หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

อนุภาคนิวตรอน

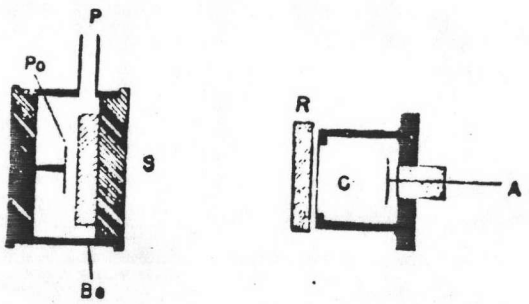
2.1 การค้นพบนิวตรอน

อนุภาคนิวตรอนเริ่มถูกค้นพบ ใน ค.ศ. 1930 โดย โบธ (Bothe) และเบคเคอร์ (Backer) ด้วยการยิงรังสีอัลฟา จากการสลายตัวของธาตุโพโลเนียมไปยังธาตุเบอริลเลียม พบว่ามีรังสีชนิดหนึ่งเกิดขึ้นมีคุณสมบัติในการทะลุทะลวงได้สูงไม่มีประจุ เชื่อกันว่าเป็นรังสีแกมมาพลังงานสูง และเรียกรังสีนี้ว่า รังสีเบอริลเลียม

ต่อมานักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส อีแร็น คูรี(Irene Curie) และเฟรเดอริค โจลิออท (Frédéric Joliot) พบว่าเมื่อยิงรังสีนี้เข้าไปในสารที่มีไฮโดรเจนเป็นธาตุประกอบ จะให้อนุภาคโปรตอนพลังงานสูงปริมาณมาก แชดวิค (Chadwick) ได้ทำการวัดระยะของโปรตอนเหล่านี้ พบว่าไปได้ถึง 26 เซนติเมตรในอากาศซึ่งจากการคำนวนโดยอาศัยหลักคงตัวของโมเมนตัมและพลังงาน แสดงว่ารังสีนี้จะต้องมีพลังงานถึง 50 MeV ทำให้เชื่อว่าไม่ใช่รังสีแกมมา

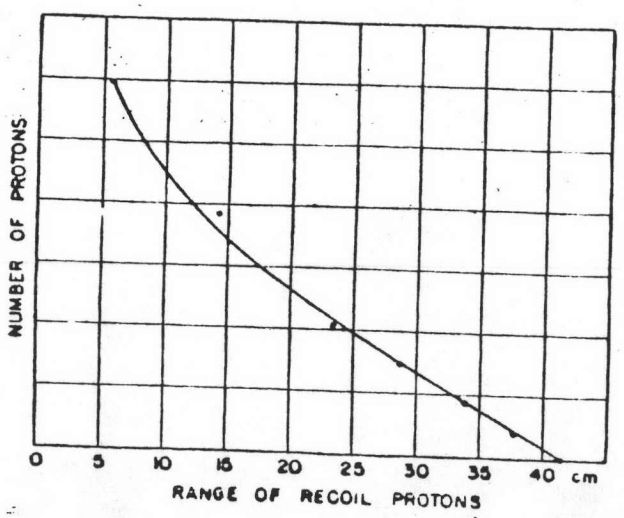
ในปี ค.ศ. 1932 แชดวิค เรียกรังสีนี้ว่า นิวตรอน และตั้งสมมุติฐานว่านิวตรอนเป็นอนุภาคไม่มีประจุ มีมวลเกือบเท่าโปรตอน มีอำนาจในการทะลุทะลวงสูง โดยเชื่อตามแนวความคิดของรัทเธอร์ฟอร์ด (Rutherford) ที่ให้ไว้ในปี ค.ศ. 1920 ว่า โปรตอนและอีเลคตรอนเมื่ออยู่รวมกันใกล้ชิดมาก จะรวมกันเป็นอนุภาคที่เป็นกลางเรียก นิวตรอน ตามสมมุติฐานของ แชดวิค เมื่อเบอริลเลียมถูกยิงด้วยรังสีอัลฟา จะเกิดปฏิกิริยา ดังนี้

$$_2He^4 + {}_4Be^9 \longrightarrow {}_6C^{12} + {}_0n^1$$



9

FIG. 2.1 *Apparatus used by Chadwick in experiments leading to the discovery of the neutron. S is the source of neutrons in which Po is a disk coated with polonium, and Be is a block of beryllium. A vacuum pump was connected at P. C is a pulse ionization chamber connected to an amplifier and oscillograph at A. R is a sheet of paraffin in which the neutrons produced recoil protons.*



9

FIG. 2.2 *Curve showing the relative numbers of protons of various ranges ejected from paraffin placed in front of the ionization chamber shown in Fig. 1.1. Ranges are measured in equivalent centimeters of air.*

2.2 อนุภาคนิวตรอน

นิวตรอนเป็นอนุภาคชนิดหนึ่งมีมวล 1.657×10^{-27} กิโลกรัม 1.00897 amu ประกอบด้วยโปรตอนและอีเลคตรอนอยู่รวมกัน เมื่ออยู่ในสภาพอิสระจะสลายตัวให้โปรตอนและอีเลคตรอนมีครึ่งชีวิต 12.8 นาที

$$_0n^1 \longrightarrow {}_1p^1 + {}_{-1}e^0 + \nu$$

อนุภาคนิวตรอนเป็นองค์ประกอบอันหนึ่งร่วมกับโปรตอน เป็นนิวเคลียสของธาตุต่าง ๆ และแสดงลักษณะสมมุติเป็นคลื่นตามทฤษฎีของเดอปรอง นิวตรอนที่พลังงาน 1 eV สามารถดีฟแฟรค (Diffracted) ในผลึกได้เช่นเดียวกับรังสีเอ็กซ์

นิวตรอนมีคุณสมบัติแตกต่างกันตามพลังงาน โดยแบ่งได้ดังนี้

2.2.1 Slow neutron มีพลังงานระหว่าง 0 ถึง 1000 eV แบ่งออกเป็น

2.2.1.1 Cold neutron มีพลังงานอยู่ในช่วงต่ำมาก คือน้อยกว่า 0.025 eV

2.2.1.2 Thermal neutron มีพลังงานเท่ากับพลังงานของอะตอมตัวกลาง ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ปกติแล้วจะมีพลังงานประมาณ 0.025 eV

