บทที่ 2

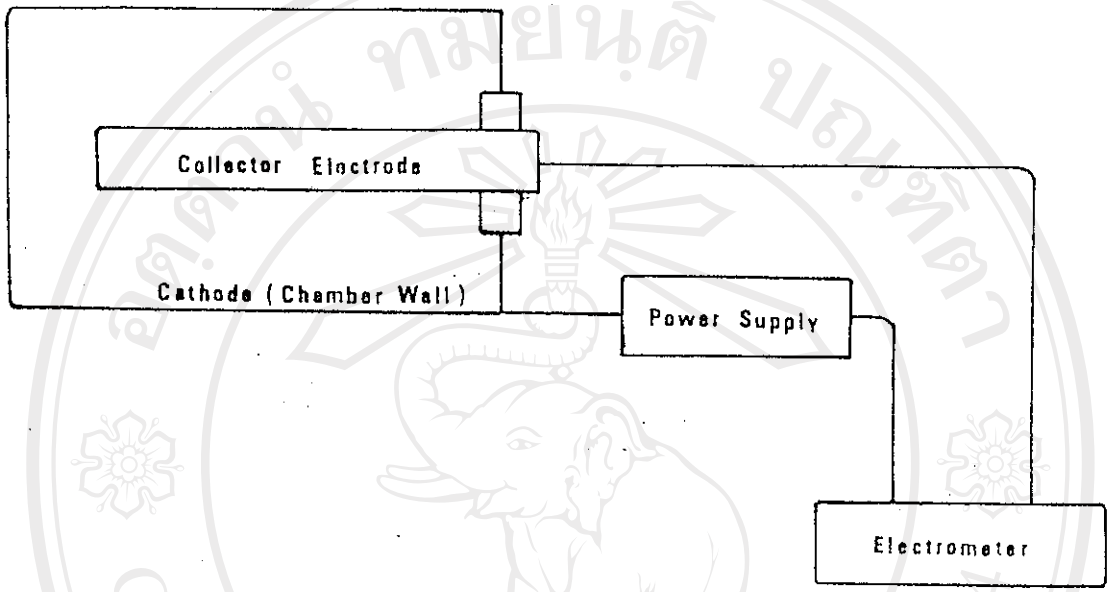
หลักการทำงานของไอออนไนเซชันแชมเบอร์และการวัดโดส

หัววัดแบบไอออนไนเซชันแชมเบอร์ มีลักษณะที่เป็นทั้งทรงกลม (spherical) ทรงกระบอก (cylindrical) และปลอกนิ้วมือ (thimble) ขนาดของหลอด (chamber) ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน โดยปกติมีตั้งแต่ขนาด 0.1 ซม^3 (Broerse, 1980) จนถึงเรือน 100 ซม^3 ขึ้นไป (Schulz, 1978) ภายในกลวงเพื่อใช้บรรจุกาซชนิดต่าง ๆ ผนังของหลอดทำหน้าที่เป็นอิเลกโทรดที่บริเวณเส้นแกนของหลอดมีแท่งตัวนำติดยื่นออกมาจากฐานทำหน้าที่เป็นอิเลกโทรดอีกขั้วหนึ่ง ฐานหลอดทำด้วยวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้า แยกขั้วอิเลกโทรดทั้งสองออกจากกัน วัสดุที่เป็นองค์ประกอบสำคัญก็คือ ผนังและกาซที่บรรจุภายในหลอด กาซที่บรรจุภายในหลอดจะเกิดการแตกตัวเนื่องจากอนุภาคมีประจุซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างรังสีนิวตรอนและรังสีแกมมา กับผนังหรือกาซภายในหลอด ซึ่งสามารถทำการตรวจวัดปริมาณประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นด้วยอิเลกทรอมิเตอร์ที่มีความไวสูง ประจุไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้จะถูกนำไปคำนวณเป็นโดสดูดกลืนในสสารผสมนิวตรอน-แกมมาต่อไป

