

การคำนวณค่าพลังงานจากยูเรเนียม-236

CALCULATE THE ENERGY FROM URANIUM-236

ชโนภาส ชนลักษณ์ดาว* และ รัศมี แสงศิริมงคลยิ่ง

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร กรุงเทพมหานคร 10220

Chanopat Chonlakdao* and Ratsamee Sangsirimongkolying

Faculty of Science and Technology, Phranakhon Rajabhat University, Bangkok, 10220

*E-mail: chanopatp@gmail.com

Received: 12-09-2023

Revised: 06-11-2023

Accepted: 09-11-2023

บทคัดย่อ

บทความวิชาการนี้กล่าวถึงหลักการต่าง ๆ เพื่อเข้าใจการคำนวณพลังงานจากยูเรเนียม-236 ที่เหมาะสมสำหรับครูและอาจารย์ทั่วไป โดยได้อธิบายประวัติความเป็นมา ความสัมพันธ์มวลพลังงานของไอน์สไตน์ พลังงานยึดเหนี่ยวเฉลี่ย และอื่น ๆ เพราะธรรมชาติที่แปลกของนิวเคลียร์ฟิชชัน เราจึงต้องเข้าใจความหมายของนิวเคลียร์ฟิชชัน เพื่อจะได้เข้าใจการคำนวณพลังงานจากยูเรเนียม-236 ในบทความนี้เราสามารถประมาณค่าพลังงานจากยูเรเนียม-236 โดยใช้ผลต่างในค่าพลังงานยึดเหนี่ยวเฉลี่ยของยูเรเนียม-236 กับค่าพลังงานยึดเหนี่ยวเฉลี่ยของผลผลิตจากนิวเคลียร์ฟิชชัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพลังงานจากยูเรเนียม-236 มีค่าประมาณ 203 MeV

คำสำคัญ: ความสัมพันธ์มวลพลังงานของไอน์สไตน์ พลังงานยึดเหนี่ยวเฉลี่ย นิวเคลียร์ฟิชชัน

ABSTRACT

This academic article provides all the principles necessary to understand the calculation of the energy in uranium-236 which are suitable for the general teachers and lecturers. The histories, Einstein's mass energy, average binding energy, were explained. Owing to the strange nature of nuclear fission, one must understand the interpretations of nuclear fission before properly understanding the calculation of the energy from uranium-236. We can now estimate the energy from uranium-236, using the deviation between the average binding energies of the uranium-236 parent nuclide and the fission product nuclei, which suggests that the energy of uranium-236 is about 203 MeV.

Keywords: Einstein's mass energy relation, Average binding energy, Nuclear Fission

บทนำ

ในปี ค.ศ. 1919 (Woolfson, 2010) รัทเธอร์ฟอร์ด (Rutherford) เป็นนักวิทยาศาสตร์คนแรกที่ประสบความสำเร็จในการแปลงธาตุ โดยการยิงอนุภาคอัลฟา (α particle, ${}^4_2\text{He}$) จากเรเดียม (Radium) ไปยังนิวเคลียสของไนโตรเจน (Nitrogen, ${}^{14}_7\text{N}$) รัทเธอร์ฟอร์ดพบความจริงว่า ไนโตรเจนที่ถูกยิงแล้วจะเปลี่ยนเป็นอะตอมออกซิเจน (Oxygen, ${}^{17}_8\text{O}$) กับโปรตอน (Proton, ${}^1_1\text{p}$) รวมทั้งให้รังสีแกมมา (Gamma radiation, γ) ออกมาด้วย ดังสมการ (1)



สมการ (1) ตั้งชื่อว่า ปฏิกิริยานิวเคลียร์ (Nuclear reaction) โดยการทำให้นิวเคลียสแตกออก เมื่อตอนที่นิวเคลียสของไนโตรเจนแตกไปนั้น ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับนิวเคลียสยังไม่ค่อยเข้าใจเท่าใดนัก คือไม่มีใครรู้เกี่ยวกับองค์ประกอบของมันมากนัก ที่รู้แน่นอนคือมีโปรตอนอยู่ในนิวเคลียส แต่ก็คิดกันว่าต้องมีส่วนอื่นอยู่ด้วย เพราะอะตอมของยูเรเนียม (Uranium) ที่มีโปรตอน 92 ตัว แต่หนักกว่าโปรตอนถึง 238 เท่า เรามีเหตุผลพอที่จะถือว่าต้องมีอนุภาคอื่นอีก และอนุภาคอื่นซึ่งก่อให้เกิดปัญหานี้ถูกตั้งชื่อว่า นิวตรอน (Neutron) ซึ่งยังไม่มีข้อพิสูจน์ว่ามีอยู่จริงในตอนนั้น ต้องรอไปจนถึงปี ค.ศ. 1932 ชาดวิก (Chadwick) ได้ยิงเบริลเลียม (Beryllium) ด้วยอนุภาคอัลฟา และพบว่าเมื่อเบริลเลียมแตกตัวจะให้อนุภาคที่มีมวลเหมือนโปรตอนแต่ไม่มีประจุไฟฟ้าออกมา อนุภาคนี้มีคนตั้งชื่อไว้แล้วว่านิวตรอน ซึ่งนิวตรอนนี้ต่อมาได้ถูก แฟร์มี (Fermi) นำมาใช้เป็นกระสุนแทนอนุภาคอัลฟา เพราะนิวตรอนนั้นไม่มีประจุไฟฟ้าทำให้เดินทางได้ไกลกว่าอนุภาคอัลฟา ด้วยเหตุนี้แฟร์มีจึงคิดว่านิวตรอนคงมีโอกาที่จะชนนิวเคลียสและทำให้นิวเคลียสแตกตัวออกได้ดีกว่าอนุภาคอัลฟา โดยยิงนิวตรอนช้า (Slow neutron) ซึ่งนิวตรอนจะถูกลดความเร็วลงด้วยน้ำหรือพาราฟิน (Paraffin) หรือที่เรียกกันว่าตัวหน่วงความเร็ว (Moderator) และพบว่านิวตรอนเหล่านี้สามารถจับกับนิวเคลียสของอะตอมได้ง่ายกว่าอนุภาคนิวตรอนที่มีความเร็วสูงกว่า

การยิงยูเรเนียมด้วยนิวตรอนช้าแบบนี้ให้ผลลัพธ์ที่น่าประหลาดใจคือเกิดธาตุใหม่ที่เบากว่าอย่างไม่น่าคาดคิด ซึ่งไม่ได้รับการระบุชื่ออยู่ยาวนานเพราะนักวิทยาศาสตร์ไม่เชื่อว่าจะมีธาตุใหม่ขึ้นมาได้เองจากการระดมยิง จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1938 (Lemons, 2018) ฮาห์น (Hahn) ไมต์เนอร์ (Meitner) และสเตรสซมันน์ (Strassmann) ได้เริ่มทำการทดลองแบบเดียวกับแฟร์มี โดยยิงยูเรเนียมด้วยนิวตรอนช้า จากนั้นก็ตรวจสอบสิ่งต่าง ๆ ที่เกิดจากการแตกตัวของยูเรเนียม จากผลการทดลองทั้งสามคนเชื่อว่า สิ่งที่เกิดขึ้นนี้เป็นพวกธาตุที่เรียกว่าธาตุทรานส์ยูเรนิค (Transuranic) ซึ่งเป็นชื่อที่ใช้เรียกธาตุที่มีเลขอะตอมสูงกว่ายูเรเนียม และในเวลาต่อมาทั้งสามคน ทราบว่าไอเรเน โจลิโอท์ (Irene Joliot) และผู้ร่วมงานได้ตรวจพบธาตุชนิดใหม่ธาตุหนึ่งในกลุ่มธาตุทรานส์ยูเรนิค ซึ่งเกิดจากการรวมยิงยูเรเนียม แต่ธาตุที่พบนี้ไม่เป็นธาตุทรานส์ยูเรนิค ในเวลาต่อมาฮาห์นและสเตรสซมันน์ได้วางแผนที่จะทำการทดลองเลียนแบบไอเรเน โจลิโอท์ซ้ำอีก เพื่อดูให้แน่ใจว่าจะได้ผลอย่างเดียวกันหรือไม่ เขาพบว่าสิ่งที่ได้นั้นมีคุณสมบัติทางเคมีคล้าย ๆ กับเรเดียม ตอนแรกเขาก็คิดว่าเป็นเรเดียม แต่ต่อมาเขาได้ตรวจสอบสิ่งที่เกิดขึ้นซ้ำแล้วซ้ำอีกหลายครั้ง จนในที่สุดก็สรุปว่า สิ่งที่เขาทดลองได้ที่แท้ก็คือแบเรียม (Barium) ซึ่งมีเลขอะตอม 56 นั่นเอง และเขาก็เชื่อในผลงานของเขาอย่างไม่มีข้อสงสัย เนื่องจากเขาเป็นนักเคมี เขาทั้งสองยังรือที่จะประกาศการค้นพบซึ่งจะต้องขัดกับกฎต่าง ๆ ที่มีอยู่ในวิชาฟิสิกส์สมัยนั้น ดังนั้นเขาตัดสินใจเขียนจดหมายเล่าให้ไมต์เนอร์ฟังถึงเรื่องการค้นพบแบเรียมในผลผลิตที่ได้จากการรวมยิงยูเรเนียม ไมต์เนอร์ทราบดีว่าอะไรเกิดขึ้น อะตอมของยูเรเนียมบางตัวได้แบ่งแยกออกเป็นสองส่วนเกือบเท่า ๆ กัน ต่อมาไม่นาน ได้มีผู้ค้นพบอีกส่วนหนึ่งที่คู่กับแบเรียมซึ่งเป็นคริปตอน (Krypton) ซึ่งมีเลขอะตอม 36 เมื่อนำเลขอะตอมของแบเรียมรวมเข้าด้วยกัน