2.2.1.3 Epithermal neutron มีพลังงานสูงกว่า เทอร์มาลนิวตรอนเล็กน้อย

2.2.1.4 Resonance neutron มีพลังงานระหว่าง 1–100 eV นิวตรอนในช่วงพลังงานนี้ถูกดูดกลืนโดยธาตุอื่น ๆ ได้ง่าย

2.2.2 Intermediate neutron เป็นนิวตรอนที่มีพลังงานระหว่าง 1000 eV ถึง 0.5 MeV

2.2.3 High energy and Ultra-high energy neutron เป็นนิวตรอนพลังงานสูง และเป็นช่วงของนิวตรอนเร็ว โดยที่ high energy neutron มีพลังงานในช่วง 0.5 – 10 MeV และ Ultra high energy neutron มีพลังงานสูงจนถึง 50 MeV

2.3 ต้นกำเนิดนิวตรอน

ต้นกำเนิดนิวตรอนหมายถึง ตัวหรือแหล่งที่แผ่อนุภาคนิวตรอนออกมา วิธีการที่จะให้ได้นิวตรอนมีหลายแบบ และเป็นปฏิกิริยานิวเคลียร์ทั้งสิ้น แบ่งตามลักษณะการเกิดดังนี้

2.3.1 นิวตรอนที่ได้จากการยิงรังสีไปยังธาตุ (Radioactive source) ต้นกำเนิดนี้ใช้วิธีการให้รังสีเข้าชนเป้า แล้วให้นิวตรอนออกมา รังสีที่ใช้มีหลายชนิด และให้นิวตรอนที่แตกต่างกัน ปฏิกิริยาที่สำคัญ เช่น (α,n) , (p,n) , (γ,n)

2.3.1.1 ปฏิกิริยา (α,n) เป็นปฏิกิริยาแรกที่ทำให้ค้นพบนิวตรอน และเป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่สำคัญต่อมา ใช้สารกัมมันตรังสีให้อัลฟาผสมหรือทำเป็นโลหะผสมกับธาตุที่ใช้เป็นเป้า สารกัมมันตรังสีที่ใช้ เช่น เรเดียม -226 พลูโตเนียม -239, โพโลเนียม -210, ธาตุที่ใช้เป็นเป้า เช่น ไนโตรเจน เบอริลเลียม อลูมีเนียม พบว่าเบอริลเลียมมีความสามารถให้นิวตรอนได้สูงสุด

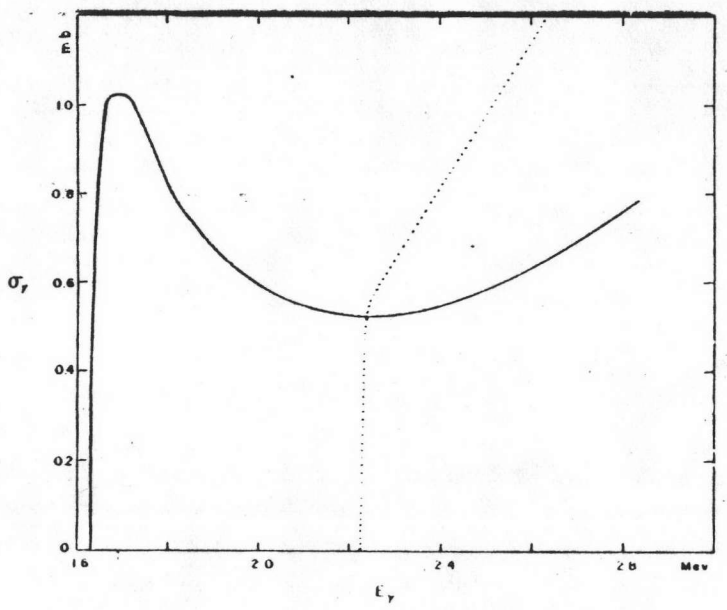
ต้นกำเนิดรังสี	ครึ่งชีวิต	พลังงานของรังสีอัลฟา (MeV)	จำนวนนิวตรอน (นิวตรอน/วินาที 10^{-6} คูรี)	ปริมาณของรังสีแกมมาที่ระยะ 1 เมตร มิลลิเรนเกน/ชั่วโมง
Po^{210}	138.4 วัน	5.30	2.5	0.03
Pu^{239}	24360 ปี	5.15,5.13,5.10	2.2	0.03
Am^{241}	458 ปี	5.48	2.7	0.03
Cm^{242}	163 วัน	6.11,6.07	4.2	2.5
Ra^{226}	1600 ปี	4.8,5.3,5.5,6.0	20	835

ตารางที่ 2.1[8] แสดงค่าปริมาณรังสีแกมมา และนิวตรอนจากต้นกำเนิด (α,n) แบบต่าง ๆ กัน

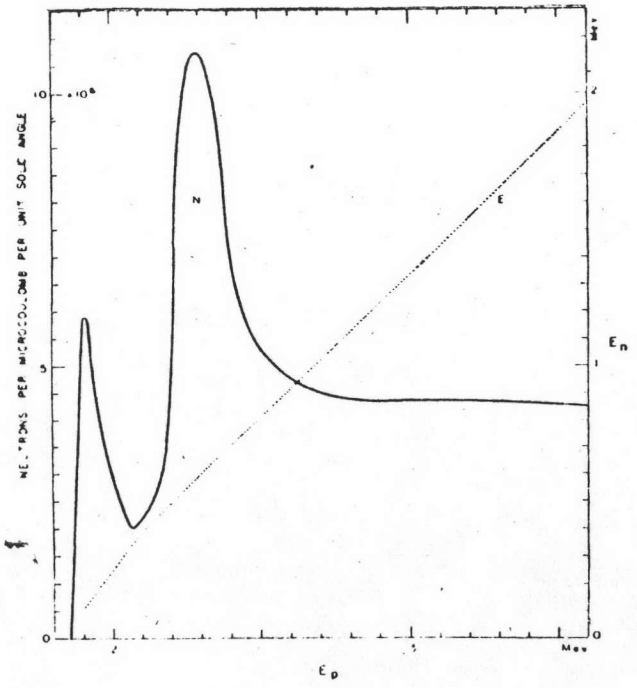
2.3.1.2 ปฏิกิริยา (γ ,n) บางครั้งเรียกว่า photo neutron source ปฏิกิริยาที่ใช้ เช่น Be^{9} (γ ,n) Be^{8} และ H^{2} (γ ,n) H^{1} นิวตรอนที่ได้จะมีพลังงานเดียว