2.1 หลักการทำงานของไอออนไนเซชันแชมเบอร์

ไอออนไนเซชันแชมเบอร์เป็นเครื่องวัดรังสี ซึ่งอาศัยหลักการแตกตัวของกาซเมื่อเกิดอันตรกิริยากับอนุภาคประจุไฟฟ้าเป็นหลักการสำคัญในการตรวจวัดปริมาณรังสี รูปร่าง และส่วนประกอบโดยทั่วไปของเครื่องวัดรังสีชนิดนี้มีลักษณะดังรูปที่ 2.1 กล่าวคือ ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าบวกและขั้วไฟฟ้าลบคู่หนึ่ง แกนกลางเป็นขั้วไฟฟ้าบวก (Collector electrode) ทำหน้าที่รวบรวมประจุไฟฟ้าที่เกิดจากการแตกตัวของกาซ และผนังหลอด (Chamber wall) ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าลบโดยต่อเป็นวงจรกับความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงสูง ขั้วไฟฟ้าทั้งสองนี้แยกออกจากกันโดยยึดติดกับฐานหลอดที่เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี ภายในแชมเบอร์จะบรรจุกาซไว้จำนวนหนึ่งซึ่งอาจจะเป็นกาซบริสุทธิ์ หรือกาซผสมชนิดใดชนิดหนึ่ง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของกัมมันตภาพรังสีที่ต้องการตรวจวัด เมื่ออะตอมหรือโมเลกุลของกาซภายในแชมเบอร์เกิด

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของไอออนไนเซชั่นแชมเบอร์และวงจรวัดกระแสโดยทั่วไป

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

อันตรกิริยาแบบคูลอมบ์กับอนุภาคประจุไฟฟ้าที่ทะลุผ่านผนังหลอดเข้าไป หรืออนุภาคประจุไฟฟ้าทุติยภูมิที่เกิดขึ้นภายในแชมเบอร์อันเป็นผลสืบเนื่องมาจากอะตอม หรือโมเลกุลของกาซภายในแชมเบอร์เกิดอันตรกิริยากับกัมมันตภาพรังสีชนิดต่าง ๆ อิออนลบที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ไปหาขั้วไฟฟ้าบวก สำหรับอิออนบวกจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วไฟฟ้าลบ และสามารถตรวจวัดประจุไฟฟ้าจำนวนนี้ได้โดยตรงในรูปของกระแสไฟฟ้า หรือประจุไฟฟ้าโดยใช้อิเลกทรอมิเตอร์ความไวสูง เนื่องจากปริมาณประจุไฟฟ้าจะมีค่าน้อยมากอยู่ในลำดับที่ต่ำกว่า 10^{-8} แอมแปร์ ทั้งนี้ในกรณีของไอออนไนเซชันแชมเบอร์ ที่มีผนังสมมูลย์กับอากาศ (air wall equivalent) กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่าตามสมการ (Price, 1964)

$$I = 3.326 \times 10^{-14} \frac{dx}{dt} \frac{V P}{T} \qquad (2.1)$$

เมื่อ I เป็นกระแสไฟฟ้าในหน่วยของแอมแปร์

P เป็นความดันในหน่วยมิลลิเมตรของปรอทของกาซภายในแชมเบอร์

V เป็นปริมาตรยังผล (effective volume) ในหน่วยลูกบาศก์เซนติเมตร ของกาซภายในแชมเบอร์

T อุณหภูมิเป็นองศาเคลวิน

$\frac{dx}{dt}$ เป็นปริมาณรังสีในหน่วยของเรินเกนท์ที่ตกกระทบแชมเบอร์ต่อหนึ่งหน่วยชั่วโมง (Exposure rate) ในกรณีแหล่งกำเนิดรังสีชาตุเรเดียม ปริมาณนี้จะมีค่าตามสมการ (Price, 1964)

$$\frac{dx}{dt} = \frac{C(1 - 0.13\ t)A}{d^2} \qquad (2.2)$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เมื่อ A เป็นความเข้มกัมมันตภาพรังสีในหน่วยคูรีของแหล่งกำเนิดรังสี

t เป็นความหนาในหน่วยมิลลิเมตรของโลหะพลาตินัมที่ห่อหุ้มธาตุเรเดียมที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดรังสีแกมมา

C เป็นค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของกาซที่บรรจุภายในแชมเบอร์

d เป็นระยะทางระหว่างแหล่งกำเนิดรังสีถึงแชมเบอร์มีหน่วยเป็นเซนติเมตร

2.2 อันตรกิริยาระหว่างรังสีกับสสาร

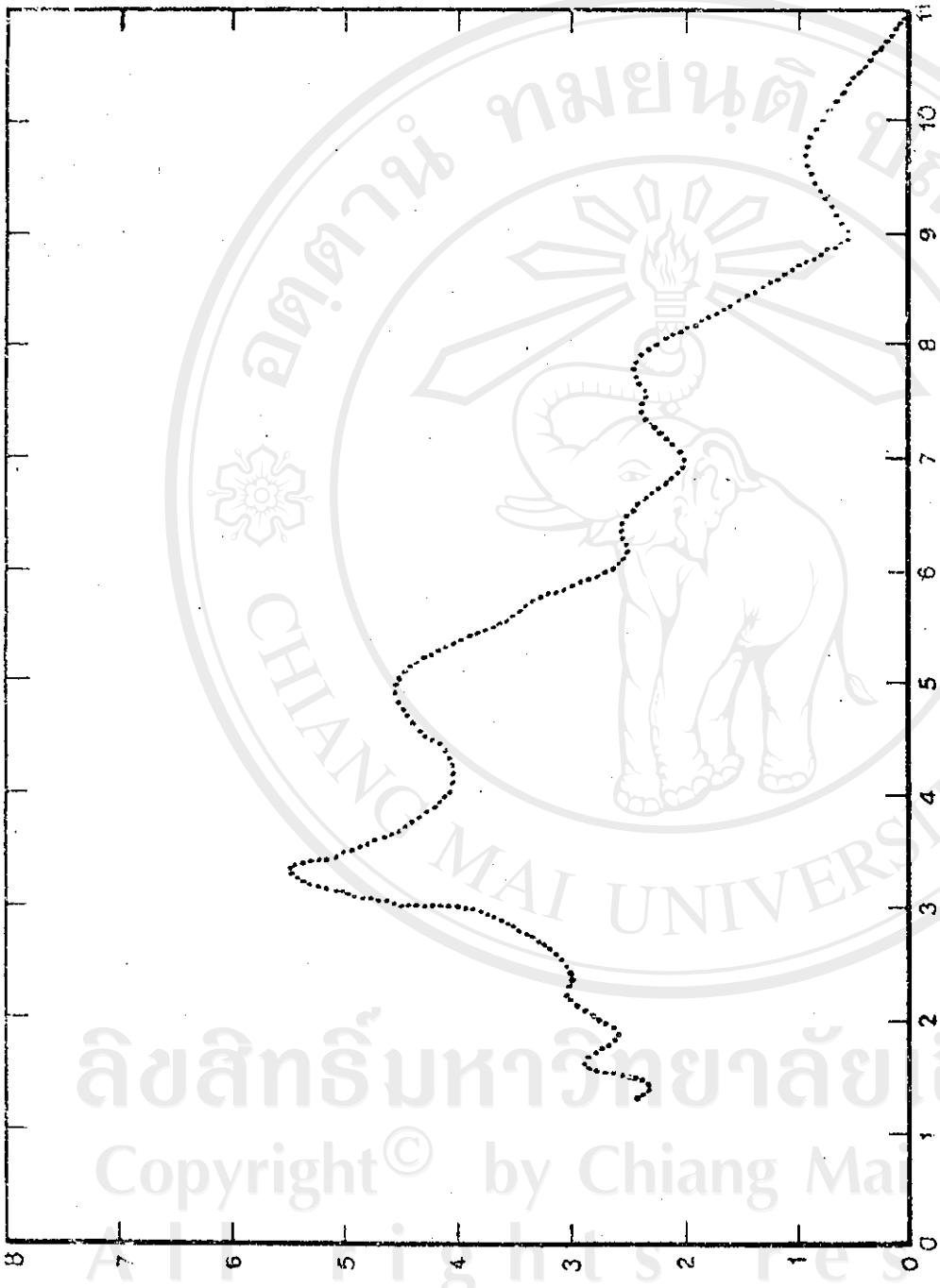
รังสีที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ใช้ต้นกำเนิดนิวตรอนจากสารกัมมันตรังสี Am-Be มีความแรง 1 Ci มีลักษณะเป็นทรงกระบอกทำด้วยเหล็กกล้าหนา 2.4 มม. ห่อหุ้มสารประกอบ $^{241}Am\ O_2$ ซึ่งคลุกเคล้าอยู่กับโลหะ ^{9}Be ^{241}Am เป็นธาตุกัมมันตรังสีซึ่งสลายตัวตามสมการ (Lederer and Shirley, 1978)