กับเลขอะตอมของคริปทอนก็จะได้ 92 ซึ่งเป็นเลขอะตอมยูเรเนียมพอดี ไมต์เนอร์ได้ตั้งชื่อการค้นพบในลักษณะที่อะตอมยูเรเนียมแบ่งแยกออกเป็นสองส่วนว่าฟิชชัน (Fission, คล้ายการแบ่งตัวของเซลล์ที่มีชีวิตออกเป็นสองส่วนซึ่งก็เรียกฟิชชันเหมือนกัน) ยิ่งไปกว่านั้นไมต์เนอร์คิดว่าเมื่อยูเรเนียมแบ่งแยกออกเป็นสองส่วนเกือบเท่า ๆ จะมีพลังงานจำนวนหนึ่งที่มีค่ามหาศาลถูกปลดปล่อยออกมาด้วย และชิ้นส่วนทั้งสองก็จะวิ่งแยกออกจากกันด้วยความเร็วสูง ตอนที่ไมต์เนอร์ได้รับจดหมายจากฮาห์นนั้นเป็นเวลาพอดีกับหลานของเธอชื่อฟริช (Frisch) ได้รับรู้เรื่องราวในจดหมายของฮาห์นด้วยในตอนแรกฟริชไม่เชื่อว่าอะตอมของยูเรเนียมจะแบ่งแยกออกเป็นสองส่วนที่เกือบเท่ากันได้ เขายังแอบคิดว่าฮาห์นและสแตรซ์แมนจะต้องทำการทดลองผิดพลาด

ในช่วงเวลานั้นทั้งไมต์เนอร์และฟริชได้พูดคุยกันเพื่อที่จะหาสาเหตุว่าเกิดอะไรขึ้นกันแน่ ซึ่งเต็มไปด้วยความยากลำบากเป็นอย่างมาก ทั้งในเรื่องของความเข้าใจทางทฤษฎีและเทคนิคในการทดลอง อย่างไรก็ตามความลับไม่เป็นความลับอีกต่อไปแล้ว เมื่อไมต์เนอร์และฟริชได้ตัดสินใจบอกชาวนีแอกโบร์ (Bohr) ซึ่งเป็นผู้หนึ่งที่ศึกษาค้นคว้าเรื่องธรรมชาติของอะตอมและโบร์ได้รับการยกย่องว่าเป็นนักฟิสิกส์ที่ยิ่งใหญ่คนหนึ่ง โดยโบร์ได้แนะนำการทดลองเพื่อวัดหาค่าและคำนวณค่าพลังงานที่ปล่อยออกมาเมื่อยูเรเนียมแตกตัวออกเป็นสองส่วน โบร์สนใจการค้นพบนี้มากเพราะว่าในปรากฏการณ์นิวเคลียร์ฟิชชันนั้น มันไม่เป็นไปตามความรู้ที่มีมาก่อนเลย การค้นพบของฮาห์นและสแตรซ์แมนเช่นนี้ได้เปิดทางให้นักวิทยาศาสตร์ทำการค้นคว้าและวิจัย หนทางใหม่เหล่านี้จะให้อีกความรู้ใหม่เป็นอะไรได้บ้าง

บทความวิชาการนี้นำเสนอขึ้นมาเพื่อให้ข้อมูลพื้นฐานแก่ผู้ที่ต้องการความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับหลักการของนิวเคลียร์ฟิชชัน ยิ่งไปกว่านั้นยังได้ให้เทคนิคที่จำเป็นในการคำนวณค่าพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาอีกด้วย

บทความนี้แบ่งออกเป็นสามส่วนหลักคือ 1) ประวัติความเป็นมา 2) หลักการพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับนิวเคลียร์ฟิชชัน และ 3) เทคนิคที่จำเป็นในการคำนวณค่าพลังงานจากนิวเคลียร์ฟิชชัน

ประวัติความเป็นมา

550 ปีก่อนคริสต์ศักราช (Tiner, 2021) พวกกรีกโบราณเป็นพวกแรกที่กล่าวเตือนขึ้นว่า สสารเป็นส่วนประกอบของอะตอม (Atom) เริ่มจาก ดีโมคริตุส (Democritus) กล่าวไว้ว่า ถ้าตัดสสารทั้งหลายออกเป็นชิ้น ๆ และตัดลงไปเป็นชิ้นเล็กลงไปเรื่อย ๆ ในที่สุดจะได้ชิ้นส่วนซึ่งเล็กเกินไปกว่าจะแบ่งได้อีก และเรียกชิ้นส่วนนี้ว่าอะตอม จากภาษากรีกอะตอมแปลว่าไม่สามารถจะแบ่งได้ นี่เพียงเป็นเพียงทฤษฎีและยังไม่เป็นเรื่องที่รับรองกันทั่วไป จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1896 เบ็กเกอร์เรล (Becquerel) พบว่าผลึกของผงเกลือของยูเรเนียม (Uranium) ย่อมปลดปล่อยแสงประหลาดซึ่งสามารถทำให้ฟิล์มถ่ายรูปดำได้ ทำให้เขาเป็นคนแรกที่ค้นพบกัมมันตภาพรังสี (Radioactivity) ต่อมาในปี ค.ศ. 1898 มารี คูรี (Marie Curie) เชื่อว่าแสงประหลาดเหล่านั้นมาจากธาตุเคมีในแร่ยูเรเนียมแล้วให้ชื่อว่าเรเดียม ซึ่งแปลว่าธาตุส่องแสงหรือเรืองแสงได้ สมบัติที่ประหลาดของเรเดียม คือการปลดปล่อยพลังงานออกมาในสภาพรังสีได้ตลอดเวลา ยิ่งไปกว่านั้น ยังพบว่าเรเดียมมีน้ำหนักลดลงไปเล็กน้อยหลังจากวางทิ้งไว้นาน ๆ จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1905 (Born, 1965) ไอน์สไตน์ (Einstein) พิสูจน์ว่า เมื่อสารกัมมันตรังสีปล่อยรังสีออกมา น้ำหนักจะลดลงเล็กน้อย เป็นเพราะว่ามวลสารบางส่วนถูกทำให้เคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วของแสงยกกำลังสองพร้อมกับเปลี่ยนไปเป็นพลังงาน

ยูเรเนียมคือธาตุกัมมันตรังสีที่เป็นโลหะหนักที่มีอยู่ตามธรรมชาติ ไอโซโทป (Isotope) ที่พบในธรรมชาติได้แก่ยูเรเนียม-235 และยูเรเนียม-238 ไอโซโทปคือกลุ่มธาตุที่มีจำนวนโปรตอนในนิวเคลียสเท่ากันแต่มีจำนวนนิวตรอนต่างกัน คือยูเรเนียม-235 มีจำนวนนิวตรอนเท่ากับ $235 - 92 = 143$ ตัว และยูเรเนียม-238 มีจำนวนนิวตรอนเท่ากับ $238 - 92 = 146$ ตัว

ยูเรเนียมที่มีอยู่อยู่ตามธรรมชาติบนโลกนี้ส่วนใหญ่เป็นยูเรเนียม-238 ในขณะที่ยูเรเนียม-235 อันเป็นไอโซโทปที่แตกตัวและเกิดนิวเคลียร์ฟิชชันนั้นมีเพียงเล็กน้อยคือมีเพียง 0.7202% ของยูเรเนียม-238 เท่านั้น ตัวเลข 0.7202% นี้เป็นจริงเสมอไม่ว่าจะเป็นยูเรเนียมที่ได้มาจากเหมืองแร่แห่งใด ๆ บนโลกนี้ (Eklund, 1975)

ยูเรเนียม-235 กับ ยูเรเนียม-238 นั้นมีอายุครึ่งชีวิตแตกต่างกัน อายุครึ่งชีวิตของสารกัมมันตภาพรังสีนั้นหมายความว่าระยะเวลาที่สารกัมมันตภาพรังสีใช้ในการสลายตัวจนเหลือครึ่งหนึ่งของปริมาณเริ่มต้น หรือความยาวนานกว่าที่ธาตุเดิมจะสลายเป็นธาตุอื่นครึ่งจำนวนของปริมาณที่มีอยู่เดิม เช่น ยูเรเนียม-235 นั้นมีครึ่งชีวิต 710 ล้านปี ดังนั้น ถ้ามียูเรเนียม-235 อยู่ 5 กรัมในขณะนี้ อีก 710 ล้านปีข้างหน้าเราจะมียูเรเนียม-235 เหลือเพียง 2.5 กรัม เป็นต้น อายุครึ่งชีวิตของยูเรเนียม-238 เท่ากับ 4,470 ล้านปี (Knoll, 2021) ซึ่งใกล้เคียงอายุโลก (4,540 ล้านปี) นั้นหมายความว่าตั้งแต่โลกถือกำเนิดมา ครึ่งหนึ่งของยูเรเนียม-238 ที่โลกเคยมีได้สลายไปแล้วครึ่งหนึ่ง เนื่องจากยูเรเนียม-238 มีครึ่งชีวิตที่นาน ดังนั้นมันจึงสลายตัวช้ามากมีผลให้พลังงานที่ปล่อยออกมาจากการสลายตัวมีค่าน้อยทำให้สารประกอบของยูเรเนียม-238 มีอุณหภูมิไม่สูง แต่ยูเรเนียม-235 มีครึ่งชีวิตที่สั้น ดังนั้นกระบวนการปล่อยพลังงานจะมีค่าสูงทำให้อุณหภูมิของสารประกอบยูเรเนียม-235 ค่อนข้างสูง

วิทยาศาสตร์ที่นำไปสู่ปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain reaction) เป็นครั้งแรก (Eklund, 1975) เริ่มต้นด้วยความตื่นตัวเนื่องด้วยเพราะความหลักแหลมและไหวพริบของนักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศสกลุ่มหนึ่ง ใน ค.ศ. 1975 มีการประชุมวิทยาศาสตร์ด้านนิวเคลียร์ที่ลิสส์ที่กาบอง (Gabon) ซึ่งเป็นประเทศในตอนกลางของภาคตะวันตกของทวีปแอฟริกา การประชุมครั้งนี้มีเนื้อหาเกี่ยวกับปรากฏการณ์ธรรมชาติที่แปลกประหลาดอย่างหนึ่ง ได้เกิดขึ้นที่กาบองเมื่อ 1,800 ล้านปีมาแล้ว คือที่ฝรั่งเศสมีโรงงานแยกไอโซโทปยูเรเนียม-235 ออกจากแร่ยูเรเนียมธรรมชาติ เจ้าหน้าที่จะต้องคอยตรวจสอบปริมาณความเข้มข้นของยูเรเนียม-235 ที่ได้รับมา ที่ต้องตรวจสอบก็เพื่อให้แน่ใจว่าแร่ยูเรเนียมนั้นเป็นแร่ที่ได้มาจากเหมืองแร่จริง ๆ ไม่ได้มาจากโรงงานอื่น ๆ ซึ่งอาจจะแอบแยกเอายูเรเนียม-235 ออกไปใช้บ้างแล้ว ในระหว่างการวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นคราวหนึ่ง ใน ค.ศ. 1972 เจ้าหน้าที่พบว่าปริมาณความเข้มข้นของยูเรเนียม-235 มีน้อยกว่าค่าที่ควรจะมี คือเขาวัดปริมาณได้เพียง 0.7171% เท่านั้น (ค่าที่ควรจะมีคือ 0.7202%)

ถ้าหากนักวิทยาศาสตร์ไม่ระมัดระวังก็คงจะปล่อยเลยตามเลยไปแล้ว เพราะค่านี้น้อยกว่าค่าที่ควรจะเป็นเพียง 0.0031% แต่ด้วยความรอบคอบ พวกเขาจึงตรวจสอบซ้ำอีกหลายหน และพบว่า ค่าดังกล่าวนี้ไม่ใช่ค่าที่วัดได้ผิดพลาดหากว่าแร่ยูเรเนียมนั้นมีปริมาณยูเรเนียม-235 น้อยกว่าแร่ยูเรเนียมตามธรรมชาติจริง ๆ และจากการสอบสวนก็พบว่าแร่ยูเรเนียมนั้นมาจากเหมืองแร่แห่งหนึ่งชื่อ โอโกล (Oklo) ของประเทศกาบอง

หลังจากแน่ใจว่าปริมาณยูเรเนียม-235 ในสินแร่แห่งนี้มีน้อยกว่าธรรมชาติแล้ว ก็มีการให้แนวคิดที่ว่า สาเหตุที่ปริมาณยูเรเนียม-235 มีน้อยลงคงเป็นเพราะเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่เมื่อนานมาแล้ว และต่อมาก็มีการประกาศแนวคิดนี้เป็นทฤษฎี คือถ้านิวเคลียสของธาตุหนักแบ่งแยกตัวแล้วจะปล่อยพลังงานออกมาจำนวนหนึ่งต่อหนึ่งครั้งของการแบ่งแยกตัว และจะปล่อยนิวตรอนออกมาไปชนกับนิวเคลียสข้างเคียง ทำให้เกิดการแบ่งแยกตัวต่อเนื่องต่อไปอีกเป็นลูกโซ่ เรียกปฏิกิริยาการแบ่งแยกแบบต่อเนื่องนี้ว่า ปฏิกิริยาลูกโซ่ ซึ่งถ้าหากไม่มีการควบคุมอัตราการแบ่งแยกตัวแล้ว จำนวนครั้งของการแบ่งแยกจะเพิ่มทวีคูณอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาอันสั้น และได้พลังงานออกมาจำนวนมาก ซึ่งทฤษฎีนี้ถูกนำไปใช้ทำอาวุธนิวเคลียร์ (Nuclear weapons) เพื่อการสงคราม

การสำรวจทางด้านธรณีวิทยาปรากฏว่า ที่โอโกลเมื่อประมาณ 1,800 ล้านปีมาแล้ว มีสภาวะทั้งสี่อย่างมาประชุมพร้อมกันพอดี คือ 1) มีปริมาณยูเรเนียมอยู่ในสายแร่เข้มข้นมาก 2) มีอัตราส่วนของยูเรเนียม-235 มากกว่า 3% 3) ไม่มีสารที่สามารถดูดซับนิวตรอนได้เป็นปริมาณมาก และ 4) มีน้ำเป็นตัวหน่วงนิวตรอน เมื่อปัจจัยทุกอย่างพร้อม

ก็ชักนำให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ในบริเวณบางส่วนของเหมืองแห่งนี้เป็นเวลามานานนับแสนปี ในเรื่องนี้ต้องขอสดุดีนักวิทยาศาสตร์ฝรั่งเศสที่นึกเฉลียวใจทันและช่วยกันสำรวจจนสามารถสรุปผลอันน่าตื่นใจได้ในเวลารวดเร็ว

นิวเคลียร์ฟิชชัน (Nuclear Fission)

ในปี ค.ศ. 1938 นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมัน ฮาห์น และ สเตรซแมน ได้ทดลองใช้นิวตรอนยิงนิวเคลียสของธาตุชนิดต่าง ๆ พบว่านิวเคลียสของธาตุต่าง ๆ ทั่วไปนั้นมักจะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้นหลังจากดูดนิวตรอน แต่สำหรับธาตุยูเรเนียมนั้นนิวเคลียสของมันจะเปลี่ยนแปลงอย่างมาก คือนิวเคลียสของยูเรเนียมแบ่งแยกออกเป็นสองส่วนเท่ากันอย่างรวดเร็ว ๆ และเรียกเหตุการณ์นี้ว่าการแบ่งแยกตัวของนิวเคลียส หรือนิวเคลียร์ฟิชชัน แต่ทว่านิวเคลียสของยูเรเนียมนั้นไม่คงทนถาวรมากนัก ทั้งนี้ก็เกี่ยวเนื่องจากน้ำหนักของมัน โดยเปรียบเทียบกับนิวเคลียสเหมือนกับหยดน้ำขนาดใหญ่ (Laohavanich, 2516) ซึ่งเมื่อมีการรบกวนก็จะมีอาการเคลื่อนไหวอย่างรุนแรง ยิ่งถ้ามีการเพิ่มพลังงานเข้าไปให้มีการเคลื่อนไหวรุนแรงพอ หยดน้ำเช่นนั้นก็จะแยกตัวเองออกเป็นสองหยดเล็ก ๆ ดังนั้นจึงดูเหมือนจะเป็นไปได้ว่านิวเคลียสของยูเรเนียมมีรูปลักษณะที่มันคงเพียงเล็กน้อย และภายหลังเมื่อจับเอานิวตรอนเข้าไว้แล้วก็อาจแบ่งแยกออกเป็นสองนิวเคลียสและมีลักษณะเท่า ๆ กัน (Whipple & Davies, 2020)

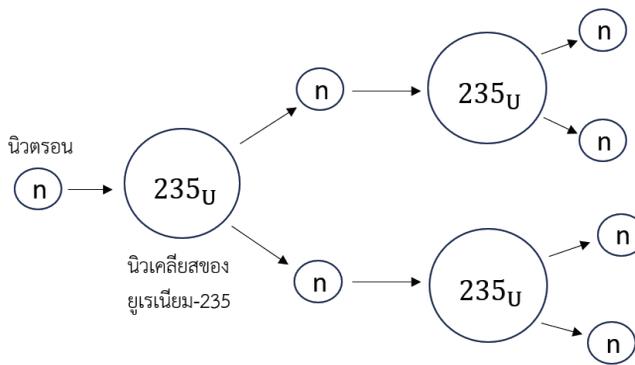
การแบ่งแยกของนิวเคลียสของยูเรเนียมออกเป็นสองส่วนนั้น เมื่อนำเอาน้ำหนักของทั้งสองส่วนนี้มารวมกันปรากฏว่าน้อยกว่าของนิวเคลียสของยูเรเนียมเดิม โดยฟิสิกส์ได้ยืนยันว่าการแบ่งแยกนั้นจะเกิดการปลดปล่อยพลังงานจำนวนมากขึ้นมากอีกด้วย และนั่นก็คือพลังงานซึ่งยึดนิวเคลียส (Binding energy) เข้าไว้ด้วยกัน การแบ่งแยกตัวของนิวเคลียสนั้น อาจเทียบเท่ากับการเอาขวานฟันขึ้นไม่ออกเป็นสองส่วน แต่การรวมน้ำหนักของชิ้นไม้สองชิ้นนั้นเข้าเป็นอันเดียวกันก็ย่อมมีน้ำหนักเป็นอันเดียวกันกับท่อนไม้ชิ้นเมื่อก่อนผ่า ยิ่งไปกว่านั้นการรวมน้ำหนักของนิวเคลียสทั้งสองส่วนพบว่าเบาว่าน้ำหนักของนิวเคลียสเมื่อก่อนผ่า ทั้งนี้เพราะสสารบางส่วน (มวลส่วนหนึ่ง) ได้หายไปนั่นเอง จากสมการของไอน์สไตน์ที่ทำนายไว้เมื่อ ค.ศ. 1905 (Wilkinson, 2020) เราทราบว่ามวลสสารบางส่วนที่หายไปนี้จะถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานจลน์ของชิ้นส่วนทั้งสอง ซึ่งเป็นเหตุให้มันวิ่งออกจากกันด้วยอัตราเร็วที่สูงมาก นอกจากนั้นยังไปเป็นพลังงานจลน์ของนิวตรอนที่ถูกปล่อยออกมาอีกด้วย และเรียกปรากฏการณ์แบบนี้เรียกว่านิวเคลียร์ฟิชชัน

ทั้งยูเรเนียม-235 และยูเรเนียม-238 ต่างก็เป็นธาตุยูเรเนียมเหมือนกัน แต่ก็มีเพียงยูเรเนียม-235 เท่านั้นที่ให้พลังงานนิวเคลียร์ ในขณะที่นิวเคลียสของยูเรเนียม-238 จะไม่แบ่งแยกตัวเวลารับนิวตรอนเข้าไป แต่นิวเคลียสของยูเรเนียม-235 เมื่อมีการรับนิวตรอนเพียงตัวเดียวก็จะได้นิวเคลียสใหม่ที่ไม่เสถียร (ยูเรเนียม-236) และในเวลาต่อมา ก็จะแบ่งแยกตัวออกเป็นนิวเคลียสที่เล็กลงสองนิวเคลียส ขณะเดียวกันก็ปลดปล่อยพลังงานมหาศาลออกมาพร้อมกับนิวตรอนออกมาถึงสองหรือสามตัว

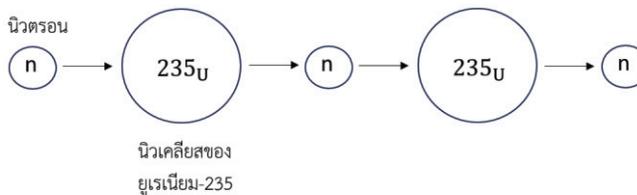
ในปี ค.ศ. 1939 นักวิทยาศาสตร์พบลักษณะพิเศษของยูเรเนียมที่สำคัญที่สุดคือ การแบ่งแยกนิวเคลียสจะเกิดปฏิกิริยาชนิดที่เรียกว่าปฏิกิริยาลูกโซ่ (Lemons, 2018) โดยสมมติให้จำนวนนิวตรอนที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากนิวเคลียร์ฟิชชันของนิวเคลียสของยูเรเนียม-235 ตัวหนึ่งมีค่าเป็น N นิวตรอน และนิวตรอนเหล่านี้ก็ฟุ้งชนยูเรเนียม-235 อีก N นิวเคลียส โดยแต่ละนิวตรอน จะทำให้ได้พลังงานมหาศาลพร้อมกับนิวตรอนอีก N ตัวด้วยหลักการเช่นนี้ เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไป n รอบ ปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นเป็นทวีคูณและขยายขนาดเป็น N^n ปฏิกิริยาลักษณะนี้ขยายขนาดแบบฟังก์ชันเลขชี้กำลัง (Exponential function) ซึ่งจะก่อให้เกิดการระเบิด ลักษณะนี้เป็นปฏิกิริยา ลูกโซ่แบบแตกแขนงของการแบ่งแยกนิวเคลียส และเป็นปฏิกิริยาที่เกิดในระเบิดนิวเคลียร์ เช่น ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชัน ครั้งหนึ่งให้นิวตรอนออกมา 2 ตัว เมื่อไปทำปฏิกิริยาต่อ จะได้นิวตรอนออกมาอีก 4 ตัว หลังจากทำปฏิกิริยาอีกชุดหนึ่ง

ก็จะได้ 8 ตัว ถัดไปอีกครั้ง ก็จะได้ 16 ตัว กระบวนการนี้ใช้เวลาอันน้อยมากเพราะว่านิวตรอนเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วมาก ประมาณ 13,000 กิโลเมตรต่อวินาที

สาเหตุที่ปฏิกิริยาแบบแบ่งแยกนิวเคลียสก่อให้เกิดการระเบิดได้นั้นเป็นเพราะ จำนวนนิวตรอน N ที่เกิดขึ้นจากการชนมีค่าเป็น $N > 1$ แต่ถ้านิวตรอนที่ถูกปลดปล่อยมีเพียงแค่ 1 ตัว ปฏิกิริยา ก็จะดำเนินไปด้วยขนาดที่เท่าเดิม ไม่เกิดการระเบิด ปฏิกิริยาลักษณะนี้เรียกว่าปฏิกิริยาลูกโซ่แบบคงตัว ด้วยหลักการง่าย ๆ เช่นนี้ ช่วยให้สามารถกำหนดได้ว่า จะสร้างระเบิดนิวเคลียร์ (อาวุธสงคราม) หรือเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (โรงไฟฟ้านิวเคลียร์) โดยมีสิ่งที่แตกต่างกันชัดเจนคือ ระเบิดนิวเคลียร์ใช้ปฏิกิริยาลูกโซ่แบบแตกแขนง ส่วนเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ใช้ปฏิกิริยาลูกโซ่แบบคงตัว ดังแสดงในภาพที่ 1 และภาพที่ 2 ตามลำดับ



ภาพที่ 1 การระเบิดลูกโซ่แบบแตกแขนง (ดัดแปลงจาก Semat, 1962)



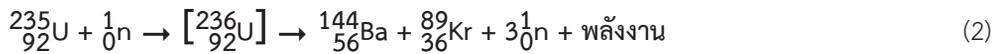
ภาพที่ 2 การระเบิดลูกโซ่แบบคงตัว (ดัดแปลงจาก Semat, 1962)

โดยธรรมชาติ นิวตรอนจะวิ่งผ่านสสารต่าง ๆ ได้ดีมาก เพราะฉะนั้นโอกาสที่จะชนจิง ๆ กับนิวเคลียสจะมีน้อย เนื่องจากนิวเคลียสมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับขนาดของอะตอม แต่นิวตรอนที่ยิงเข้าไปที่ก้อนยูเรเนียมจะเหนี่ยวนำให้เกิดการแบ่งแยกนิวเคลียสได้นั้น นิวตรอนจะต้องชนกับนิวเคลียส แต่โอกาสที่จะชนมีน้อยมาก ฉะนั้นปฏิกิริยาลูกโซ่จะเป็นไปได้ยาก ดังนั้นจำเป็นต้องมีการควบคุมให้เกิดนิวเคลียร์ฟิชชัน เพื่อช่วยให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ได้ดีขึ้น ก็อาจทำได้โดยเพิ่มขนาดของก้อนยูเรเนียม-235 ที่ใช้ให้มีขนาดพอเหมาะ เรียกววลของยูเรเนียม-235 ที่พอเหมาะนี้ว่า มวลวิกฤติ (Critical mass) การระเบิด ต้องการมวลวิกฤติของยูเรเนียม-235 เพียงก้อนโตประมาณเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตรเท่านั้น (Meyerhof, 1967) เพื่อว่านิวตรอนที่ถูกปลดปล่อยจะได้มีโอกาสชนกับนิวเคลียสหลาย ๆ ครั้ง ก่อนที่จะหนีหายออกไปจากก้อนยูเรเนียม-235 หากก้อนยูเรเนียม-235 มีขนาดเล็กกว่ามวลวิกฤติ ก่อนที่นิวตรอนจะได้ชนกับนิวเคลียส ก็คงหลุดรอดออกไป ทำให้ปฏิกิริยาลูกโซ่นั้นไม่สามารถดำรงอยู่ได้ ดังนั้นนิวตรอนจะผ่านเข้าสู่ก้อนยูเรเนียม-235 แล้วชน

นิวเคลียสหรือไม่ นั่น ขนาดของก๊อญูเรเนียม-235 จะต้องพอเหมาะ (มวลวิกฤติ) ยิ่งไปกว่านั้น หากก๊อญูเรเนียม-235 มีขนาดใหญ่กว่ามวลวิกฤติ แม้วางไว้เฉย ๆ ก็สามารถระเบิดได้ ดังนั้นข้อกำหนดของการเก็บรักษาญูเรเนียมคือ จะต้องไม่เก็บให้มีมวลสูงกว่ามวลวิกฤติ

การคำนวณพลังงานจากนิวเคลียร์ฟิชชัน

นิวเคลียร์ฟิชชันเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญ ปรากฏการณ์นี้ เกิดจากการยิงนิวตรอนที่มีความเร็วไม่สูงเข้าไป ในนิวเคลียสของญูเรเนียม-235 ทำให้นิวเคลียสนั้นถูกเร้า (Excited nucleus) (นิวเคลียสที่ไม่เสถียร) แล้วในเวลาต่อมา เกิดการแตกออกเป็นสองเสี่ยงพร้อมกัับให้นิวตรอนตัวใหม่เกิดขึ้น 3 ตัวอีกด้วย ดังสมการ (2)



สัญลักษณ์นิวเคลียร์ที่ใช้นี้ กำหนดให้ $[{}^{236}_{92}\text{U}]$ เป็นนิวเคลียสของญูเรเนียมที่ถูกเร้า ซึ่งเกิดจากนิวเคลียสของญูเรเนียม-235 จับนิวตรอนตัวหนึ่ง โดยที่ 236 คือเลขมวลหรือจำนวนนิวคลีออนมีค่าเท่ากับจำนวนโปรตอนรวมกับจำนวนนิวตรอน (Ghoshal, 2007; Laohavanich, 1973)

จากสมการ (2) หมายความว่านิวเคลียสของญูเรเนียม-235 หนึ่งตัว เมื่อถูกนิวตรอนพุ่งชน ได้แบ่งแยกตัวเป็นแบเรียมกับคริปตอน และมีนิวตรอนเกิดขึ้นอีก 3 ตัว พร้อมกับปลดปล่อยพลังงานออกมา ยิ่งไปกว่านั้นสมการ (2) แสดงให้เราเห็นว่า ด้านซ้ายของสมการ (2) เรียกว่าก่อนเกิดปฏิกิริยาจะมีนิวตรอนหนึ่งตัวและด้านขวาของสมการ (2) เรียกว่าหลังเกิดปฏิกิริยาจะมีนิวตรอนสามตัว ดังนั้นนิวตรอนสามตัวก็จะพุ่งชนนิวเคลียสของญูเรเนียม-235 ที่ยังไม่แบ่งแยกตัวต่อไป ซึ่งจะทำให้เกิดนิวตรอนอีกเป็นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ ซึ่งก็คือปฏิกิริยาลูกโซ่นั้นเอง ทุกครั้งที่นิวเคลียสของญูเรเนียม-235 แบ่งแยกตัว (นิวเคลียร์ฟิชชัน) ก็จะได้พลังงานออกมา ด้วยเหตุนี้ปฏิกิริยาลูกโซ่จึงให้พลังงานมหาศาล เพราะมวลของญูเรเนียม-235 กับนิวตรอนหนึ่งตัวรวมกันมีค่ามากกว่ามวลของแบเรียม-141 กับคริปตอน-92 และนิวตรอนทั้งสามตัว หรือเขียนสั้น ๆ ได้ว่า มวลรวมของนิวเคลียสหลังเกิดปฏิกิริยาน้อยกว่ามวลของญูเรเนียม-235 รวมกับนิวตรอนหนึ่งตัว ดังนั้นมวลที่หายไปจะต้องถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานตามสมการของไอน์สไตน์

การศึกษาพลังงานนิวเคลียร์เริ่มต้นภายหลังจากที่ไอน์สไตน์เสนอทฤษฎีมวลสารและพลังงาน พบว่ามวลสารและพลังงานมีความเกี่ยวข้องกัน ดังสมการ (3) (Peplow, 2023)

$$E = mc^2 \quad (3)$$

สมการ (3) ของไอน์สไตน์นี้กำหนดให้ E คือพลังงาน (ในหน่วยจูล, J) ที่สมมูลกับมวล m (ในหน่วยกิโลกรัม, kg) และ C คืออัตราเร็วของแสง ($\approx 3 \times 10^8$ m/s) สมการ (3) บอกเราว่า มวลสารคือพลังงานรูปหนึ่ง บรรดานักวิทยาศาสตร์รู้ว่านี่คือแหล่งกำเนิดพลังงานชนิดใหม่ ดังนั้นหากมีการทดลองโดยอาศัยปฏิกิริยาใดก็ตาม เช่น ปฏิกิริยานิวเคลียร์แล้วทำให้มวลของสารตั้งต้นเปลี่ยนไป ในที่นี้มวลส่วนที่เปลี่ยนแปลงไปเรียกว่ามวลพร่อง (mass defect, Δm) ดังนั้นพลังงานที่เกิดขึ้นคือ

$$\Delta E = (\Delta m)c^2 \quad (4)$$

ในปี ค.ศ. 1960 นักวิทยาศาสตร์ได้กำหนดมาตรฐานสากลเพื่อใช้วัดมวลของนิวเคลียส โดยกำหนดน้ำหนักอะตอมของคาร์บอนที่เป็นกลางให้มีค่าเท่ากับ 12 พอดีและกำหนดให้ $1/12$ ของมวลของอะตอมคาร์บอนใช้อักษรย่อ u หรือ amu (Unified atomic mass unit) ในที่นี้ $1 u \approx 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$ และพลังงานจะใช้หน่วยพลังงานของอิเล็กตรอน (Electron volt) ใช้อักษรย่อ eV กำหนดให้ $1 eV \approx 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ จากทฤษฎีมวลสารและพลังงานของไอน์สไตน์จะได้ว่า มวล $1 u$ จะให้พลังงานคือ

$$E = Mc^2 = (1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}) (3 \times 10^8 \text{ m/s}) \left(\frac{1 eV}{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}} \right)$$

