรังสีชนิดที่จะทำให้เกิดการรบกวนรังสีแกมมาที่ต้องการวัด แต่ต้องไม่ยาวนานจนทำให้ไอโซโทปกัมมันตรังสีที่ต้องการวัดเกิดการสลายตัวไปมากจนเกินความจำเป็น

4.3 ระยะเวลาในการวัดรังสีแกมมา ต้องมีค่ามากพอที่จะทำให้ได้สถิติของการวัดที่ดี แต่ต้องไม่ยาวนานจนเป็นการทำลาย การวัดไอโซโทปกัมมันตรังสีจากปฏิกิริยาอื่นที่จะต้องทำการวัดต่อไป

เพื่อลดความยุ่งยากในการจัดสรรระยะเวลาทั้งสาม ในการทดลองครั้งนี้ได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ TIME (ภาคผนวก ก) ช่วยในการคำนวณ การทดลองครั้งนี้ได้ทำการอบรังสีตามแผนที่กำหนดไว้ดังนี้คือ อบรมรังสีนิวตรอน foil ทุกแผ่นพร้อมกัน ทำมุมศูนย์กลางเท่ากับแนวการเคลื่อนที่ของอนุภาคดีวเทอรอน ตำแหน่งติดกับเป้าของแหล่งกำเนิด 14 mev นิวตรอน model J-25 ปรับ high voltage ที่ 135 kv target current ที่ 600 μ A ใช้เวลาในการอบรังสีนิวตรอน 10 นาที หลังจากอบรังสีนิวตรอนแล้ว ได้ทำการวัดรังสีแกมมาที่มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตาราง 2 แสดงระยะเวลาในการสลายตัว และระยะเวลาในการวัดรังสีแกมมาของ ปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่ใช้เป็น threshold detectors

Foil	ปฏิกิริยา	ระยะเวลาในการสลายตัว (ชั่วโมง : นาที : วินาที)	ระยะเวลาในการวัดรังสีแกมมา (วินาที)
V	$V^{51} (n,p)Ti^{51}$	00 05 00	180
Co	$Co^{59} (n,\alpha)Mn^{56}$	00 41 18	2000
Cu	$Cu^{65} (n,p)Ni^{65}$	01 22 00	5000
Mg	$Mg^{24} (n,p)Na^{24}$	03 20 00	6402
Al	$Al^{27} (n,\alpha)Si^{24}$	05 16 38	5000
Cu	$Cu^{65} (n,2n)Cu^{64}$	06 50 00	1000
Cu	$Cu^{65} (n,2n)Cu^{64}$	32 24 55	20000
Co	$Co^{59} (n,2n)Co^{58}$	42 14 53	90000

5. นำผลที่ได้จากการวัดรังสีแกมมา มาคำนวณหาค่ากัมมันตภาพจำเพาะจากการทดลอง (A_{mea}) โดยการแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองลงในสมการ (2.18)

6. นำข้อมูลค่าภาคตัดขวางของปฏิกิริยา input spectrum และค่ากัมมันตภาพจำเพาะจากการทดลอง (A_{mea}) มาคำนวณหาสเปกตรัมของนิวตรอนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ผลการทดลอง

ผลการเลือกปฏิกิริยาที่เหมาะสมเพื่อเป็น threshold detectors และข้อมูลทางนิวเคลียร์ของปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ได้แสดงในตาราง 3 หลังจากออปรังสีนิวตรอน แล้วทำการวัดรังสีแกมมาจากทุกปฏิกิริยาด้วย HPGe detector นำผลการวัดรังสีแกมมาที่ได้ไปคำนวณหาค่ากัมมันตภาพจำเพาะจากการทดลอง (A_{mea}) ของแต่ละปฏิกิริยาได้ผลการคำนวณดังแสดงในตาราง 4 ค่า A_{mea} ที่ได้นำไปใช้ในการคำนวณสเปกตรัมของนิวตรอนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ SAND II มีพิสัยของสเปกตรัมอยู่ในช่วงพลังงานจลน์ของนิวตรอนเท่ากับ 3.75 - 17.00 MeV โดยแบ่งพลังงานในพิสัยออกเป็นช่วง ๆ ละ 0.25 MeV รวม 54 energy groups ใช้สเปกตรัมจากการทดลองของ Hyvonen-Dabek และ Nikkinen-Vilki (Hyvonen-Dabek and Nikkinen-Vilki, 1980 : 455) เป็น input spectrum แล้วทำการคำนวณด้วยวิธีการ iteration 10 ครั้ง ให้ผลการคำนวณสเปกตรัมของนิวตรอนดังแสดงในตาราง 5 และภาพประกอบ 2 โดยจะเห็นได้ว่า สเปกตรัมของนิวตรอนที่ได้จากการทดลองในครั้งนี้มีลักษณะเป็นยอดแหลม (peak) จุดสูงสุดของยอดแหลมอยู่ที่ตำแหน่งพลังงานจลน์ของนิวตรอนมีค่าระหว่าง 14.50 - 14.75 MeV FWHM = 1.25 MeV Integral flux = $3.60 \times 10^8 \text{ neutron.cm}^{-2}.\text{sec}^{-1}$