$$^{241}_{95}Am \longrightarrow {}^{237}_{93}Np + {}^{4}_{2}He + \gamma \qquad (2.3)$$

รังสีแอลฟา ($^{4}_{2}He$) ที่ได้มีพลังงานหลายระดับ แต่ที่สำคัญมี 2 ระดับพลังงาน คือ ระดับพลังงาน 5.49 MeV (85 %) และ 5.44 MeV (13 %) ส่วนรังสีแกมมา (γ) มีพลังงาน 59.6 KeV (0.06 MeV) อนุภาคแอลฟาที่ออกมาจะทำปฏิกิริยากับ ^{9}Be โดยให้นิวตรอนพลังงานตั้งแต่ 0.5-11.5 MeV ออกมา ซึ่งมีการกระจายพลังงานดังสเปกตรัมตามรูป 2.2 (Geiger and Zwan, 1970) และได้รังสีแกมมาพลังงานเฉลี่ย 4.43 Mev (Lederer and Shirley, 1978) ออกมาด้วย

สำหรับกาซที่บรรจุในแชมเบอร์คือ กาซพวกไฮโดรคาร์บอนเช่น กาซโปรเปน (C_3H_8) หรืออะเซทีลีน (C_2H_2) และพวกกาซหนัก ๆ เช่น กาซอาร์กอน (Ar) หรือกาซไนโตรเจน (N_2) เนื่องจากกาซภายในแชมเบอร์จะมีการแตกตัว

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 2.2 แสดงสเปคตรัมของนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสี Am-Be (Geiger and Zwan, 1970)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เกิดขึ้น เมื่อมีอันตรกิริยาคูลอมบ์กับอนุภาคประจุไฟฟ้าเท่านั้น แต่รังสีนิวตรอนและรังสีแกมมาเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุไฟฟ้า ดังนั้น การแตกตัวของกาซภายในแชมเบอร์เมื่อรังสีทั้งสองชนิดเคลื่อนที่เข้าไปจะเกิดจากอนุภาคประจุไฟฟ้าทุติยภูมิ ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากอันตรกิริยาระหว่างกาซและรังสีทั้งสองชนิด โดยที่รังสีนิวตรอนพลังงานดังกล่าวจะมีอันตรกิริยากับไฮโดรเจนได้ดีกว่าคาร์บอน ส่วนกาซหนัก ๆ นั้นจะเกิดอันตรกิริยาน้อยมาก สำหรับรังสีแกมมาจะมีอันตรกิริยากับสารที่มีอะตอมมิคนัมเบอร์สูงได้ดีกว่าสารที่มีอะตอมมิคนัมเบอร์ต่ำ ดังนั้น จึงเกิดอันตรกิริยากับกาซอาร์กอนได้ดีที่สุด ถัดมาเป็นไนโตรเจน, คาร์บอน และไฮโดรเจนจะมีอันตรกิริยาน้อยที่สุด ในที่นี้จะพิจารณาอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างรังสีนิวตรอน และรังสีแกมมาที่ได้จากแหล่งกำเนิดรังสี Am-Be กับกาซพวกไฮโดรคาร์บอนและกาซอาร์กอน