ต้นกำเนิดรังสี	ครึ่งชีวิต	พลังงานนิวตรอนเฉลี่ย (keV)	นิวตรอน/วินาที-คูรี (นน. 1 กรัมที่ระยะ 1 ม. x 10^{-4})
Na^{24} + D_2O	14.8 ช.ม	220($\pm$20)	27
Na^{24} + Be	14.8 ช.ม	830($\pm$40)	13
Mn^{56} + D_2O	2.6 ช.ม	220	0.31
Mn^{56} + Be	2.6 ช.ม	100(90 %)	2.9
		300(10 %)	
Ga^{72} + D_2O	14 ช.ม	130	6
Ga^{72} + Be	14 ช.ม		5
In^{116} + Be	54 นาที	100(40 %)	0.82
		300(60 %)	
Sb^{124} + Be	60 วัน	30	19
La^{140} + D_2O	40 ช.ม	140	0.8
La^{140} + Be	40 ช.ม	620	0.3

ตารางที่ 2.2[7] แสดงต้นกำเนิดนิวตรอนชนิด (γ ,n) โดยให้นิวตรอนยีลด์ประมาณ 10^{7} นิวตรอนต่อวินาที



รูปที่ 2.3 แสดงค่าภาคตัดขวางของปฏิกิริยา (γ ,n) ต่อรังสีแกมม่าที่พลังงานต่าง ๆ เส้นหนักเป็นค่าภาคตัดขวางของธาตุ เบอริลเลียม เส้นประเป็นค่าภาคตัดขวางของดิวทีเดียม



รูปที่ 2.4 แสดงปริมาณของนิวตรอนจากปฏิกิริยา Li (p,n) Be ของโปรตอนพลังงานต่าง ๆ กัน เส้นประเป็นค่าภาคตัดขวางของลิเทียม

2.3.1.3 ปฏิกิริยา (p,n)นิวตรอนสามารถผลิตจากอนุภาคโปรต อนพลังงานสูงเข้าชนเป้า ให้นิวตรอนพลังงานเดียว มีค่าอยู่ระหว่าง 5 MeV จนถึง 20 MeV เช่น

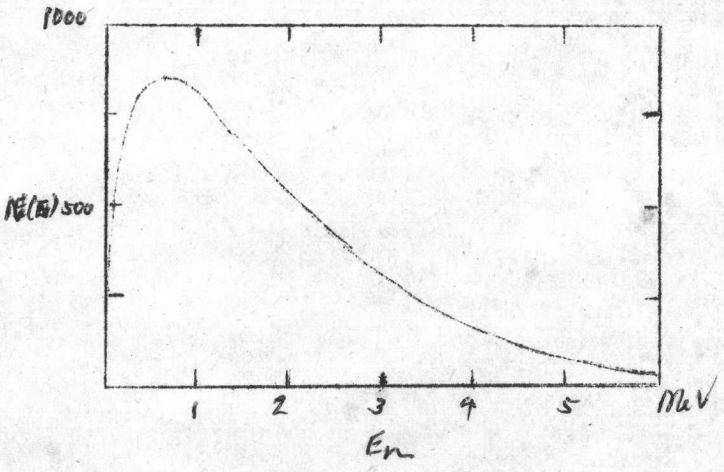
$$_1H^3 + {}_1H^2 \longrightarrow {}_2He^4 + {}_0n^1 + 17.6\ \text{MeV}$$

$$_6C^{12} + {}_1H^2 \longrightarrow {}_7N^{13} + {}_0n^1 - 0.26\ \text{MeV}$$

$$_3Li^7 + {}_1H^1 \longrightarrow {}_3Be^7 + {}_0n^1 - 1.65\ \text{MeV}$$

2.3.2 เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

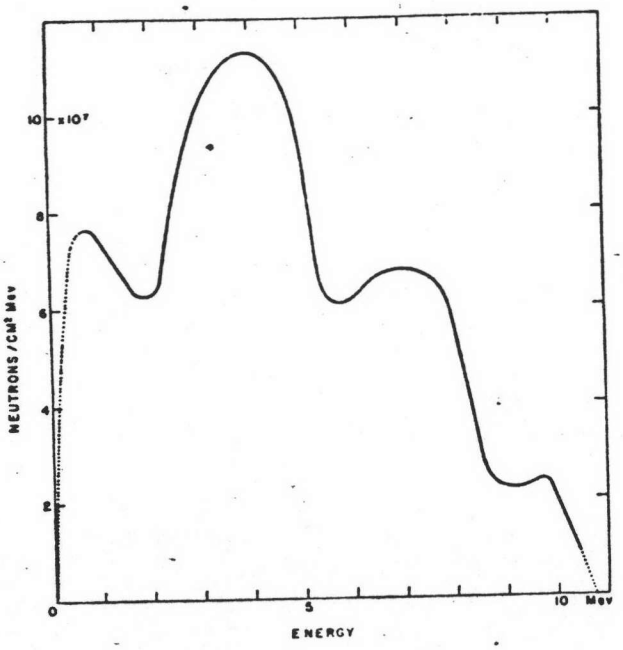
เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่ให้ปริมาณมากที่สุด โดยวิธีการทำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบลูกโซ่ในธาตุหนัก เช่น ยูเรเนียม –235 นิวตรอนที่ได้จากการแตกตัวนี้จะมีพลังงานสูงแล้วถูกลดพลังงานลงในตัวหน่วง (moderator) กลายเป็นเทอร์มาลนิวตรอน เข้าทำปฏิกิริยากับธาตุยูเรเนียมต่อไป เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์มีด้วยกันหลายชนิด ขึ้นอยู่กับการออกแบบและจุดมุ่งหมายในการใช้งาน



รูปที่ 2.5[9] แสดงการกระจายปริมาณของนิวตรอนต่อพลังงานในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