จากการวัดสเปกตรัมของนิวตรอนด้วยระบบ time of flight spectrometer อากัย double scintillation spectrometer ของ คุณหญิง สุวรรณหงจร (คุณหญิง สุวรรณหงจร 2526 : 38) ได้ผลการวัดสเปกตรัมของนิวตรอนมีลักษณะเป็นยอดแหลม จุดสูงสุดของยอดแหลมอยู่ที่พลังงานจลน์ของนิวตรอนเฉลี่ย 14.7 MeV FWHM = 0.9 MeV ดังแสดงในภาพประกอบ 3

จะเห็นได้ว่า ผลการวัดสเปกตรัมของนิวตรอนด้วยวิธี threshold detectors และวิธี time of flight ได้ผลที่สอดคล้องใกล้เคียงกัน ทั้งในด้านรูปร่างและตำแหน่งสูงสุดของยอดแหลม

สิ่งเหล่านี้แสดงให้เห็นว่า เทคนิคการวัดสเปกตรัมของนิวตรอนด้วย threshold detectors เป็นเทคนิคที่น่าจะยอมรับได้ และควรได้มีการพัฒนาเพื่อใช้ในการทดลองวัดสเปกตรัมของนิวตรอนในระบบอื่น ๆ ต่อไป

ตาราง 3 แสดงคุณสมบัติ และข้อมูลทางนิวเคลียร์ของปฏิกิริยาที่ใช้

Foil	ความหนา (mm)	เส้นผ่าน- ศูนย์กลาง (mm)	มวล (gm)	ปฏิกิริยา	Isotopic abundance (%)	E_{th} (MeV)	ครึ่งชีวิต	γ -ray energy (MeV)	branching ratio (%)	σ (mb)
Al	0.15	25.4	0.171862	$Al^{27} (n, \alpha) Na^{24}$	100	8.7	15 h	1.369	100	114
Co	0.15	12.7	0.062658	$Co^{59} (n, \alpha) Ni^{56}$	100	5.2	2.58 h	.847	99	29
	0.15	12.7	0.062658	$Co^{59} (n, 2n) Co^{58}$	100	10.6	71.4 d	.810	99	711
Cu	0.20	12.7	0.285144	$Cu^{65} (r, p) Ni^{65}$	30.91	3.75	2.5 h	1.481	25	26
	0.20	12.7	0.285144	$Cu^{65} (n, 2n) Cu^{64}$	30.91	10.3	12.8 h	1.340	0.5	924
Mg	0.15	12.7	0.034074	$Mg^{24} (n, p) Na^{24}$	78.70	6.3	15 h	1.369	100	182
V	0.10	12.7	0.041596	$V^{51} (n, p) Ti^{51}$	99.76	13.0	5.8 m	.320	95	36

ตาราง 4 แสดงผลการวัดรังสีแกมมา และค่ากัมมันตภาพจำเพาะจากการทดลอง

ปฏิกิริยา	count rate (cpm)	% error	A_{mea} ((nucleus ⁻¹ .sec ⁻¹))	% error*
Al ²⁷ (n,α)Na ²⁴	1013.62	0.59	3.62×10^{-17}	15.01
Co ⁵⁹ (n,α)Mn ⁵⁶	657.48	1.20	1.22×10^{-17}	15.05
Co ⁵⁹ (n,2n)Co ⁵⁸	30.87	0.83	2.81×10^{-16}	15.02
Cu ⁶⁵ (n,p)Ni ⁶⁵	61.69	2.50	7.58×10^{-18}	15.21
Cu ⁶⁵ (n,2n)Cu ⁶⁴	529.91	0.42	3.54×10^{-16}	15.01
Mg ²⁴ (n,p)Na ²⁴	426.96	0.89	6.66×10^{-17}	15.03
V ⁵¹ (n,p)Ti ⁵¹	12670.33	0.90	1.11×10^{-17}	15.03

* = เปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนของ A_{mea} คำนวณจาก % error = $\frac{\Delta A_{mea}}{A_{mea}} \times 100$

$$\frac{\Delta A_{mea}}{A_{mea}} = \left[\left(\frac{\Delta c}{c} \right)^2 + \left(\frac{\Delta m}{m} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} \right)^2 \right]^{1/2}$$

เมื่อ Δc = ค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดรังสีแกมมา

Δm = ค่าความคลาดเคลื่อนในการชั่งมวลของ foil จากการชั่ง 5 ครั้ง

$\Delta \epsilon$ = ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูล ประสิทธิภาพในการวัดรังสีแกมมาด้วย