หรือ $E \approx 931 \times 10^6 eV = 931 \text{ MeV}$

โดยที่ $10^6 eV = 1 \text{ MeV}$

ดังนั้น $1 u \approx 931 \text{ MeV}$ (5)

จากทฤษฎีเมื่อนิวเคลียส 2 ตัวทำปฏิกิริยานิวเคลียร์กัน ถ้ามันปลดปล่อยพลังงานออกมาแล้ว มวลของนิวเคลียสที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาจะต่อน้อยกว่ามวลของนิวเคลียสก่อนทำปฏิกิริยากัน ดังนั้นการคำนวณค่าพลังงานที่ปลดปล่อยออกมา ต้องการแค่ความรู้ในระดับปีหนึ่งของมหาวิทยาลัยเท่านั้น เช่น ปฏิกิริยาจากสมการ (2) เมื่อเราทราบว่าแต่ละนิวเคลียสมีมวลเท่าใด เราก็สามารถคำนวณหาพลังงานที่เกิดขึ้นในสมการ (2) ได้ จากสมการของไอน์สไตน์ ในทางปฏิบัติเรามักจะใช้มวลของอะตอมที่เป็นกลางของธาตุแทนมวลของนิวเคลียส ยกตัวอย่างการคำนวณพลังงานแบบแรก ตามทฤษฎีมวลสารและพลังงานของบทความนี้ คือ

พิจารณามวลของอะตอมก่อนเกิดปรากฏการณ์นิวเคลียร์ฟิชชัน

$${}_{92}^{235}\text{U} = 235.0439 \text{ u}$$

$${}_0^1\text{n} = 1.0087 \text{ u}$$

ดังนั้น ${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1\text{n} = 236.0526 \text{ u}$

พิจารณามวลของอะตอมหลังเกิดปรากฏการณ์นิวเคลียร์ฟิชชัน

$${}_{56}^{144}\text{Ba} = 143.9226 \text{ u}$$

$${}_{36}^{89}\text{Kr} = 88.9175 \text{ u}$$

$$3{}_0^1\text{n} = 3.0261 \text{ u}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad {}^{144}_{56}\text{Ba} + {}^{89}_{36}\text{Kr} + 3{}_0^1\text{n} = 235.8662 \text{ u}$$

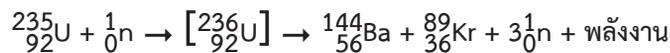
$$\text{ดังนั้นมวลพร้อม} \Delta m = 236.0526 \text{ u} - 235.8662 \text{ u} = 0.1864 \text{ u}$$

ดังนั้น พลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมาต่อหนึ่งนิวเคลียร์ฟิชชัน จากสมการ (4) จะได้

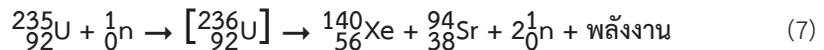
$$\Delta E = 0.0864 \text{ u} \times 931 \frac{\text{MeV}}{\text{u}} = 173.5 \text{ MeV} \quad (6)$$

ค่าพลังงานจากสมการ (6) สามารถประมาณได้ 173 MeV ซึ่งส่วนใหญ่ปรากฏอยู่ในรูปพลังงานจลน์ของผลผลิตจากนิวเคลียร์ฟิชชัน

สิ่งที่ต้องพิจารณาถัดไปคือ จากสมการ (2) สำหรับนิวเคลียสที่ไม่เสถียร นั้น ไม่แน่นอนอาจให้ผลผลิตเป็นไปได้อย่างไร เช่น



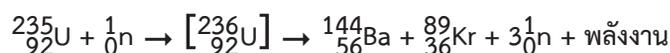
หรือ



ค่าพลังงานในสมการ (7) จะให้ค่าพลังงานเป็นบวก สังเกตได้จาก ถ้ามวลลดลงภายหลังการเกิดปฏิกิริยาแล้วมวลกลายเป็นพลังงานจะจัดเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ยิ่งไปกว่านั้นนิวเคลียสของธาตุหนักมีอัตราส่วนนิวตรอนต่อโปรตอนสูง ดังนั้นเมื่อนิวเคลียสของธาตุหนัก เช่นยูเรเนียมแตกออก จะได้นิวตรอนเสรี 2 หรือ 3 เป็นผลให้การแตกตัวครั้งหนึ่ง ๆ คิดเป็นค่าเฉลี่ยแล้วจะได้นิวตรอนจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชันประมาณ 2.5 อนุภาค

สำหรับการคำนวณพลังงานทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากนิวเคลียร์ฟิชชัน ในบทความนี้เราได้แสดงตัวอย่างการคำนวณไว้เป็นแบบสอง ซึ่งให้ค่าพลังงานที่แตกต่างจากการคำนวณแบบแรก ที่ให้ผลลัพธ์ในสมการ (6) การคำนวณแบบสองที่วางนี้ เรามีการพิจารณาเพิ่มเติมในส่วนของพลังงานที่ถูกปลดปล่อยจากนิวเคลียร์ฟิชชัน โดยใช้แนวคิดที่แตกต่างจากทฤษฎีมวลสารและพลังงาน ดังที่แสดงไว้ในตัวอย่างการคำนวณแบบแรกก่อนหน้านี้ ดังนั้นเราต้องหาจำนวนโปรตอนและนิวตรอนให้ถูก แล้วนำมาคูณกับมวล เพราะว่าแต่ละนิวเคลียสมีจำนวนนิวคลีออนไม่เท่ากัน รวมทั้งมวลโปรตอนและนิวตรอนที่กำหนดให้มาก็เป็นแค่ค่าของ 1 อนุภาคเท่านั้น ลำดับถัดไปที่ต้องนำมาพิจารณาในแนวคิดแบบสองคือ เนื่องจากนิวเคลียสแต่ละชนิดมีจำนวนนิวคลีออนต่าง ๆ กัน ดังนั้น ถ้าเราใช้ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวเฉลี่ยแล้ว ย่อมทำให้การคำนวณง่ายขึ้น โดยพิจารณาพลังงานจากนิวเคลียร์ฟิชชันของยูเรเนียม-236 ในเทอมของผลต่างระหว่างค่าพลังงานยึดเหนี่ยวเฉลี่ยของยูเรเนียม-236 กับผลผลิตที่ได้จากนิวเคลียร์ฟิชชัน

การคำนวณตามแนวคิดแบบสอง เริ่มต้นจากสมการ (2)



ในเมื่อ $[^{236}_{92}\text{U}]$ เป็นนิวเคลียสที่ถูกเร้า ซึ่งเกิดจาก $^{235}_{92}\text{U}$ จับนิวตรอนตัวหนึ่ง และเนื่องจากภายในนิวเคลียสยูเรเนียมมีแรงยึดเหนี่ยว เพื่อป้องกันไม่ให้โปรตอนที่อยู่รวมกันผลักรันจนหลุดออกนอกนิวเคลียส เรียกแรงยึดเหนี่ยวนี้ว่าแรงนิวเคลียร์ สำหรับการหาค่าพลังงานยึดเหนี่ยว จะให้นิวเคลียสยูเรเนียมแตกตัวเป็นนิวคลีออนอิสระ (โปรตอนและนิวตรอน) และหาค่าพลังงานที่เกิดขึ้น หลังจากเกิดนิวเคลียร์ฟิชชัน

จากสมการ (2) พลังงานยึดเหนี่ยว (BE) ของนิวเคลียสยูเรเนียม-236 หาได้จากผลต่างระหว่างผลรวมมวลนิวคลีออนของยูเรเนียม-236 กับมวลของนิวเคลียสยูเรเนียม-236 ดังนี้

$$\Delta m = (m_{92\text{โปรตอน}} + m_{144\text{นิวตรอน}}) - m_{\text{ยูเรเนียม}236} \quad (8)$$

เมื่อโปรตอนมีมวล 1.00782 u นิวตรอนมีมวล 1.00866 u และ ยูเรเนียม-236 มีมวล 236.04556 u จะเห็นว่า ยูเรเนียม-236 มีมวลน้อยกว่าโปรตอนและนิวตรอนรวมกัน หรือมวลส่วนหนึ่งก็คือพลังงานยึดเหนี่ยวนั่นเอง

$$\Delta m = [92(1.00782 \text{ u}) + 144(1.00866 \text{ u})] - 236.04556 \text{ u}$$

$$\Delta m = 237.96648 \text{ u} - 236.04556 \text{ u} = 1.92092 \text{ u}$$

จากสมการ (5) คิดเป็นพลังงาน (BE) คือ $1.92092 \times 931 \text{ MeV} = 1788.3765 \text{ MeV}$ จะเห็นได้ว่าหลังจากแยกโปรตอนและนิวตรอนออกจากนิวเคลียสยูเรเนียม-236 จะมีมวลส่วนหนึ่งเพิ่มขึ้นมา ซึ่งเมื่อนำมาคำนวณเป็นพลังงาน จะถือว่าพลังงานนี้คือ พลังงานที่ยึดเหนี่ยวนิวเคลียสยูเรเนียม-236 นั่นเอง และถ้านิวเคลียสใหญ่มากขึ้น ก็จะต้องใช้แรงยึดเหนี่ยวมากขึ้นเนื่องจากจำนวนนิวคลีออนมีมากขึ้น ถัดไปเราจะคำนวณอัตราส่วนระหว่างพลังงานยึดเหนี่ยวต่อจำนวนนิวคลีออน (BE/A) (เลขมวล, $A = 236$) ดังนี้

$$\frac{BE}{A} = \frac{1788.3765}{236} = 7.58 \text{ MeV/นิวคลีออน}$$

จากค่า BE/A จะสามารถประมาณความเสถียรของนิวเคลียสอย่างประมาณได้ นั่นคือถ้าค่า BE/A มีค่ามาก นิวเคลียสก็จะเสถียรมาก ใช้เทคนิคการคำนวณเดียวกัน เราจะได้ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของ $^{144}_{86}\text{Ba}$ มีค่าเป็น 8.26 MeV/นิวคลีออน และพลังงานยึดเหนี่ยวของ $^{89}_{36}\text{Kr}$ มีค่าเป็น 8.62 MeV/นิวคลีออน เพราะว่าค่าพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออน ทั้งสองค่าที่เกิดจากนิวเคลียร์ฟิชชันนั้นแตกต่างกันไม่มาก ดังนั้นในบทความนี้เราจะใช้ค่าเฉลี่ย (Average) ของสองชิ้นส่วนที่เป็นผลผลิต (แบเรียมและคริปตอน) จากนิวเคลียร์ฟิชชัน ด้วยเหตุนี้ เราจะเรียกพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนว่าพลังงานยึดเหนี่ยวเฉลี่ย (Average binding energy) เพื่อคำนวณค่าพลังงาน (E) ที่ปลดปล่อยออกมาจากยูเรเนียม-236 โดยใช้สมการ (2) ดังนี้



$$E = \left[\left(\frac{BE}{A} \right)_{\text{ผลผลิตของฟิสชัน}} - \left(\frac{BE}{A} \right)_{\text{ยูเรเนียม236}} \right] \times 236 \text{ นิวคลีออน} \quad (9)$$

เราสามารถให้ $\left(\frac{BE}{A} \right)_{\text{ผลผลิตของฟิสชัน}}$ เป็นค่าเฉลี่ยของสองชิ้นส่วนที่เป็นผลผลิตจากนิวเคลียร์ฟิชชัน
ดังนั้นสมการ (9) คือ

$$E = \left[\left(\frac{(B/A)_{144}\text{Ba} + (B/A)_{89}\text{Kr}}{2} \right) - \left(\frac{B}{A} \right)_{\text{ยูเรเนียม236}} \right] \times 236 \text{ นิวคลีออน}$$

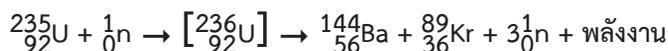
$$E = \left[\left(\frac{8.26 \frac{\text{MeV}}{\text{นิวคลีออน}} + 8.62 \frac{\text{MeV}}{\text{นิวคลีออน}}}{2} \right) - 7.58 \frac{\text{MeV}}{\text{nucleon}} \right] \times 236 \text{ นิวคลีออน}$$

$$E = (0.86 \text{ MeV/นิวคลีออน}) (236 \text{ นิวคลีออน}) = 202.96 \text{ MeV} \quad (10)$$

เพราะฉะนั้น พลังงานที่ปลดปล่อยออกมาจากการนิวเคลียร์ฟิชชันหนึ่งครั้งคือ 202.96 MeV หรือประมาณ 203 MeV ต่อการนิวเคลียร์ฟิชชันหนึ่งครั้ง ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการวัดคือ 200 MeV (Koch, 1995; Seaborg et al., 2006) โดยทั่วไปแล้ว เราพยายามมองหาข้อเท็จจริงโดยเริ่มจากคำนวณผลลัพท์จากนั้นเราก็จะเปรียบเทียบผลลัพท์ที่ได้จากการคำนวณ ด้วยผลการทดลอง หากมันไม่สอดคล้องกับการทดลองก็แสดงว่า แนวคิดที่เราทำมานั้นผิด (Ottaviani & Dye, 2022) คำกล่าวง่าย ๆ ดังกล่าวนี้อเอง ที่เป็นหัวใจสำคัญของวิทยาศาสตร์ หากแนวคิดไม่สอดคล้องกับผลการทดลองวัด ก็แสดงว่าแนวคิดดังกล่าวผิด (Feynman, 1998)

สรุป

เมื่อไอโซโทปที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติของยูเรเนียม-235 จับกับนิวตรอนที่เคลื่อนที่ช้า ไอโซโทปดังกล่าวจะสามารถดูดซับนิวตรอนเพื่อสร้างนิวไคลด์ยูเรเนียม-236 ที่ไม่เสถียรได้ นิวไคลด์ใหม่นี้จะปลดปล่อยอนุภาคแอลฟาและรังสีแกมมาออกมา เมื่อพิจารณาจากสมการ (2)



พบว่าเมื่อนิวตรอนเข้าใส่ยูเรเนียม-235 แล้วถูกจับยึดได้ จะเปลี่ยนไปเป็นไอโซโทปยูเรเนียม-236 ที่ไม่เสถียร เราพบว่า มีการแตกตัวออกเป็นสองส่วนย่อย โดยทั่วไป ชนิดของนิวเคลียสทั้งสองที่เป็นผลผลิตจากนิวเคลียร์ฟิชชันอาจเป็นไปได้หลายแบบ และมีขนาดเล็กลงประมาณครึ่งหนึ่งของนิวเคลียสวัตถุดิบตั้งต้น พร้อมกับนิวตรอนอีกสองถึงสามตัวพร้อมกับให้ค่าพลังงานดังแสดงไว้ในสมการ (7) ซึ่งต่อมาถูกนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง

เพราะจากสมการ (2) เราได้แสดงการคำนวณนิวเคลียร์ฟิชชันของยูเรเนียม-236 หนึ่งครั้ง พบว่าให้ค่าพลังงานรวมทั้งหมดปล่อยออกมาประมาณ 203 MeV ต่อมาเรานำค่าพลังงาน 203 MeV มาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จากสมการ (6) ซึ่งเป็นค่าพลังงานที่เราคำนวณได้โดยใช้ทฤษฎีมวลสารและพลังงานของไอน์สไตน์ให้ค่าประมาณ 173 MeV ตัวเลขนี้ไม่รวมพลังงานจลน์ของนิวตรอนประมาณ 6 MeV (Meyerhof, 1967) เนื่องจากมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับ 173 MeV สรุปได้ว่าการแบ่งแยกตัวของยูเรเนียม-236 ปล่อยพลังงานรวมทั้งหมดโดยประมาณ 203 MeV แบ่งแยกค่าพลังงานออกเป็นดังนี้

- 1) 173 MeV หรือ 85.22% ของ 203 MeV เป็นค่าพลังงานจลน์ของผลผลิตจากนิวเคลียร์ฟิชชัน
- 2) 30 MeV หรือ 14.78% ของ 203 MeV เป็นค่าพลังงานจลน์ของอนุภาคนิวตรอน ทั้งที่เกิดทันทีจากนิวเคลียร์ฟิชชันและที่เกิดจากการสลายตัวของผลผลิตจากนิวเคลียร์ฟิชชัน รวมทั้งยังมีค่าพลังงานจลน์จากรังสีบีตา (Beta rays) รังสีแกมมา (Gamma rays) และรังสีเอ็กซ์ (X-rays) ทั้งที่เกิดทันทีเมื่อเกิดนิวเคลียร์ฟิชชันและที่เกิดจากการสลายตัวของผลผลิตจากนิวเคลียร์ฟิชชันอีกด้วย

สรุปจากสมการ (2) เราได้แสดงการคำนวณไว้สองแบบดังนี้ 1) แบบแรก ผลลัพธ์จากสมการ (6) เราคำนวณหาพลังงานตามสมการของไอน์สไตน์พบว่าปล่อยพลังงานออกมาประมาณ 173 MeV เพราะนิวเคลียสประกอบด้วยโปรตอนและนิวตรอน ซึ่งมีแรง 3 ชนิด ที่ทำให้นิวเคลียสรักษารูปร่างไว้ได้คือ แรงผลักระหว่างประจุ (โปรตอนผลักกับโปรตอน) แรงดึงดูดระหว่างมวล (นิวคลีออนดึงดูดกันเอง) และแรงนิวเคลียร์ (แรงที่นิวคลีออนยึดเหนี่ยวกัน) เมื่อนิวคลีออนอยู่ใกล้กัน จะมีมวลบางส่วนเปลี่ยนเป็นพลังงานยึดเหนี่ยว มวลที่หายไปนี้เรียกว่ามวลพร่อง (Δm) ถ้าเรารู้มวลพร่องแล้วจะได้ $\Delta E = (\Delta m) \times 931 \text{ MeV}$ ในทำนองเดียวกัน ถ้าเรารู้ความเร็วอนุภาคแล้วจะได้ $\Delta E = \Delta \frac{1}{2} mv^2$ ดังนั้นค่าพลังงานที่เราคำนวณได้ประมาณ 173 MeV นี้จัดเป็นพลังงานจลน์ของผลผลิตชิ้นส่วนทั้งสองจากนิวเคลียร์ฟิชชัน

ค่าพลังงานที่ปล่อยออกมา นอกจากจะคำนวณหาได้จากแบบแรก เรายังนำเสนอการคำนวณแบบสองซึ่งสามารถคำนวณได้จากความแตกต่างในค่าพลังงานยึดเหนี่ยวเฉลี่ยของนิวเคลียสยูเรเนียม-236 กับนิวเคลียสของผลผลิตจากรังสีฟิชชันได้อีกด้วย ซึ่งผลลัพธ์การคำนวณแบบสอง ในสมการ (10) ให้พลังงานรวมทั้งหมดออกมาประมาณ 203 MeV

สิ่งที่น่าสนใจจากการวิจัยนี้คือ การคำนวณพลังงานทั้งแบบแรกและแบบสองนั้นให้พลังงานประมาณ 173 MeV และ 203 MeV ตามลำดับ และเมื่อนำตัวเลขทั้งสองมาหาผลต่างจะได้ค่า 30 MeV ตัวเลขนี้มีค่าใกล้เคียงกับผลจากการวัด (Seaborg et al., 2006) โดย Seaborg et al. (2006) แสดงค่าพลังงานไว้ดังนี้ 172 MeV และ 200 MeV ตามลำดับ ($200 \text{ MeV} - 172 \text{ MeV} = 28 \text{ MeV}$ หรือ 14% ของพลังงานรวมทั้งหมดที่ปล่อยออกมา) ถ้าพิจารณาถึงค่าพลังงานรวมทั้งหมดที่ปลดปล่อยออกมา แล้วนำไปเปรียบเทียบกับพลังงานรวมทั้งหมดที่ปลดปล่อยออกมาจากวัฏจักรเบตาธรรมดา จะพบว่าการระเบิดของยูเรเนียม-235 มีค่าเท่ากับการระเบิดของวัฏจักรเบตาธรรมดาหลาย ๆ พันต้น จึงเป็นไปได้ในการนำพลังงานมหาศาลนี้ไปใช้ในการผลิตอาวุธเพื่อการสงครามและนำไปใช้เป็นประโยชน์ในทางสันติ เช่น เอาไปทำเป็นพลังงานไฟฟ้า (โรงไฟฟ้านิวเคลียร์) เอาไปทำเป็นเครื่องยนต์พลังงานนิวเคลียร์ของเรือดำน้ำ เอาไปทำเป็นแบตเตอรี่พลังงานนิวเคลียร์ของสถานีอวกาศ ยิ่งไปกว่านั้น ก็มันตภาพรังสีจากยูเรเนียมได้นำเอาไปใช้ในการแพทย์ การเกษตร และอุตสาหกรรมอีกด้วย

ดังนั้นเรสรุปได้ว่า จากข้อมูลทั้งหมดทำให้เราทราบว่า นิวเคลียสแต่ละชนิดประกอบด้วยจำนวนโปรตอนและนิวตรอนอย่างละเท่าไร เมื่อเราคำนวณมวลของนิวเคลียสจากอนุภาคที่เป็นองค์ประกอบ จะพบว่ามวลของนิวเคลียสมีค่าน้อยกว่ามวลที่คำนวณจากมวลของโปรตอนและนิวตรอนที่ประกอบกันเป็นนิวเคลียสชนิดนั้น ความแตกต่างของมวล

ของนิวเคลียสดังกล่าว เรียกว่ามวลพร้อม และเมื่อแปลงมวลพร้อมเป็นพลังงาน จะได้พลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียส ซึ่งเป็นพลังงานที่เป็นผลโดยตรงของแรงนิวเคลียร์ ซึ่งทำให้นิวคลีออนรวมกันอยู่ในนิวเคลียส และเนื่องจากนิวเคลียสแต่ละชนิดมีจำนวนนิวคลีออนต่าง ๆ กัน ในการวิจัยนี้เราใช้แนวคิดพลังงานยึดเหนี่ยวเฉลี่ยเพื่อใช้คำนวณตามแบบสอง การคำนวณตามแบบสอง แนวคิดคือพลังงานยึดเหนี่ยวเฉลี่ย โดยเราสามารถนิยามให้เป็นพลังงานยึดเหนี่ยวต่อ นิวคลีออนได้เพราะว่า พลังงานที่คำนวณได้นี้คือพลังงานที่ต้องใช้ในการเอานิวคลีออนออกจากนิวเคลียส และเราพยายามที่จะให้การคำนวณนี้เป็นตัวอย่างแก่ครูและอาจารย์ เพื่อให้ครูและอาจารย์สามารถนำไปถ่ายทอดในชั้นเรียนเพื่อเป็น ประโยชน์ต่อการศึกษาและการนำไปใช้ประโยชน์จากพลังงานนิวเคลียร์โดยส่วนรวมในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- Born, M. (1965). **Einstein's Theory of Relativity**. New York: Dover.
- Eklund, S. (1975). Oklo Phenomenon. **IAEA Bulletin**, 17(3), 2-4.
- Feynman, P. R. (1998). **The Meaning of it All: Thoughts of a Citizen-Scientist**. New York: Perseus.
- Ghoshal, N. S. (2007). **Nuclear Physics**. New Delhi: S. Chand & Company LTD.
- Knoll, H. A. (2021). **A Brief History of Earth**. New York: HarperCollins.
- Koch, L. (1995). Radioactivity and fission energy. **Radiochimica Acta**, 70-71(s1), 397-402.
- Laohavanich, Y. (1973). **Introduction to Modern Physics**. Bangkok: Mahidol Printing. (in Thai)
- Lemons, D. (2018). **Seeing Physics**. London: Andre Deutsch.
- Meyerhof, W. (1967). **Elements of Nuclear Physics**. New York: McGraw-Hill Book Company.
- Ottaviani, J., & Dye, J. (2022). **Einstein**. New York: First Second.
- Peplow, M. (2023). **Short Cuts Science**. London: Icon Books.
- Seaborg, T. G., Morrissey, W., & Loveland, W. (2006). **Modern Nuclear Chemistry**. New York: Wiley Interscience.
- Semat, H. (1962). **Introduction To Atomic AND Nuclear Physics**. New York: Holt, Rinehart and Winston.
- Tiner, H. J. (2021). **Exploring The World of Physics**. Green Forest: Master Books.
- Whipple, T., & Davies, J. (2020). **Get Ahead in Physics**. London: Walker Books.
- Wilkinson, C. (2020). **Theory of Relativity**. London: Laurence King.
- Woolfson, M. (2010). **Materials, Matter & Particles: A Brief History**. London: Imperial College Press.