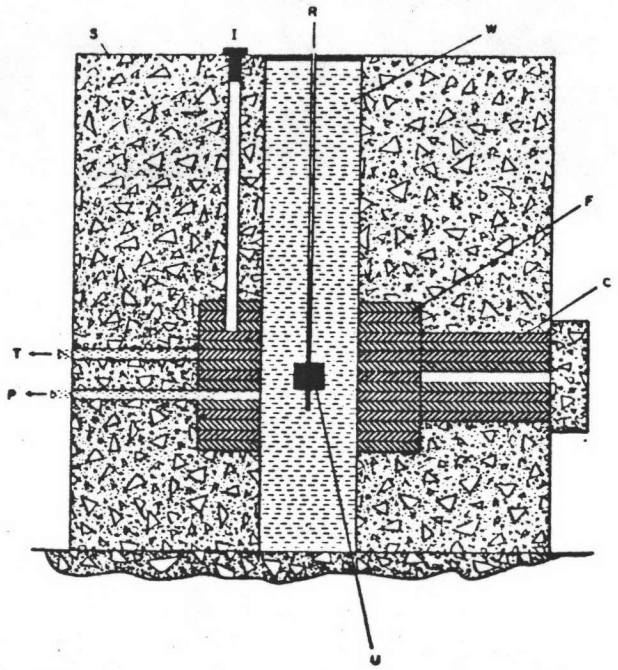
2.4 ต้นกำเนิดพลูโตเนียม–เบอริลเลียม (α,n)

พลูโตเนียมรวมตัวกับธาตุเบอริลเลียม ในรูป (Pu-Be) มีความหนาแน่น 3.7 กรัม/ลบ.ซม. ไอโซโทปที่นิยมใช้ คือ พลูโตเนียม –239 ซึ่งให้อนุภาคอัลฟาพลังงาน 5.1 MeV มีครึ่งชีวิต 23 x 10^4 ปี ให้รังสีแกมมาพลังงานต่ำและปริมาณน้อย จึงเป็นต้นกำเนิดแบบที่นิยมใช้กันมากที่สุดแบบหนึ่ง พลูโตเนียม–เบอริลเลียม รูปทรงกระบอกส่วนสูง 3 เซนติเมตร และเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ให้ปริมาณนิวตรอนประมาณ 10^6 นิวตรอน/วินาที



รูปที่ 2.6[9] แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานของนิวตรอนและปริมาณนิวตรอน จากต้นกำเนิด พลูโตเนียม–เบอริลเลียม (Pu-Be)

2.5 เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ แบบ TRIGA MARK III (สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ) ใช้ยูเรเนียมเข้มข้นเป็นเชื้อเพลิง และมีน้ำเป็นตัวหน่วง



A heterogeneous reactor using uranium enriched in U^{235} with ordinary water as moderator. R—control rod. S—shield. W—ordinary water. F—graphite reflector. C—thermal column. U—uranium fuel elements enriched in U^{235}. T—thermal neutrons. I—irradiation chamber.

รูปที่ 2.7[9] แสดงภาพจำลองของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ชนิดยูเรเนียมเข้มข้น (enriched) โดยมีน้ำเป็นตัวหน่วง

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.6 ปฏิกิริยาระหว่างนิวตรอนกับธาตุต่าง ๆ

นิวตรอนจะเกิดปฏิกิริยากับธาตุต่าง ๆ ได้หลายแบบขึ้นอยู่กับพลังงานของนิวตรอน และโครงสร้างนิวเคลียสของธาตุที่นิวตรอนเข้าทำปฏิกิริยาด้วย โอกาสในการเกิดปฏิกิริยาได้มากน้อยกำหนดโดยค่า ภาคตัดขวาง (Cross section) ของธาตุนั้น ๆ โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{dn}{dt} = N\phi\sigma \quad \text{..... 2.1}$$

dn/dt = อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อเวลา

ϕ = นิวตรอนฟลักซ์

N = จำนวนอะตอมของธาตุ

σ = ภาคตัดขวางไมโครสโครปิค (microscopic crossection) มีหน่วยเป็นหน่วยของพื้นที่คิดเป็นบาร์น (barn) หรือ 10^{-24} ซม.^{2}

ในบางโอกาสภาคตัดขวางแมคโครสโครปิค (macroscopic crossection) จะถูกนำมาใช้ ซึ่งมีค่า $\Sigma = \sigma n$

n = ความหนาแน่นของอะตอม

ปฏิกิริยาระหว่างนิวตรอนและธาตุต่าง ๆ มีดังนี้

2.6.1 การกระเจิงแบบอิลาสติค(elastic scattering) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดมากระหว่างนิวตรอนเร็วกับธาตุเลขอะตอมต่ำ โดยนิวตรอนเข้าชนนิวเคลียสของธาตุแล้วกระเด็นกลับค่าพลังงานจลน์และโมเมนตัมรวมก่อนนิวตรอนเร็วเข้าชน จะเท่ากับค่ารวมหลังนิวตรอนชนนิวเคลียสแล้ว ใช้สัญญาลักษณ์ (n,n)

2.6.2 การกระเจิงแบบอินอิลาสติค (Inelastic scttering) เมื่อนิวตรอนเข้าชนนิวเคลียสจะถ่ายเทพลังงานบางส่วนให้ ทำให้นิวเคลียสนั้นเปอยู่ในสภาพถูกกระตุ้น (excited state) แล้วให้รังสีแกมมาออกมาภายหลังใช้สัญญาลักษณ์ (n,n')