2.2.1 <u>อันตรกิริยาของรังสีนิวตรอนพลังงานสูงกับกาซไฮโดรคาร์บอนและกาซอาร์กอน</u>

เมื่อรังสีนิวตรอนพลังงานสูงมีอันตรกิริยากับสารประกอบไฮโดรคาร์บอน อันตรกิริยาสำคัญที่เกิดขึ้นได้แก่ elastic scattering, inelastic scattering และ non-elastic scattering นิวตรอนจะมีอันตรกิริยากับไฮโดรเจนมากที่สุดในช่วงพลังงานต่ำกว่า 14 MeV ลงมา และอันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับคาร์บอนจะได้อนุภาคหนักกับรังสีแกมมาพลังงานสูง (Cecil, et al.,1979) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีรายละเอียดดังนี้คือ

(i) elastic scattering เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแบบ (n, n) เกิดขึ้นกับไฮโดรเจนอะตอมมากที่สุด เนื่องจากนิวตรอนมีมวลใกล้เคียงกับมวลโปรตอน โดยเฉพาะเมื่อนิวตรอนมีพลังงานต่ำกว่า 14 MeV นอกจากนี้นิวตรอนยังเกิดอันตรกิริยาแบบ (n, n) กับคาร์บอนอีกด้วย ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีดังนี้ $^{1}_{H}(n, n)^{1}_{H}$ และ $^{12}_{C}(n, n)^{12}_{C}$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

(ii) inelastic scattering เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแบบ (n, n') และได้รังสีแกมมาพลังงานสูง ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นมาเมื่อนิวตรอนมีพลังงาน 5-10 MeV ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ ^{12}C (n, n') $^{12}C^*$

(iii) Non elastic scattering ปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นเมื่อนิวตรอนตกกระทบเป้าแล้วจะได้ประจุไฟฟ้าหนักออกมา ปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นมากเมื่อนิวตรอนมีพลังงานระหว่าง 5-15 MeV ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแบบนี้คือ ^{12}C (n,α) ^{4}Be, และ ^{12}C (n, n) 3α กราฟแสดงโอกาสการเกิดปฏิกิริยา (Cross - section) ของนิวตรอนที่มีอันตรกิริยากับไฮโดรเจนและคาร์บอน ดังรูปที่ 2.3 พบว่า ^{1}H (n, n) ^{1}H เกิดขึ้นมากกว่าปฏิกิริยาอื่น โปรตอนที่เกิดขึ้นจะมีจำนวนมากและทำให้กาซแตกตัวเป็นปริมาณมากกว่าอนุภาคชนิดอื่น