HPGe detector เปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ PEAK code กับ

ผลการทดลองที่ได้ทำขึ้น (อรุณีย์ อินทกร เกรียงไกร นิตยสุทธิ์ และวิวัฒน์ ตียาสุนทรานนท์

2529 : 96 - 97) พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด 13 % รวมกับค่าความคลาดเคลื่อนใน

การคำนวณประสิทธิภาพของ HPGe detector ด้วยวิธี Monte Carlo ซึ่งใช้ใน PEAK

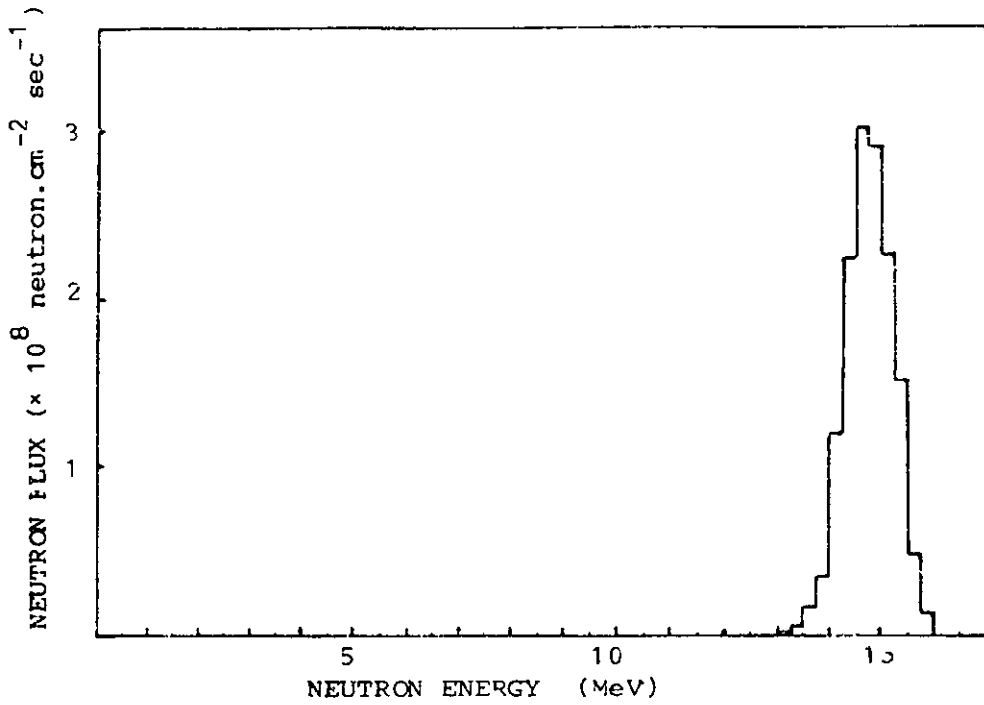
code มีค่าไม่สูงกว่า 2 % ได้เป็นค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดของข้อมูลประสิทธิภาพเท่ากับ

ตาราง 5 แสดงผลการคำนวณหลักซ์ของนิวตรอนที่ระดับพลังงาน E ต่าง ๆ จากการคำนวณ
ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ SAND II