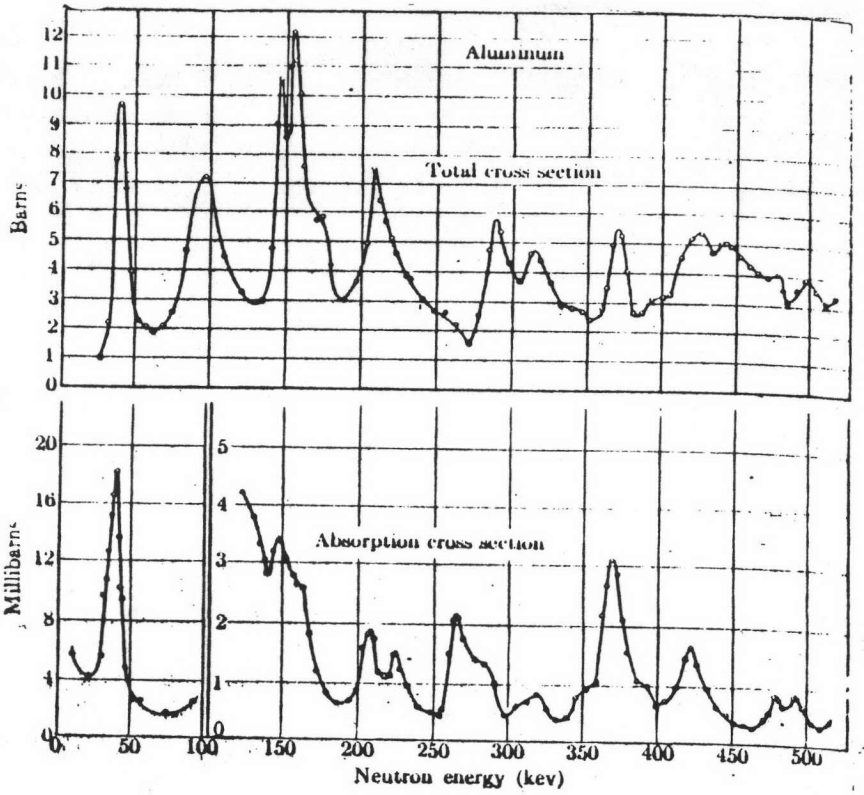
2.6.3 การดูดกลืน (Radiative Capture) ปฏิกิริยานี้ นิวตรอนถูกนิวเคลียสของธาตุจับไว้ ทำให้นิวเคลียสอยู่ในสภาพโลด ให้รังสีแกมมาออกมาภายหลัง บางครั้งเรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาการดูดกลืน ใช้สัญญาลักษณ์ (n,γ)

2.6.4 การให้อนุภาคมีประจุ (Charged-particle Reactions) ปฏิกิริยานี้เมื่อนิวตรอนถูกนิวเคลียสจับไว้แล้วให้อนุภาคมีประจุออกมาแทน เช่นอนุภาคอัลฟา อนุภาคโปรตอน สัญญลักษณ์คือ (n,α) , (n,p)

2.6.5 การใช้อนุภาคนิวตรอน (neutron-product Reaction) นิวตรอนถูกจับโดยนิวเคลียสแล้วให้ นิวตรอนใหม่ออกมา สัญญลักษณ์คือ (n,2n) , (n,3n)

2.6.6 การแตกตัว (Fission) นิวเคลียสจับนิวตรอนไว้ แล้วแตกตัวออกเป็นหลายส่วน จะเกิดเฉพาะในธาตุที่หนักบางชนิด เช่น ยูเรเนียม

โอกาสในการเกิดปฏิกิริยาแต่ละแบบยังขึ้นอยู่กับพลังงานของนิวตรอน และเลขอะตอมของธาตุนั้น ๆ นิวตรอนพลังงานต่ำถึงปานกลาง ($0 < E < 500$ keV) กับธาตุเบา และปานกลาง ($A < 80$) ปฏิกิริยาที่สำคัญคือการกระเจิงแบบอิลาสติค (n,n) และการดูดกลืน (n,γ) ในนิวตรอนพลังงานต่ำกับธาตุเลขอะตอม จะเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวได้ในธาตุบางตัว นิวตรอนพลังงานสูง (0.5 MeV - 10 MeV) กับธาตุขนาดกลางและหนัก ($25 < A < 250$) จะเกิดปฏิกิริยาเพิ่มอีก 2 แบบ คือการส่งอนุภาคมีประจุออกมา และการกระเจิงแบบอินอีลาสติค



รูปที่ 2.8[7] แสดงค่าเปรียบเทียบระหว่างค่าภาคตัดขวางทั้งหมดกับค่าภาคตัดขวางแบบดูดกลืน ของธาตุอลูมิเนียม จะเห็นว่าค่าภาคตัดขวางทั้งหมดมีค่ามากกว่าค่าภาคตัดขวางดูดกลืนเป็นพันเท่า และมีค่าภาคตัดขวางแบบเรโซแนนซ์ (resonance) หลายค่า

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.7 ปฏิกิริยาแบบ (n,p) และ (n,α)

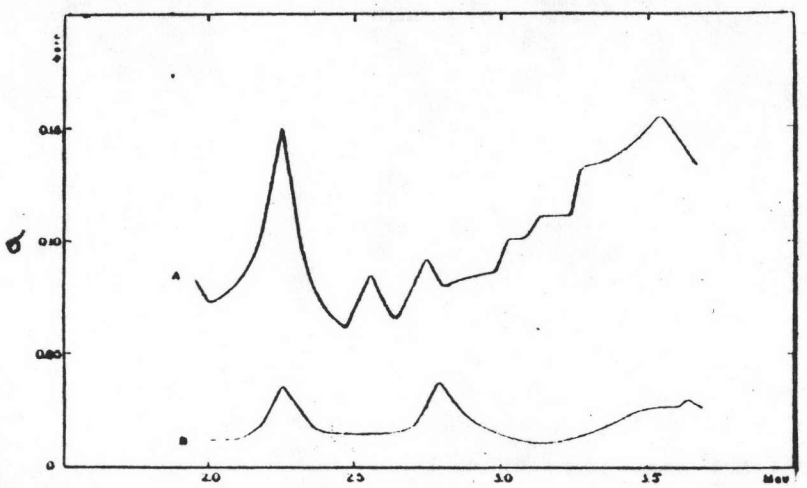
ปฏิกิริยาชนิดนี้นิวเคลียสของธาตุจะจับนิวตรอนไว้แล้วให้อนุภาคมีประจุออกมา การที่จะเกิดปฏิกิริยาได้นิวตรอนจะต้องมีค่าพลังงานสูงกว่า ค่าพลังงานขีดเริ่ม (Threshold) ของธาตุนั้น ๆ เนื่องจากอนุภาคมีประจุที่ส่งออกมาจะต้องมีพลังงานสูงกว่า คูลอมบ์ แบริเออร์ (Coulomb barrier) ของธาตุนั้น ๆ จึงมักพบว่าค่าภาคตัดขวางของปฏิกิริยาแบบที่ให้อนุภาคมีประจุออกมาจะน้อยกว่า การกระเจิงแบบอินอิลาสติค และการดูดกลืน โดยเฉพาะในธาตุเลขอะตอมสูง ปฏิกิริยาที่เป็นที่รู้จักกันคือ $N^{14}(n,p)\ C^{14}$ ในกรณีของนิวตรอนช้าปฏิกิริยานี้จะเกิดได้ในธาตุบางตัว เช่น $Li^6\ (n,\alpha)\ H^3$, ${}_5B^{10}\ (n,\alpha)\ {}_3Li^7$, ${}_2H^3(n,p){}_1H^3$