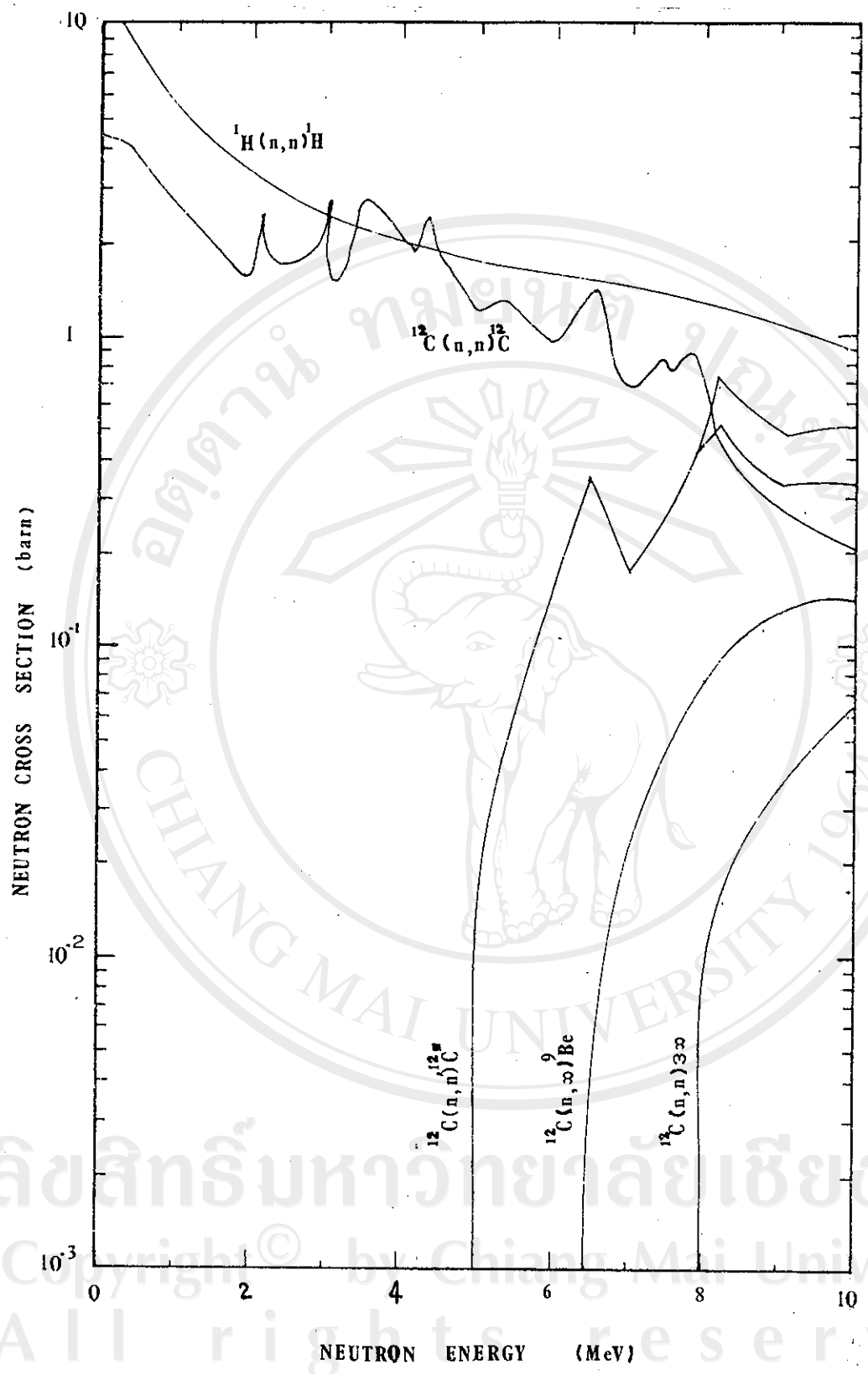
สำหรับอันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับอาร์กอนนั้นเกิดขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับอันตรกิริยาของสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอน (BNL 325, 1976) จึงไม่นำมาพิจารณาในที่นี้

2.2.2 <u>อันตรกิริยาของรังสีแกมมาพลังงาน 4.43 MeV กับกาซไฮโดรคาร์บอนและกาซอาร์กอน</u>

เมื่อรังสีแกมมาตกกระทบกาซไฮโดรคาร์บอนและกาซอาร์กอน อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นมีดังนี้คือ Photoelectric effect, Compton scattering และ Pair production โดยที่พลังงานของรังสีแกมมามีค่า 4.43 MeV และค่าอะตอมมิคนัมเบอร์ของอาร์กอน, คาร์บอน และไฮโดรเจนไม่สูงนัก ดังนั้น อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเป็น Compton scattering

