บทที่ 2
นิวไคลด์และขบวนการเกิดกัมมันตภาพรังสี

ในบทที่ 1 ได้เสนอโครงสร้างอะตอมและชี้ถึงความสำคัญของอิเล็กตรอนและปฏิกิริยาของมัน ในบทนี้จะอธิบายคุณสมบัติของนิวเคลียส (แกนกลางของอะตอม) และขบวนการกัมมันตภาพรังสี ซึ่งเป็นปรากฏการณ์นิวเคลียร์ที่สำคัญ

นิวไคลด์และการจัดแบ่งพวกของนิวไคลด์

ธาตุจะประกอบด้วยอะตอมแตกต่างกัน ส่วนนิวไคลด์ประกอบด้วยนิวคลีไอแตกต่างกัน ธาตุหนึ่ง ๆ จะมีเลขเชิงอะตอม (Z) เป็นตัวกำหนดลักษณะสมบัติเพียงอย่างเดียว แต่นิวไคลด์จะถูกกำหนดด้วยเลขเชิงมวล (A) ของนิวไคลด์คือเป็นผลบวกของจำนวนโปรตอน (Z) และนิวตรอน (N) กล่าวคือ $A = Z+N$

ตัวอย่างเช่น $^{131}I_{53}$ เป็นนิวไคลด์หนึ่งของไอโอดีนประกอบด้วย โปรตอน 53 ตัวและนิวตรอน จำนวน 78 ตัว ซึ่งผลบวกของปริมาณทั้งสองคือ 131 เป็นค่าเลขเชิงมวลของนิวไคลด์นี้ สัญญลักษณ์ของนิวไคลด์คือ $^{A}X_{Z}$ โดย A และ Z คือค่าของเลขเชิงมวลและเลขเชิงอะตอมของนิวไคลด์ตามลำดับ และ X คือธาตุซึ่งมีนิวไคลด์ดังกล่าวประกอบอยู่

การจำแนกนิวไคลด์จะจำแนกตามเลขเชิงมวล (mass number) จำนวนนิวตรอนและเลขอะตอม (จำนวนโปรตอน) นิวไคลด์ที่มีมวลเชิงอะตอม (atomic mass) เท่ากันเรียกว่าไอโซบาร์ (isobars) ตัวอย่างเช่น $^{131}I_{53}$ และ $^{131}Xe_{54}$ นิวไคลด์ทั้งสองมีเลขเชิงมวลเท่ากันคือ 131 นิวไคลด์ที่มีจำนวนโปรตอน (protons) เท่ากันเรียกว่าไอโซโทป (isotopes) ตัวอย่างเช่น $^{12}C_{6}$ และ $^{13}C_{6}$ ซึ่งทั้งสองนิวไคลด์มีโปรตอนและเลขเชิงอะตอมเท่ากัน โดยปกติแล้วไอโซโทปจะเป็นพวกธาตุเดียวกัน นิวไคลด์ที่มีจำนวนนิวตรอน (neutrons) เท่ากันเรียกว่าไอโซโทน (isotones) ตัวอย่างเช่น $^{13}N_{7}$ และ $^{14}O_{8}$ โดยที่นิวไคลด์ทั้งสองมีค่านิวตรอนเท่ากับ 6 เช่นเดียวกัน เพื่อช่วยให้จดจำได้ง่าย คู่อักษรที่สมนัยกันในแต่ละนิยามได้ถูกพิมพ์เป็นตัวเอน ดังนี้

จำนวนโปรตอน (*p*rotons) เท่ากันเรียกไอโซโทป (isoto*p*es)

จำนวนเลขเชิงอะตอม (*a*tomic mass) เท่ากันเรียกไอโซบาร์ (isob*a*rs)

จำนวนนิวตรอน (*n*eutrons) เท่ากันเรียกไอโซโทน (isoto*n*es)

โครงสร้างนิวเคลียร์และสภาวะโลดของนิวไคลด์

คงมีคำถามว่าภายในนิวเคลียสนิวตรอนและโปรตอนจัดตัวกันอยู่อย่างไร? (ทั้งสองค่ารวมกันเรียกว่านิวคลีออน) เราจะตอบได้เพียงว่ามันยากที่จะอธิบาย ตามที่เข้าใจนั้นโครงสร้างของนิวเคลียสเมื่อเปรียบ

เทียบกับโครงสร้างของอะตอมนั้นดูเหมือนจะมีข้อจำกัด จากเอกสารและข้อมูลที่ได้จากการทดลองอ้างอิงได้ว่า นิวคลีออนจะถูกจัดอยู่ในเชลล์ทรงกลมภายในนิวเคลียสเช่นเดียวกับอิเล็กตรอนที่อยู่ภายในอะตอม อย่างไรก็ตาม แม้ไม่มีความกระจ่างนักเกี่ยวกับลักษณะการจัดเรียงตัวของบรรดานิวคลีออนในวงโคจรเหล่านี้ ตลอดจนการเปลี่ยนวงโคจรที่แตกต่างกันของนิวคลีออน สิ่งที่ทราบและจัดเป็นประการสำคัญในการวิจารณ์ในปัจจุบัน คือ นิวคลีออนสามารถถูกกระทำให้อยู่ในสภาวะโลด ซึ่งเป็นการเคลื่อนสู่วงโคจรที่ว่างและมีระดับพลังงานสูงกว่า โดยการดูดกลืนพลังงานจากภายนอกนิวเคลียส การจัดเรียงตัวของนิวคลีออนในระดับต่ำสุดภายในนิวเคลียสนั้นคือเป็นสถานะพื้น (ground state) ของนิวไคลด์ วงโคจรที่อยู่สูงกว่าจะถือว่าเป็นระดับพลังงานหรือสถานะกระตุ้น ในทำนองเดียวกับอิเล็กตรอนในอะตอม นิวคลีออนส์ในนิวเคลียสถูกยึดเหนี่ยวด้วยพลังงานยึดเหนี่ยวค่าต่าง ๆ พลังงานยึดเหนี่ยวของนิวคลีออน (ปริมาณพลังงานที่ต้องใช้ในการดึงมันออกจากนิวเคลียส) จะแปรค่าไปสำหรับแต่ละนิวไคลด์ อย่างไรก็ตามพลังงานยึดเหนี่ยวค่าเฉลี่ยของนิวคลีออนส์สำหรับนิวไคลด์ทั้งหมดอยู่ในช่วง 5-8 MeV. ค่าดังกล่าวนี้สูงกว่าค่าพลังงานยึดเหนี่ยวเฉลี่ยของอิเล็กตรอนในอะตอมประมาณ 1,000 เท่า (MeV สูงกว่า KeV) ดังนั้น จึงยากในการดึงโปรตอนหรือนิวตรอนออกจากนิวเคลียส จำต้องมีการถ่ายเทพลังงานปริมาณมากจากภายนอกซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นได้เฉพาะกรณีเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู เครื่องเร่งอนุภาค หรือไซโคลตรอนเท่านั้น

โดยทั่วไป สถานะกระตุ้นของนิวไคลด์หนึ่งเป็นช่วงเวลาสั้น ๆ ($< 10^{-11}$ วินาที) และสลายตัวสู่สถานะพื้นหรือระดับพลังงานที่มีค่าต่ำกว่าด้วยวิธีการเปล่งรังสีพลังงานสูง ซึ่งลักษณะอาการทำนองเดียวกับสถานะกระตุ้นของอะตอมซึ่งสลายตัวลงสู่สถานะพื้นของอะตอมโดยการเปล่งแสงหรือรังสีเอ็กซ์

สถานะกระตุ้นมีเลขเชิงมวล เลขเชิงอะตอมและจำนวนนิวตรอนเป็นค่าเดียวกับสถานะพื้น ดังนั้นจึงถูกเรียกเป็น "ไอโซเมอร์" (isomers) กล่าวคือ ไอโซเมอร์ (Isomer) คือสถานะกระตุ้นของนิวไคลด์ สังเกตว่าอักษร e ในวงเล็บนั้นถูกเขียนเป็นตัวเอนในค่านิยามข้างต้นนี้เพื่อช่วยในการจดจำ ไอโซเมอร์ของนิวไคลด์มักถูกจำแนกออกจากสถานะพื้นโดยใช้สัญลักษณ์ดอกจันกำกับสัญลักษณ์ของนิวไคลด์ เช่น $^{12}_{6}C^{*}$ เป็นสถานะกระตุ้นของ $^{12}_{6}C$ อย่างไรก็ตาม มีบางกรณีที่ช่วงอายุของสถานะกระตุ้นของนิวไคลด์มีค่ายาวนานมาก (เป็นวินาที นาที หรือแม้แต่เป็นปี) เมื่อเกิดเหตุการณ์ดังกล่าว สถานะกระตุ้นถูกเรียกเป็นสถานะกึ่งเสถียร (metastable state) ตัวอย่างที่รู้จักกันแพร่หลายสำหรับนิวไคลด์ที่มีสถานะกึ่งเสถียรคือ ^{99m}Tc และ ^{113m}In อักษร "m" ที่อยู่ถัดจากเลขเชิงมวลในนิวไคลด์ทั้งสองนี้หมายถึงสถานะกึ่งเสถียรและเป็นการแยกนิวไคลด์ออกจากสถานะพื้นคือ ^{99}Tc และ ^{113}In ตามลำดับ

นิวไคลด์รังสีและเสถียรภาพของนิวไคลด์

นิวไคลด์บางพวกมีสภาวะไม่คงตัวแม้จะอยู่ในสถานะนั้นก็ตาม เรียกชื่อนิวไคลด์ดังกล่าวว่า "นิวไคลด์รังสี (radionuclide)" ซึ่งบรรดานิวไคลด์รังสีมักจะพยายามจัดโครงสร้างให้เสถียรโดยการเปล่งรังสี

แม่เหล็กไฟฟ้าหรืออนุภาคมีประจุก็ได้เรียกลักษณะการประพฤติดังกล่าวว่า "การสลายตัวของกัมมันตรังสี (radio-active decay)" ข้อสงสัยก็คือสิ่งใดที่เป็นตัวกำหนดให้นิวไคลด์เสถียรหรือเป็นกัมมันตรังสี คำตอบคือแรงขนาดมากและแรงแม่เหล็กไฟฟ้า แรงซึ่งมีขนาดมาก (strong forces) เป็นแรงกิริยาระหว่างคู่นิวคลีออน (nucleons) เช่น โปรตอน – โปรตอน โปรตอน – นิวตรอน หรือ นิวตรอน – นิวตรอน จัดเป็นแรงดูดซึ่งกันและกันในระยะคู่นิวคลี-ออนที่น้อยมาก ๆ แรงแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นกิริยาระหว่างโปรตอนเท่านั้น (เนื่องจากนิวตรอนไม่มีประจุ) และถูกจัดเป็นแรงผลัก (คือประจุเหมือนกันมีขนาดเท่ากันจะผลักกัน) ในสภาวะสมดุลของแรงดูดและแรงผลักซึ่งบ่งถึงเสถียรภาพของนิวไคลด์ ตราบเมื่อมีการรบกวนใด ๆ เกิดขึ้นต่อดุลระหว่างแรงทั้งสองนิวไคลด์มีความไม่เสถียรและกลายเป็นกัมมันตรังสี ในธรรมชาติมีประมาณ 259 นิวไคลด์เสถียร ความสัมพันธ์ของจำนวนนิวตรอน (N) กับจำนวนโปรตอน (Z) แสดงในรูป 2 – 1 เส้นกราฟช่วงแรกเป็นเส้นตรง จากนั้นจะเริ่มโค้งเข้าแนวแกน N อย่างช้า ๆ เมื่อเลขเชิงอะตอม มีค่าสูงขึ้นคือมีค่า > 25 และจากกราฟจะเห็นได้ว่านิวไคลด์เบา (A < 50) จะมีจำนวนโปรตอนเท่ากับจำนวนนิวตรอนในนิวไคลด์เสถียร เช่น $^{16}O_8$ คือนิวไคลด์ออกซิเจนเสถียร ประกอบด้วย 8 นิวตรอน และ 8 โปรตอน ส่วนพวกนิวไคลด์หนักกว่า A > 100 จะมีจำนวนนิวตรอนมากกว่าโปรตอนในนิวไคลด์คงตัว เช่น $^{127}I_{53}$ เป็นนิวไคลด์ไอโอดีนคงตัวประกอบด้วยโปรตอน 53 ตัวและนิวตรอน 74 ตัวบริเวณด้านบนและล่างของเส้นกราฟเรียกว่า "อาณาจักรนิวไคลด์รังสี (domain of radionuclides)" ซึ่งสามารถแยกประเภทของนิวไคลด์รังสีดังนี้

นิวไคลด์รังสีที่อยู่บริเวณด้านบนของเส้นกราฟ เป็นพวกมีจำนวนนิวตรอนมากเกินไป

นิวไคลด์รังสีที่อยู่บริเวณด้านล่างของเส้นกราฟ เป็นพวกที่มีโปรตอนมากเกินไป

ทั้งสองกรณีเป็นสาเหตุให้นิวไคลด์อยู่ในสภาวะไม่สมดุล

อนุกรมหรือลูกโซ่กัมมันตรังสี

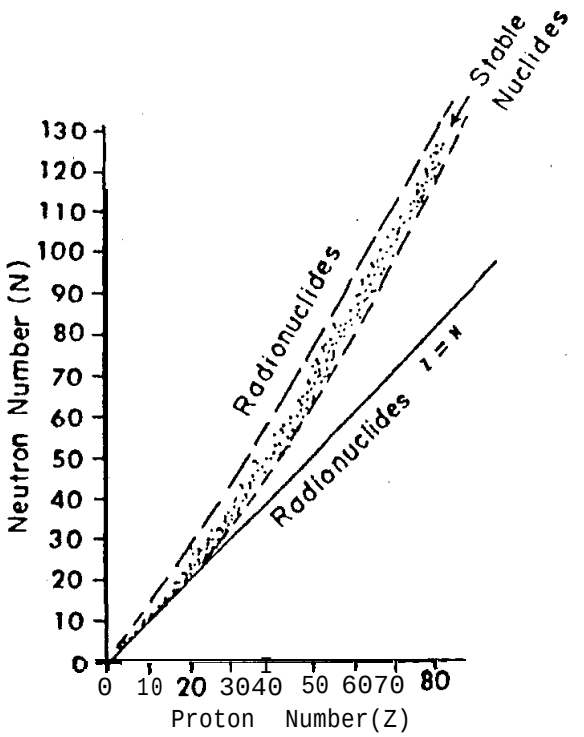
ดังได้กล่าวแล้วว่านิวไคลด์รังสีจะพยายามสลายตัวเพื่อให้อยู่ในสถานะเสถียร ซึ่งเสถียรภาพดังกล่าวอาจเกิดจากการสลายตัวโดยตรงขั้นตอนเดียวสู่สถานะพื้นคงตัวหรือโดยสลายตัวเป็นนิวไคลด์รังสีอื่น ๆ หลายขั้นตอนแต่ท้ายสุดคือนิวไคลด์เสถียร ตัวอย่างเช่น $^{131}I_{53}$ สลายตัวโดยตรงสู่นิวไคลด์เสถียร $^{131}Xe_{54}$ ส่วน $^{226}Ra_{88}$ จะสลายตัว ขั้นแรกเป็น $^{222}Rn_{86}$ ต่อไปคือ $^{218}Po_{84}$ .....และสุดท้ายคือ $^{210}Pb_{82}$ ซึ่งเป็นนิวไคลด์เสถียร เรียกลักษณะการสลายตัวดังกล่าวว่าอนุกรมกัมมันตรังสีหรือการสลายตัวแบบลูกโซ่ ซึ่งลำดับได้โดยนิวไคลด์เริ่มต้นอยู่ด้านหางลูกศรเสมอ

$$^{226}Ra_{88} \rightarrow {}^{222}Rn_{86} \rightarrow {}^{218}Po_{84} \rightarrow {}^{214}Pb_{82} \rightarrow {}^{214}Bi_{83} \rightarrow {}^{214}Po_{84} \rightarrow {}^{210}Pb_{82} \text{ (เสถียร)}$$

อนุกรมกัมมันตภาพรังสีที่ใช้ในเวชศาสตร์นิวเคลียร์คือ ^{99}Mo และ ^{113}Sn ซึ่งลำดับการสลายตัว ดังนี้

$$^{99}Mo \rightarrow {}^{99m}Tc \rightarrow {}^{99}Tc \rightarrow {}^{99}Ru \text{ (เสถียร)}$$

$$^{113}Sn \rightarrow {}^{113m}In \rightarrow {}^{113}In \text{ (เสถียร)}$$



รูป 2-1 การพล็อตจำนวนนิวตรอนตามฟังก์ชันของจำนวนโปรตอน (เลขเชิงอะตอม) ของนิวไคลด์เสถียร บรรดาธาตุที่มีเลขเชิงอะตอมต่ำจะมีจำนวนโปรตอนใกล้เคียงกับจำนวนนิวตรอน แต่พวกที่มีเลขเชิงอะตอมสูงจะมีจำนวนนิวตรอนมากกว่าจำนวนโปรตอน จึงจะทำให้นิวไคลด์อยู่ในสภาวะเสถียร นิวไคลด์รังสีจะประกอบอยู่ทั้งสองด้านของแนวเส้นกราฟเสถียร

ขบวนการของกัมมันตรังสีและกฎการคงตัว

นิวไคลด์รังสีจะกลายเป็นนิวไคลด์เสถียรโดยขบวนการสลายตัว 3 แบบดังนี้ คือ การสลายตัวให้อนุภาคอัลฟา (α) เบตา (β) และแกมมา (γ) สาเหตุในการเรียกชื่อดังกล่าวนั้นเนื่องจากยุคที่ค้นพบ ขบวนการเหล่านี้ยังไม่กระจ่างในธรรมชาติของมันอย่างแท้จริง กฎการอนุรักษ์ทั้งสามประการยังคงใช้เป็นหลักได้ในกรณีขบวนการกัมมันตรังสีหรือ การเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์ ซึ่งได้แก่ การสลายตัวที่เกิดขึ้นเพื่อรักษากฎการคงตัวของ พลังงานเลขเชิงมวล และประจุไฟฟ้า ดังนั้นพลังงานจะยังคงไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งพลังงานทั้งหมดจะมีค่าเท่ากับ พลังงานมวล + พลังงานจลน์ + พลังงานรูปอื่น ๆ เช่น โฟตอนในช่วงเกิดขบวนการสลายตัวของกัมมันตรังสีหรือการเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์ ค่าพลังงานรวมจะไม่เปลี่ยนแปลงและจากกฎการอนุรักษ์เลขเชิงมวลอะตอมกล่าวว่าผลรวมของเลขเชิงมวลอะตอมจะคงค่าตลอดขบวนการของกัมมันตรังสีหรือนิวเคลียร์ เลขเชิงมวลของนิวตรอนหรือโปรตอนนั้นถือว่ามีค่าเป็น 1 ส่วนของอิเล็กตรอนมีค่าเป็น 0 ในทำนองเดียวกันกฎการอนุรักษ์ประจุไฟฟ้ากล่าวว่าประจุไฟฟ้าทั้งหมดจะคงค่าเดิมตลอดช่วงการสลายตัวของกัมมันตภาพรังสีหรือการเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์

การสลายตัวให้อนุภาคอัลฟา :

การสลายตัวให้อนุภาคอัลฟานั้นนิวไคลด์กัมมันตภาพรังสีจะเปล่งอนุภาคหนักซึ่งมีประจุเรียกว่า "อนุภาคอัลฟา" ซึ่งอนุภาคนี้จะหนักกว่าโปรตอนหรือนิวตรอน 4 เท่าและเป็นพาหะประจุไฟฟ้ามีค่า 2 เท่าของโปรตอน โดยแท้จริงแล้วอนุภาคอัลฟาเป็นนิวไคลด์เสถียรมีเลขเชิงมวลอะตอม A = 4 และเลขเชิงอะตอม Z = 2 ซึ่งคือนิวเคลียสของอะตอมฮีเลียม

จากกฎการอนุรักษ์มวลและประจุไฟฟ้ากล่าวได้ว่า ขณะมีการสลายตัวให้อนุภาคอัลฟา เลขเชิงมวลและเลขเชิงอะตอมของนิวไคลด์ลูกจะลดค่าลง 4 และ 2 ตามลำดับดังแสดงข้างล่างนี้

$$^{A}X_{Z} \;=\; ^{(A-4)}Y_{(Z-2)} + {}^{4}He_{2} \text{ (อนุภาคอัลฟา)}$$

สังเกตว่าเลขเชิงมวลและประจุไฟฟ้า (ในกรณีนี้คือผลรวมของเลขเชิงอะตอม) ทั้งสองข้างของสมการยังมีค่าเท่าเดิม

ตัวอย่างการสลายตัวให้อนุภาคอัลฟา ได้แก่การสลายตัวของธาตุ เรเดียม −226 เป็นเรดอน −222

$$^{226}Ra_{88} = {}^{222}Rn_{86} + \alpha$$

ตัวอย่าง :

$^{222}Rn_{86}$ เป็นนิวไคลด์รังสีซึ่งสลายตัวโดยการเปล่งอนุภาคอัลฟาจงหาธรรมชาติของนิวไคลด์ลูก?

เนื่องจาก $^{222}Rn_{86}$ สลายตัวตามขบวนการสลายตัวให้อนุภาคอัลฟาเลขเชิงมวลของนิวไคลด์ลูกจะมีค่าน้อยกว่าของนิวไคลด์แม่อยู่ 4 หน่วย กล่าวคือ 222−4 = 218 ในทำนองเดียวกันเลขเชิงอะตอมจะถูกลดค่าลง 2 กล่าวคือ 86−2 = 84 ดังนั้นนิวไคลด์ลูกจะมีค่าเลขเชิงมวล 216 และเลขเชิงอะตอมเท่ากับ 84 จากตารางธาตุ เลขเชิงอะตอม 84 เป็นของธาตุ Po ดังนั้น นิวไคลด์ลูกคือ $^{218}Po_{84}$

ข้อกำหนดในการสลายให้อนุภาคอัลฟาได้แก่ :

1. นิวไคลด์รังสีต้องมีค่าเลขเชิงมวลอะตอม A มากกว่า 150

2. พลังงานจลน์ของอนุภาคอัลฟาที่ถูกเปล่งออกมานั้นมีค่าคงที่และจะลดลงตามค่าการสลายตัว จากตัวอย่างข้างต้น คือ $^{226}Ra_{88}$ สลายตัวให้อนุภาคอัลฟา พลังงานจลน์ของอนุภาคอัลฟาที่ถูกเปลี่ยนออกมามีค่า 4.780 MeV

การสลายให้อนุภาคเบตา :

ในระหว่างการจัดเรียงตัวชนิดนี้ นิวตรอนหรือโปรตอนภายในนิวเคลียสของนิวไคลด์รังสีจะถูกแปลงเป็นโปรตอนหรือนิวตรอนตามลำดับ เมื่อโปรตอนถูกแปลงเป็นนิวตรอน ประจุบวกภายในนิวเคลียสจะลดค่าลง 1 เป็นการลดแรงผลักระหว่างโปรตอนหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า เมื่อนิวตรอนถูกแปลงเป็นโปรตอน ประจุบวกภายในนิวเคลียสมีค่าเพิ่มขึ้น 1 ดังนั้นจึงเป็นการเพิ่มแรงผลักภายในนิวเคลียสคือเกิดสภาพสมดุลของแรงสองแรง (แรงแม่เหล็กไฟฟ้าและแรงชนิดแรง) เพื่อคงสภาวะเสถียรของนิวไคลด์ (ดูคำอธิบายในเรื่องนิวไคลด์รังสีและ

สมดุลของนิวไคลด์ หน้า 15)

การแปลงนิวตรอนเป็นโปรตอน หรือโปรตอนเป็นนิวตรอนนั้นจะถูกควบคุมด้วยแรงชนิดอ่อน (ตรงข้ามกับแรงชนิดแรง, แรงแม่เหล็กไฟฟ้า และแรงโน้มถ่วง ดูบทที่ 1) ธรรมชาติแท้จริงของแรงชนิดอ่อนยังไม่กระจ่างและมิใช่วัตถุประสงค์ในการอธิบายการสลายตัวให้อนุภาคเบตา การสลายตัวให้อนุภาคเบตาอาจเป็นไปได้ตามขบวนการใดขบวนการหนึ่งดังนี้คือ

(1) การเปล่ง β^- หรือการเปล่งอิเล็กตรอน

(2) การเปล่ง β^+ หรือการเปล่งโพสิตรอน หรือ

(3) การจับอิเล็กตรอน (electron capture)

การเปล่งอนุภาคเบตา β^-

ในขบวนการนี้ นิวตรอนภายในนิวไคลด์รังสีได้ถูกแปลงเป็นโปรตอน พลังงานส่วนเกินจะถูกปล่อยในรูปของอนุภาคคู่คืออิเล็กตรอนและแอนตินิวตริโน (antineutrino) ลักษณะดังกล่าวมิได้หมายความว่ามีอิเล็กตรอนหรือแอนตินิวตริโนบรรจุอยู่ในนิวเคลียส ทั้งสองอนุภาคดังกล่าวถูกสร้างขึ้นจากพลังงานส่วนเกิน ณ เวลาที่เกิดการสลายตัวของกัมมันตรังสี แอนตินิวตริโนเป็นอนุภาคซึ่งไม่มีมวลหยุดนิ่ง (rest mass) และไม่มีประจุไฟฟ้า ($Z = 0$) การที่แอนตินิวตริโนมีปฏิกิริยากับวัสดุนั้นมักเกิดขึ้นน้อยมาก ดังนั้นบทบาทในแง่ชีววิทยาจึงไม่เด่น แต่ที่ต้องมีปรากฏอยู่เพื่อรักษากฎการอนุรักษ์ของพลังงานนั่นเอง อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันได้มีการทดลองและยืนยันว่ามีแอนตินิวตริโนปรากฏอยู่จริง การสลายตัวโดยการเปล่งเบตา (β) เขียนเป็นสมการดังนี้

$$^{A}X_{Z} = {}^{A}Y_{Z+1} + e + \bar{\nu}$$

สังเกตว่าทั้งค่าเลขเชิงมวลและประจุไฟฟ้ายังคงค่าเดิม

ตัวอย่างการสลายตัว β^- ที่รู้จักทั่วไปได้แก่ $^{3}H_{1}$, $^{14}C_{6}$ และ $^{32}P_{15}$ ซึ่งเขียนสมการได้ดังนี้

$$^{3}H_{1} = {}^{3}He_{2} + e + \bar{\nu}$$

$$^{14}C_{6} = {}^{14}N_{7} + e + \bar{\nu}$$

$$^{32}P_{15} = {}^{32}S_{16} + e + \bar{\nu}$$

เห็นได้ชัดว่า ระหว่างการสลายตัวให้ β^- นั้นเลขเชิงมวล (A) ยังคงไม่เปลี่ยนแปลง และเลขเชิงอะตอม (Z) จะเพิ่มค่าขึ้นอีก 1 พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่ถูกเปล่งออกมาจะมีค่าไม่คงที่ เนื่องจากพลังงานลัพธ์ในการสลายตัว (เป็นค่าผลต่างระหว่างพลังงานมวลของนิวไคลด์รังสีแม่ และของนิวไคลด์ลูก) จะต้องแบ่งปันให้กับอิเล็กตรอนและแอนตินิวตริโน

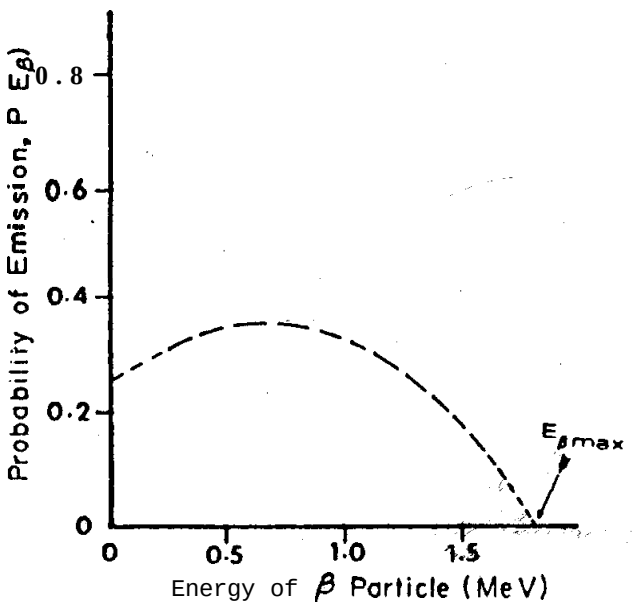
จากตัวอย่างข้างต้น ผลต่างระหว่างพลังงานมวลของคู่ $^{3}H_{1}$ และ $^{3}He_{2}$, $^{14}C_{6}$ และ $^{14}N_{7}$ $^{32}P_{15}$ และ $^{32}S_{16}$ ในช่วงมีการสลายตัวจะถูกปันระหว่างอิเล็กตรอนและแอนตินิวตริโน การแบ่งปันพลังงานดังกล่าวมีลักษณะแบบสุ่ม ดังนั้น อิเล็กตรอนที่ถูกเปล่งออกนั้นจะมีพลังงานจลน์แปรค่ากันไป (รู้จักกันทั่วไปว่าเป็น

สเปคตรัมเบตาลบ) ตั้งแต่ 0 จนถึงค่าสูงสุดของ $E_{\beta}max$ โดยค่า E_{β} max เป็นค่าพลังงานลัพธ์ในกรณีการสลายตัวให้ β^- โดยเฉพาะ จากตัวอย่างข้างต้น E_{β} max ของการสลายตัวของ $^{3}H_{1}$ คือ 0.018 MeV ส่วนของการสลายตัวของ ^{14}C คือ 0.156 MeV และของ ^{32}P คือ 1.17 MeV โอกาสของการเปล่งอิเล็กตรอนซึ่งมีพลังงานจลน์ตามกำหนดคือ E_{β} ได้แก่ $P(E_{\beta})$ จะแปรค่าอย่างมากตามพลังงานจลน์ E_{β} การแปรค่าของ $P(E_{\beta})$ ตาม E_{β} (กล่าวคือสเปคตรัม β^-) ดังแสดงในรูป 2 – 2 เป็นกรณีการสลายตัว β ทั่ว ๆ ไป

ในการคำนวณโดสกัมมันตภาพรังสีที่คนไข้ได้รับจากนิวไคลด์รังสีที่มีการเปล่ง β^- นั้นจะสนใจค่าพลังงานเฉลี่ย $\bar{E}_{\beta}$ ของอิเล็กตรอน การคำนวณค่า $\bar{E}_{\beta}$ ขึ้นกับการทราบรูปร่างแน่นอนของสเปคตรัม β อย่างไรก็ตามจากฎตายตัว กรณีไม่ต้องการความถูกต้องสูงนัก อาจหาค่า $\bar{E}_{\beta}$ จากการหาร $E_{\beta}max$ ด้วย 3 (กล่าวคือ $\bar{E}_{\beta}$ = 1/3 E_{β} max) โดยทั่วไป E_{β} max และ $\bar{E}_{\beta}$ จะถูกแสดงค่าในตารางนิวไคลด์

การเปล่งโพสิตรอนหรือ β^+

ในขบวนการนี้ โปรตอนภายในนิวเคลียสถูกเปล่งเป็นนิวตรอน และเปล่งพลังงานส่วนเกินออกไปในรูปของอนุภาคคู่ ซึ่งกรณีนี้คือโพสิตรอนและนิวตริโน (นิวตริโนและแอนตินิวตริโนนั้นสามารถนับรวมได้ว่าเป็นอนุภาคเหมือนกันทุกประการ เฉพาะกรณีนี้) โพสิตรอนเป็นอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุบวกหนึ่ง (แทนที่จะมีประจุลบหนึ่ง) มันมีค่ามวลเช่นเดียวกับอิเล็กตรอน และมีปฏิกิริยากับวัสดุกั้นในอาการทำนองเดียวกันกับอิเล็กตรอน การสลายตัวให้อนุภาคโพสิตรอนอาจเขียนได้ดังนี้



รูป 2-2 ตัวอย่างสเปคตรัมเบตาในการสลายตัวให้อนุภาคเบตาจะมีการเปล่งอิเล็กตรอน (หรือโพสิตรอน) หลายตัวซึ่งต่างมีค่าพลังงานไม่เหมือนกันและค่าพลังงานสูงสุดคือ E_{β} max สเปคตรัมเบตาแสดงถึงโอกาสในการเปล่งอิเล็กตรอนซึ่งมีค่าพลังงานเป็น E_{β}

$$^{A}X_{Z} = {}^{A}Y_{Z-1} + e^{+} + \gamma$$

สมการนี้ยังคงอนุรักษ์ค่าเลขเชิงมวลและประจุไฟฟ้า อย่างไรก็ตามกรณีอนุรักษ์พลังงานลัพธ์ มวลของนิวไคลด์ X ควรมีค่ามากกว่ามวลของนิวไคลด์ Y อย่างน้อย 1.02 MeV (2 × มวลของอิเล็กตรอน) เนื่องจากมวลของนิวไคลด์นั้นรวมทั้งมวลของนิวเคลียสและของอิเล็กตรอนที่ประกอบอยู่ด้วย ดังนั้น มวลของนิวไคลด์ X ประกอบด้วยมวลของ Z อิเล็กตรอน ขณะที่มวลของนิวไคลด์ Y ประกอบด้วยมวลของ Z−1 อิเล็กตรอน e^{+} เกิดจากพลังงานนิวเคลียสของนิวไคลด์ X ดังนั้น มวลของนิวไคลด์ X จะต้องมีค่ามากกว่า 2X มวลของอิเล็กตรอน ตัวอย่างของการเปล่งโพสิตรอนได้แก่

$$^{11}C_{6} = {}^{11}B_{5} + e^{+} + \gamma$$
$$^{15}O_{8} = {}^{15}N_{7} + e^{+} + \gamma$$
$$^{18}F_{9} = {}^{18}O_{8} + e^{+} + \gamma$$

สังเกตว่า ในช่วงที่มีการเปล่ง β^{+} เลขเชิงมวลยังคงค่าเดิม แต่เลขเชิงอะตอมเพิ่มขึ้น 1 และในขบวนการเปล่ง β^{+} นี้พลังงานของโพสิตรอนที่ถูกเปล่งออกไปมีค่าแตกต่างกันตั้งแต่ 0 จนถึงค่าสูงสุด $E_{\beta}max$ ซึ่งทราบกันทั่วไปว่าเป็นสเปคตรัม β^{+} การคำนวณค่าแน่นอนของพลังงานเฉลี่ย β^{+} (เขียนย่อเป็น $E_{\beta+}$) ในกรณีนี้ก็มีผลเช่นกัน จากการประมาณสามารถหาค่า $\bar{E}_{\beta+}$ ได้โดยหาร E_{+} ด้วย 3

การจับอิเล็กตรอน

ในขบวนการนี้โปรตอนภายในนิวเคลียสถูกแปลงกลับเป็นนิวตรอนโดยการจับอิเล็กตรอนจากวงโคจรของอะตอม (เช่น K,L หรือ M) อนุภาคที่ถูกเปล่งออกไปไม่ใช่อิเล็กตรอนหรือโพสิตรอน แต่เป็นนิวตริโน การจับอิเล็กตรอนจากวงโคจร K ของอะตอมนั้น เรียกชื่อเป็น K capture การจับอิเล็กตรอน จากวงโคจร L เรียกชื่อเป็น L capture การจับอิเล็กตรอนใช้เวลาเพียงนิดเดียว (สั้นกว่าการสลายตัวให้แกมมา) ซึ่งนิวเคลียสชนโดยตรงกับอิเล็กตรอนในวงโคจร (K,L,...ฯลฯ) ของอะตอม เมื่ออิเล็กตรอน จากวง K L หรือ M ถูกจับออกไป ย่อมเกิดช่องว่างในส่วนในของอะตอม ช่องว่างนี้จะถูกเติมให้เต็มทันที โดยอิเล็กตรอนจากวงโคจรที่สูงกว่าและจะมีการเปล่งแคแรคเธอริสติคเอ็กซเรย์หรือออเกอร์อิเล็กตรอน (Auger electron) (ดูบทที่ 1) โอกาสของการจับอิเล็กตรอนจากวงโคจร K มักมีค่าสูงกว่าการจับในวงโคจร L หรือ M เขียนสมการการจับอิเล็กตรอนดังนี้

$$^{A}X_{Z} + e^{-}(\text{orbital}) = {}^{A}Y_{Z-1} + \gamma$$

ความสัมพันธ์ดังกล่าวยังคงรักษาการอนุรักษ์ของปริมาณเลขเชิงมวลและประจุไฟฟ้า ตัวอย่างของการจับได้แก่

$$^{51}Cr_{24} + e\ (\text{orbital}) = {}^{51}V_{23} + \gamma$$
$$^{131}Cs_{55} + e^{-}(\text{orbital}) = {}^{131}Xe_{54} + \gamma$$

สังเกตว่าในช่วงเวลาเกิดการจับอิเล็กตรอนนั้นเลขเชิงมวลคงค่าเดิม, แต่เลขเชิงอะตอมลดลง 1 ซึ่งเป็นเช่นเดียว

กับกรณีการเปล่งโพสิตรอน

ในช่วงเวลาการสลายตัวให้อนุภาคเบตาทั้ง 3 ขบวนการเลขเชิงมวล A ยังคงไม่เปลี่ยนแปลง จากเหตุผลดังกล่าวนี้ จึงกล่าวว่าการสลายตัวให้อนุภาคเบตาเป็นการจัดตัวแบบไอโซบาริค (isobaric transition)

การสลายตัวให้รังสีแกมมา :

ดังได้เคยอธิบายแล้วว่านิวเคลียสอาจถูกทำให้อยู่ในสถานะกระตุ้นชั่วคราว โดยการดูดกลืนพลังงาน ซึ่งเรียกระดับพลังงานดังกล่าวว่าไอโซเมอร์ (isomer) โดยทั่วไปนิวไคลด์พวกไอโซเมอร์มีอายุสั้นมาก ยกเว้นกรณีสถานะพลังงานกึ่งเสถียรหรือ "เมตะสเตเบิล" (metastable) การสลายตัวของพลังงานในสถานะกระตุ้นไปสู่ระดับพลังงานต่ำกว่าหรือ "กราวนด์สเตท" (ground state) เรียกว่าการจัดตัวแบบไอโซเมอริค (isomeric transition) (ตรงข้ามกับกรณีการจัดตัวแบบไอโซบาริคในกรณีของการสลายตัวให้อนุภาคเบตา) และติดตามด้วยขบวนการทั้งสอง คือ

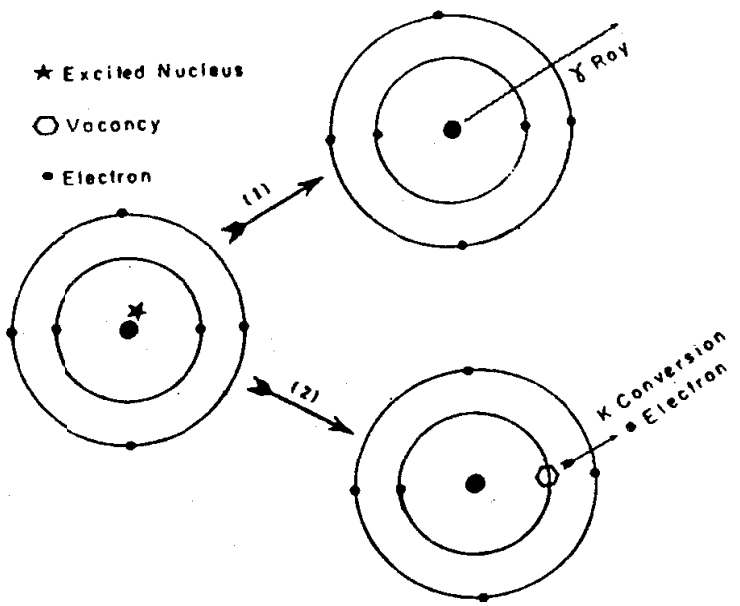
(1) การเปล่งโฟตอนพลังงานสูง

(2) อินเทอร์นัลคอนเวิร์สชัน (internal conversion)

แผนภาพดังอธิบายได้แสดงในรูป 2 –3

การเปล่งโฟตอนพลังงานสูง

ในขบวนการนี้ พลังงานส่วนเกินของไอโซเมอร์ถูกปล่อยในรูปของโฟตอนพลังงานสูง ซึ่งรู้จัก



รูป 2-3 การจัดตัวแบบไอโซเมอริค นิวเคลียสในสถานะกระตุ้นของการจัดตัวแบบไอโซเมอริค จะปลดปล่อยพลังงานได้ 2 วิธี คือ (1) เปล่งรังสีแกมมา (โฟตอน) หรือ (2) ถ่ายทอดพลังงานให้กับอิเล็กตรอนในวงโคจรโดยตรง โดยทั่วไปคือวงโคจร K อิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานจะถูกปล่อย จากอะตอมซึ่งถูกเรียกชื่อเป็นคอนเวิร์สชันอิเล็กตรอน ดังนั้นย่อมเกิดช่องว่างในวงโคจรที่อยู่ในกว่าและถูกเติมทันทีด้วยลักษณะตามที่ได้อธิบายแล้วในบทที่ 1

ในนามของรังสีแกมมา (γ-ray) รังสีแกมมาถูกจัดเป็นรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีพลังงานสูง (> 100 eV ดูรายละเอียดในบทที่ 1) รังสีเอ็กซ์และแกมมาที่มีค่าพลังงานค่าเดียวกันนั้น ไม่สามารถแยกความแตกต่างได้ เนื่องจากกัมมันตภาพทั้งสองจะมีปฏิกิริยากับวัสดุกั้นในลักษณะอาการเดียวกัน ข้อแตกต่างของรังสีทั้งสองมีเพียงอย่างเดียวคือต้นกำเนิด พลังงานที่ถูกเปล่งออกจากนิวเคลียสเป็นโฟตอนพลังงานสูงนั้นเรียกว่ารังสีแกมมา แต่พลังงานที่ถูกเปล่งออกจากอะตอม (กล่าวคือ การจัดอิเล็กตรอนภายในวงโคจรของอะตอม) ในรูปของโฟตอนพลังงานสูงคือเอ็กซ-เรย์ (x-ray) การเรียกชื่อโฟตอนพลังงานสูงให้แตกต่างกันนั้นไม่มีผลต่างอย่างใดต่อเวชศาสตร์นิวเคลียร์ในแง่ปฏิบัติ

อินเทอร์นัลคอนเวิร์สชัน

บางครั้งแทนที่นิวไคลด์ในสถานะกระตุ้นจะเปล่งรังสีแกมมา กลับส่งพลังงานส่วนเกินให้กับอิเล็กตรอนในวงโคจรโดยตรง (ในวงโคจร K, L หรือ M) ขบวนการดังกล่าวเรียกว่า "อินเทอร์นัลคอนเวิร์สชัน" และยังเป็นตัวอย่างในการชนกันโดยตรงระหว่างนิวเคลียสและอิเล็กตรอนในวงโคจรได้อีกตัวอย่างหนึ่ง (ตัวอย่างแรกคือการจับอิเล็กตรอนในการสลายตัวให้อนุภาคเบตา ดังได้กล่าวไว้แล้วในตอนต้น)

อินเทอร์นัลคอนเวิร์สชันจัดเป็นขบวนการกลับกับการเปล่งรังสีแกมมา นิวเคลียสเดี่ยวอาจจะเปล่งรังสีแกมมาหรืออิเล็กตรอนก็ได้ อย่างไรก็ตาม นิวคลีไอกลุ่มหนึ่งอาจเปล่งรังสีแกมมาได้บางจำนวน ส่วนที่เหลืออาจเกิดคอนเวิร์สชันอิเล็กตรอน อัตราส่วนของจำนวนอิเล็กตรอนต่อจำนวนรังสีแกมมาที่เปล่งออกมา ในกลุ่มนิวคลีไอที่อยู่ในสถานะกระตุ้นนั้นเรียกเป็นสัมประสิทธิ์ของอินเทอร์นัลคอนเวิร์สชัน (แทนด้วย α) ในกรณีพลังงานสถานะกระตุ้น ซึ่ง

$$\alpha = \frac{\text{จำนวนอิเล็กตรอนทั้งหมดที่ถูกเปล่งออกมา}}{\text{จำนวนรังสีแกมมาทั้งหมดที่ถูกเปล่งออก}}$$

α ในกรณีนี้ไม่ใช่อนุภาคอัลฟา

ถ้าพิจารณาเฉพาะอิเล็กตรอนที่ถูกชนออกจากวงโคจร K อัตราส่วนดังกล่าวจึงเรียกเป็น "สัมประสิทธิ์ของ คอนเวิร์สชัน – K" (K conversion) แทนด้วยสัญลักษณ์ α_K และถ้าพิจารณาเฉพาะอิเล็กตรอนที่ถูกชนออกจากวงโคจร L เรียกอัตราส่วนดังกล่าวเป็นสัมประสิทธิ์ของ "คอนเวิร์สชัน – L" หรือ α_L ดังนั้น α ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์ลัพธ์จึงมีค่าเป็นผลรวมของ สัมประสิทธิ์คอนเวิร์สชันใน K, L และ M (กล่าวคือ $\alpha = \alpha_K + \alpha_L + \alpha_M$)

ตัวอย่างเช่น ถ้า $\alpha = 1/5$ หมายถึงการเปล่งรังสีแกมมามีค่ามากกว่าการเปล่งอิเล็กตรอนถึง 5 เท่า ซึ่งการเปล่งอิเล็กตรอนนั้นเกิดจากอินเทอร์นัลคอนเวิร์สชัน หรือถ้ามีการสลายตัวทั้งสิ้น 6 ส่วน จะมีการเปล่งรังสีแกมมา 5 ส่วน และอีก 1 ส่วน เป็นการเปล่งอิเล็กตรอนโดยขบวนการคอนเวิร์สชัน ดังนั้นถ้านิวคลีไอในสถานะกระตุ้นมีการสลายตัว 100 ส่วน จะมีการเปล่งรังสีแกมมา 83 ส่วน (กล่าวคือ $5/6 \times 100 = 83$) และคงเหลือขบวนการเปล่งคอนเวิร์สชันอิเล็กตรอนเพียง 17 ส่วน ถ้าสัมประสิทธิ์ของอินเทอร์นัลคอน-เวิร์สชันมีค่าเป็น 2 แสดงว่าการเปล่งอิเล็กตรอนมีค่าเป็น 2 เท่าของการเปล่งรังสีแกมมา หรือกล่าวว่า ในการ

สลายตัว 3 ส่วน การเปล่งรังสีแกมมามี 1 ส่วน และการเปล่งคอนเวิร์สชันอิเล็กตรอนมีค่า 2 ส่วน ดังนั้นถ้ามีการสลายตัว 100 ส่วนจากนิวคลีไอในสถานะกระตุ้นจะมีรังสีแกมมาถูกเปล่งออกประมาณ 33 ส่วน ($1/3 \times 100 = 33$) ขณะที่จำนวนคอนเวิร์สชันอิเล็กตรอนมีค่า 67 ส่วน

โอกาสของคอนเวิร์สชัน K มีค่าสูงเมื่อเปรียบเทียบกับค่าคอนเวิร์สชันในวงโคจร L หรือ M เนื่องจากอิเล็กตรอนในวงโคจร K อยู่ใกล้นิวเคลียสมากกว่าอิเล็กตรอนในวงโคจร L และ M นั่นเอง ซึ่งโอกาสของขบวนการอินเทอร์นัลคอนเวิร์สชันย่อมมีค่าสูงกว่า ถ้าพลังงานสถานะกระตุ้นเป็นระดับที่มีอายุนาน (สถานะกึ่งเสถียร) และพลังงานของสถานะกระตุ้นมีค่าต่ำ (< 100 keV)

จากการที่อิเล็กตรอนถูกเปล่งออกจากวงโคจรที่อยู่ด้านใน (ชิดกับนิวเคลียส) ตามขบวนการอินเทอร์นัลคอนเวิร์สชัน (เช่น วง K, L หรือ M) จึงเกิดช่องว่างขึ้นในวงโคจร ดังกล่าว ซึ่งช่องว่างนี้จะถูกแทนที่ทันทีโดยอิเล็กตรอนจากวงโคจรสูงกว่า ผลคือเกิดการเปล่งรังสีเอ็กซ์หรือออเกอร์อิเล็กตรอน (Auger electron) ขบวนการเติมช่องว่างในวงโคจรของอะตอมเป็นเช่นเดียวกับปรากฏการณ์ที่เกิดหลัง K-capture ในการสลายตัวให้อนุภาคเบตา เนื่องจากอิเล็กตรอนในแต่ละวงโคจรของอะตอม (เช่น K,L,...) จะถูกยึดเหนี่ยวด้วยพลังงานปริมาณแน่นอน ซึ่งรู้จักกันทั่วไปว่าคือพลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy) คอนเวิร์สชันอิเล็กตรอนจะนำพลังงานจลน์ซึ่งมีค่าเท่ากับผลต่างของพลังงานในสถานะกระตุ้น (ของนิวเคลียส) และพลังงานยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนในแต่ละวงโคจร ตัวอย่างเช่น ^{113}In พลังงานของระดับกึ่งเสถียรมีค่า 393 keV มีการเปล่งรังสีแกมมา 393 keV แต่เปล่งอิเล็กตรอน K-คอนเวิร์สชันมีพลังงานจลน์ค่า 393-29.7 (คือค่าพลังงานยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอน K ในอะตอมของ In) = 363.3 keV

ผังการสลายตัว

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการสลายตัวให้อนุภาคอัลฟา เบตา และแกมมา รวมทั้งตัวอย่างต่าง ๆ ของขบวนการกัมมันตรังสี สิ่งที่สงสัยสำหรับบุคคลทั่วไปคือ จะทราบได้อย่างไรว่านิวไคลด์รังสีหนึ่ง ๆ มีการสลายตัวให้อนุภาคอัลฟา เบตา หรือรังสีแกมมา หรือมีการรวมตัวกันตั้งแต่จำนวน 2 หรือมากกว่าขึ้นไป โดยทั่วไปไม่มีกฎตายตัวที่จะอธิบายหรือให้ความกระจ่างต่อข้อสงสัยดังกล่าว ข้อมูลที่ได้จากการทดลองของแต่ละนิวไคลด์รังสีจะถูกรวบรวมไว้ จากนั้นเสนอในรูปแบบของผังการสลายตัว อาจกล่าวได้ว่าผังการสลายตัวคือการรวบรวมข้อมูลจากการทดลองรวมทั้ง

(1) วิธีการ (modes) และความถี่ของการสลายตัว

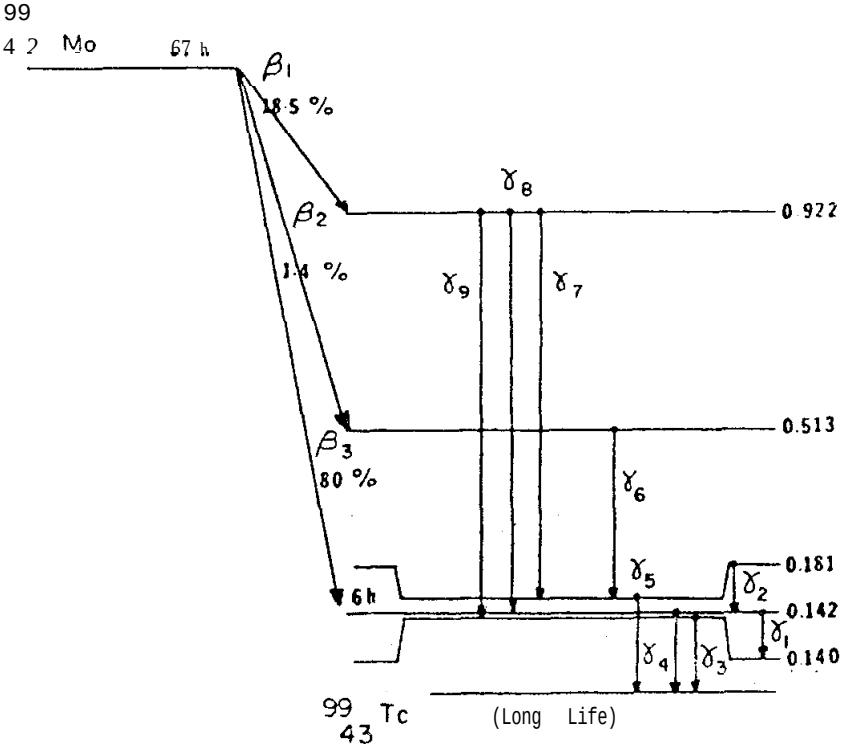
(2) ขบวนการสลายตัว

(3) พลังงานของรังสีที่ถูกเปล่งออกไป

(4) ครึ่งชีวิต (half-life) ดูรายละเอียดในบทที่ 3 และข้อมูลอื่น ๆ ซึ่งน่าสนใจของนิวไคลด์รังสี ผังการสลายตัวของพวก "ไอโซบาร์" (isobars) หรือการเปล่งอนุภาคเบตามักจัดโดยนิวไคลด์รังสี

เรียงจากซ้ายไปขวา ตามการเพิ่มเลขเชิงอะตอม ในการเสนอแผนภาพดังกล่าว การสลายตัวให้ β^- ของนิวไคลด์รังสีทุกตัวกลายเป็นนิวไคลด์ทางด้านขวามือ (↘) และนิวไคลด์รังสีทั้งหมดที่เกิดจาก K-capture หรือการสลายตัวให้ e^+ จะอยู่ด้านซ้าย (↙ หรือ ↵) สภาวะโลดของนิวไคลด์ถูกแทนด้วยแนวนอนอยู่เหนือระดับกราวนด์พลังงานของสถานะต่าง ๆ เหล่านั้นจะเพิ่มค่าจากระดับล่างสู่ระดับบนของหน้ากระดาษ การจัดตัวแบบไอโซเมอริคระหว่างระดับพลังงาน 2 ระดับถูกแทนด้วยเส้นตั้งซึ่งเชื่อมต่อระดับพลังงานทั้งสอง

ตัวอย่างนี้ตรงข้ามกับพลังงานอิเล็กตรอนในอะตอม สเกลพลังงานซึ่งมีค่าเป็นศูนย์จะถูกกำหนดเป็นสถานะของนิวไคลด์ ลักษณะเช่นนี้เหมือนกับการเลือกวงโคจร K เป็นระดับพลังงานศูนย์ ผลสืบเนื่องจากแนวปฏิบัติดังกล่าวทำให้วงโคจรอื่น เช่น L, M ฯลฯ มีพลังงานเป็นบวก ในระดับนิวเคลียส ถ้าตามแนวความคิดเดิมดังกล่าว พลังงานของอิเล็กตรอนในวงโคจร K L M ของอะตอมโซเดียมจึงมีพลังงานเป็น 0, 1009 และ 1071 eV แทนค่าเดิมซึ่งเป็นลบคือ −1072, −63 และ 1 eV ตามลำดับ



รูป 2-4 ผังการสลายตัวของ ^{99}Mo การสลายตัวของ ^{99}Mo คือการเปล่งเบตาไปสู่ระดับพลังงานสถานะกระตุ้นของ ^{99}Tc- มีค่าพลังงานเป็น 0.142, 0.153 และ 0.922 MeV สถานะกระตุ้นเหล่านี้จะสลายตัวสู่สถานะพื้นโดยการเปล่งรังสีแกมมาปริมาณหนึ่งซึ่งแสดงไว้แล้ว การจัดตัวซึ่งมีโอกาสเกิดได้น้อยจะถูกตัดทิ้งไปยกเว้นกรณี 0.142 MeV ซึ่งมีครึ่งชีวิต 6 ชม. สถานะกระตุ้นอื่นจะมีอายุสั้น

ในรูป 2 −4 เป็นผังการสลายตัวของ ^{99}Mo เป็นอะตอมแม่ของ ^{99m}Tc ซึ่งได้ปฏิบัติงานสาขาเวชศาสตร์นิวเคลียร์ สรุปย่อ ๆ ได้ว่า จากผังการสลายตัวของ ^{99}Mo แสดงว่า ^{99}Mo สลายตัวอยู่ในระดับพลังงาน

สถานะกระตุ้นโลดของ ^{99}Tc ถึง 80% ระดับพลังงานดังกล่าวนี้มีค่าพลังงาน 0.142 MeV (เรียกเป็นสถานะกึ่งเสถียร เนื่องจากระดับพลังงานนี้มีอายุนานพอสมควร) ซึ่งวิธีการสลายตัวคือการเปล่งอนุภาคเบตา (β^-) มีค่าพลังงาน E_β สูงสุด = 1.23 MeV และอีก 18.5% ของช่วงเวลาการสลายตัวนั้นเป็นการสลายตัวสู่ระดับพลังงานสถานะกระตุ้นอื่น ๆ (ไอโซเมอร์) ของ ^{99}Tc ซึ่งมีค่าพลังงาน 0.922 MeV โดยการเปล่งอนุภาคเบตา มีค่า E_β สูงสุด = 0.45 MeV ส่วนที่เหลืออีกประมาณ 1.4% นั้นเป็นการสลายตัวสู่ระดับพลังงานสถานะกระตุ้นอื่น ๆ ของ ^{99}Tc สภาวะโลดของ ^{99}Tc ที่ค่า 0.922 MeV มีอายุสั้นมาก และใช้เวลาสั้น ๆ ($< 10^{-9}$ วินาที) ในการสลายตัวสู่สถานะพื้นหรือสถานะกระตุ้นซึ่งอยู่ต่ำกว่า โดยการเปล่งรังสีแกมมาหรือคอนเวิร์สชันอิเล็กตรอน

ตาราง 2 –1 เสนอจำนวนการเปล่งรังสีจากการสลายตัวของ ^{99}Mo (เบตา แกมมา เคแรคเธอริส--ติคเอ็กซเรย์ คอนเวิร์สชันอิเล็กตรอน และออเกอร์อิเล็กตรอน) ค่าพลังงาน ($\bar{E}_i$) และความถี่ของการเปล่ง n_i (n_i ถูกนิยามเป็นโอกาสของการเปล่งรังสี i ซึ่งมีค่าพลังงาน E_i ต่อการสลายตัวของนิวไคลด์รังสี) อย่างไรก็ตาม ข้อมูลที่แสดงในตาราง 2 –1 นั้นไม่สามารถคำนวณจากรูป 2 –4 เพียงอย่างเดียว เนื่องจากต้องอาศัยข้อมูลอื่น ๆ และการคำนวณที่ซับซ้อนช่วย วารสาร Journal of Nuclear Medicine (Sppl. 10,1975) ได้ตีพิมพ์รายละเอียดของนิวไคลด์จำนวนมาก

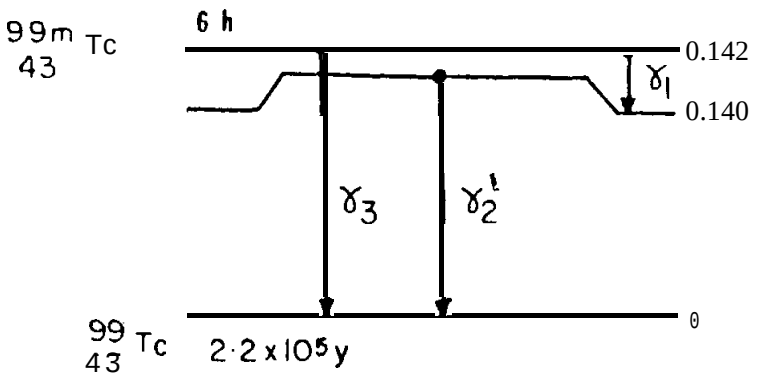
ตาราง 2-1 การเปล่งกัมมันตภาพรังสีในการสลายตัวของ ^{99}Mo

ลำดับ	รังสี (i)	ความถี่ในการเปล่ง (n_i)	ค่าพลังงานเฉลี่ย (MeV) (E_i)
1	β 1	0.185	0.140
2	β 2	0.014	0.298
3	β 3	0.797	0.452
4	γ 1	—	—
5	M Conversion -Electron	0.851	0.002
6	γ 2	0.130	0.041
7	K Conversion Electron	0.043	0.019
8	Y3	0.815	0.140
9	K Conversion Electron	0.085	0.120
10	L Conversion Electron	0.011	0.138
11	Y4	—	—
12	γ 5	0.066	0.181
13	γ 6	0.014	0.366
14	Y7	0.137	0.740
15	γ 8	0.048	0.778
16	X-Rays-K(a)	0.094	0.018
17	X-Rays-K@')	0.017	0.021
18	KLL Auger Electron	0.022	0.015
19	KLX Auger Electron	0.01	0.018
20	LMM Auger Electron	1.53	0.002
21	MXY Auger Electron	1.20	0.001

ตัวอย่างอื่น ๆ ของแผนภาพการสลายตัว ได้แก่ ^{99m}Tc และ ^{125}I ในภาคผนวก A ได้เสนอในรูปแบบตารางแสดงการเปล่งกัมมันตภาพรังสีโดยนิวไคลด์รังสีอื่น ๆ ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในเวชศาสตร์นิวเคลียร์ ทั้งนี้จะมีรายละเอียดเฉพาะกัมมันตภาพรังสีที่มีการสลายตัวมากกว่า 1% ของการสลายตัวแต่ละครั้งของนิวไคลด์รังสีเท่านั้น ซึ่งรวบรวมขึ้นจากแหล่งข้อมูลดังกล่าวข้างต้นนั่นเอง แม้ว่าข้อมูลเกี่ยวกับการสลายตัวของ ^{99m}Tc อาจจะสรุปจากแผนภาพการสลายตัวของ ^{99}Mo ก็ตาม ยังได้เสนอแผนภาพการสลายตัวของ ^{99m}Tc แยกต่างหากในรูป 2 – 5 เนื่องจากมีความสำคัญมากในเวชศาสตร์นิวเคลียร์

ตาราง 2–2 ได้เสนอรายละเอียดของ ^{99m}Tc

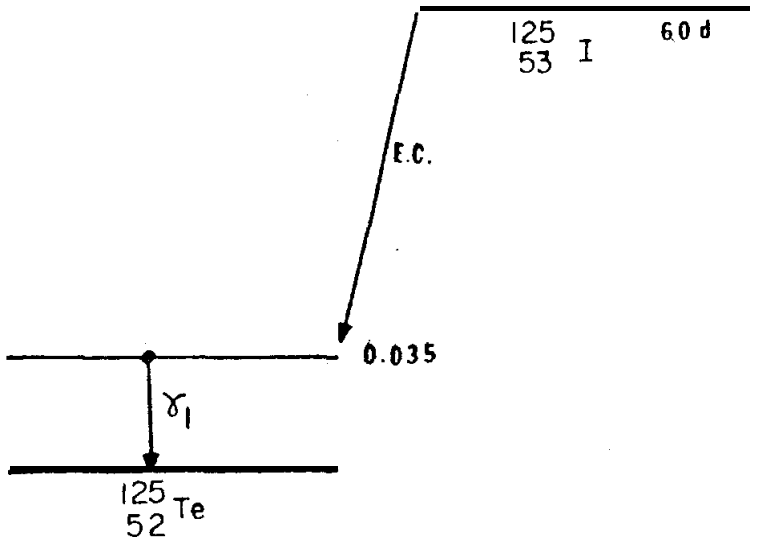
แผนภาพการสลายตัวของ ^{125}I ซึ่งเป็นนิวไคลด์รังสีหนึ่งที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายในงานเรดิโออิมมูโนแอสเสย์ (radioimmunoassays) แสดงในรูป 2 – 6 ปริมาณรังสีแกมมา เอ็กซเรย์ และคอนเวิร์สชันอิเล็กตรอน



รูป 2-5 ผังการสลายตัวของ ^{99m}Tc สถานะไอโซเมอริคของ ^{99}Tc ที่ค่า 0.142 MeV มีครึ่งชีวิต 6 ชม. และจะสลายตัวสู่สถานะกระตุ้น 0.142 MeV เป็นอันดับแรก (โอกาส 99%) ซึ่งมีครึ่งชีวิตสั้นมาก (10^{-9} วินาที) ดังนั้นย่อมสลายตัวสู่สถานะพื้นโดยการเปล่งรังสีแกมมา 0.140 MeV หรือคอนเวิร์สชันอิเล็กตรอนที่สมนัยกัน สถานะพื้นหรือนิวไคลด์ ^{99}Tc แท้จริงแล้วเป็นนิวไคลด์รังสี แต่มีครึ่งชีวิตที่ยาวนานมากจนในทางปฏิบัติถือว่าเป็นนิวไคลด์เสถียร

ตาราง 2-2 รังสีที่ถูกเปล่งจากการสลายตัวของ ^{99m}Tc

ลำดับ	รังสี (i)	ความถี่ในการเปล่ง (n_i)	ค่าพลังงานเฉลี่ย (MeV) ($\bar{E}_i$)
1	γ I (Conversion Electron)	0.986	0.002
2	γ 2 (Photon)	0.883	0.140
3	K Conversion Electron	0.088	0.119
4	L Conversion Electron	0.011	0.138
5	M Conversion Electron	0.004	0.140
6	γ 3 (Conversion Electron)	0.01	0.122
7	K (α) x-Ray	0.064	0.018
8	K (β) x-Ray	0.012	0.021
9	KLL Auger Electron	0.015	0.015
10	LMM Auger Electron	0.106	0.002
11	MXY Auger Electron	1.23	0.0004



รูป 2-6 ผังการสลายตัวของ ^{125}I การสลายตัวของ ^{125}I โดยวิธีการจับอิเล็กตรอนไปสู่ไอโซเมอริคสเตทของ ^{125}Te ที่ 0.035 MeV ซึ่งสลายตัวสู่สถานะพื้นในทันทีทันใดด้วยการเปล่งรังสีแกมมา (โอกาส 7%) หรือคอนเวิร์สชันอิเล็กตรอน (โอกาส 93%) ในการจับอิเล็กตรอนหรืออินเทอร์นัลคอนเวิร์สชันย่อมเกิดช่องว่างอิเล็กตรอนในวงโคจร K เอ็กซเรย์ K ของ ^{125}Te (29.8 keV) ก็ถูกเปล่งออกเช่นกันในการสลายตัวของ ^{125}I

ตาราง 2-3 รังสีที่ถูกเปล่งในการสลายตัวของ ^{125}I

ลำดับ	รังสี (i)	ความถี่ในการเปล่ง (N_i)	ค่าพลังงานเฉลี่ย (MeV) ($\bar{E}_i$)
1	γ 1	0.068	0.035
2	K Conversion Electron	0.746	0.004
3	L Conversion Electron	0.107	0.031
4	M Conversion Electron	0.080	0.035
5	X-Ray-K(a)	1.176	0.027
6	X-Ray-K(B)	0.240	0.031
7	X-Ray-L	0.215	0.004
8	KLL Auger Electron	0.137	0.023
9	KLX Auger Electron	0.058	0.026
10	KXY Auger Electron	0.01	0.030
11	LMM Auger Electron	1.49	0.003
12	MXY Auger Electron	3.59	0.001

ฯลฯ และค่าพลังงานที่สมนัยกันรวมทั้งความถี่ของการเปล่งในการสลายตัวของ ^{125}I แสดงในตาราง 2 – 3

ควรจดจำเสมอว่าการสลายตัวของ ^{99}Mo และ ^{125}I นั้น รังสีแกมมาและเอ็กซเรย์ที่เปล่งออกมามิใช่ได้จากนิวไคลด์ ^{99}Mo และ ^{125}I แต่ได้จาก ^{99}Tc และ ^{125}Te ตามลำดับ แม้ว่าในห้องปฏิบัติการรังสีดังกล่าวนั้นหมายถึงแกมมาของไอโอดีน – 125 และแกมมาของโมลิบดินัม – 99 สิ่งเหล่านี้จัดเหตุการณ์ดังกล่าวขึ้น อะตอมจึงอยู่ในสภาพแตกตัว 2 ครั้ง ขบวนการทำนองเดียวกันนี้ อาจเกิดขึ้นในช่องว่างของวงโคจร L หรือ M

เป็นการเรียกชื่อผิด

การสลายตัวมักเกิดตามอนุกรมดังนี้

$$^{99}\mathrm{Mo} \xrightarrow{\beta^-} {}^{99}\mathrm{Tc}^{*} \xrightarrow{\gamma} {}^{99}\mathrm{Tc}$$

$$^{125}\mathrm{I} \xrightarrow{\text{K capture}} {}^{125}\mathrm{Te}^{*} \xrightarrow{\gamma} {}^{125}\mathrm{Te}$$