



บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

ในการหาอัตราการฟission โดยวิธีแอคทีเวชัน เป็นวิธีที่ใช้กันแพร่หลาย ธาตุที่ใช้
อานิวตรอนนิยมทำเป็นแผ่นบาง ๆ เพื่อแก้ self shielding effect นอกจากนี้
ธาตุที่ต้องใช้ต้องมีความสามารถในการดูดกลืนนิวตรอน (absorption cross
section) สูงพอที่จะให้ความเข้มของรังสีมากซึ่งพอที่จะตรวจได้ง่าย และนิวเคลียส
กัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นใหม่ Half life ต้องยาวพอ เพื่อการเคลื่อนย้าย sample
ไปยังเครื่องวัด แต่ต้องไม่ยาวจนเกินไป เพื่อเวลาที่ใช้อานิวตรอนจะได้ไม่นาน ธาตุ
ที่ใช้ต้องมี sensitivity ที่เหมาะสม

4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- (1) แผ่นอินเดียมขนาด 1 x 1 ตารางเซนติเมตร
- (2) แผ่นโรเดียมกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางครึ่ง นิ้ว
- (3) แผ่นทองขนาด 1 x 1 ตารางเซนติเมตร
- (4) แผ่นแคดเมียมจำนวน 10 แผ่น
- (5) แผ่นอลูมิเนียมกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้วจำนวน 2 แผ่น
- (6) นาฬิกาจับเวลา เพื่อใช้เทียบกับเวลาที่เครื่องวัดรังสีบอก
- (7) เครื่องวัด Geiger Muller Counter
- (8) เครื่องวัด Multichannel Analyzer ซึ่งให้ผลการวัดรังสี
แกมมาสเปกตรัม ปรากฏให้เห็นบนจอ Oscilloscope มี 1024
channel หัววัด NaI ขนาด 3 x 3 ตารางนิ้ว
- (9) แหล่งกำเนิดนิวตรอนพลูโตเนียม-เบอริลเดียม ขนาด 5 Ci นิวตรอน
ที่ปล่อยออกมา 1.11×10^7 นิวตรอน/วินาที พลังงานเฉลี่ย 4.2 MeV



ท่อบรรจุต้นกล้าเปิดผิวตรอน

ท่ออาบผิวตรอน

ดินน้ำใต้ดินที่ศูนย์กลาง ๑ เมตร

รูป 4.1 แสดงถึงน้ำบรรจุต้นกล้าเปิดผิวตรอน

4.2 การทดลองและคำนวณหาเทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์โดยวิธีแอคทีเวชัน

ตอนที่ 1 ใช้แผ่นโรเดียม Rh^{103}

Rh^{103} เมื่อทำปฏิกิริยา (n, γ) กับเทอร์มาลนิวตรอนจะได้ Rh^{104m} (half life 4.4 minutes, $\sigma_a = 12$ barn) สลายได้ Rh^{104} (half life 42 seconds, $\sigma_a = 135$ barn) เนื่องจาก Rh^{104} มี σ_a สูง ในการคำนวณจะคิดว่ารังสี β ได้จาก Rh^{104} อย่างเดียว ซึ่งมีครึ่งชีวิตเพียง 42 วินาที ดังนั้นการนำโรเดียมจากต้นกำเนิดนิวตรอนมายังเครื่องวัด ต้องใช้เวลาให้สั้นที่สุด การอบโรเดียมในท่อระยะ 7.8, 12.8, 20.8, 31.9 cm. ใช้แผ่นโรเดียมวางบนเทปกาว (สกอตเทป) แล้วนำไปปิดคานข้างของขวดพลาสติกซึ่งผูกด้วยสายเอ็นเส้นเล็กๆ นำขวดไปหย่อนในท่อสำหรับอบนิวตรอน ที่มีระยะต่างๆกันดังกล่าวข้างต้นเป็นเวลาสองนาที โดยให้ระนาบของแผ่นโรเดียมหันเข้าหาต้นกำเนิดนิวตรอน ส่วนการอบโรเดียมที่วางบนแท่นอคูมิเนียมก็จัดให้คานสั้นเข้าหาต้นกำเนิดนิวตรอน

Half life of Rh	=	42	sec
λ	=	$\frac{0.693}{42}$	$= 0.0165 \text{ sec}^{-1}$
load	=	2	min
waiting time	=	15	sec
decay factor $e^{-\lambda t}$	=	$e^{-0.0165 \times 15}$	$= 0.7805$
normalized to saturate	=	$(1 - e^{-\lambda t})$	$= 0.8619$
Average cpm ตาราง 4.1 และ 4.2 มาลบกันค่าที่ได้คือ		cpm	ที่เกิดจาก
Thermal neutron	=	6302 - 481	$= 5821 \text{ cpm}$
\therefore cps saturate and after loading	=	5821/60	$= 97$
percent abundance (B) ของโรเดียม	=	100	

$$\text{โรเดียมหนัก } 0.0834 \text{ gm มีจำนวนอะตอม} = \frac{0.0834 \times 6.03 \times 10^{23}}{103} \text{ atoms}$$

$$= 4.88 \times 10^{20} \text{ atoms}$$

$$\text{Efficiency ของเครื่อง GM (E)} = 2.59 \%$$

$$N = 4.88 \times 10^{20} \text{ atoms}$$

$$\sigma_a = 135 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$$

จากสมการ (3.3) cps เป็นค่าที่ยังมิได้ normalized มาที่ saturate and after loading ส่วนค่าจากรางเป็นค่าที่ normalized แล้ว ดังนั้นเทอร์มาลฟลักซ์ จะหาได้จากสูตร

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{\text{cps} \times 100 \times 100}{E N \sigma_a B} \\ &= \frac{97 \times 100 \times 100}{2.59 \times 4.88 \times 10^{20} \times 135 \times 10^{-24} \times 100} \\ &= 5.6 \times 10^4 \text{ n/cm}^2\text{-sec} \end{aligned}$$