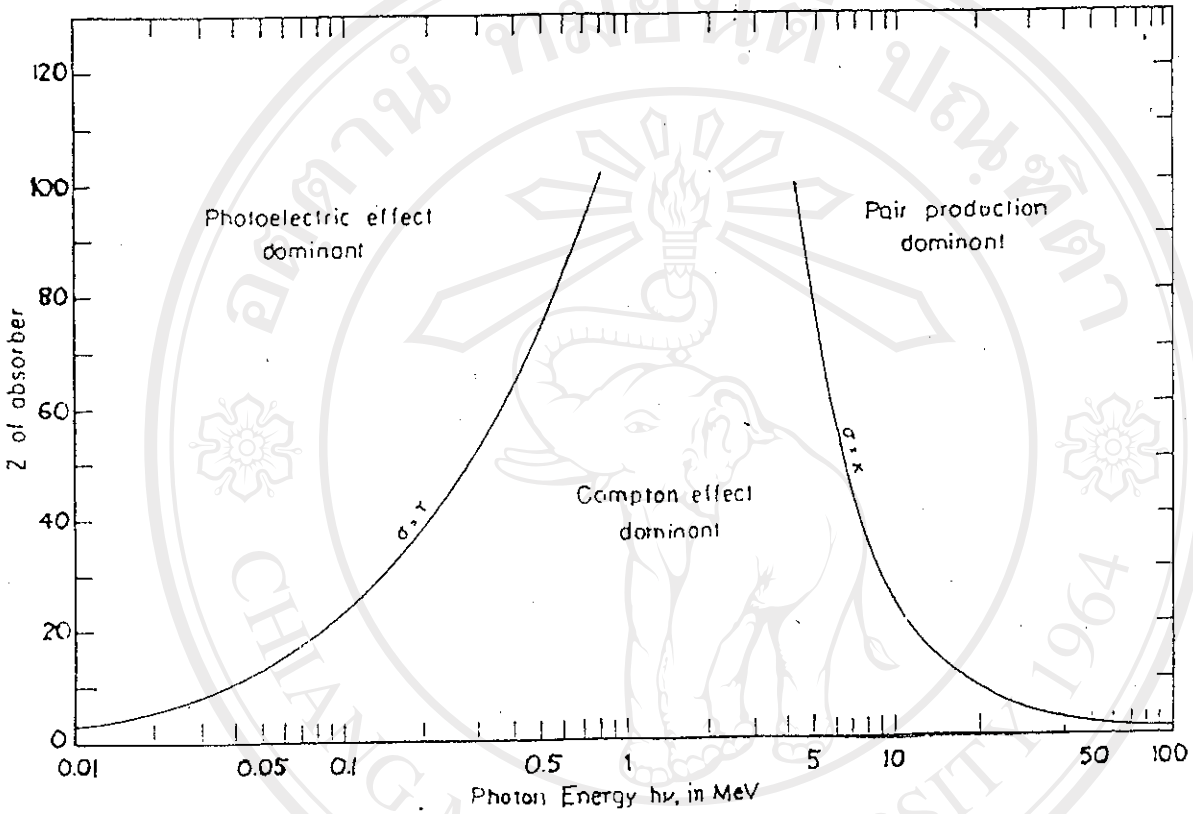
กราฟแสดงอันตรกิริยาระหว่างสสารกับโฟตอน ดังแสดงในรูป 2.4

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 2.3 แสดงค่า cross - section ที่นิวตรอนมีต่อนิวเคลียสของไฮโดรเจน และคาร์บอน (Cecil et al., 1979)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงอันตรกิริยาระหว่างธาตุต่าง ๆ กับโฟตอน (Evans, 1955)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

โอกาสการเกิดอันตรกิริยาระหว่างรังสีแกมมากับอาร์กอนจะสูงกว่าคาร์บอนและไฮโดรเจน เนื่องจาก กาซอาร์กอนมีความหนาแน่นของอะตอมในปริมาณที่สูงกว่าคาร์บอนและไฮโดรเจน

อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นทั้งหมดที่กล่าวแล้วจะให้ secondary charge particle ซึ่งจะทำให้อะตอมของกาซแตกตัว สามารถวัดได้อยู่ในรูปของ Ionizing current จากกระแสไฟฟ้าหรือประจุไฟฟ้าที่ได้นำมาคำนวณเป็นโดสดูดกลืนของเนื้อเยื่อต่อไป