เป้า	พลังงานขีดเริ่ม	ครึ่งชีวิต
Mg^{24}	2.1	14.8 ชม.
Al^{27}	2.1	10.2 นาที
P^{32}	1.1	170 นาที
S^{32}	1.1	14.3 วัน
Cr^{52}	2.8	3.9 นาที

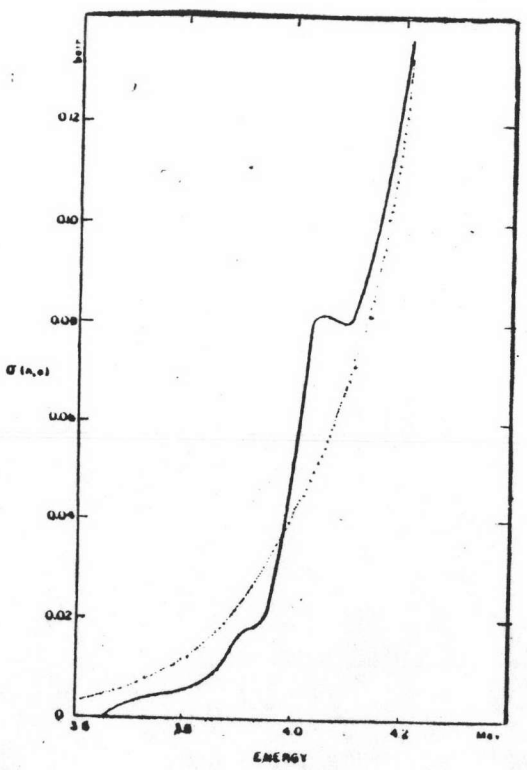
003808

ตารางที่ 2.3[9] แสดงค่าพลังงานขีดเริ่มของธาตุบางตัวในปฏิกิริยา (n,p)

i 17862862



รูปที่ 2.9 เส้น A แสดงค่าภาคตัดขวางของปฏิกิริยา $N^{14}(n,\alpha)B^{11}$
เส้น B แสดงค่าภาคตัดขวางของปฏิกิริยา $N^{14}(n,p)C^{14}$
ต่อนิวตรอนที่พลังงานต่าง ๆ



รูปที่ 2.10 แสดงค่าภาคตัดขวางของปฏิกิริยา $O^{16}(n,d)C^{14}$ ที่นิวตรอน
พลังงานต่าง ๆ กัน เส้นประแสดงว่าโอกาสในการที่อนุภาคอัลฟาจะผ่าน
กูลอม แบริเออร์ ได้จากการคำนวน

2.8 การตรวจวัดนิวตรอน

เนื่องจากนิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุ จึงตรวจวัดโดยอาศัยผลที่ได้จากนิวตรอนเข้าทำปฏิกิริยากับธาตุ ปฏิกิริยาแบบต่าง ๆ ที่ใช้ในการตรวจวัดนิวตรอนมีดังนี้

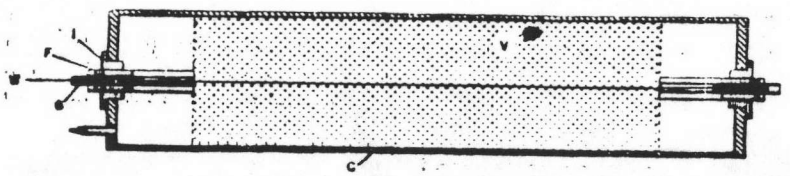
2.8.1 การจับนิวตรอนโดยนิวเคลียสแล้วให้อนุภาคมีประจุพลังงานสูงออกมาทันที เครื่องมือที่ทำการลักษณะนี้ เช่น Ionization Chamber, Proportional Counter โดยใช้ปฏิกิริยา $B^{10}(n,\alpha)Li^{7}$ ในสถานะก๊าซของ $B^{10}F_3$ เนื่องจาก B^{10} มีค่าภาคตัดขวางสูงมากสำหรับเทอร์มาลนิวตรอน และเมื่อนิวตรอนพลังงานเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพของเครื่องจะลดลง

2.8.2 การจับนิวตรอนโดยนิวเคลียส แล้วเกิดการแตกตัวขึ้น เช่น

$$U^{235} + n(\text{slow or fast}) \longrightarrow A + B$$

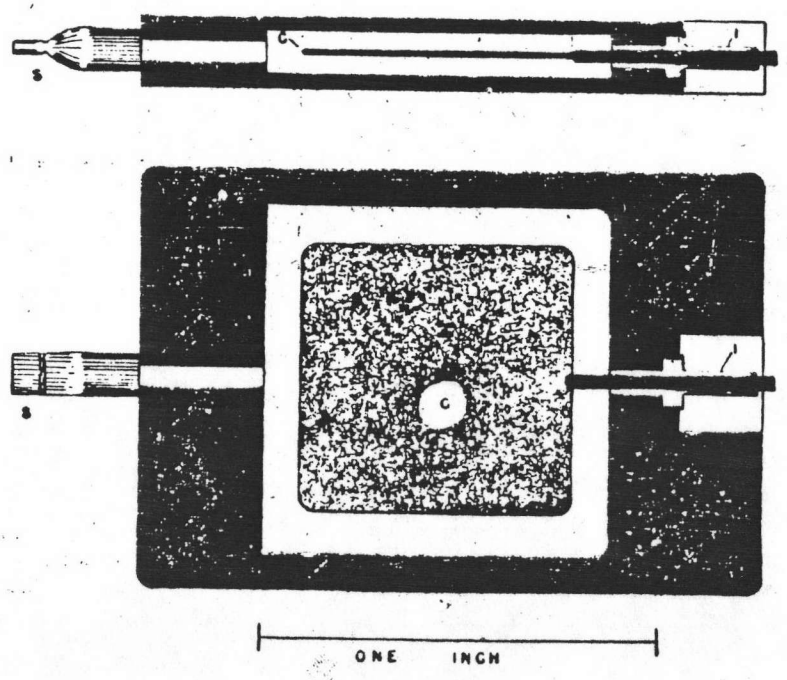
$$U^{238} + n(\text{fast}) \longrightarrow C + D$$

A , B , C , D ที่ได้จากการแตกตัวจะเป็นธาตุหนักมีพลังงานสูงถึง 100 MeV และสามารถทำให้เกิดการไอออนไนซ์ได้สูงมาก ยูเรเนียมที่ใช้ในหัววัดมักจะเป็นก๊าซ UF_6 หรืออาจจะเคลือบอยู่บนผิวของหลอดวัด เครื่องวัดที่ใช้ธาตุที่แตกตัวได้ จะมีประสิทธิภาพในการวัดเทอร์มาลนิวตรอน และเครื่องวัดที่ใช้ธาตุตามธรรมชาติ เช่น ธอเรียม, ยูเรเนียม จะมีประสิทธิภาพในการวัดนิวตรอนเร็ว



7

FIG. 2.11 *Proportional counter tube with field tubes to define the sensitive volume. F—field tube. V—sensitive volume. W—center wire. C—guard tube. I—insulation.*



9

FIG. 2.12. *Small fission chamber for detecting slow neutrons. I—insulator. C—plate on which fissioning material is deposited. S—seal.*

2.8.3 การจับนิวตรอนโดยนิวเคลียส แล้วกลายเป็นสารกัมมันตรังสี ตรวจวัดจากรังสีที่ให้ออกมาภายหลัง ซึ่งบางครั้งเรียกการวิเคราะห์แบบแอคติเวชัน ประสิทธิภาพของการวัดจะขึ้นอยู่กับความยาวครึ่งชีวิตที่เหมาะสม และค่าภาคตัดขวางที่มากพอที่จะทำให้สารกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นวัดได้ ธาตุที่ใช้ในการวัดนิวตรอนวิธีนี้เป็น ทอง อินเดียม มังกานีส โดยจะอยู่ในลักษณะเป็นแผ่นบาง ๆ หรือเป็นผงละเอียด นำไปอาบนิวตรอนในช่วงระยะเวลาหนึ่ง แล้วนำมาวัดรังสีโดยเครื่องวัด แบบไกเกอร์ หรือแบบซินทิเลชั่น

นอกจากนี้ยังสามารถนำมาวัดปริมาณของนิวตรอนที่พลังงานช่วงหนึ่ง ๆ โดยอาศัยหลักการที่ว่า การเกิดปฏิกิริยาของธาตุบางตัว นิวตรอนจะต้องมีพลังงานเกินค่าขีดเริ่มของธาตุนั้น เรียกการวัดนี้ว่า Threshold dectector

2.8.4 การกระเจิงของนิวตรอนเนื่องจากธาตุเบา เช่น ไฮโดรเจน และรีคอยนิวเคลียส เป็นตัวที่จะทำให้เกิดการไอออนไนซ์ต่อไป ซึ่งสามารถนำมาวัดนิวตรอนเร็วได้ผลดี เครื่องวัดบรรจุด้วยสารประกอบของไฮโดรเจนในสภาพของก๊าซ เช่น Cloud Chamber,

ACTIVATION CROSS SECTIONS OF A FEW NUCLIDES FOR 14-MEV NEUTRONS

Reaction	*Half-life*	*σ (isotopic)*
$Al^{27}(n,p)Mg^{27}$	9.6 min	0.079 barn
$Al^{27}(n,\alpha)Na^{24}$	15.0 hr	0.135
$P^{31}(n,p)Si^{31}$	170 min	0.091
$Fe^{56}(n,p)Mn^{56}$	2.6 hr	0.124
$Cu^{63}(n,2n)Cu^{62}$	9.9 min	0.510
$Cu^{65}(n,2n)Cu^{64}$	12.8 hr	0.97
$Cu^{66}(n,p)Ni^{65}$	2.6 hr	0.019
$Ag^{107}(n,2n)Ag^{106}$	24.5 min	0.56
$Ag^{109}(n,2n)Ag^{108}$	2.3 min	1.0

ตารางที่ 2.4[9] ค่าภาคตัดขวางของธาตุบางชนิด ที่นิวตรอนพลังงาน 14 MeV

THRESHOLD DETECTORS FOR NEUTRONS

Target nucleus	Threshold Mev	Half-life of activity	Convenient material
	(n,2n)		
C^{12}	20.2	20.5 min	Graphite
N^{14}	10.6	10.1 min	Urea
O^{16}	16.5	2.1 min	Cellophane
F^{19}	10.4	112 min	LiF
P^{31}	12.3	2.6 min	$(NH_4)H_2PO_4$
Cr^{50}	13.4	42 min	Cr_2O_3
Ni^{58}	11.7	36 hr	Ni metal
As^{75}	10.3	16 day	As_2O_3
Ag^{107}	9.6	24.5 min	Ag metal
Sb^{121}	9.3	16 min	Sb_2O_3
I^{127}	9.5	13 day	NH_4I
Pr^{141}	9.4	3.5 min	Pr_6O_{11}
	(n,p)		
Mg^{24}	2.1	14.8 hr	Mg metal
Al^{27}	2.1	10.2 min	Al metal
P^{31}	1.1	170 min	$(NH_4)H_2PO_4$
S^{32}	1.0	14.3 day	S powder
Ti^{49}	1.1	57 min	Ti metal
Cr^{52}	2.8	3.9 min	Cr_2O_3
Fe^{56}	2.1	2.6 hr	Fe metal

ตารางที่ 2.5[9] ธาตุที่ใช้เป็นเทรสโฮลด์ดีเทคเตอร์

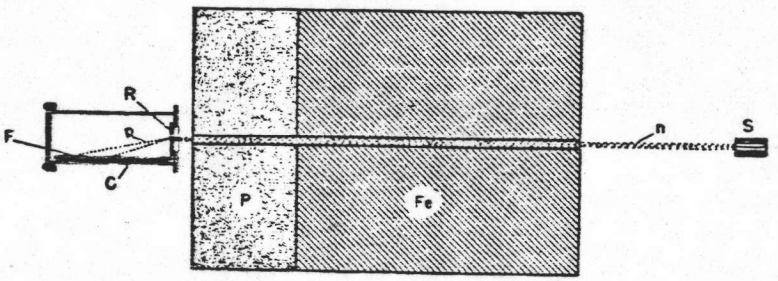


FIG. 2.13 *Collimator for use with an external radiator to record recoiling protons in a nuclear emulsion. F—photographic plate. C—evacuated chamber. p—proton beam. R—radiator. P—paraffin. Fe—iron block. n—neutron beam. S—source of neutrons.*

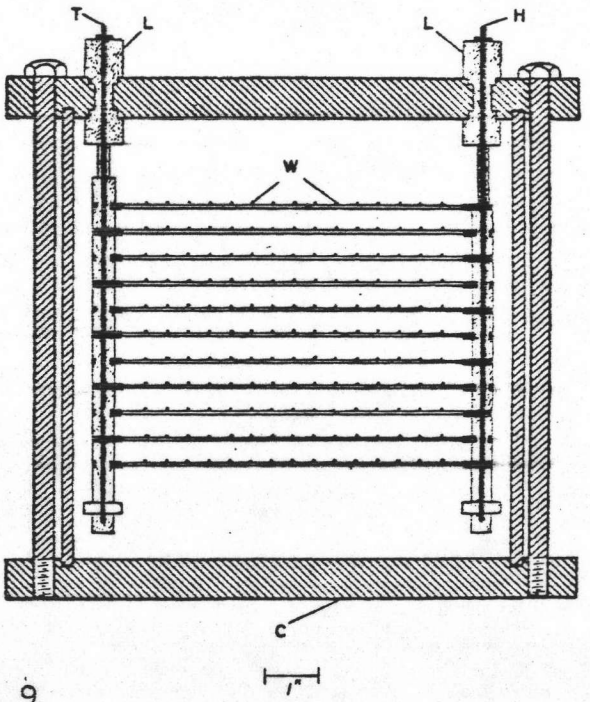


FIG. 2.14 *Multiple-wire proportional counter for fast-neutron detection. The cross section shows the arrangement of grids. C—cylindrical metal chamber. W—wire grids. L—Lucite insulators. T—terminal for collecting electrodes. H—terminal for high-voltage electrodes.*

2.9 การคำนวนนิวตรอนฟลักซ์

นิวตรอนฟลักซ์หมายถึง จำนวนนิวตรอนซึ่งเคลื่อนที่ในทิศทางต่าง ๆ กัน วิ่งผ่านพื้นที่ 1 ตารางเซนติเมตรในเวลา 1 วินาที ในการตรวจวัดทำได้หลายวิธีดังกล่าวแล้ว แต่ในการทดลองมักจะใช้วิธี นิวตรอนแอคติเวชัน โดยการนำธาตุบางตัวไปอาบนิวตรอนในช่วงเวลาหนึ่ง แล้วนำมาวัดรังสีที่เกิดจากค่าที่วัดได้ นำมาคำนวนหานิวตรอนฟลักซ์ ดังนี้

ϕ = นิวตรอนฟลักซ์ทุกพลังงานทั้งหมด

$\phi(E)$ = นิวตรอนฟลักซ์ที่พลังงาน E

$\sigma_a(E)$ = ภาคตัดขวางไมโครสโคปิคของการดูดกลืนที่พลังงาน E

σ_a = ภาคตัดขวางไมโครสโคปิคของการดูดกลืนเฉลี่ย

N = จำนวนอะตอมของวัตถุที่ใช้อาบรังสี

$$\phi = \int \phi(E)\,dE$$

$$= \frac{\int \phi(E)\sigma_a(E)\,dE}{\int \phi(E)\,dE} \qquad \text{.....(2.2)}$$

$$\sigma_a \phi = \int \phi(E)\sigma_a(E)\,dE \qquad \text{.....(2.3)}$$

และอัตราการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมด $= N\int \phi(E)\sigma_a(E)\,dE$ .....(2.4)

อัตราการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมด $= N\sigma_a\phi$ .....(2.5)

เวลาในการอาบนิวตรอน = T

ค่าคงที่การสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี = λ

ดังนั้น อัตราการแผ่รังสีเมื่ออาบนิวตรอนเวลานาน $T = A_T$

ในทางปฏิบัติ $A_T = N\sigma\phi(1-e^{-\lambda T})$ .....(2.6)

ในการนำธาตุมายังเครื่องวัด รังสีจะสลายตัวลงด้วยอัตรา $e^{-\lambda t}$ เมื่อ t เป็นเวลาระหว่างการนำวัตถุออกมาจากต้นกำเนิดนิวตรอนมายังเครื่องวัด

$$A_T = N\sigma\phi(1-e^{-\lambda T})\, e^{-\lambda t} \qquad \text{.....(2.7)}$$

เครื่องวัดจะวัดรังสีได้เพียงบางส่วน ซึ่งจะวัดได้มากน้อยขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของเครื่องวัดนั้น (E)

$$E = \text{cps} \times 100 / \text{dps} \qquad \text{.....(2.8)}$$

และในธรรมชาติ ธาตุหนึ่ง ๆ จะมีหลายไอโซโทป มีบางไอโซโทปเท่านั้นที่เกิดปฏิกิริยา จึงหาค่าของไอโซโทปที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาจาก percent abundance ในธรรมชาติจากน้ำหนักของธาตุ โดยการแทนค่า E และ P ใน

$$\phi = \frac{\text{cps} \times 100 \times 100}{ENP\sigma a\, e^{-\lambda t}(1- e^{-\lambda T})} \qquad \text{.....(2.9)}$$