ที่ระยะต่างๆก็คำนวณโดยวิธีเดียวกัน นำผลที่ได้บันทึกในตาราง 4.11

ตอนที่ 2 ใช้แผ่นอินเดียม

In^{115} เมื่อทำปฏิกิริยา (n, γ) กับ Thermal neutron จะได้ In^{116m} (Half life 54 minutes, $\sigma_a = 65$ barn) สลายได้ In^{116} (Half life 13

seconds, $\sigma_a = 52$ barn) ในการวัดจะทิ้งไว้ 2 นาทีเพื่อ In^{116} สลายตัวหมด

ดังนั้นรังสี จะได้จาก In^{116m} เท่านั้น ส่วนการวัดแผ่นอินเดียมในท่อและนอกท่อ

ทำเช่นเดียวกับโรเดียม

$$\text{Half life} = 54 \text{ min}$$

$$\text{decay constant} = \frac{0.693}{54} = 0.01283 \text{ min}^{-1}$$

$$\text{load} = 2 \text{ hr}$$

waiting time	=	2	min
decay factor	$e^{-\lambda t}$	$= e^{-0.01283 \times 2}$	$= 0.9747$
normalized to saturate	=	$(1 - e^{-\lambda T})$	$= 0.7855$
percent abundance (B)	=	95.8 %	
atomic weight (M)	=	114.94	
จำนวนอะตอม (N)	=	$\frac{\text{น.น.เป็นกรัม} \times 6.03 \times 10^{23}}{M}$	
	σ_a	$= 65 \times 10^{-24}$	cm^2
	E	$= 2.59 \%$	

นำค่า cps ที่ saturated และ after loading จากตาราง 4.9 และ 4.12 ค่าต่างๆตามข้างต้น แทนในสมการหาฟลักซ์ จะได้เทอร์มาลฟลักซ์ที่ระยะต่างๆดังแสดงในตาราง 4.13 และ 4.14

ตอนที่ 3 ไขแผ่นทอง

Au^{197} เมื่อทำปฏิกิริยา (n, γ) กับเทอร์มาลนิวตรอนจะได้ Au^{198} (Half life 2.965 days $\sigma_a = 98 \text{ barn}$ เนื่องจากแผ่นทองมีครึ่งชีวิตยาว จะปล่อยให้สลายหมดต้องใช้เวลาประมาณ 1 เดือน ดังนั้นในการทดลองจะอบนิวตรอนในท่อเท่านั้น และให้ระนาบของแผ่นหันเข้าหาต้นกำเนิดนิวตรอนเช่นเดียวกับโรเดียม

Half life	=	2.965 days = 64.68	hr
decay constant	=	$\frac{0.693}{64.68}$	$= 0.0107 \text{ hr}^{-1}$
load 7 days	=	168	hr
normalized to saturate	=	$(1 - e^{-\lambda T})$	$= 0.83454$
percent abundance (B)	=	100	

$$\begin{aligned} \text{atomic weight (M)} &= 197.028 \\ \sigma_a &= 98 \times 10^{-24} \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

นำค่า cps ที่ saturated และ after loading จากตาราง 4.10 และค่าต่างๆตามข้างต้นแทนในสมการหาฟลักซ์ที่ระยะต่างๆดังแสดงในตารางที่ 4.10

4.3 การทดลองและคำนวณหานิวตรอนเร็วโดยวิธีแอลคิเวชั่น

ในการหานิวตรอนเร็วที่ระยะ 2 เซนติเมตรจากต้นกำเนิดนิวตรอนใช้แผ่นอลูมิเนียมหนัก 1.383 กรัม เส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้ว ที่ระยะ 2 เซนติเมตรจะมีทั้งเทอร์มาลนิวตรอนและนิวตรอนเร็ว ดังนั้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะมีทั้ง (n, γ) และ (n,p) ${}_{13}\text{Al}^{27}$ ทำปฏิกิริยา (n,p) ได้ ${}_{12}\text{Mg}^{27}$ (ครึ่งชีวิต 9.5 นาที γ พลังงาน 1.013 MeV และ 0.842 MeV) ในปฏิกิริยา (n, γ) ได้ ${}_{13}\text{Al}^{28}$ (ครึ่งชีวิต 2.31 นาที γ พลังงาน 1.78 MeV) เนื่องจาก cross section ที่จะเกิดปฏิกิริยา (n,p) มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ cross section ที่จะเกิดปฏิกิริยา (n, γ) ดังนั้นต้องตรวจสอบเสียก่อนว่าเกิด ${}_{12}\text{Mg}^{27}$ มากพอที่จะวัดได้โดยพิจารณา peak ของ spectrum จากเครื่อง MCA ซึ่งต่อกับ Oscilloscope แต่การที่จะทราบว่า spectrum ที่ปรากฏบนจอ Oscilloscope เป็นของธาตุอะไรนั้น ก็พิจารณาจากพลังงาน ดังนั้นก่อนอื่นต้องทำ calibration curve ระหว่างพลังงานกับ channel number ของ Photo peak ของ Standard source

source	channel number	energy of MeV
Cs ¹³⁷	131	0.662
Na ²²	101	0.511
	248	1.274
Co ⁶⁰	223	1.17
	252	1.33
A	161	0.84
B	331	1.76

} จากกราฟ

จากกราฟรูปที่ 4.6 อ่านได้ว่าที่ channel number 161 มีพลังงาน 0.840 MeV แสดงว่า source A คือ Mg^{27} และ channel number 331 มีพลังงาน 1.76 MeV แสดงว่า source B คือ Al^{28} พิจารณาจาก spectrum ของ Mg^{27} จะเห็นว่า มี Activity มากพอที่จะวัดได้

ในการหา Activity ของ Mg^{27} นั้นโดยนำแผ่น Al^{27} ไปอบนิวตรอนที่ระยะ 2 เซนติเมตรจากแกนกลางของ source จัดให้ระนาบของแผ่นอยู่ในแนวตั้ง ออบ 2 ชั่วโมง แล้วนำมาวัดด้วยเครื่อง G.M. ตั้งเวลา 30 วินาที วัด Activity ที่เวลาต่างๆ กัน โดยวัดห่างเป็นช่วงๆ ช่วงละ 30 วินาที บันทึกผลประมาณ 9 ค่า หลังจากนั้นเปลี่ยนเป็นช่วงละ 2 นาที บันทึกผลประมาณ 7 ค่า นำผลที่ได้ไปเขียนกราฟดังแสดงในรูป 4.4

A = Activity ของ Mg^{27} อ่านได้ 65 C/30 sec

A + B = Activity ของ Al^{28} และ Mg^{27}

G = Activity ของ Al^{28} จากกราฟอ่านได้ 260 counts ใน 30 sec

back ground = 20 C/30 sec

True activity of Mg^{27} = $\frac{65-20}{30}$ = 1.5 cps

คำนวณ

Mg^{27} half life = 9.5 min

decay constant = $\frac{0.693}{9.5}$ = 0.07295 min^{-1}

load = 2 hr

waiting time = 35 sec

= 0.58 min

percent abundance = 100 %

atomic weight = 27

cross section ของปฏิกิริยา (n,p) กราฟรูปที่ 3.4 ที่พลังงาน 4.2 MeV
อ่านได้เท่ากับ 11×10^{-27} barn

$$\begin{aligned} \text{decay factor } e^{-\lambda t} &= e^{-0.07295 \times 0.58} \\ &= e^{-0.04231} \\ &= 0.9586 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{normalized to saturate factor} &= (1 - e^{-\lambda T}) \\ &= (1 - e^{-0.07295 \times 120}) \\ &= 0.99984 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Aluminium } 1.383 \text{ gm} &= \frac{1.383 \times 6.03 \times 10^{23}}{27} \\ &= 3.09 \times 10^{22} \quad \text{atoms} \end{aligned}$$

$$\text{percent abundance of Al}^{27} = 100 \%$$

$$\begin{aligned} \text{ผลึกซ์ของนิวตรอนเร็ว, } \phi_s &= \frac{\text{cps} \times 100 \times 100}{E N B \sigma_a e^{-\lambda t} (1 - e^{-\lambda T})} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi_s &= \frac{1.5 \times 100 \times 100}{2.59 \times 3.09 \times 10^{22} \times 100 \times 11 \times 10^{-27} \times 0.99984 \times 0.9589} \\ &= 17.8 \times 10^4 \quad \text{neutrons/cm}^2\text{-sec} \end{aligned}$$

4.4 ข้อควรระวังในการทดลอง

(1) เปิดเครื่องวัดรังสี G.M. ไว้อย่างน้อย 1 ชั่วโมงก่อนใช้ เพื่อให้เครื่อง
ร้อน จะได้ค่าที่แน่นอน

(2) เวลาเอาแผ่นพอยไปนับ ต้องวางไว้ที่ตำแหน่งเดียวกันเสมอ โดยทำเครื่องหมายไว้
เพื่อเครื่องจะได้มีประสิทธิภาพในการนับเท่ากันตลอด

(3) แผ่นฟอยที่ทำปฏิกิริยากับนิวตรอนครึ่งหนึ่งแล้ว เมื่อนำมาใช้อีก ต้องทิ้งไว้ประมาณ 10 เท่าของครึ่งชีวิตยาว เพื่อให้กัมมันตภาพรังสีที่ค้างอยู่สลายหมดเสียก่อน

(4) การหา back ground ควรทำใกล้ๆกับเวลาที่นับความเข้มของรังสี

(5) แผ่นฟอยที่ใช้หานิวตรอนฟลักซ์ ควรตรวจสอบครึ่งชีวิตเสียก่อน เพื่อให้แน่ใจว่าใช้แผ่นฟอยที่ต้องการ และไม่มี impurityปน วิธีทำ โดยนำแผ่นฟอยไปอบนิวตรอน แล้วนำไปวัด activity ที่เวลาต่างๆ เอาเวลาและ activity ไปเขียนกราฟหาคึ่งชีวิต ดังแสดงในรูปที่ 4.5

(6) การอ่าน activity ควรอ่านทั้งสองหน้าของแผ่นฟอย แล้วหาค่าเฉลี่ยเพื่อป้องกัน self shielding effect

4.5 การคำนวณหา Sensitivity ของธาตุต่างๆ

จากตาราง 4.14 ระยะ 7.8 เซนติเมตร

$$\begin{aligned} \text{เทอร์มาลฟลักซ์เฉลี่ย} &= \left(\frac{560 + 572 + 460}{2} \right) \times 10^2 \\ &= 5.3 \times 10^4 \quad \text{n/cm}^2\text{-sec} \end{aligned}$$

$$\text{G.M. มี back ground} = 40 \quad \text{cpm}$$

$$\text{efficiency G.M.} = 2.59 \%$$

การวัดจะได้ผลเมื่อ count ที่ได้ต้องประมาณ 2 เท่า back ground

$$\therefore \text{activity ของ sample ควร count ได้อย่างน้อยที่สุด} = 40 \quad \text{cpm}$$

$$\therefore \text{cps} = \frac{40}{60} = 0.67$$

$$\text{จาก } W = \frac{M \times \text{cps} \times 100 \times 100}{N_0 B E \phi_a e^{-\lambda t} (1 - e^{-\lambda T})}$$

ถ้า cps เป็นค่าที่ saturate and after loading

$$\frac{1}{e^{-\lambda t}(1 - e^{-\lambda T})} = 1$$

$$W = \frac{M \times \text{cps} \times 100 \times 100}{N_0 B E \phi \sigma_a}$$

ในกรณีของ Au¹⁹⁷

$$B = 100 \%$$

$$\text{Sensitivity (W)} = \frac{0.67 \times 197 \times 100 \times 100}{6.03 \times 10^{23} \times 100 \times 2.59 \times 5.3 \times 10^4 \times 98 \times 10^{-24}}$$

$$= 1.75 \times 10^{-3} \text{ gm}$$

โดยวิธีเดียวกันนี้คำนวณหา Sensitivity ของธาตุต่างๆดังแสดงในตาราง 4.14

4.6 การคำนวณหาเทอร์มัลฟลักซ์โดยทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 กลุ่ม

สมการ (3.8),

$$\phi_{th} = \frac{a K_f^2 (e^{-K_f r} - e^{-K_s r})}{4 \pi D_s (K_s^2 - K_f^2) r}$$

ค่าคงที่สำหรับนิวตรอนในน้ำหาได้ดังนี้

$$L^2 = \frac{\bar{r}^2}{6}$$

$$\bar{r}^2 = \text{ระยะทางกำลังสองเฉลี่ยซึ่งนิวตรอนเคลื่อนที่จากจุดกำเนิดนิวตรอนถึงจุดที่นิวตรอนถูกจับ}$$

หรือ

$$L^2 = \frac{1}{\sqrt{3} \epsilon_{tr} \epsilon_a}$$

เมื่อ ϵ_{tr} = macroscopic transport cross section

ϵ_a = macroscopic absorption cross section

D = สัมประสิทธิ์การฟุ้งของนิวตรอน

$$= \frac{1}{3 \epsilon_s (1 - \bar{\mu}_0)}$$

$\bar{\mu}$ = Average cosine of the scattering angle/collision

ให้ $\lambda_{tr} = \frac{1}{\epsilon_s (1 - \bar{\mu}_0)}$

= transport mean free path

$$D = \frac{\lambda_{tr}}{3}$$

ค่า L และ D ในทฤษฎีมีการคลาดเคลื่อนเนื่องจาก

(1) เทอรัมาลนิวตรอนไม่ได้มีพลังงานเดียว

(2) ϵ_s ไม่คงที่

ดังนั้น L และ D จะหาได้จากการทดลอง

$$K_s = \frac{1}{L_s}$$

$$= \frac{1}{2.755}$$

$$= 0.363$$

cm⁻¹

$$D_s = 0.144$$

cm

ห้ L_s และ D_s เป็นค่าที่ได้มาจากตารางที่ 6.11 หน้า 105 ในหนังสือ

Neutron Physics ของ Beckurt, K.H. and Wirtz, K. 1964.

K_f หาได้จาก $\bar{v} = 52.8 \text{ cm}^2$ เป็นค่าเฉลี่ยของนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอน

ชนิดพลูโตเนียม-เบอริลเลียม ในหนังสือ A Manual of Experiments in Reactor

Physics of Frank A. Valente.

$$\begin{aligned}\bar{b} &= L_F^2 = 1/K_F^2 \\ K_F &= 1/\sqrt{\bar{b}} \\ &= 1/\sqrt{52.8} \\ &= 0.1376 \text{ cm}^{-1}\end{aligned}$$

แทนค่า K_S , D_S , K_F และ $a = 1.11 \times 10^7$ n/sec ลงในสมการ
จะหา ϕ_{th} ที่ระยะต่างๆได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\phi_S(r) &= \frac{1.11 \times 10^7 \times (0.1376)^2 (e^{-0.1376r} - e^{-0.363r})}{4 \times 3.14 \times 0.144 [(0.363)^2 - (0.1376)^2] r} \\ &= \frac{1.03 \times 10^6 (e^{-0.1376r} - e^{-0.363r})}{r}\end{aligned}$$

แทนค่า r ที่ระยะต่างๆจะได้เทอร์มัลฟลักซ์ดังในตาราง 4.13 และ 4.14

4.7 การคำนวณหานิวตรอนเร็วโดยทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอนสองกลุ่ม

จากสมการ (3.6)

$$\phi_F(r) = \frac{ae^{-Kr}}{4\pi Dr}$$

$$a = 1.11 \times 10^7 \text{ n/sec}$$

$$K = 0.1376 \text{ cm}^{-1}$$

D = สัมประสิทธิ์การฟุ้งของนิวตรอนเร็วขึ้นอยู่กับพลังงานของนิวตรอนเร็ว
ที่ออกมาจากต้นกำเนิดนิวตรอน ในกรณี อเมอริเซียม-เบอริลเลียม
มีค่า 4.1 ซม. เนื่องจากสเปกตรัมของอเมอริเซียม-เบอริลเลียม
คล้ายกับ พลูโตเนียม-เบอริลเลียม ดังนั้นจึงอนุมานให้มีค่า 4.1 ซม.

$$\begin{aligned}\phi(2) &= \frac{1.11 \times 10^7 \times e^{-0.1376 \times 2}}{4 \times 3.14 \times 4.1 \times 2} \\ &= 8.2 \times 10^4 \text{ n/cm}^2\text{-sec}\end{aligned}$$



4.8 วิจารณ์ผลการคำนวณ

ในการศึกษาการกระจายของนิวตรอนแบบทรงกระบอกที่วางอยู่ในน้ำ ใต้น้ำเอาทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอนสองกลุ่ม และการทดลองโดยวิธีแอดดิเวชันมาใช้ในการคำนวณหาค่าเทอร์มัลฟลักซ์ที่ระยะต่างๆจากตัวกำเนิดนิวตรอนไม่เกิน 31.9 ซม. ผลการคำนวณปรากฏว่า ที่ระยะใกล้ตัวกำเนิดนิวตรอน เทอร์มัลฟลักซ์ที่ได้จากทฤษฎีและจากการทดลองจะต่างกันมาก (ใช้กราฟรูป 4.3 ประกอบ) อาศัยทฤษฎีอธิบายการกระจายนิวตรอนในน้ำได้ก็ในระยะ 8 - 24 ซม. ถ้าที่ระยะมากกว่า 24 ซม. จะใช้กราฟเริ่มห่างจากกัน แสดงว่าความแตกต่างระหว่างทฤษฎีและการทดลองเริ่มมากขึ้น เนื่องจากสูตรที่ใช้คำนวณนั้น ตั้งเงื่อนไขขอบเขตว่า ตัวกลางสำหรับลดความเร็วนิวตรอนมีขอบเขตแน่นอน แต่ในทางปฏิบัติ ไม่สามารถหาภาชนะที่บรรจุตัวกลางที่มีขอบเขตแน่นอนได้ การนำทฤษฎีไปใช้หาเทอร์มัลฟลักซ์ที่ตำแหน่งใกล้ขอบภาชนะไม่ถูกต้องนัก เพราะบริเวณดังกล่าวไม่เป็นบริเวณที่ Homogeneous จึงทำให้นิวตรอนที่วิ่งไปมาทุกทิศทางไม่สม่ำเสมอ ที่บริเวณใกล้กับขอบภาชนะ นิวตรอนที่พุ่งเข้าหาขอบภาชนะมีปริมาณมากกว่าจำนวนนิวตรอนที่พุ่งออกจากภาชนะเข้าหาใจกลาง ที่ระยะน้อยกว่า 8 ซม. ฟลักซ์ที่ได้จากทฤษฎีและการทดลองจะต่างกันมาก ทั้งนี้เนื่องจากในทฤษฎีถือว่าต้นกำเนิดนิวตรอนเป็นจุด แต่ในการทดลองต้นกำเนิดนิวตรอนเป็นแบบทรงกระบอก ที่ระยะใกล้ๆจะอนุมูลว่ารูปทรงกระบอกเป็นจุดย่อมไม่ถูกต้องนัก

กราฟรูป 4.3 ได้จากการทดลองโดยนำแผ่นฟอยวางบนแท่นอลูมิเนียม ให้ด้านหน้าของแผ่นตั้งฉากกับแกนของต้นกำเนิดนิวตรอนทรงกระบอก โดยให้ฟลักซ์ที่ระยะ x ซม. เป็นฟลักซ์เฉลี่ยตั้งแต่ระยะ $(x - 0.5)$ ถึง $(x + 0.5)$ ซม. ซึ่งที่แท้จริงนั้นไม่ถูกต้องนัก เพราะว่าฟลักซ์กับระยะทางไม่ได้แปรผันโดยตรง และการที่ใช้รูปร่างของฟอย (คือโรเดียมเป็นแผ่นกลม อินเดียมเป็นแผ่นจัตุรัส) ต่างกัน ทำให้ประสิทธิภาพของ G.M. ไม่เท่ากัน

กราฟรูป 4.2 จะเห็นว่าฟลักซ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้แผ่นฟอยทอง โรเคียมอินเดียม มีค่ามากกว่าฟลักซ์ที่คำนวณจากทฤษฎี ซึ่งตรงข้ามกับกราฟรูป 4.3 เนื่องจากรู้ว่าในการทดลองนำฟอยไปอาบในท่อโดยใช้ด้านหน้าของแผ่นชนานกับแกนของต้นกำเนิดนิวตรอนทรงกระบอก ดังนั้น ฟอยที่อาบนิวตรอนอยู่ ณ ตำแหน่งใด ฟลักซ์ที่ได้จะเป็นที่ตำแหน่งนั้น ไม่ใช่ค่าเฉลี่ยอย่างเช่นในกราฟ (กราฟรูป 4.3) อนึ่งท่อที่ใช้อาบฟอยนั้นมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 นิ้ว ดังนั้นที่วางที่ใช้อาบฟอยระยะ x ซม. จะมีช่องกว้างตั้งแต่ $(x - \frac{2.56}{2})$ ถึง $(x + \frac{2.56}{2})$ ซม. ทำให้ฟลักซ์ที่ได้ไม่ถูกต้องนัก นอกจากนี้ในทฤษฎีถือว่าทุกๆจุดในโมเดอเรเตอร์เป็นเอกพันธ์ แต่ในการทดลอง ท่อแต่ละท่อจะเกิดที่ว่างถ้าพิจารณาใน 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรของที่ว่างซึ่งแผ่นฟอยวางอยู่ จะมีเฉพาะเทอร์มาลนิวตรอนที่พุ่งออกไป และเทอร์มาลนิวตรอนที่ถูกดูด ดังนั้นเทอม $\epsilon_{af} \phi_f$ ในสมการ

$$D_s \nabla^2 \phi_s - \epsilon_{as} \phi_s + \epsilon_{af} \phi_f = 0$$

จึงไม่มีสูตรที่พิสูจน์มาได้ เพื่อใช้คำนวณเทอร์มาลนิวตรอน จึงไม่ถูกต้องนัก

วัสดุที่ใช้สำหรับลดความเร็วของนิวตรอน อะตอมเหล่านี้จะมีภาคตัดขวางของการดูดเทอร์มาลนิวตรอนสูง นอกจากนี้ภาชนะที่ใช้บรรจุน้ำเป็นถังเหล็ก เมื่อทิ้งไว้นานวันก็เกิดสนิมเหล็ก ซึ่งโมเลกุลของสนิมเหล็กเหล่านี้จะไปปะปนกับโมเลกุลของน้ำ พิจารณาฟลักซ์ที่ระยะไกลต้นกำเนิดนิวตรอน ผลจากทฤษฎีและการทดลองจะต่างกันมากที่ระยะไกลออกไป ความแตกต่างจะลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องจาก เมื่อเทียบกับขนาดของต้นกำเนิดทรงกระบอกกับระยะที่จะหาฟลักซ์ ถ้าระยะไกลพอจะอนุมูลได้ว่า ต้นกำเนิดแบบทรงกระบอกคิดเป็นแบบจุดได้

ฟลักซ์ของนิวตรอนเร็วที่ได้จากการทดลอง คำนวณได้ $17.8 \times 10^4 \text{ n/cm}^2\text{sec}$ จากทฤษฎีการพุ่งของนิวตรอนสองกลุ่ม คำนวณได้ $8.2 \times 10^4 \text{ n/cm}^2\text{sec}$ จะต่างกันถึง

54 % ทั้งนี้เนื่องจากการกระจายของนิวตรอนเร็วจะเป็นแบบ Cylindrical symmetry ค่า Laplacian operator จะได้

$$\nabla^2 = \frac{\partial}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

ส่วนทฤษฎีที่ใช้คำนวณฟลักซ์ของนิวตรอนเร็ว นั้น จะพิจารณาการกระจายของนิวตรอนเร็วเป็นแบบ Spherical symmetry ค่า Laplacian operator จึงต่างออกไป ดังนั้นสูตรที่ใช้คำนวณจึงไม่ถูกต้องนัก นอกจากนี้นิวตรอนเร็วที่ปล่อยออกมาจากพลูโตเนียม-เบอริลเสื่อม นั้น ไม่ได้มีพลังงานเดียว แต่มีพลังงานตั้งแต่ 0 - 10.6 MeV ส่วนทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอนสองกลุ่มพวกนั้นใช้ได้ก็ สำหรับระบบนิวตรอนที่มีพลังงานเท่ากันหมด การชนระหว่างนิวตรอนกับน้ำ ไม่ทำให้นิวตรอนสูญเสียพลังงานไป ส่วนนิวตรอนเร็ว นั้นจะสูญเสียพลังงานทุกครั้งที่ชนกับนิวเคลียสของตัวกลาง ดังนั้นทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอนสองกลุ่ม จึงไม่เหมาะที่จะใช้คำนวณหา นิวตรอนเร็ว

ตาราง 4.1 แสดงอัตราการแผ่รังสีของแผ่นโร เคียมเมื่ออบนิทรอนที่ระยะ 7.8 ซม.

mg/cm ²	true cpm	cpm at saturate and after loading	normalized cpm to 83.4 mg
81	4218	6268	6454
81.6	3978	5911	6041
77.9	4000	5944	6364
79.3	4107	6103	6418
76.3	3873	5755	6290
83.4	4216	6265	6265
79.7	4050	6018	6297
82.2	4146	6161	6251
80.5	4109	6106	6326
77.3	3938	5852	6314
			average 6302

ตาราง 4.2 แสดงอัตราการแผ่รังสีของแผ่นโร เคียมเมื่อหุ้มแคดเมียมที่ระยะ 7.8 ซม.

mg/cm ²	true cpm	cpm at saturate and after loading	normalized cpm to 83.4 mg	Cd-ratio
81	315	468	482	13.39
81.6	309	459	469	12.87
77.9	288	428	458	13.88
79.3	318	473	497	12.92
76.7	294	437	475	13.17
83.4	306	455	455	13.76
79.7	297	441	461	13.64
82.2	321	477	484	12.92
80.5	345	513	531	11.90
77.3	309	459	495	12.74
			average 481	13.12

ตาราง 4.3 แสดงอัตราการแผ่รังสีของแผ่นโร เคียมเมื่ออาบนิวตรอนที่ระยะ 12.8 ซม.

mg/cm ²	true cpm	cpm at saturate and after loading	normalized cpm to 83.4 mg
81	1305	1939	1996
81.6	1293	1921	1963
77.9	1245	1850	1980
79.3	1266	1881	1978
76.7	1218	1810	1968
83.4	1416	2104	2104
79.7	1356	2015	2108
82.2	1377	2046	2076
80.5	1266	1881	1949
77.3	1326	1970	2125
			average 32025

ตาราง 4.4 แสดงอัตราการแผ่รังสีของแผ่นโร เคียมเมื่อหุ้มแคดเมียมที่ระยะ 12.8 ซม.

mg/cm ²	true cpm	cpm at saturate and after loading	normalized cpm to 83.4 mg	Cd-ratio
81	72.9	108.3	111.5	17.9
81.6	72.9	108.3	110.7	17.7
77.9	56.1	83.4	99.3	22.2
79.3	79.8	118.6	124.7	15.8
76.3	73.8	109.7	119.3	16.5
83.4	89.1	132.4	132.4	15.9
79.7	78.9	117.2	122.6	17.2
82.2	85.8	127.5	129.4	16.0
80.5	74.1	110.1	114.1	17.1
77.3	48.0	71.3	76.9	27.6
			average 113	18.4

ตาราง 4.5 แสดงอัตราการแผ่รังสีของแผ่นโรเดียมเมื่ออบนิวตรอนที่ระยะ 20.8 ซม.

mg/cm ²	true cpm	cpm at saturate and after loading	normalized cpm to 83.4 mg
81	468	632	651
81.6	468	632	646
77.9	436	589	631
79.3	466	629	661
76.3	430	580	630
83.4	428	578	578
79.7	406	548	573
82.2	454	613	622
80.5	462	624	646
77.3	460	621	670
			average 631

ตาราง 4.6 แสดงอัตราการแผ่รังสีของแผ่นโรเดียมเมื่อหุ้มแคดเมียมที่ระยะ 20.8 ซม.

mg/cm ²	true cpm	cpm at saturate and after loading	normalized cpm to 83.4 mg	Cd-ratio
81	22	29.7	30.6	21.3
81.6	34	45.9	46.9	13.8
77.9	40	54.0	57.8	10.9
79.3	26	35.1	36.9	17.9
76.3	22	29.7	32.3	19.5
83.4	16	21.6	21.	26.8
79.7	20	27.0	28.2	20.3
82.2	16	21.6	21.9	28.3
80.5	14	18.9	19.6	33.0
77.3	22	29.7	32.0	20.9
			average 32.8	21.0

mg/cm ²	true cpm	cpm at saturate and after loading	normalized cpm to 83.4 mg
81	53	71.6	73.7
81.6	41	55.4	56.6
77.9	46	62.1	66.5
79.3	49	66.2	69.6
76.3	47	63.5	69.0
83.4	67	90.5	90.5
79.7	28	38.0	39.8
82.2	62	83.7	84.9
80.5	28	38.0	39.4
77.3	44	59.4	64.0
			average 65.4

ตาราง 4.7 แสดงอัตราการแผ่รังสีของแผ่นโรเดียมเมื่ออานิวตรอนที่ระยะ 31.9 เซนติเมตร

mg/cm ²	distance cm	bare foil cps	covered foil cps	thermal cps	thermal flux φ x 10 ²	epithermal flux φ x 10 ²
83.4	7.8	105	8.02	96.98	560	46.3
83.4	12.8	33.75	1.88	31.87	185	10.9
83.4	20.5	10.52	0.55	9.97	58.3	3.2
83.4	31.9	1.09	--	1.09	6.5	—

ตาราง 4.8 แสดงเทอร์มาลและอีพิเทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์ที่ระยะต่างๆ คำนวณโดยวิธีแอกติเวชันจากตาราง 4.1 ถึง 4.7

mg/cm ²	distance cm	bare foil cps	covered foil cps	thermal cps	thermal flux ∅ x 10 ²	epithermal flux ∅ x 10 ²
100	7.8	52.29	3.86	48.43	572	45.6
100	12.8	17.61	0.927	16.68	197	10.9
100	20.5	5.35	0.263	5.09	60.1	3.1
100	31.9	0.6097	—	0.6097	7.2	—

ตาราง 4.9 แสดงเทอร์มาลและอีพิเทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์ที่ระยะต่างๆ คำนวณโดยวิธีแอกติเวชัน และอาบอินเตียมด้วยนิวตรอนจากฟลูโตเนียม-เบอริลเลียม

mg/cm ²	distance cm	bare foil cps	covered foil cps	thermal cps	thermal flux ∅ x 10 ²	epithermal flux ∅ x 10 ²
41.8	7.8	16.45	1.51	14.94	460	46.5
55.1	12.8	6.697	0.527	6.17	144	12.2
55.0	20.5	2.16	0.20	1.96	45.9	4.6

ตาราง 4.10 แสดงเทอร์มาลและอีพิเทอร์มาลฟลักซ์ ได้จากการคำนวณโดยวิธีแอกติเวชัน แผ่นทองซึ่งมีน้ำหนักต่างๆ

mg/cm ²	distance cm	bare foil cps	covered foil cps	thermal cps	thermal flux ∅x10 ²	epithermal flux ∅x10 ²
81	4	91.5	8.19	83.31	503	49.5
81.6	6	74.76	6.34	68.42	402	37.2
77.9	8	49.96	3.79	46.17	289	23.7
79.3	10	34.18	2.07	32.11	197	12.7
76.7	12	22.89	1.35	21.54	137	8.6
83.4	14	17.93	0.985	16.94	101	5.9
79.7	16	13.11	0.714	12.39	76	4.4
82.2	18	9.66	0.497	9.16	54	2.9
80.5	20	6.13	—	6.13	37	—
77.3	22	4.10	—	4.10	25.6	—
81	24	3.00	—	3.00	18.1	—
81.6	30	0.99	—	0.99	5.92	—
77.9	32	0.765	—	0.765	4.79	—

ตาราง 4.11 แสดงค่าเทอร์มัลและอีพิเทอร์มัลฟลักซ์ที่ระยะต่างๆในน้ำ โดยเกิดจาก
 พลูโตเนียม-เบอริลเสื่อม ซึ่งมีความแรง 1.11×10^7 นิวตรอน/วินาที
 ค่าฟลักซ์เหล่านี้ได้มาจากการคำนวณโดยวิธีแอกติเวชันและใช้แผ่นโรเดียม
 อานิวตรอน

mg/cm ²	distance cm	bare foil cps	covered foil cps	thermal cps	thermal flux ∅x10 ²	epithermal flux ∅x10 ²
81.9	4	50.003	4.92	45.523	603	65.2
78.1	6	32.87	3.096	29.77	450	46.8
78.7	8	25.13	2.149	22.98	322	30.1
86.5	10	17.411	1.32	16.091	220	18.0
95.0	12	12.479	0.814	11.665	145	10.1
99.3	14	9.512	0.606	8.906	106	7.2
101.6	16	6.567	0.395	6.172	72	4.6
101.6	18	4.542	0.264	4.270	50	3.1
104.0	20	3.29	0.216	3.074	35	2.5
104.0	22	2.332	0.167	2.165	25	1.9
91.0	24	1.448	—	1.418	17	—
98.4	30	0.666	—	0.666	9	—
98.8	32	0.514	—	0.514	6	—

ตาราง 4.12 แสดงค่าเทอร์มัลและอีพิเทอร์มัลฟลักซ์ ที่ระยะต่างๆในน้ำ โดยเกิดจากพลูโตเนียม-เบอริลเลียม ซึ่งมีความแรง 1.11×10^7 นิวตรอนต่อวินาที ค่าฟลักซ์เหล่านี้ได้มาจากการคำนวณโดยวิธีแอกคิเวชันและใช้แผนอินเตียมอานิวตรอน

distance (cm)	$\phi_s \times 10^2$ (neutron / cm ² - sec)		
	two group diffusion	activation method(Rh)	activation method(In)
4	882	503	603
6	557	402	450
8	358	289	322
10	233	197	220
12	154	137	145
14	103	101	106
16	69.3	76	72
18	47.2	54.	50
20	32.5	37	35
22	22.5	25.6	25
24	15.7	18.1	17
30	5.5	5.9	9
32	3.9	4.8	6

ตาราง 4.13 แสดงการเปรียบเทียบเทอร์มาลฟลักซ์ที่ได้จากทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอนสองกลุ่ม กับ แอคติเวชันโดยใช้แผ่นโรเดียมและอินเดียมวางในลักษณะหั่นคานสันเข้าหาต้นกำเนิดนิวตรอน

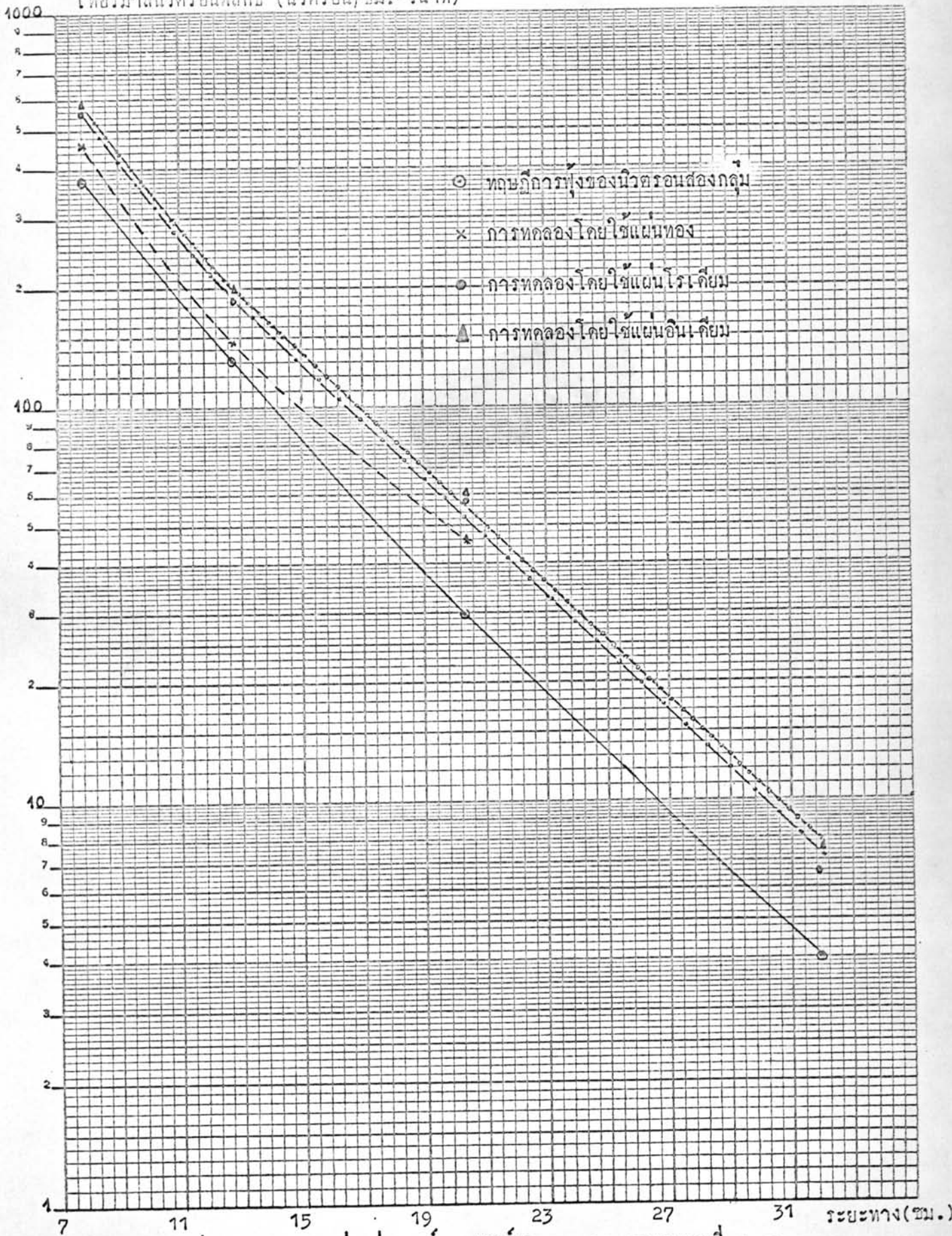
distance (cm)	$O_S \times 10^2$ (neutron / cm ² - sec)			
	two group diffussion	activation method(Rh)	activation method(In)	activation method(Au)
7.8	373	560	571	460
12.8	131	85	197	144
20.5	29.5	58.3	60.1	45.9
31.9	4.0	6.5	7.2	—

ตาราง 4.14 แสดงเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ที่ได้จากแอกติเวชัน โคบอลต์
แผ่นโรเดียม อินเดียม และแผ่นทอง

Element	Mass number	Activation cross-section barn	Half-life	Sensitivity $\mu\text{g} \times 10^{-2}$	% Natural Abundance
La	115	65	54 min.	0.1728	95.72
Au	197	98	2.7 day	0.175	100
Ag	109	89	24.4 sec.	0.224	48.18
Mn	55	13.3	2.56 hr.	0.363	100
Sc	45	10	20 sec.	0.395	100
V	51	4.9	3.75 min.	0.916	99.76
La	139	8.9	40.2 hr.	0.137	99.9
W	186	40	23.9 hr.	1.436	28.41
As	75	4.5	26.4 hr.	1.46	100
I	127	6.4	25 min.	1.74	100
Cu	63	4.5	12.8 hr.	1.78	69.09
Ga	71	5.0	14.12 hr.	3.15	39.9
Na	23	0.53	15.0 hr.	3.84	100
Hf	180	10	5.5 hr.	4.49	35.2
Br	81	3.0	35.34 hr.	4.79	49.46
Al	27	0.23	2.3 min.	10.3	100
Rh	103	135.0	42.0 sec.	0.067	100

ตาราง 4.15 แสดง Sensitivity ของธาตุต่างๆเมื่อฉายเทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์ ที่ระยะ 7.8 เซนติเมตร

เทอร์มอลเวกตรอนฟลักซ์ (นิวตรอน/ซม.-วินาที)



รูปที่ 4.2 กราฟระหว่างค่าเทอร์มอลฟลักซ์กับระยะทาง จากตารางที่ 4.14

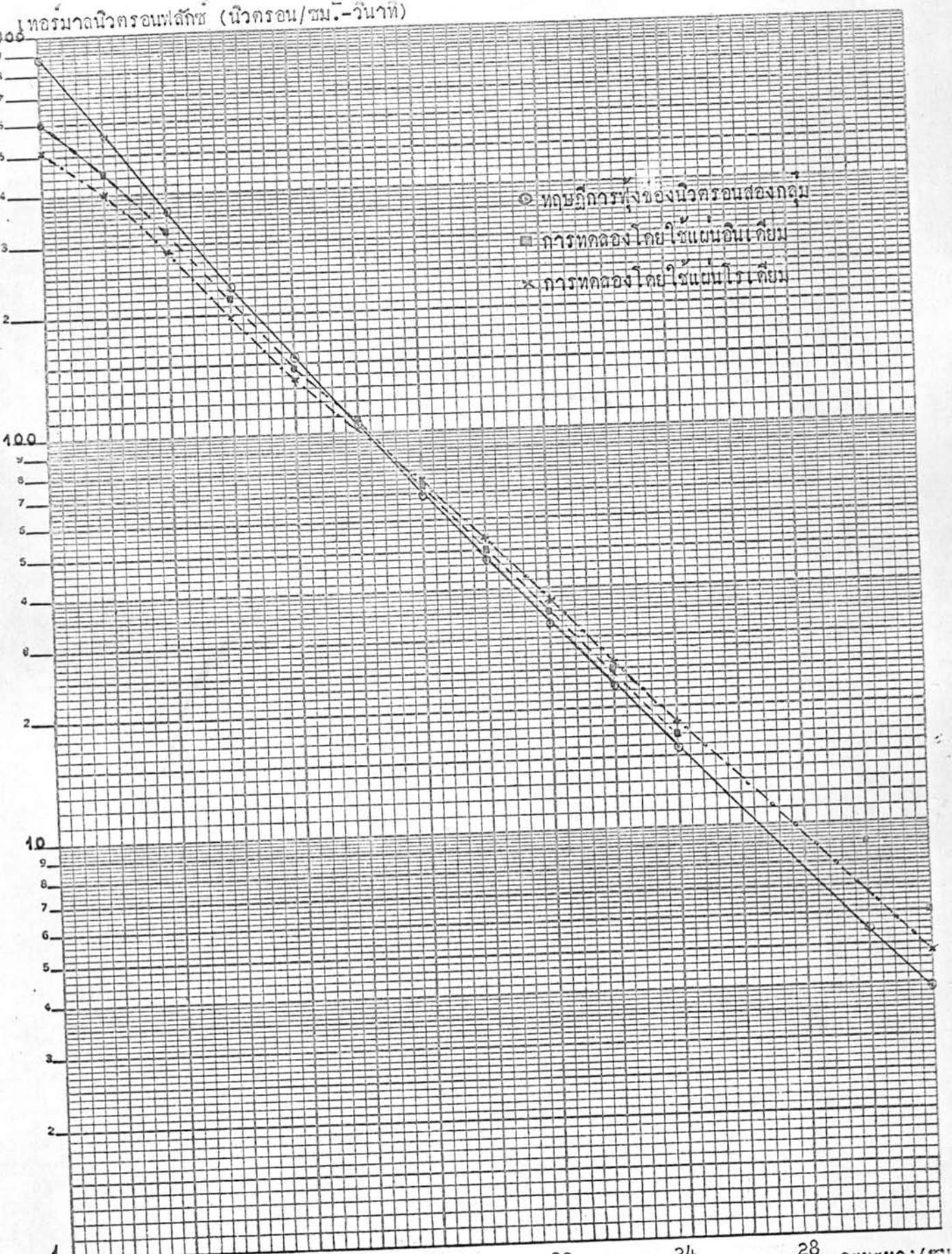
1000
 9
 8
 7
 6
 5
 4
 3
 2
 100
 9
 8
 7
 6
 5
 4
 3
 2
 10
 9
 8
 7
 6
 5
 4
 3
 2
 1

เทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์ (นิวตรอน/ซม.²-วินาที)

- ทฤษฎีการพุ่งของนิวตรอนสองกลุ่ม
- การทดลองโดยใช้แผ่นอินเดียม
- × การทดลองโดยใช้แผ่นโรเตียม

4 8 12 16 20 24 28 ระยะทาง(ซม.)

รูปที่ 4.3 กราฟระหว่างค่าเทอร์มาลฟลักซ์กับระยะทาง จากตาราง 4.13



1000

count in 30 sec

รูปที่ 4.4 แสดงการหาแอกติวิตี้ของไอโซโทปที่มีครึ่งชีวิตสั้นและยาว

(A+B)

(G)

จุด G หาได้จาก $(A+B-A) = 325 - 65 = 260 \text{ c}/30 \text{ sec}$

200

T = 1.45 min

100

(A)

T = 8.1 min

time (minute)

SEMI-LOGARITHMIC
2 CYCLES X 70 DIVISIONS

6

5

4

3

2

1

1

2

4

6

8

10

12

14

2

4

6

8

10

12

14



รูป 4.5 แสดงการหา ครึ่งชีวิตของธาตุอินเดียม

รูป 4.6 แสดงการหา Energy Spectrum ของ ^{23}Al