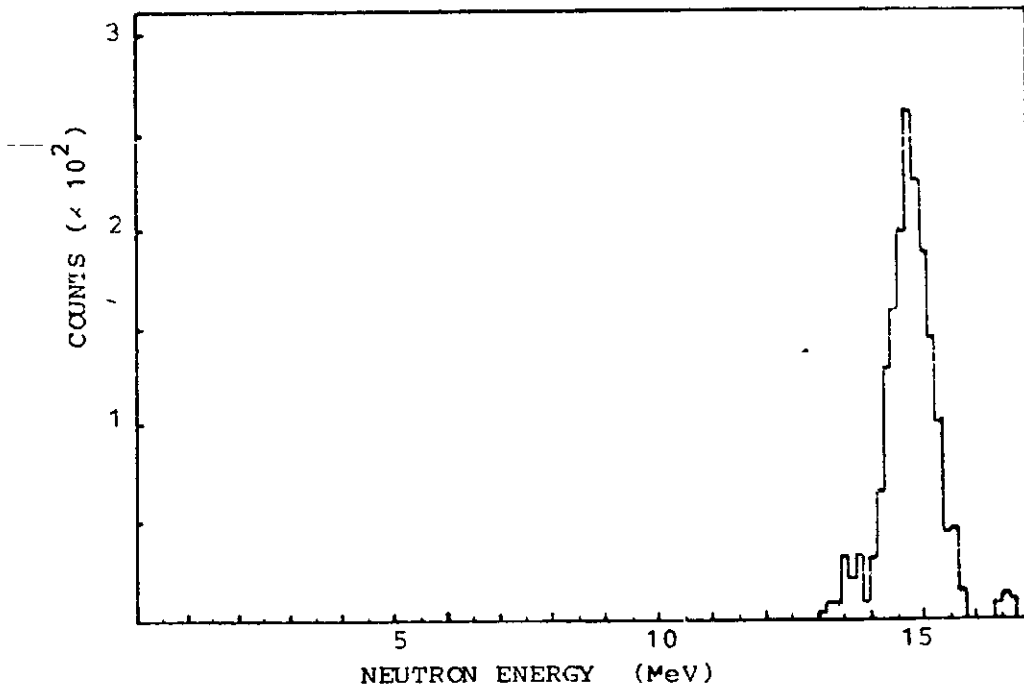
E (MeV)	$\phi(E)$ ($\times 10^6$)	E	$\phi(E)$ ($\times 10^8$)
3.75 - 13.00	0.00	14.75 - 15.00	2.91
13.00 - 13.25	0.02	15.00 - 15.25	2.27
13.25 - 13.50	0.06	15.25 - 15.50	1.52
13.50 - 13.75	0.16	15.50 - 15.75	0.49
13.75 - 14.00	0.35	15.75 - 16.00	0.13
14.00 - 14.25	1.20	16.00 - 16.25	0.03
14.25 - 14.50	2.25	16.25 - 17.00	0.00
14.50 - 14.75	3.03		

$$\text{integral flux} = 3.60 \times 10^8 \text{ neutron.cm}^{-2}.\text{sec}^{-1}$$

$$*\text{integral flux} = \int_{E=3.75}^{17.00} \phi(E) dE$$



ภาพประกอบ 2 แสดงสเปกตรัมของนิวตรอนที่ได้จากการทดลองจริง



ภาพประกอบ 3 แสดงสเปกตรัมของนิวตรอนที่ได้จากการวัดด้วยวิธี time of flight

บทย่อ สรุปผลการทดลอง อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

ความมุ่งหมายของการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มีความมุ่งหมายเพื่อให้ทราบเทคนิค วิธีการใช้ threshold detectors ในการวัดสเปกตรัมของนิวตรอน และเป็นการทดสอบความถูกต้องแม่นยำของวิธีการ threshold detectors เมื่อคำนวณสเปกตรัมของนิวตรอนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ SAND II

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

การทดลองได้ใช้แหล่งกำเนิดนิวตรอนแบบเครื่องเร่งอนุภาคปฏิกิริยา ${}^3\text{H}(d,n){}^4\text{He}$ model J-25 ณ อาคารวิจัยนิวตรอนพลังงานสูง มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอน foil ที่ใช้ในการอาบรังสีนิวตรอน ผลิตโดยบริษัท Reactor Experiments ทำการวัดรังสีแกมมาด้วย HPGe detector คำนวณประสิทธิภาพของ HPGe detector ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ PEAK code ใช้เมนเฟรมคอมพิวเตอร์ IBM CPU model 3031 ในการคำนวณ และคำนวณสเปกตรัมของนิวตรอนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ SAND II โดยใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ Cannon AS 100 ในการคำนวณ

วิธีดำเนินการ

1. คัดเลือกปฏิกิริยาที่เหมาะสมมาเป็น threshold detectors
2. จัดหาข้อมูลเกี่ยวกับค่าภาคตัดขวางของปฏิกิริยาที่ใช้เป็น threshold detectors
3. คำนวณประสิทธิภาพของ HPGe detector ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ PEAK code

4. วางแผนการอาบรังสี และทำแผนการวัดรังสีแกมมา
5. อาบรังสีนิวตรอน และวัดรังสีแกมมา

วิเคราะห์ข้อมูล

1. กำหนดค่ากัมมันตภาพจำเพาะจากการทดลอง (A_{mea}) จากผลการวัดรังสีแกมมาด้วยสมการ (2.18)
2. คำนวณสเปกตรัมของนิวตรอนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ SAND II

สรุปผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ SAND II เมื่อใช้ผลการทดลองของ Hyvonen-Dabek และ Nikkinen-Vilkkä (Hyvonen-Dabek and Nikkinen-Vilkkä, 1980 : 455) เป็น input spectrum ได้สเปกตรัมของนิวตรอนมีลักษณะเป็นยอดแหลม จุดสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งพลังงานจลน์ของนิวตรอนมีค่าระหว่าง 14.50 - 14.75 MeV integral flux = 3.60×10^6 neutron.cm⁻².sec⁻¹

อภิปรายผล

พิจารณาผลการวัดสเปกตรัมของนิวตรอนด้วย threshold detectors เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ SAND II ได้สเปกตรัมของนิวตรอนที่มีลักษณะเป็นยอดแหลมจุดสูงสุดของยอดแหลมอยู่ที่ตำแหน่งพลังงานจลน์ของนิวตรอนระหว่าง 14.50 - 14.75 MeV FWHM = 1.25 MeV เปรียบเทียบกับผลการวัดสเปกตรัมของนิวตรอนด้วยระบบ time of flight spectrometer อาศัย double scintillation spectrometer ของ คุณหญิง สุวรรณหจร (คุณหญิง สุวรรณหจร 2526 : 38) ได้ผลการวัดสเปกตรัมของนิวตรอนมีลักษณะเป็นยอดแหลม จุดสูงสุดของยอดแหลมอยู่ที่พลังงานจลน์เฉลี่ย 14.7 MeV FWHM = 0.9 MeV ดังแสดงในภาพประกอบ 3 จะเห็นได้ว่าผลการทดลองวัดสเปกตรัมของนิวตรอนด้วยวิธี threshold detectors ให้ผลการวัดที่

สอดคล้องกับวิธีการวัดสเปกตรัมของนิวตรอนด้วยระบบ time of flight spectrometer ทั้งในด้านรูปร่าง ตำแหน่งสูงสุด และขนาดความกว้างของยอดแหลม

ข้อสังเกตบางประการเกี่ยวกับการทดลองในครั้งนี้คือ การวัดรังสีแกมมากระทำที่ ตำแหน่งติดหัววัด โดยใช้ข้อมูลค่าประสิทธิภาพของ HPGe detector ได้จากการคำนวณ ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ PEAK code ซึ่งได้มีการศึกษาการทำงาน และตรวจสอบผลการคำนวณของโปรแกรมกับผลการทดลองแล้ว (อรุณีย์ อินทร์ เกรียงไกร นิตยสุทธิ์ และวิวัฒน์ ตียาสุนทรานนท์ 2529 : 96 - 97) พบว่าสามารถใช้ PEAK code คำนวณประสิทธิภาพสำหรับ HPGe detector ที่ใช้ในการทดลองนี้ได้ แต่เพื่อเป็นการ ยืนยันผลการวัดรังสีแกมมา และป้องกันความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างทำการทดลอง ในครั้งนี้ ได้ใช้ NaI(Tl) detector ทำการวัดรังสีแกมมาจากทุกปฏิกิริยาเพิ่มอีก หัววัดหนึ่ง โดยทำการวัดสลับกับ HPGe detector จนครบทุกปฏิกิริยา ซึ่งเดิมนั้นได้คัดเลือก ปฏิกิริยาที่จะนำมาใช้เป็น threshold detectors 10 ปฏิกิริยา หลังจากนำผลการวัด รังสีแกมมาไปวิเคราะห์ และคำนวณค่า A_{mea} เปรียบเทียบกันระหว่างหัววัดทั้งสอง พบว่า มี 3 ปฏิกิริยาที่ต้องตัดออกไปถึงเหลือ 7 ปฏิกิริยาที่ใช้ในการคำนวณสเปกตรัมของนิวตรอน ปฏิกิริยาที่ตัดออกจากการคำนวณ คือปฏิกิริยา $Al^{27}(n,p)Mg^{27}$ $Cu^{63}(n,2n)Cu^{62}$ และ $V^{51}(n,c)Sc^{48}$ โดยสองปฏิกิริยาแรกได้ไอโซโทปกัมมันตรังสีที่ให้อัตราการแผ่รังสีแกมมา สูงมาก อาจทำให้ผลการวัดรังสีแกมมา และค่า A_{mea} ที่คำนวณได้จากปฏิกิริยาทั้งสองมีค่า ไม่ถูกต้อง ส่วนปฏิกิริยา $V^{51}(n,c)Sc^{48}$ คาดว่าผลการวัดรังสีแกมมาอาจคลาดเคลื่อนไป เพราะปรากฏการณ์ cascade coincidence หรือเรียกอีกอย่างว่า sum-coincidence effect

ข้อเสนอแนะ

1. ข้อมูลค่าภาคตัดขวางของปฏิกิริยาในการทดลองครั้งนี้ได้มาด้วยการอ่านค่า จากกราฟ ซึ่งอาจมีความผิดพลาดในการอ่านค่าได้ เพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาดของค่า ภาคตัดขวางดังกล่าว ควรใช้ข้อมูลภาคตัดขวางของปฏิกิริยาที่เป็นตัวเลขโดยตรง อาจอยู่

ในลักษณะเพิ่มข้อมูล เช่น ENDF/B-IV หรือ ENDF/B-V แต่ในการทดลองครั้งนี้ไม่สามารถจัดหาข้อมูลในลักษณะดังกล่าวได้อย่างครบถ้วนทุกปฏิกิริยา จึงไม่ได้ใช้ข้อมูลลักษณะนี้ในการคำนวณสเปกตรัมของนิวตรอน ดังนั้นในการพัฒนาวิธีการเพื่อให้เกิดความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น สามารถทำได้โดยจัดหาข้อมูลค่าภาคตัดขวางของปฏิกิริยาจากเพิ่มข้อมูล เช่น ENDF/B-IV และ ENDF/B-V ให้ครบทุกปฏิกิริยาเพื่อใช้ในการคำนวณสเปกตรัมของนิวตรอนต่อไป

2. ปัญหาในการวัดรังสีแกมมา ถ้าสามารถทำได้ควรทำการวัดรังสีแกมมาที่ระยะห่างจากหัววัดพอสมควร เนื่องจากในการทดลองครั้งนี้ แหล่งกำเนิดนิวตรอนให้ฟลักซ์ของนิวตรอนไม่สูงนัก ($\sim 3 \times 10^8 \text{ neutron.cm}^{-2}.\text{sec}^{-1}$) จึงต้องทำการวัดรังสีแกมมาที่ตำแหน่งติดหัววัด แต่ที่ตำแหน่งนี้มีข้อจำกัดซึ่งอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ A_{mea} มีความผิดพลาดให้สองสาเหตุคือ สาเหตุที่หนึ่งไม่สามารถหาข้อมูลประสิทธิภาพ (efficiency) ของ HPGe detector ที่ตำแหน่งติดหัววัดได้โดยตรง เพราะขาดแกนแหล่งกำเนิดรังสีแกมมาในลักษณะ disk source ที่มีคุณสมบัติเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็น standard source จึงใช้ข้อมูลประสิทธิภาพของหัววัดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี Monte Carlo โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ PEAK code สาเหตุที่สองผลการวัดรังสีแกมมามีความผิดพลาดเนื่องจากปรากฏการณ์ sum-coincidence effect เมื่อทำการวัดรังสีแกมมา ณ ตำแหน่งติดหัววัดปรากฏการณ์ดังกล่าวจะมีโอกาสเกิดขึ้นได้มาก

หนทางแก้ไขความผิดพลาดอันเกิดมาจากสองสาเหตุดังกล่าวอาจทำได้โดยทำการวัดรังสีแกมมาที่ระยะห่างจากหัววัดออกมา เพราะที่ระยะห่างจากหัววัดมีข้อดีสองประการ ดังนี้คือ ประการที่หนึ่งสามารถทำการทดลองหาประสิทธิภาพของ HPGe detector ได้โดยตรง ประการที่สองปรากฏการณ์ sum-coincidence effect จะลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างหัววัด และแหล่งกำเนิดรังสีแกมมามีค่าเพิ่มขึ้น (Knoll, 1979 : 454) แต่ข้อเสียของการวัดรังสีแกมมาที่ระยะห่างจากหัววัดคือ ประสิทธิภาพของการวัดรังสีแกมมามีค่าต่ำกว่าการวัดรังสีแกมมาที่ระยะติดหัววัด

ในกรณีที่ไม่สามารถทำการวัดรังสีแกมมาที่ระยะห่างได้แล้ว ก็อาจทำการวัดรังสีแกมมาที่ระยะติดหัววัดภายใต้เงื่อนไขคือ หนึ่งทำการวัดรังสีแกมมาที่ระยะเดียวกันทั้งหมด ไม่ว่าจะใกล้หัววัดหรือติดหัววัด ทุกปฏิบัติการต้องทำการวัด ณ ตำแหน่งเดียวกันทั้งหมด ถ้าปฏิบัติการใดไม่สามารถวัดได้เพราะ foil มีอัตราการแผ่รังสีแกมมาสูงจนทำให้ระบบการวัดมีค่า dead time มากเกินกว่าที่จะยอมรับได้ การปล่อยยัติไอโซโทปกัมมันตรังสีใน foil นั้นมีการสลายตัวไปจนสามารถทำการวัดรังสีแกมมาได้โดยที่ระบบการวัดมี dead time ไม่สูงมากจนเกินไป สองเลือกวัดรังสีแกมมาที่ปราศจากการ coincidence กับรังสีแกมมาอื่น หรือถ้ามีการ coincidence กับรังสีแกมมาอื่นก็ให้อยู่ในสัดส่วนที่น้อยที่สุด สิ่งเหล่านี้จะทำให้สามารถทำการวัดรังสีแกมมาได้อย่างถูกต้องยิ่งขึ้น

3. ถ้าใช้ HPGe detector หรือ Ge(Li) detector ในการวัดรังสีแกมมา อาจใช้ NaI(Tl) detector วัดรังสีแกมมาเพิ่มอีกหัววัดหนึ่ง เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องในการวัด และยังสามารถช่วยในการหาสาเหตุของความผิดพลาดในการวัดรังสีแกมมาที่อาจเกิดขึ้นได้เพราะ NaI(Tl) detector มีข้อดีคือ ประสิทธิภาพ (efficiency) สูงกว่า HPGe detector และ Ge(Li) detector อีกทั้ง NaI(Tl) detector มีข้อมูลเกี่ยวกับประสิทธิภาพของหัววัดที่หาได้ง่ายและเป็นที่ยอมรับ เพราะเป็นหัววัดที่มีใช้กันอย่างแพร่หลาย และมีการศึกษาคุณสมบัติของหัววัดชนิดนี้มาเป็นเวลานานแล้ว ข้อจำกัดของ NaI(Tl) detector คือ energy resolution ของ NaI(Tl) detector ไม่ดีเท่า HPGe detector และ Ge(Li) detector ทำให้ไม่สามารถใช้ NaI(Tl) วัดรังสีแกมมาของไอโซโทปกัมมันตรังสีจากบางปฏิบัติการที่มีสเปกตรัมของรังสีแกมมาซับซ้อนยุ่งยาก

4. ความกว้างของช่วงพลังงานจลน์ของนิวตรอนในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ SAND II ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ได้แบ่งออกเป็นช่วง ๆ ละ 0.25 MeV ภายในพิสัย 3.75 - 17.00 MeV รวม 54 energy groups ในกรณีที่ต้องการสเปกตรัมของนิวตรอนที่ละเอียด มีช่วงพลังงานจลน์ของนิวตรอนแคบกว่าที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ สามารถทำได้โดยแบ่งช่วงพลังงานจลน์ของนิวตรอนให้แคบลงไปอีก นั่นก็คือ ภายในพิสัยที่เท่ากันจะได้จำนวน energy groups เพิ่มขึ้น ในการ

ทดลองครั้งนี้ไม่สามารถแบ่งช่วงดังกล่าวลงไปให้แคบกว่านี้ได้เพราะเป็นการแบ่งช่วงพลังงาน
จลน์ของนิวตรอนเพื่ออ่านค่าภาคตัดขวางจากกราฟ แต่ถ้าได้มีการใช้ข้อมูลภาคตัดขวางจาก
แฟ้มข้อมูล เช่น ENDF/B-V ซึ่งแบ่งช่วงพลังงานจลน์ของนิวตรอนออกเป็นช่วงแคบ ๆ
ช่วงละ 0.10 MeV ก็น่าจะได้สเปกตรัมของนิวตรอนจากการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
SAND II ที่ละเอียดและดียิ่งขึ้น

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- กษุณี สุวรรณขจร สเปกตรัมของนิวตรอนจากเครื่องกำเนิดนิวตรอนขนาด 14 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์
วิทยานิพนธ์ วท.ม. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 2526, 49 หน้า อัดสำเนา
- สมเกียรติ ทรัพย์ทอง เทคนิคการวัดรังสี มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร 2525,
417 หน้า อัดสำเนา
- อรุณีย์ อินทร เกรียงไกร นิยสุทธิ์ และวิวัฒน์ ตียาสุนทรานนท์ "การคำนวณประสิทธิภาพหัววัด
รังสีแกมมาแบบสารกึ่งตัวนำเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์โดยวิธีมอนติคาร์โล" ใน กำหนดการและ
บทความประกอบการประชุมทางวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 12
หน้า 96 - 97 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร 2529
- Chuang, L.S., H.K. Wong and K.C. Wong. "Absolute Determination of 14 MeV
Neutron Spectrum by Means of Liquid-scintillation Spectrometer and
Threshold Foil - detectors." NIM 160 487 - 492, 1979.
- Garber, D. and R. Kinsey. Neutron Cross Sections. (BNL 325) V.2
3rd. ed., National Technical Information Service, 1976. 491 p.
- Hyvonen-Dabek, M. and P. Nikkinen-Vilkkil. "Determination of Neutron
Generator Fast Neutron Spectra Using Threshold Detectors." NIM
170- 451 - 458, 1980.
- Isoufanidis, N. Measurement and Detector of Radiation, London,
McGraw - Hill Book Co., 1976. 493 p.
- Knoll, G. Radiation Detection and Measurement, New York, John Wiley &
sons, 1979. 815 p.
- Kuijpers, L. and others. "On the Determination of Fast Neutron
Spectra with Activation Techniques, Its Application in a Fusion
Reactor Blanket Model." NIM 144 - 215 - 224, 1977.
- McElroy, W. "Measurement of Neutron Flux Spectra by a Multiple
Foil Activation Iterative Method and Comparison with Reactor
Physics Calculations and Spectrometer Measurements." Nuclear
Science and Engineering 36 15 - 27, 1969.
- Nakamura, T. "Monte Carlo Calculation of Peak Efficiencies and
Response Functions of Coaxial - type Ge(Li) detectors for Disk
Gamma - ray Sources." NIM 131 521 - 527, 1975
- Price, J. Nuclear Radiation Detection. 2nd. ed., New York,
McGraw - Hill Book Co., 1964. 430 p.

Sandberg, J. "On the Feasibility of Multicomponent Activation Detectors for Fusion Reactor Neutronics Measurements." NIM 206 227 - 234, 1981.

Shin, K., T. Saito and M. Fujii. "Spectral Measurements of Neutrons Produced by 52 MeV Protons with Activation Detectors." NIM 187 587 - 594, 1981.

การพนัน

ภาคผนวก ก โปรแกรมคอมพิวเตอร์ TIME

```

100 CLS
110 FLUX=3 E+08
120 PRINT "INTEGRAL FLUX = ",FLUX," neutron/(cm2* sec)" PRINT
130 PRINT "Reaction      ", INPUT RES$
140 PRINT
150 PRINT "Cross section (mb)      ", INPUT CS
160 PRINT "Atomic mass of target material = ", INPUT AM
170 PRINT "Foil mass (gm)      ", INPUT FM
180 PRINT "Isotopic abundance (%)    ", INPUT IA
190 PRINT "Purity (%)      ", INPUT PU
200 PRINT "Half life ,(Y,D,H,M,S)    ", INPUT HL,UH$
210 T=HL UN$=UH$.GOSUB 530
220 HL=T
230 LAMDA=LOG(2)/HL
240 PRINT "Gamma ray energy (MeV) , Branching ratio (%) ", INPUT EG,F
250 PRINT "Efficiency at ",EG," (MeV) = ", INPUT EFF
260 PRINT "Irradiation time (Y,D,H,M,S) ", INPUT IT,UT$
270 T=IT*UN$=UT$ GOSUB 530
280 IT=T
290 PRINT "Decay time (D,H,M,S) ", INPUT TD,UD$ TD2=TD
300 T=TD UN$=UD$ GOSUB 530
310 TD=T
320 PRINT "Counting time ,(H,M,S) ", INPUT CT,UC$
330 T=CT*UN$=UC$ GOSUB 530
340 CT=T
350 REM ##### CALCULATE #####
360 NO=(FM/AM)3 (IA/100)3 (PU/100)3 6.02E+23
370 C=NO*(CS*1E-27)*FLUX
380 C=C*(1-EXP(-LAMDA*IT))
390 C=C*EXP(-LAMDA*TD)
400 CR=C*EFF*(F/100)
410 GC=CR*(1-EXP(-LAMDA*CT))/LAMDA
420 REM ##### OUTPUT #####
430 PRINT
440 PRINT "-----"
450 PRINT
460 PRINT "Count rate (TD ",TD2," ";UD$," ) = ",CR,"      (CPS)"
470 PRINT "Gross count = ",GC
480 PRINT
490 PRINT "-----"
500 PRINT "Again (Y/N=Return) ", INPUT AG$
510 IF AG$<>"Y" THEN RUN
520 GOTO 260
530 REM #####
540 IF UN$="Y" THEN T=T*365.33*24*3600 GOTO 590
550 IF UN$="D" THEN T=T*24*3600 GOTO 590
560 IF UN$="H" THEN T=T*3600 GOTO 590
570 IF UN$="M" THEN T=T*60 GOTO 590
580 IF UN$<>"S" THEN PRINT "INPUT DATA ERROR"
590 RETURN

```

ภาคผนวก ข ผังงาน (flowchart) ของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ SAND II

ตัวแปรสำคัญที่ใช้ในโปรแกรม

Input

- S(M) = input spectrum ได้จากการแบ่งสเปกตรัมของนิวตรอนในวัสดุ 3.75 - 17.00 MeV ออกเป็นช่วง ๆ ละ 0.25 MeV รวม 54 energy groups
- ME(I) = ค่ากัมมันตภาพจำเพาะจากการทดลอง (A_{mea})
- F(I,J) = ค่าภาคตัดขวางของปฏิกิริยาที่ I ช่วงพลังงาน J

Output

- U = จำนวนครั้งในการ iteration
- S(M) = calculated spectrum หรือผลการคำนวณสเปกตรัมของนิวตรอน
- A(N) = ค่ากัมมันตภาพจำเพาะที่คำนวณได้จากโปรแกรม (A_{cal})
- RR(N) = อัตราส่วนบอกความแตกต่างระหว่าง A(N) และ ME(N) ภายใต้ง่อนไข
- ถ้า $A(N) = ME(N)$ แล้ว $RR(N) = 1$
- ถ้า $A(N) > ME(N)$ แล้ว $RR(N) > 1$
- ถ้า $A(N) < ME(N)$ แล้ว $RR(N) < 1$
- SS = integral flux