2.3 การใช้ไอออนไนเซชันแชมเบอร์ในการวัดโดสดูดกลืน

หัววัดโดสที่นำมาใช้ในการตรวจวัด (monitor) โดสตามบริเวณต่างๆ ภายใน หรือใกล้เคียงกับห้องผลิตรังสีนิวตรอนซึ่งมีขนาดปริมาตรในเรือน 100 ซม.^{3} ขึ้นไป (Schulz, 1978) รังสีที่มาตกกระทบส่วนใหญ่จะทำปฏิกิริยากับกาซภายในหัววัดโดยตรง โดยอาศัยหลักการของ Schulz นั้นคือ ในสนามรังสีผสม การแตกตัวต่อมวลของกาซ (R) เกิดจากผลรวมระหว่างการแตกตัวที่เกิดจากรังสีแกมมาและรังสีนิวตรอน นั้นคือ

$$R_a = {}^nR_a + {}^rR_a \qquad (2.4)$$

และ

$$R_b = {}^nR_b + {}^rR_b \qquad (2.5)$$

เมื่อ a และ b หมายถึง กาซแต่ละชนิดที่บรรจุในแชมเบอร์ ในงานวิจัยนี้เราจะเน้นหนักไปทางกาซอาร์กอน และโปรเปน ถ้าให้ ${}^nk$ และ ${}^rk$ เป็นอัตราส่วนของการแตกตัวของกาซ a และกาซ b เนื่องจากรังสีนิวตรอนและรังสีแกมมา

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

$$n_k = \frac{n_{R_a}}{n_{R_b}} \qquad (2.6)$$

$$r_k = \frac{r_{R_a}}{r_{R_b}} \qquad (2.7)$$

จากสมการที่ (2.6)-(2.9)

$$r_{R_a} = \frac{r_k}{r_k - n_k}(R_a - {}^{n}k\, R_b) \qquad (2.8)$$

$$n_{R_a} = \frac{n_k}{r_k - n_k}(r_k\, R_b - R_a) \qquad (2.9)$$

$$r_{R_b} = \frac{1}{r_k - n_k}(R_a - {}^{n}k\, R_b) \qquad (2.10)$$

$$n_{R_b} = \frac{1}{r_k - n_k}(r_k\, R_b - R_a) \qquad (2.11)$$

ซึ่ง r_{R_a} และ n_{R_a} ก็คือ การแตกตัวต่อมวลของกาซ a (อาร์กอน) เนื่องจากรังสีแกมมาเพียงอย่างเดียว และจากรังสีนิวตรอนเพียงอย่างเดียว

r_{R_b} และ n_{R_b} ก็คือ การแตกตัวต่อมวลของกาซ b (โปรเปน) เนื่องจากรังสีแกมมาเพียงอย่างเดียว และจากรังสีนิวตรอนเพียงอย่างเดียว

ค่า r_{R_a}, n_{R_a}, r_{R_b} และ n_{R_b} สามารถนำไปคำนวณโดสดูดกลืนในแชมเบอร์ (D_m) ในหน่วยของ Rad โดยอาศัยทฤษฎีของ Bragg-Gray ดังนี้

$$r_{D_m} = r_{R_a}\, r_{W_a}\, r_{K_a^m} = r_{R_b}\, r_{W_b}\, r_{K_b^m} \qquad (2.12)$$

$$n_{D_m} = n_{R_a}\, n_{W_a}\, n_{K_a^m} = n_{R_b}\, n_{W_b}\, n_{K_b^m} \qquad (2.13)$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เมื่อ r, n, m^* หมายถึง รังสีแกมมา, รังสีนิวตรอน และเนื้อเยื่อ ตามลำดับ

w เป็นพลังงานเฉลี่ยของรังสีที่ทำให้เกิดอิออนแพร์ในหน่วยเออร์ต่อคูลอมบ์ K_a^m, K_b^m เป็นอัตราส่วนของ Kerma ของเนื้อเยื่อต่อกาซ a และ b ตามลำดับ

รายละเอียดของการนำสมการ (2.4) - (2.13) มาใช้ในการคำนวณโดส จะกล่าวถึงในบทที่ 5

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved