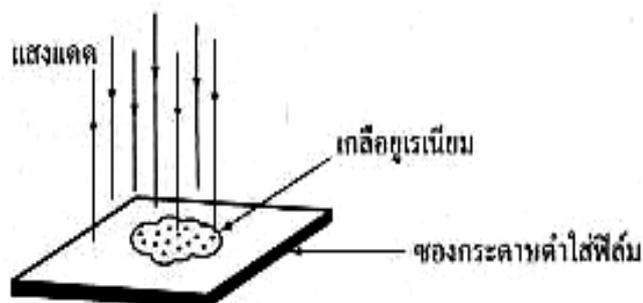


บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับรังสี

การค้นพบเกี่ยวกับธาตุกัมมันตรังสีเกิดขึ้นเมื่อปี ค.ศ.1896 โดย อองรี เบคเคอเรล (Henry Becquerel) นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับสารเรืองแสงชนิดต่างๆ เพื่อพิจารณาว่าสารเรืองแสงมีลักษณะเป็นอย่างไร เขาได้ทำการทดลองเพื่อทดสอบการเรืองแสงของสารชนิดต่างๆ โดยใช้ฟิล์มถ่ายรูปใส่ไว้ในช่องกระดาษสีดำซึ่งแสงแดดไม่สามารถทะลุผ่านกระดาษดำได้ แล้วนำสารเรืองแสงชนิดหนึ่งไปวางทับช่องกระดาษดำแล้วนำไปปรับแสงแดด เขาคาดว่าสารเรืองแสงดังกล่าวนี้จะปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์ออกมาเมื่อถูกแสงแดด และรังสีเอ็กซ์นี้จะทะลุผ่านกระดาษดำไปโดนฟิล์มถ่ายรูปทำให้เกิดรอยดำบนฟิล์ม เมื่อนำฟิล์มไปล้างผลึกซ์ที่ออกมา ก็เป็นไปตามที่เขาคาดการณ์ไว้ แต่เขาไม่สามารถสรุปได้ว่ารังสีที่ออกมาจากสารเรืองแสงเป็นรังสีเอ็กซ์หรือไม่ เพราะยังไม่ได้มีการตรวจสอบสมบัติของรังสีดังกล่าวนี้แต่อย่างใด ต่อมาเขาได้ใช้สารเรืองแสงที่มีสารประกอบยูเรเนียมเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วยและได้ทำการทดลองซ้ำ แต่วันที่ทำการทดลองนั้นมีฝนตก อากาศปิด และไม่มีแสงแดด เขาจึงได้นำสารเรืองแสงและช่องกระดาษดำที่มีฟิล์มถ่ายรูปไปไว้ในลิ้นชักของที่ทำงานเป็นเวลาหลายวัน เมื่อนำฟิล์มดังกล่าวไปล้าง พบว่ามีรอยดำบนแผ่นฟิล์มถ่ายรูปเกิดขึ้นอย่างมากมายและเข้มมากกว่าเดิม จากการทดลองดังกล่าวนี้ เบคเคอเรล สรุปว่า สารประกอบยูเรเนียมสามารถแผ่รังสีชนิดหนึ่งออกมาได้ตลอดเวลาอย่างต่อเนื่องโดยไม่ต้องอาศัยแสงแดด จากการศึกษาสมบัติของรังสีที่สารประกอบยูเรเนียมปล่อยออกมา มีสมบัติคล้ายคลึงกับรังสีเอ็กซ์ ดังนั้นการแผ่รังสีจึงไม่ต้องพึ่งปัจจัยจากภายนอก แต่จากความรู้เบื้องต้นเป็นที่ทราบกันดีว่า การแผ่รังสีเอ็กซ์จะเกิดขึ้นเองไม่ได้ นอกจากนี้ เบคเคอเรล ยังพบว่า สารประกอบตัวใดที่มีธาตุยูเรเนียมเป็นองค์ประกอบสามารถแผ่รังสีชนิดนี้ออกมาได้ แสดงว่า รังสีดังกล่าวนี้เกิดจาก **ธาตุยูเรเนียม** ดังแสดงในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 การค้นพบกัมมันตภาพรังสีของเบคเคอเรล

(<http://ecurriculum.mv.ac.th/science/physics/m4/xray1/boo1.jpg>)

ต่อมาในปี ค.ศ. 1898 ปีแอร์ คูรี และมารี คูรี ได้ทำการศึกษาถึงลักษณะของรังสีที่แผ่ออกมาจากแร่พิทช์เบลนด์ และได้ค้นพบธาตุกัมมันตรังสีที่สำคัญอีก 2 ธาตุ คือ ธาตุโปโลเนียม และ ธาตุเรเดียม นอกจากนี้ ยังพบว่า รังสีที่แผ่ออกมานี้ทำให้อากาศแตกตัวเป็นไอออนได้ และจากการศึกษาของ รัทเทอร์ฟอร์ด เมื่อปี ค.ศ.1897 พบว่ารังสีที่แผ่ออกจากธาตุกัมมันตรังสี คือ รังสีแอลฟา มีอำนาจทะลุทะลวงต่ำ และรังสีบีตา มีอำนาจทะลุทะลวงสูงกว่า พร้อมทั้งอธิบายเพิ่มว่า กัมมันตภาพรังสีเกิดจากการสลายตัวที่เกิดขึ้นเองของอะตอมแล้วทำให้เกิดธาตุใหม่ที่มีสมบัติแตกต่างไปจากธาตุเดิม ต่อมาในปี ค.ศ.1900 ปอล วิลลาร์ด (Paul Villard) ได้ค้นพบ รังสีแกมมา ซึ่งมีอำนาจทะลุทะลวงสูงกว่ารังสีแอลฟาและบีตาค่อนข้างมาก รังสีแกมมาเป็นรังสีที่ไม่มีประจุไฟฟ้า และเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จึงไม่เบี่ยงเบนในสนามแม่เหล็ก การค้นพบต่างๆ ที่กล่าวมา เป็นจุดเริ่มต้นของการศึกษารายละเอียดของสมบัติของรังสี กระบวนการสลายตัวและการประยุกต์นำมาใช้ประโยชน์

2.2 กัมมันตภาพรังสีในธรรมชาติ

ต้นกำเนิดหรือแหล่งกำเนิดรังสีที่ใหญ่ที่สุดในธรรมชาติแก่โลกของเรา คือ ดวงอาทิตย์ ซึ่งดวงอาทิตย์สามารถดำรงอยู่ได้จนถึงทุกวันนี้ด้วยการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบรวมตัวของธาตุเบาหรือปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบฟิวชัน (fusion reaction) ของธาตุไฮโดรเจนและธาตุฮีเลียมที่มีอยู่บนดวงอาทิตย์อย่างต่อเนื่องตลอดเวลา เมื่อเกิดปฏิกิริยาแบบรวมตัวดังกล่าวนี้แล้ว ก็จะก่อให้เกิดรังสีจากดวงอาทิตย์ให้ออกมาสู่ระบบสุริยะจักรวาลอย่างมากมาย เช่น รังสีแสงที่เรามองเห็น (visible light) รังสีเอ็กซ์ (x-rays) รังสีแกมมา (gamma rays) รังสีคอสมิก (cosmic rays) ที่มีพลังงานสูงตลอด จนคลื่นรังสีที่มีพลังงานต่ำ เช่น คลื่นความร้อน คลื่นไมโครเวฟ (microwave) คลื่นเรดาร์ คลื่นโทรทัศน์ และคลื่นวิทยุ เป็นต้น

สำหรับรังสีที่มีพลังงานสูง เช่น รังสีเอ็กซ์ รังสีแกมมา และรังสีคอสมิก เรารวมเรียกว่า รังสีนิวเคลียร์ ทั้งนี้เนื่องจากรังสีเหล่านี้เกิดจากการสลายตัวของนิวเคลียสของสารกัมมันตรังสีนั่นเอง ต้นกำเนิดหรือแหล่งกำเนิดรังสีนิวเคลียร์ในธรรมชาติอีกแห่งหนึ่งที่สำคัญ ก็คือ โลก (earth) เนื่องจากโลกเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของระบบสุริยะจักรวาล ที่เกิดมาจากทฤษฎีอภิมหากัมปนาท หรือ ทฤษฎีบิ๊กแบง (big bang theory) เป็นที่ทราบกันดีว่าทฤษฎีอภิมหากัมปนาทนี้เกิดมาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบรวมตัวของอนุภาคเล็กๆ เป็นหลัก แล้วเกิดมีการรวมตัวกันขึ้นของสสารต่างๆ มาเป็นโลกมนุษย์ โดยที่สสารต่างๆเหล่านั้นมีอยู่ 3 สถานะ คือ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส จะเห็นได้ว่าของแข็งบนโลก ก็คือ ดิน หิน และแร่ธาตุต่างๆ ส่วนของเหลว คือ น้ำและของเหลวอื่นๆ และแก๊ส คือ อากาศและแก๊สชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ทั้งในดิน ในน้ำ และในอากาศ สสารต่างๆที่อยู่บนโลกเหล่านี้ล้วนแต่มีสารกัมมันตรังสีเป็นส่วนประกอบอยู่ด้วยโดยมีอัตราส่วนที่เป็นไปตามธรรมชาติ

มนุษย์เราที่อาศัยอยู่บนโลกที่มีกัมมันตภาพรังสีในสิ่งแวดล้อมอยู่ทั่วไป ส่วนใหญ่เป็นรังสีที่มีอยู่ตามธรรมชาติ (natural occurring radiation) และบางส่วนเกิดขึ้นจากกิจกรรมของมนุษย์ (man-made radiation) ต้นกำเนิดของกัมมันตภาพรังสีในสิ่งแวดล้อม แบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

1. กัมมันตภาพรังสีจากพื้นโลก ที่มาจากแร่ธาตุกัมมันตรังสีต่าง ๆ ที่เป็นส่วนประกอบของพื้นผิวโลกที่มีมาตั้งแต่โลกกำเนิดขึ้นมาแล้ว มีนิวไคลด์กัมมันตรังสี หรือธาตุที่ให้รังสีที่พบในธรรมชาติมากกว่า 60 ชนิด เป็นแหล่งกำเนิดรังสีที่สำคัญของปริมาณรังสีที่เราได้รับในแต่ละวัน

2. กัมมันตภาพรังสีที่เกิดจากรังสีคอสมิกที่มาจากนอกโลก และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างรังสีคอสมิกกับแก๊สและธาตุต่างๆที่มีอยู่ในชั้นบรรยากาศของโลกแล้วก่อให้เกิดสารกัมมันตรังสีขึ้นอีกมากมาย

3. กัมมันตภาพรังสีที่มนุษย์สร้างขึ้นเกิดขึ้นเนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์และการนำเอาสารกัมมันตรังสีมาใช้ในวงการต่างๆ เช่น การแพทย์ อุตสาหกรรม และการเกษตรกรรม เป็นต้น ซึ่งมีอัตราส่วนที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับผลรวมของปริมาณรังสีทั้งหมดที่มีอยู่ทั้งหมดในธรรมชาติ

สำหรับนิวไคลด์กัมมันตรังสีเริ่มต้นที่ได้ถือกำเนิดมาพร้อมกับโลกของเรา มักจะมีการสลายตัวแบบต่อเนื่องเป็นอนุกรม ซึ่งสามารถจัดแบ่งออกเป็นอนุกรมของนิวไคลด์กัมมันตรังสีเริ่มต้นได้ 3 อนุกรมดังต่อไปนี้ คือ

2.2.1 อนุกรมทอเรียม (Thorium series; $4n$ series) สารกัมมันตรังสีเริ่มต้นในอนุกรมนี้ได้แก่ ^{232}Th ซึ่งมีค่าครึ่งชีวิตเท่ากับ 1.41×10^{10} ปี มีการสลายตัวอย่างต่อเนื่อง จนได้นิวไคลด์ที่เสถียร คือ ^{208}Pb สารกัมมันตรังสีในอนุกรมชุดนี้จะมีค่าเลขมวล (A) ที่หารด้วย 4 ลงตัว ดังนั้นบางครั้งเรียกอนุกรมชุดนี้ว่า ชุด $4n$ การสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในอนุกรมนี้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

2.2.2 อนุกรมยูเรเนียม (Uranium series; $4n+2$ series) สารกัมมันตรังสีเริ่มต้นในอนุกรมนี้ได้แก่ ^{238}U ซึ่งมีค่าครึ่งชีวิตเท่ากับ 4.47×10^9 ปี มีการสลายตัวอย่างต่อเนื่องจนได้นิวไคลด์ที่เสถียร คือ ^{206}Pb สารกัมมันตรังสีในอนุกรมชุดนี้จะมีค่าเลขมวล (A) ที่หารด้วย 4 แล้วเหลือเศษ 2 การสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในอนุกรมนี้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

2.2.3 อนุกรมแอกทิเนียม (Actinium series; $4n+3$ series) สารกัมมันตรังสีเริ่มต้นในอนุกรมนี้ได้แก่ ^{235}U ซึ่งมีค่าครึ่งชีวิตเท่ากับ 7.04×10^8 ปี มีการสลายตัวอย่างต่อเนื่อง จนได้นิวไคลด์ที่เสถียร คือ ^{207}Pb สารกัมมันตรังสีในอนุกรมชุดนี้จะมีค่าเลขมวล (A) ที่หารด้วย 4 แล้วเหลือเศษ 3 การสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในอนุกรมนี้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.3

นอกจากนี้ยังมีอนุกรมนิวไคลด์กัมมันตรังสีอีกอนุกรมหนึ่ง มีชื่อว่า อนุกรมเนปทูเนียม (Neptunium series; $4n+1$ series) ซึ่งมี ^{241}Pu เป็นสารกัมมันตรังสีเริ่มต้นในอนุกรมนี้ ซึ่งมีค่าครึ่งชีวิตสั้นเพียง 14.4 ปี และโดยส่วนใหญ่นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่มีการสลายแบบต่อเนื่องที่มีอยู่

ในอนุกรมมักมีค่าครึ่งชีวิตที่ไม่ยาวนานมากนัก ในปัจจุบันจึงไม่พบอนุกรมกัมมันตรังสีนี้ในธรรมชาติ

ตารางที่ 2.1 ชนิดของนิวไคลด์ ชื่อเดิมของนิวไคลด์ ค่าครึ่งชีวิต และรังสีส่วนใหญ่ที่ปลดปล่อยออกมาในอนุกรมทอเรียม

นิวไคลด์กัมมันตรังสี	ชื่อเดิม	ครึ่งชีวิต	รังสีส่วนใหญ่ที่ปลดปล่อย
^{232}Th	Thorium	1.4×10^{10} y	$\alpha, <1\% \gamma$
^{228}Ra	Mesothorium I	5.75 y	$\beta, <1\% \gamma$
^{228}Ac	Mesothorium II	6.13 h	β, γ
^{228}Th	Radiothorium	1.91 h	α, γ
^{224}Ra	Thorium X	3.66 d	α, γ
^{220}Rn	Emanation thoron	55.6 s	$\alpha, <1\% \gamma$
^{216}Po	Thorium A	0.15 s	$\alpha, <1\% \gamma$
^{212}Pb	Thorium B	10.64 h	β, γ
^{212}Bi	Thorium C	60.55 m	α, γ
^{212}Po (64%)	Thorium C'	0.305 μs	α
^{208}Tl (36%)	Thorium C''	3.07 m	β, γ
^{208}Pb	Thorium D	เสถียร	ไม่มี

ตารางที่ 2.2 ชนิดของนิวไคลด์ ชื่อเดิมของนิวไคลด์ ค่าครึ่งชีวิต และรังสีส่วนใหญ่ที่ปลดปล่อยออกมาในอนุกรมยูเรเนียม

นิวไคลด์กัมมันตรังสี	ชื่อเดิม	ครึ่งชีวิต	รังสีส่วนใหญ่ที่ปลดปล่อย
^{238}U	Uranium I	4.47×10^9 y	$\alpha, <1\% \gamma$
^{234}Th	Uranium X_1	24.1 d	β, γ
^{234m}Pa	Uranium X_2	1.17 m	$\beta, <1\% \gamma$
^{234}Pa	Uranium Z	6.69 y	β, γ
^{234}U	Uranium II	244,500 y	$\alpha, <1\% \gamma$
^{230}Th	Ionium	7.7×10^4 y	$\alpha, <1\% \gamma$
^{226}Ra	Radium	1,600 y	α, γ

นิวไคลด์กัมมันตรังสี	ชื่อเดิม	ครึ่งชีวิต	รังสีส่วนใหญ่ที่ปลดปล่อย
^{222}Rn	Emanation radon	3.8 d	$\alpha, <1\% \gamma$
^{218}Po	Radium A	3.05 m	$\alpha, <1\% \gamma$
^{214}Pb (99.98%)	Radium B	26.8 m	β, γ
^{218}At (0.02%)	Astatine	2 s	α, γ
^{214}Bi	Radium C	19.9 m	β, γ
^{214}Po (99.98%)	Radium C'	164 μs	$\alpha, <1\% \gamma$
^{210}Tl (0.02%)	Radium C''	1.3 m	β, γ
^{210}Pb	Radium D	22.3 y	β, γ
^{210}Bi	Radium E	5.01 d	β
^{210}Po (~100%)	Radium F	138.4 d	$\alpha, <1\% \gamma$
^{206}Tl (0.00013%)	Radium E''	4.20 m	$\beta, <1\% \gamma$
^{206}Pb	Radium G	เสถียร	ไม่มี

ตารางที่ 2.3 ชนิดของนิวไคลด์ ชื่อเดิมของนิวไคลด์ ค่าครึ่งชีวิต และ รังสีส่วนใหญ่ที่ปลดปล่อยออกมาในอนุกรมเอกทึบ

นิวไคลด์กัมมันตรังสี	ชื่อเดิม	ครึ่งชีวิต	รังสีส่วนใหญ่ที่ปลดปล่อย
^{235}U	Actinouranium	7.038×10^8 y	α, γ
^{231}Th	Uranium Y	25.5 h	β, γ
^{231}Pa	Protoactinium	2.276×10^4 y	α, γ
^{227}Ac	Actinium	21.77 y	$\beta, <1\% \gamma$
^{227}Th (98.62%)	Radioactinium	18.72 y	α, γ
^{223}Fr (1.38%)	Actinium K	21.8 m	β, γ
^{223}Ra	Actinium X	11.43 d	α, γ
^{219}Rn	Emanation actinon	3.96 s	α, γ

นิวไคลด์กัมมันตรังสี	ชื่อเดิม	ครึ่งชีวิต	รังสีส่วนใหญ่ที่ปลดปล่อย
	Actinium A	1.78 ms	$\alpha, <1\% \gamma$
$^{211}\text{Pb} (\sim 100)$	Actinium B	36.1 m	β, γ
$^{215}\text{At} (0.00023\%)$	Astatine	~ 0.1 ms	$\alpha, <1\% \gamma$
	Actinium C	2.14 m	α, γ
$^{211}\text{Po} (0.273\%)$	Actinium C'	0.516 s	α, γ
$^{207}\text{Tl} (99.73\%)$	Actinium C''	4.77 m	$\beta, <1\% \gamma$
^{207}Pb	Actinium D	เสถียร	ไม่มี

สำหรับนิวไคลด์เริ่มต้น ค่าครึ่งชีวิต และนิวไคลด์สุดท้ายในอนุกรมกัมมันตรังสีของทั้ง 4 อนุกรมได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 นิวไคลด์เริ่มต้น ค่าครึ่งชีวิต และนิวไคลด์สุดท้ายของอนุกรมกัมมันตรังสีทั้ง 4 อนุกรมที่มีอยู่ในธรรมชาติ

ชื่ออนุกรม	นิวไคลด์เริ่มต้น		นิวไคลด์สุดท้าย
	สัญลักษณ์	ค่าครึ่งชีวิต(ปี)	
ทอเรียม (4n)	^{232}Th	1.4×10^{10}	^{208}Pb
เนปทูเนียม (4n+1)	^{241}Pu	14.4	^{209}Bi
ยูเรเนียม (4n+2)	^{238}U	4.47×10^9	^{206}Pb
แอกทิเนียม (4n+3)	^{235}U	7.038×10^8	^{207}Pb

นอกจากนี้ ยังมีนิวไคลด์กัมมันตรังสีเริ่มต้นที่ไม่มีการสลายตัวแบบต่อเนื่อง ที่นอกเหนือไปจากนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่มีอยู่ในอนุกรมกัมมันตรังสีทั้ง 4 อีกด้วย แต่ก็มีจำนวนไม่มากนัก เช่น ^{40}K , ^{87}Rb , ^{113}Cd และ ^{115}In เป็นต้น ดังได้แสดงนิวไคลด์กัมมันตรังสีประเภท

ดังกล่าวนี้ในตารางที่ 2.5 จะเห็นได้ว่า นิวไคลด์กัมมันตรังสีเริ่มต้นทั้ง 3 อนุกรม และ ^{40}K จึงเป็นแหล่งกำเนิดค่ากัมมันตภาพรังสีในธรรมชาติที่สำคัญ ซึ่งคงจะหลีกเลี่ยงการรับรังสีไม่ได้

ส่วนนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดจากรังสีคอสมิกที่เป็นผลเนื่องมาจากปฏิกิริยาของรังสีคอสมิกกับสารต่างๆที่มีอยู่ในชั้นบรรยากาศของโลก เช่น การทำปฏิกิริยานิวเคลียร์ระหว่างนิวตรอนที่มีอยู่ในรังสีคอสมิกกับ ^{14}N แล้วได้ ^{14}C และนิวตรอนดังกล่าวนี้ทำปฏิกิริยากับ ^6Li แล้วได้ ^3H ดังสมการของปฏิกิริยานิวเคลียร์ $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$ และ $^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีนิวไคลด์อื่นๆอีกเช่น ^7Be , ^{10}Be , ^{18}F , ^{22}Na , ^{24}Na , ^{26}Al , ^{31}Si , ^{32}Si , ^{32}P , ^{33}P , ^{35}S , ^{36}S , ^{36}Cl , ^{38}Cl , ^{38}Mg , ^{39}Cl , ^{38}S และ ^{80}Kr ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.6 ส่วนนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นในกรณีนี้ที่เกี่ยวข้องกับมนุษย์มากที่สุด ได้แก่ ^3H , ^7Be , ^{14}C และ ^{11}Na

ตารางที่ 2.5 นิวไคลด์กัมมันตรังสีบางชนิดในธรรมชาติที่ไม่ปรากฏอยู่ในอนุกรมกัมมันตรังสีทั้ง 4 อนุกรม

นิวไคลด์กัมมันตรังสี	ค่าครึ่งชีวิต(ปี)	รังสีที่ปลดปล่อย	กัมมันตภาพจำเพาะจากเปลือกโลก(Bq/kg)
^{40}K	1.26×10^9	β, γ	630
^{50}V	6×10^{15}	γ	2×10^{-5}
^{87}Rb	4.8×10^{10}	β	70
^{115}In	6×10^{14}	β	2×10^{-5}
^{123}Te	1.2×10^{13}	X-rays	2×10^{-7}
^{138}La	1.12×10^{11}	β, γ	2×10^{-2}
^{144}Nd	2.4×10^{15}	α	3×10^{-4}
^{147}Sm	1.05×10^{11}	α	0.7
^{152}Gd	1.1×10^{14}	α	7×10^{-6}
^{174}Hf	2.0×10^{15}	α	2×10^{-7}
^{176}Lu	2.2×10^{10}	e^-, γ	0.04
^{187}Re	4.3×10^{10}	β	1×10^{-3}
^{190}Pt	6.9×10^{11}	α	7×10^{-8}
^{192}Pt	1×10^{15}	α	3×10^{-6}
^{209}Bi	$> 2 \times 10^{18}$	α	$< 4 \times 10^{-9}$

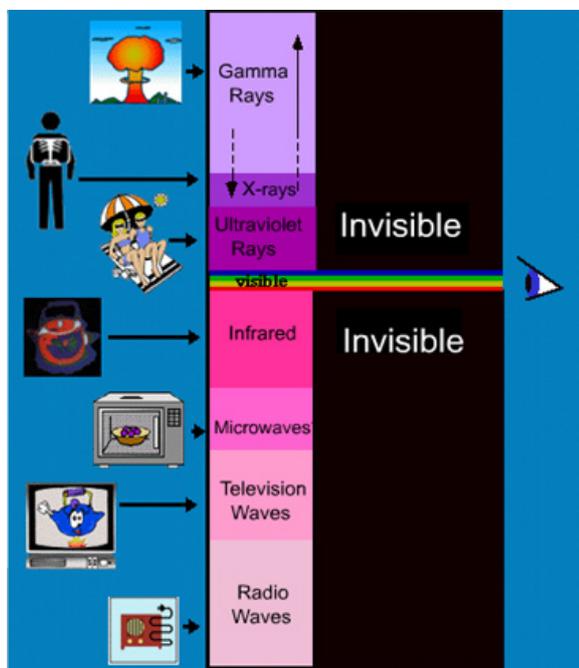
ตารางที่ 2.6 นิวไคลด์กัมมันตรังสีบางชนิดที่เกิดจากรังสีคอสมิกทำปฏิกิริยากับนิวไคลด์เป้า(target nuclide) ซึ่งเป็นธาตุต่างๆในชั้นบรรยากาศของโลก

นิวไคลด์กัมมันตรังสี	ค่าครึ่งชีวิต	นิวไคลด์เป้า	กัมมันตภาพจำเพาะ(Bq/kg)		
			อากาศ	น้ำฝน	น้ำทะเล
^{10}Be	1,600,000 y	<i>N,O</i>			2×10^{-8}
^{26}Al	720,000 y	<i>Ar</i>			2×10^{-10}
^{36}Cl	300,000 y	<i>Ar</i>			1×10^{-5}
^{80}Kr	213,000 y	<i>Kr</i>			
^{14}C	5730 y	<i>N,O</i>			5×10^{-3}
^{32}Si	~ 650 y	<i>Ar</i>			4×10^{-7}
^{39}Ar	269 y	<i>Ar</i>			6×10^{-8}
^3H	12.33 y	<i>N,O</i>	1.2×10^{-3}		7×10^{-4}
^{22}Na	2.60 y	<i>Ar</i>	1×10^{-6}	2.8×10^{-4}	
^{35}S	87.4 d	<i>Ar</i>	1.3×10^{-4}	$7.7 - 107 \times 10^{-3}$	
^7Be	53.3 d	<i>N,O</i>	0.01	0.66	
^{37}Ar	35.0 d	<i>Ar</i>	3.5×10^{-5}		
^{33}P	25.3 d	<i>Ar</i>	1.3×10^{-4}		
^{32}P	14.28 d	<i>Ar</i>	2.3×10^{-4}		
^{38}Mg	21.0 hr	<i>Ar</i>			
^{24}Na	15.0 hr	<i>Ar</i>		$3.0 - 5.9 \times 10^{-3}$	
^{38}S	2.83 hr	<i>Ar</i>		$6.6 - 21.8 \times 10^{-2}$	
^{31}Si	2.62 hr	<i>Ar</i>			
^{18}F	109.8 m	<i>Ar</i>			
^{39}Cl	56.2 m	<i>Ar</i>		$1.7 - 8.3 \times 10^{-1}$	
^{38}Cl	37.29 m	<i>Ar</i>		$1.5 - 25 \times 10^{-1}$	
$^{34\text{m}}\text{Cl}$	31.99 m	<i>Ar</i>			

2.3 ประเภทของรังสี

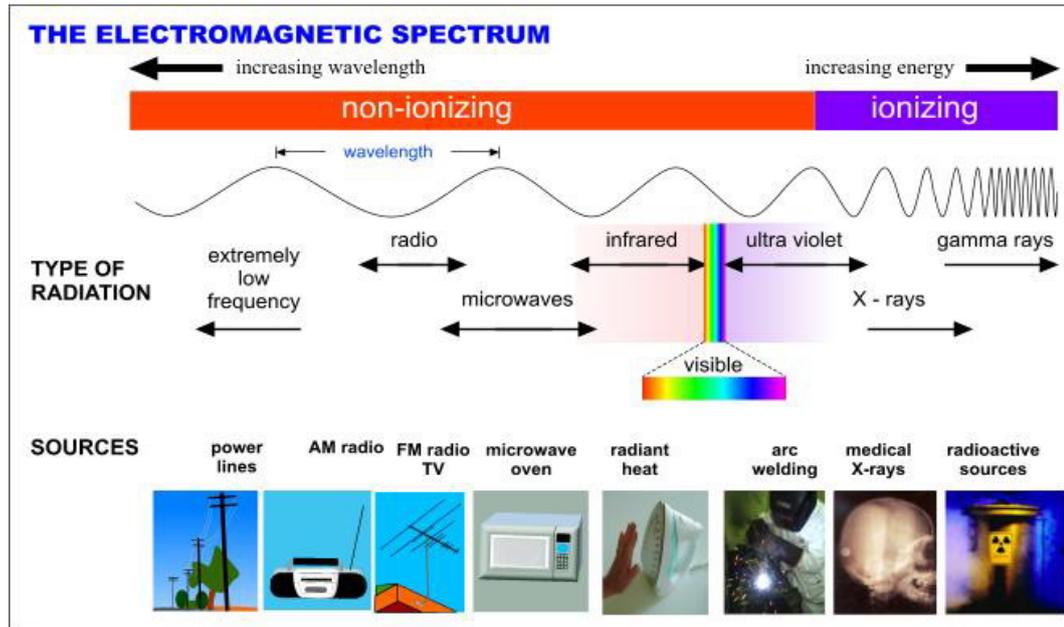
เมื่อกล่าวถึงคำว่า รังสี คนส่วนใหญ่มักจะกลัวและมีความรู้สึกว่าเป็นปรากฏการณ์อย่างหนึ่งที่ลึกลับ เป็นอันตรายและน่ากลัว ทั้งนี้เนื่องจากรังสีเป็นสิ่งที่ไม่เป็นที่รู้จัก ไม่คุ้นเคย ไม่สามารถจับต้อง สัมผัส หรือ มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า แต่ทราบว่าจะสามารถทำอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้ สำหรับความหมายของคำว่า รังสี นั้น คือ พลังงานรูปหนึ่งถูกปลดปล่อยจากแหล่งกำเนิดของรังสี แล้ววิ่งผ่านเข้าไปในตัวกลาง รังสี อาจอยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือในรูปแบบอนุภาคทั้งที่มีประจุและไม่มีประจุรังสี อาจแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้ดังต่อไปนี้

1. รังสีที่ไม่ก่อให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน (non-ionizing radiation) เป็นรังสีที่เมื่อแผ่ออกมาจากแหล่งกำเนิดแล้ววิ่งไปกระทบวัตถุหรือตัวกลางใดๆ จากนั้นจะถ่ายทอดพลังงานของรังสี ให้แก่อิเล็กตรอนที่อยู่รอบนิวเคลียสของอะตอมของวัตถุหรือตัวกลางนั้นๆ แต่ไม่สามารถทำให้อิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานหลุดออกจากวงโคจรรอบนิวเคลียสและอะตอมของตัวกลางยังคงสภาพเป็นกลางอยู่เหมือนเดิม แต่จะทำให้อิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานอยู่ในสภาวะที่ตื่นตัว (excited state) หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นสภาวะที่อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงกว่าระดับปกติ (ground state) สำหรับตัวอย่างของรังสีประเภทนี้ได้แก่ รังสีอุลตราไวโอเล็ต (ultraviolet) แสงที่มองเห็นด้วยตาเปล่า (visible light) รังสีอินฟราเรด (infrared) แสงเลเซอร์ (laser) คลื่นวิทยุ (radio frequency) คลื่นไมโครเวฟ (microwave) และ คลื่นเรดาร์ (radar) เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 2.2 และภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.2 แถบพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

(http://www.windows.ucar.edu/tour/link=/earth/Climate/cli_spectrum.html)



ภาพที่ 2.3 รังสีที่ไม่ก่อให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนและรังสีที่ก่อให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน
(<http://www.tint.or.th/nkc/nkc5001/nkc5001c1.jpg>)

2. รังสีที่ก่อให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน (ionizing radiation) เป็นรังสีที่เมื่อแผ่ออกมาจากแหล่งกำเนิดแล้วเมื่อกระทบกับวัตถุหรือตัวกลางใดๆ แล้วจะถ่ายเทพลังงานให้แก่อิเล็กตรอนของอะตอมของวัตถุหรือตัวกลางนั้นๆ และทำให้อิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานนั้นหลุดออกจากวงโคจรรอบๆ นิวเคลียสของอะตอมทำให้อะตอมขาดสภาพเป็นกลางและอะตอมจะกลายสภาพเป็นอะตอมที่มีประจุบวก ส่วนอิเล็กตรอนที่หลุดออกจะมีสภาพเป็นประจุลบ สำหรับตัวอย่างของรังสีประเภทนี้ได้แก่ รังสีที่อยู่ในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย รังสีเอ็กซ์ (x-ray) และรังสีแกมมา (gamma ray) รังสีที่อยู่ในรูปอนุภาค ซึ่งประกอบด้วย อนุภาคบีตา (beta particle) อนุภาคแอลฟา (alpha particle) อนุภาคโปรตอน (proton particle) และ อนุภาคนิวตรอน (neutron particle) ดังแสดงในภาพที่ 2.3

สำหรับชนิดของรังสีที่ก่อให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน พบว่ารังสีที่ก่อให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนจะเกี่ยวข้องกับงานด้านรังสีวิทยาเป็นส่วนใหญ่และอันตรายจากรังสีที่ไม่ก่อให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนนั้นมีน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับรังสีชนิดก่อให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน รังสีชนิดที่ก่อให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ 2 ชนิด คือ

2.1. รังสีที่มีประจุ (charged particles radiation) เป็นรังสีที่เมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางแล้ว จะสามารถทำให้อะตอมของตัวกลางนั้นแตกตัวเป็นไอออนได้โดยตรง (direct ionizing radiation) เช่น อนุภาคแอลฟา อนุภาคบีตา เป็นต้น

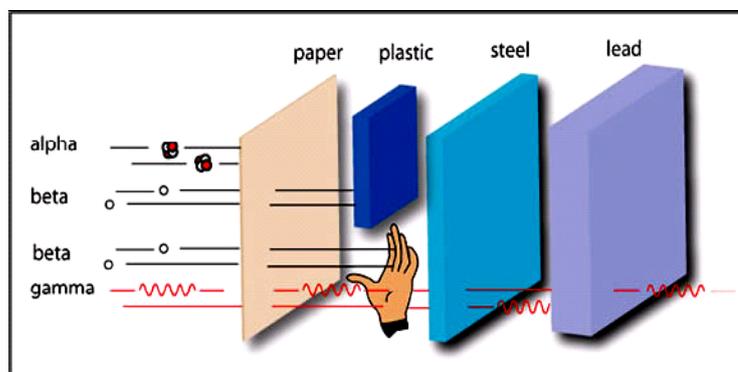
2.2. รังสีที่ไม่มีประจุ (uncharged particles radiation) เป็นรังสีที่เมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางแล้วสามารถทำให้อะตอมของตัวกลางนั้นแตกตัวเป็นไอออนได้ แต่มิได้เกิดขึ้นโดยตรง (indirect ionizing radiation) กล่าวคือ เมื่อรังสีเหล่านี้เคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในตัวกลางใดๆ แล้วตอนแรกจะถ่ายเทพลังงานให้กับอะตอมของตัวกลางนั้นๆ ก่อน แล้วจึงทำให้อนุภาคที่มีประจุของอะตอมของตัวกลางดังกล่าวนี้มีพลังงานและความเร็วสูงขึ้น จนสามารถทำให้อะตอมที่อยู่ข้างเคียงเกิดการแตกตัวเป็นไอออนได้อีก รังสีประเภทนี้ได้แก่ รังสีนิวตรอน รังสีแกมมา เป็นต้น

สำหรับรังสีที่เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย มีอยู่ด้วยกัน 3 ชนิด ได้แก่ รังสีแอลฟา รังสีบีตา และรังสีแกมมา ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

รังสีแอลฟา มีส่วนประกอบเป็นนิวเคลียสของธาตุฮีเลียมมีมวลประมาณ $4u$ มีประจุไฟฟ้า $+2e$ รังสีแอลฟาสามารถทำให้สารที่เป็นตัวกลางเกิดการแตกตัวเป็นไอออนได้เป็นอย่างดี จึงเกิดการสูญเสียพลังงานอย่างรวดเร็ว ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้อำนาจทะลุทะลวงน้อย กล่าวคือสามารถวิ่งผ่านอากาศได้ระยะทางเพียง 5 เซนติเมตร โดยประมาณ และเมื่อใช้แผ่น กระดาษบาง ๆ ก็สามารถกั้นรังสีแอลฟาไม่ให้ทะลุผ่านไปได้อีกแล้ว เนื่องจากรังสีแอลฟานี้ คือ นิวเคลียสของธาตุฮีเลียมมีมวล ซึ่งเป็นคุณสมบัติของอนุภาค ดังนั้นบางครั้งจึงเรียกรังสีแอลฟาว่า อนุภาคแอลฟา

รังสีบีตา เป็นรังสีที่มีประจุไฟฟ้าและมีค่าเท่ากับ $-1e$ และมีมวลเท่ากับมวลของอิเล็กตรอนโดยทั่วไปแล้ว สามารถกล่าวได้ว่า รังสีบีตา คือ อิเล็กตรอน รังสีบีตาสามารถวิ่งผ่านไปนอกอากาศได้ระยะทาง 0.5 เมตร โดยประมาณ ดังนั้น จะเห็นได้ว่าอำนาจทะลุทะลวงของรังสีบีตาจึงมีค่ามากกว่ารังสีแอลฟา เนื่องจากรังสีบีตา คือ อิเล็กตรอน ซึ่งเป็นอนุภาคและมีมวล ดังนั้นบางครั้งจึงเรียกรังสีบีตาว่า อนุภาคบีตา

รังสีแกมมา เป็นรังสีที่มีความเป็นกลางทางไฟฟ้า มีสมบัติเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ไม่มีมวล รังสีแกมมาจึงสามารถเคลื่อนที่ทะลุทะลวงผ่านแผ่นอะลูมิเนียมที่หนาหลายเซนติเมตรได้ จึงมีอำนาจทะลุทะลวงสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับรังสีทั้งสามชนิดนี้ ดังแสดงในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 อำนาจทะลุทะลวงของอนุภาคแอลฟา อนุภาคบีตา และรังสีแกมมา
(<http://www.tint.or.th/nkc/nkc5001/nkc5001f2.jpg>)

2.4 หน่วยวัดปริมาณรังสี

การวัดปริมาณรังสีมีความจำเป็นและสำคัญมากในทางฟิสิกส์นิวเคลียร์ เพราะจะช่วยให้ผู้ที่เกี่ยวข้องกับรังสีทั้งหลายได้รับทราบถึงปริมาณรังสีที่ได้รับ และยังช่วยให้ผู้ใช้รังสีรู้จักป้องกันอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้นได้อีกด้วย นอกจากการวัดค่ากัมมันตภาพ (activity ; A) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้บอกถึงอัตราการสลายตัวของนิวไคลด์สารกัมมันตรังสีแล้ว ยังมีหน่วยวัดปริมาณรังสีที่บอกสมบัติอื่นๆของรังสีอีก เช่น หน่วยวัดปริมาณรังสีที่บอกถึงความสามารถในการก่อให้เกิดไอออน การดูดกลืนพลังงานจากรังสีโดยตัวกลาง และผลทางชีววิทยาที่เกิดขึ้นเมื่อสิ่งมีชีวิตได้รับรังสี เป็นต้น ได้มีหน่วยงานระหว่างประเทศ คือ ICRU (International Commission on Radiation Unit and Measurement) ได้กำหนดการวัดปริมาณรังสีให้เป็นมาตรฐานเดียวกันและได้กำหนดหน่วยวัดปริมาณรังสีไว้ดังต่อไปนี้

2.4.1 หน่วยวัดค่ากัมมันตภาพ

การวัดค่ากัมมันตภาพ หรือวัดค่าความแรงของสารกัมมันตรังสี เป็นการวัดค่าของกัมมันตภาพรังสี (radioactivity) ที่แสดงอัตราการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี ในหน่วยของ ครั้งต่อวินาที (disintegration per second ; dps) คูรี (Curie ; Ci) และรัทเทอร์ฟอร์ด (Rutherford ; Rd) โดยที่กำหนดให้

1 คูรี หมายถึง ปริมาณสารกัมมันตรังสีที่สลายตัวให้ค่ากัมมันตภาพเท่ากับ 3.7×10^{10} ครั้งต่อวินาที นั่นคือ

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ dps} \dots\dots\dots(2.1)$$

1 รัทเทอร์ฟอร์ด หมายถึง ปริมาณสารกัมมันตรังสีที่สลายตัวให้ค่ากัมมันตภาพเท่ากับ 10^6 ครั้งต่อวินาที จะได้ว่า

$$1 \text{ Rd} = 10^6 \text{ dps} \dots\dots\dots(2.2)$$

นอกจากนี้ยังได้มีการกำหนดหน่วยสากลในระบบเอสไอ (SI units) ขึ้นมาใช้ในการวัดปริมาณรังสี คือ เบคเคอเรล (Becquerel ; Bq) เป็นหน่วยวัดค่ากัมมันตภาพ โดยที่

1 เบคเคอเรล หมายถึง ปริมาณสารกัมมันตรังสีที่สลายตัวให้ค่ากัมมันตภาพเท่ากับ 1 ครั้งต่อวินาที และ

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ dps} \dots\dots\dots(2.3)$$

2.4.2 เอกซ์โพเชอร์(exposure)

เอกซ์โพเชอร์ เป็นการวัดปริมาณของประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแตกตัวเป็นไอออนเมื่อมีรังสีผ่านไปในตัวกลางที่เป็นอากาศ โดยที่ หน่วยงาน ICRU ได้กำหนดให้ เรินท์เกน (Roentgen; R) เป็นหน่วยของเอกซ์โพเชอร์ และได้กำหนดให้

ปริมาณรังสี 1 เรินท์เกน หมายถึง ปริมาณรังสีที่ทำให้อากาศหนัก 0.001293 กรัม (1 ซม.³) ที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐานเกิดการแตกตัวเป็นประจุไฟฟ้า 1 *esu*

โดยส่วนใหญ่แล้ว หน่วยเรินท์เกนมักใช้กับรังสีเอ็กซ์และรังสีแกมมา ซึ่งเป็นการแสดงถึงความสามารถในการทำให้อากาศแตกตัวเป็นไอออนของโฟตอน จะได้ว่า

$$\begin{aligned} 1 R &= 1 \text{ esu} / 0.001293 \text{ g} \\ &= \frac{1 \text{ esu}}{0.001293 \text{ g}} \times \frac{1 \text{ C}}{3 \times 10^9 \text{ esu}} \times \frac{10^3 \text{ g}}{1 \text{ kg}} \\ &= 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg of standard air} \end{aligned}$$

ถ้ามีรังสีวิ่งผ่านอากาศจะทำให้เกิดการแตกตัวเป็นคู่อิออนเกิดขึ้น และเมื่อพิจารณาถึงจำนวนของคู่อิออนที่เกิดขึ้น อันเนื่องมาจากระบวนการแตกตัวเป็นไอออนนี้ พบว่า ประจุที่เกิดขึ้นจาก 1 คู่อิออน มีค่าเท่ากับ $4.8 \times 10^{-10} \text{ esu}$ และ พลังงานของโฟตอน 34 eV ทำให้เกิด 1 คู่อิออนในอากาศ ดังนั้น

$$\begin{aligned} 1 R &= \left(\frac{1 \text{ esu}}{1 \text{ cc of standard air}} \right) \left(\frac{1 \text{ ion pair}}{4.8 \times 10^{-10} \text{ esu}} \right) \\ &= 2.08 \times 10^9 \text{ ion pairs / cc of standard air} \\ 1 R &= \left(\frac{2.08 \times 10^9 \text{ ion pairs}}{0.001293 \text{ g}} \right) \left(\frac{34 \text{ eV}}{1 \text{ ion pair}} \right) (1.602 \times 10^{-12} \text{ erg / eV}) \\ &= 87.7 \text{ erg / g of standard air} \end{aligned}$$

สำหรับหน่วยในระบบเอสไอ ใช้หน่วย C/kg ในการแสดงค่าเอกซ์โพเชอร์ ดังนั้น

$$1 R = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg} \dots\dots\dots(2.4)$$

2.4.3 แอบซอร์บโดส(absorbed dose)

แอบซอร์บโดส เป็นค่าที่ใช้วัดปริมาณพลังงานของรังสีที่ตัวกลางใดๆดูดกลืนไว้ต่อหน่วยน้ำหนักของตัวกลางนั้นๆที่มีรังสีผ่านเข้าไป ใช้หน่วยวัดเป็น แร็ด (rad) ซึ่งย่อมาจาก radiation absorbed dose อาจเขียนได้ว่า

$$\text{แร็ด} = \text{พลังงานของรังสี} / \text{น้ำหนักของตัวกลาง}$$

ปริมาณรังสี 1 แร็ด หมายถึง ปริมาณของรังสีที่ตัวกลางดูดกลืนพลังงานไว้ได้ 100 เอิร์ก ต่อกรัมของตัวกลาง

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ erg/g}$$

หรือ

$$1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ J/kg}$$

ระบบหน่วยเอสไอ กำหนดให้ จูลต่อกิโลกรัม (J/kg) หรือ เกรย์ (gray; Gy) เป็นหน่วยสำหรับแอบซอร์บโดส โดยที่

$$1 \text{ J/kg} = 1 \text{ Gy} \dots\dots\dots(2.5)$$

จะได้ว่า

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad} \dots\dots\dots(2.6)$$

และเมื่อพิจารณาปริมาณรังสี 1 เรินท์เกน ซึ่งมีค่าเท่ากับพลังงาน 87.7 เอิร์ก ที่ถูกดูดกลืนไว้โดยอากาศ 1 กรัม จะเห็นได้ว่า มีค่าใกล้เคียงกับปริมาณรังสี 1 แร็ด ดังนั้น ความสัมพันธ์ของหน่วยเอกซ์โพเซอร์และแอบซอร์บโดส จึงประมาณได้ว่า

$$1 \text{ R} \approx 1 \text{ rad} \dots\dots\dots(2.7)$$

2.4.4 โดสอิควิวาเลนต์ (dose equivalent)

ถึงแม้ว่ารังสีแต่ละประเภทจะถ่ายทอดพลังงานให้กับตัวกลางเท่ากันก็ตาม แต่ตัวกลางเป็นเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต ผลทางชีววิทยาที่เกิดขึ้นจะไม่เท่ากัน เช่น นิวตรอนที่มีปริมาณ 0.01 เกรย์ ทำ

ให้เกิดผลทางชีววิทยาได้เท่ากับรังสีแกมมาที่มีปริมาณ 0.1 เกรย์ แสดงว่า นิวตรอนทำให้เกิดอันตรายได้มากกว่ารังสีแกมมาถึง 10 เท่า จะเห็นได้ว่า มีความจำเป็นต้องมีหน่วยโดสอิกิวาแลนต์ เพื่อแสดงผลของรังสีทางชีววิทยาที่เกิดขึ้น

โดยทั่วไปแล้ว จะใช้หน่วย เรม (radiation equivalent dose ; *rem*) เป็นหน่วยของโดสอิกิวาแลนต์ มักจะใช้หน่วยวัดปริมาณรังสีนี้ในงานด้านชีววิทยาทางรังสี (radiation biology) และด้านการป้องกันและความปลอดภัยทางรังสี โดยการพิจารณาจากค่าแอมซอร์บโดส ร่วมกับ ปัจจัยทางชีววิทยา อัน ได้แก่ ค่ายังผลด้านชีวภาพสัมพัทธ์ (relative biological effectiveness; *RBE*) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากการเปรียบเทียบผลทางชีววิทยาที่เกิดจากปริมาณรังสีเอกซ์พลังงาน 250 kV กับปริมาณรังสีอื่นๆที่ให้ผลเช่นเดียวกัน เขียนได้ดังต่อไปนี้

$$RBE = \frac{\text{Dose of 250 kV X-rays to produce a certain biological effect}}{\text{Dose of a given radiation to produce the same biological effect}}$$

ค่า *RBE* สำหรับรังสีต่างๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.7

สำหรับงานด้านความปลอดภัยและการป้องกันอันตรายจากรังสีนั้น ความเป็นอันตรายที่เกิดขึ้นเนื่องจากการรับรังสี ไม่เพียงแต่จะขึ้นอยู่กับปริมาณพลังงานของรังสีเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับความไวต่อรังสีและการส่งผ่านพลังงานของอวัยวะหรือเนื้อเยื่อที่รับรังสีนั้นๆ หน่วยงาน ICRU ได้แนะนำให้คำนวณค่าโดสอิกิวาแลนต์จากค่าปัจจัยการแจกแจง (distribution factor; *DF*) ซึ่งค่าดังกล่าวนี้แสดงถึงการแพร่กระจายของพลังงานของรังสีในเนื้อเยื่อหรืออวัยวะต่างๆ และค่าปัจจัยคุณภาพ (quality factor; *QF*) ซึ่งจะแสดงค่าคุณภาพของรังสีชนิดต่างๆ และได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.8 จะเห็นว่าสามารถคำนวณค่าโดสอิกิวาแลนต์ได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{dose equivalent (rem)} &= \text{absorbed dose (rad)} \times RBE \\ &= \text{absorbed dose (rad)} \times DF \times QF \end{aligned}$$

สำหรับหน่วยสากล ได้กำหนดให้ หน่วย จูลต่อกิโลกรัม (J/kg) หรือ ซีเวิร์ต (sivert; *Sv*) เป็นหน่วยของค่าโดสอิกิวาแลนต์ โดยเขียนในรูปความสัมพันธ์กับหน่วย เรม ได้ดังนี้

$$1 \text{ } J/kg = 1 \text{ } Sv \dots\dots\dots(2.8)$$

$$1 \text{ } Sv = 100 \text{ } rem \dots\dots\dots(2.9)$$

ตารางที่ 2.7 ค่า *RBE* สำหรับรังสีชนิดต่างๆ

ชนิดของรังสี	<i>RBE</i>
<i>X-rays, γ-rays</i>	1
<i>β-rays</i>	1
<i>thermal neutron</i>	4-5
<i>fast neutron</i>	10
<i>α-rays</i>	10-20

ตารางที่ 2.8 ค่า *QF* สำหรับรังสีชนิดต่างๆ

ชนิดของรังสี	<i>QF</i>
<i>X-rays, γ-rays</i>	1
<i>β-rays($E_{max} > 0.003$ MeV)</i>	1
<i>β-rays($E_{max} < 0.003$ MeV)</i>	1.7
<i>neutron, proton, alpha</i>	10
<i>heavy recoil nuclei</i>	20

สำหรับหน่วยการวัดปริมาณรังสีที่มีอยู่ทั้งหมดนี้ สามารถสรุปให้อยู่ในรูปของตาราง ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ตารางแสดงการสรุปหน่วยต่างๆที่ใช้วัดปริมาณรังสี

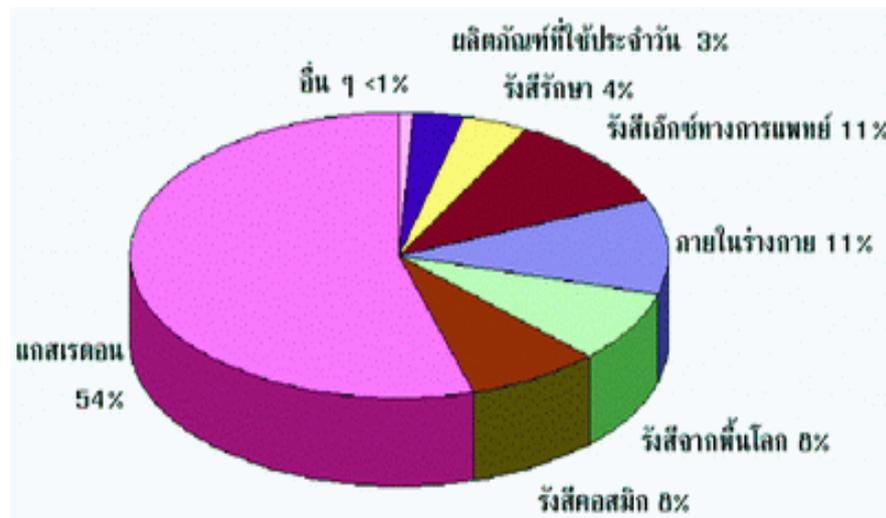
หน่วยวัดปริมาณรังสี	หน่วยเก่า	หน่วยระบบเอสไอ	ความสัมพันธ์
<i>activity</i>	<i>Ci</i>	<i>Bq</i>	$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$ $1 \text{ Bq} = 2.7 \times 10^{-11} \text{ Ci}$
<i>exposure dose</i>	<i>R</i>	<i>C/kg</i>	$1 \text{ C/kg} = 3876 \text{ R}$ $1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$
<i>absorbed dose</i>	<i>rad</i>	<i>Gy</i>	$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$ $1 \text{ rad} = 0.01 \text{ Gy}$
<i>dose equivalent</i>	<i>rem</i>	<i>Sv</i>	$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$ $1 \text{ rem} = 0.01 \text{ Sv}$

2.5 ปริมาณกัมมันตภาพรังสีที่มนุษย์ได้รับจากธรรมชาติ

นิวไคลด์สารกัมมันตรังสี พบได้ทั่วไปในธรรมชาติ ในอากาศ ในน้ำ ในดิน รวมทั้งในตัวคนเราด้วย เนื่องจากร่างกายของมนุษย์เราประกอบไปด้วยแร่ธาตุ ซึ่งได้รับมาจากธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมแต่ละวัน โดยการรับประทานอาหาร ดื่มน้ำ และ หายใจ รับเอานิวไคลด์ของสารกัมมันตรังสีที่มีอยู่ในอาหาร ในน้ำ และในอากาศเข้าไปในร่างกายอยู่ตลอดเวลา นั่นเอง

ไอโซโทปรังสีที่มีอยู่ในธรรมชาติ ทั้งในดิน น้ำ และอากาศ ได้แก่ โพแทสเซียม-40 วาเนเดียม-50 รูบิเดียม-87 อินเดียม-115 ทอเรียม-232 ยูเรเนียม-238 แก๊สเรดอน-220 และแก๊สเรดอน-222 เป็นต้น ไอโซโทปรังสีที่มีอยู่ในธรรมชาติเหล่านี้จะมีมากบ้างน้อยบ้าง แตกต่างกันไป ตามสภาพทางภูมิศาสตร์ของบริเวณเหล่านั้น รังสีมักจะมีปริมาณมากในบริเวณที่เป็นเหมืองแร่ เหมืองน้ำมัน และแหล่งแก๊สธรรมชาติ โดยปกติมนุษย์แต่ละคน ได้รับรังสีเข้าสู่ร่างกาย ซึ่งเป็นรังสีจากธรรมชาติ 82% นอกนั้นเป็นรังสี จากสิ่งที่มนุษย์สร้างขึ้นมาอีก 18%

จากภาพที่ 2.5 แสดงถึงปริมาณรังสีที่ได้รับต่อปี ร้อยละ 82 มาจากรังสีในธรรมชาติ ซึ่งส่วนมากมาจากแก๊สเรดอน อีกร้อยละ 18 ส่วนใหญ่ได้รับรังสีทางการแพทย์ จากรังสีวินิจฉัยหรือรังสีรักษา และน้อยกว่าร้อยละ 1 มาจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ และฝุ่นกัมมันตรังสี



ภาพที่ 2.5 สัดส่วนของปริมาณรังสีในธรรมชาติที่มนุษย์ได้รับต่อปี

(http://www.neutron.rmutphysics.com/news/index.php?option=com_content&task=view&id=298&Itemid=3)

และออกซิเจน พร้อมด้วยธาตุรองและธาตุปริมาณน้อยอีกมากกว่า 30 ธาตุ ส่วนไอโซโทปสารกัมมันตรังสีที่มีอยู่ในร่างกายโดยธรรมชาติ ได้แก่ ไฮโดรเจน-3 หรือ ทริเทียม (^3H ; Tritium) คาร์บอน-14 (^{14}C) โพแทสเซียม-40 (^{40}K) ทอเรียม-232 (^{232}Th) ยูเรเนียม-238 (^{238}U) ซึ่งต่างก็มีการสลายตัวให้รังสีแอลฟา รังสีเบตา และรังสีแกมมาออกมาตลอดเวลา จนทำให้สามารถใช้เครื่องมือวัดรังสีตรวจวัดปริมาณรังสีที่ออกมาจากร่างกายของมนุษย์เราได้

ปริมาณรังสีที่ร่างกายของมนุษย์ได้รับ คิดเป็นหน่วยมิลลิซีเวิร์ต เช่น ใน 1 ปี ร่างกายของเราได้รับรังสีโดยเฉลี่ยเป็น 2.23 มิลลิซีเวิร์ต โดยที่ได้มาจากบ้านเรือน 1.2 มิลลิซีเวิร์ต จากพื้นดิน 0.4 มิลลิซีเวิร์ต และจากรังสีคอสมิก คือ จากฟากฟ้าและจากดวงอาทิตย์ อีก 0.3 มิลลิซีเวิร์ต ปริมาณร่างกายได้รับรังสีจากสิ่งที่มนุษย์สร้างขึ้นมา ได้แก่ จากอาหารและเครื่องดื่ม 0.2 มิลลิซีเวิร์ต จากการรับการฉายรังสีเอกซเรย์ทางการแพทย์ 0.1 มิลลิซีเวิร์ต นอกจากนั้นมาจากฝุ่นกัมมันตรังสีที่ฟุ้งกระจายมาจากการทดลองระเบิดนิวเคลียร์ จากเครื่องมือเครื่องใช้ภายในบ้าน และจากการเดินทางจากสายการบินที่บินในที่สูงๆจะทำให้ได้รับรังสีคอสมิกเพิ่มมากขึ้นกว่าเกณฑ์ปกติที่ควรได้รับ

สำหรับแหล่งกำเนิดรังสีจากธรรมชาติที่วัดในหน่วยมิลลิเรมต่อปี (mrem/year) ได้แสดงไว้ในภาพที่ 2.6 ดังต่อไปนี้

	Source	mrem/year
	Cosmic rays	28
	The earth	26
	Radon	200
	The human body	25
	Building materials	4

ภาพที่ 2.6 แหล่งที่มาของปริมาณกัมมันตภาพรังสีในธรรมชาติ

(<http://www.nst.or.th/article/notes01/article004.htm>)

2.6 การสลายตัวของสารกัมมันตรังสี

สารกัมมันตรังสีประกอบด้วยนิวไคลด์ที่ไม่เสถียรอยู่มากมาย ซึ่งจะต้องมีการสลายตัว (decay or disintegration) ให้รังสีออกมา ทั้งนี้เพื่อปรับตัวเองให้เป็นนิวไคลด์ที่เสถียรมากขึ้น กระบวนการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีเป็นไปในลักษณะสุ่ม (random) ซึ่งไม่สามารถกำหนดได้ว่านิวไคลด์ใดจะสลายตัวเมื่อใด แต่แต่ละสารกัมมันตรังสีจะมีสมบัติการสลายตัว เช่น อัตราการสลายตัว ชนิดของรังสี และปริมาณรังสีที่แตกต่างกัน ในที่นี้ จะกล่าวถึง การสลายตัวของสารกัมมันตรังสี และกฎการสลายตัว

จากการศึกษาและทดลองเกี่ยวกับการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีนั้น พบว่า อัตราการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีเป็นสัดส่วนกับจำนวนนิวไคลด์ของสารกัมมันตรังสีที่มีอยู่ในขณะเวลานั้น ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ได้ว่า

อัตราการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี \propto จำนวนนิวไคลด์ของสารกัมมันตรังสี

เมื่อ N เป็นจำนวนนิวไคลด์ของสารกัมมันตรังสีที่เวลา t ใดๆ ซึ่งจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ ตามเวลาที่ผ่านไป ดังนั้น จากความสัมพันธ์ข้างต้นสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังต่อไปนี้

$$-\frac{dN}{dt} \propto N$$

โดยที่ เครื่องหมายลบ (-) หมายถึงการลดลงของจำนวนนิวไคลด์ของสารกัมมันตรังสี

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt$$

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt$$

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t$$

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t}$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \dots\dots\dots(2.10)$$

เมื่อ N_0 คือ จำนวนนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เวลาเริ่มต้น ($t = 0$ วินาที)

N คือ จำนวนนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เวลา t ใดๆ

t คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการสลายตัว

λ คือ ค่าคงที่ของการสลายตัว(decay constant)

2.7 กัมมันตภาพ (activity ; A)

ค่ากัมมันตภาพของสารกัมมันตรังสี หมายถึง อัตราการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีหรือจำนวนของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่สลายตัวต่อหน่วยเวลา หน่วยของกัมมันตภาพ คือ เบคเคอเรล (Becquerel; Bq) ซึ่งได้ตั้งชื่อของหน่วยการวัดค่ากัมมันตภาพเพื่อให้เกียรติแก่ นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส ชื่อ อองตวน อองรี เบคเคอเรล เป็นผู้ค้นพบสารกัมมันตรังสี ค่ากัมมันตภาพของสารกัมมันตรังสี จะแปรผันตรงกับจำนวนของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ซึ่งเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังต่อไปนี้

$$A \propto N$$

ดังนั้น จะได้ว่า

$$A = \lambda N \dots\dots\dots(2.11)$$

เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 4.1 โดยคูณตลอดด้วย λ จะได้ว่า

$$\lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

ดังนั้น

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \dots\dots\dots(2.12)$$

เมื่อ A_0 คือ ค่ากัมมันตภาพที่เวลาเริ่มต้น ($t = 0$ วินาที)

A คือ ค่ากัมมันตภาพที่เวลา t ใดๆ

t คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการสลายตัว

λ คือ ค่าคงที่ของการสลายตัว

2.8 ค่าครึ่งชีวิต (half life; $t_{1/2}$)

ค่าครึ่งชีวิต หมายถึง ระยะเวลาที่ธาตุกัมมันตรังสีใช้ในการสลายตัวแล้วมีปริมาณเหลืออยู่เพียงครึ่งหนึ่งของเดิม (ดูภาพที่ 2.7) ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากสมการที่ 2.10 เมื่อนิวไคลด์ใดๆ มีการสลายตัวเป็นเวลานานเท่ากับค่าครึ่งชีวิตของนิวไคลด์ จะทำให้ ค่า $N = \frac{N_0}{2}$ ดังนั้น จะได้ว่า

จากสมการที่ 2.10

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

เมื่อเวลาผ่านไป $t = t_{1/2}$ จะได้ว่า

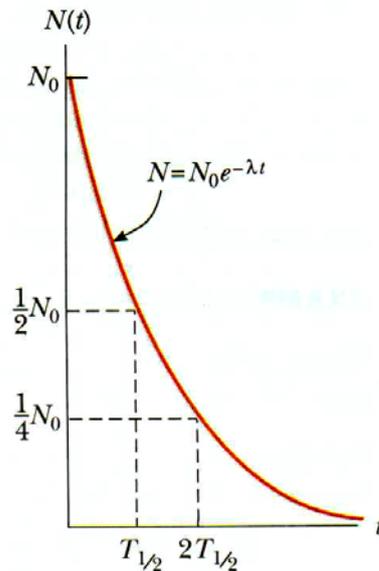
$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}}$$

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda t_{1/2}}$$

$$\ln \frac{1}{2} = -\lambda t_{1/2}$$

$$-0.693 = -\lambda t_{1/2}$$

$$t_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} \dots\dots\dots(2.13)$$



ภาพที่ 2.7 กราฟการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี

2.9 อันตรกิริยาของรังสีแกมมากับสสาร

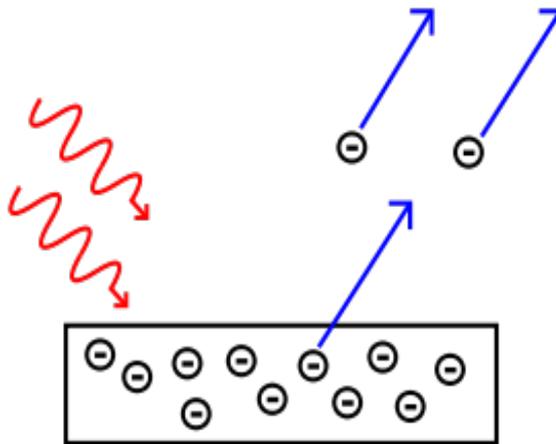
รังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อตกกระทบกับสสารและผ่านเข้าไปในเนื้อสสารที่ใช้เป็นตัวกลางบางชนิด จะทำให้เกิดอันตรกิริยากับสสารนั้นขึ้น โดยที่อันตรกิริยาของรังสีแกมมากับสสารที่สำคัญๆมีอยู่ 3 รูปแบบ คือ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก (photoelectric effect) ปรากฏการณ์คอมพ์ตัน (compton effect) และการผลิตสารคู่ (pair production) ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

2.9.1 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก

เป็นการเกิดอันตรกิริยาระหว่างรังสีแกมมากับอะตอมของสสาร ซึ่งเมื่ออะตอมของสสารถูกชนโดยรังสีแกมมา จะเกิดการถ่ายทอดพลังงานทั้งหมดให้กับอิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากอะตอม เรียกว่า โฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron) และอิเล็กตรอนที่หลุดออกมานี้มีพลังงานจลน์เท่ากับผลต่างของพลังงานของรังสีแกมมากับค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในอะตอม ดังแสดงในภาพที่ 2.8 และ สมการที่ 2.14

$$T_e = E_\gamma - B_e \quad \dots\dots\dots(2.14)$$

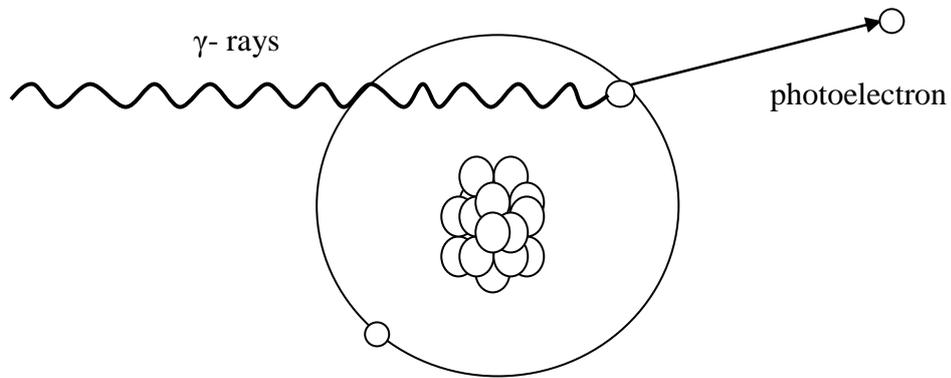
- เมื่อ T_e คือ พลังงานจลน์ของโฟโตอิเล็กตรอน หน่วย keV
 E_γ คือ พลังงานของรังสีแกมมาที่ตกกระทบสสาร หน่วย keV
 B_e คือ พลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในอะตอม หน่วย keV



ภาพที่ 2.8 แผนภาพการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก

(http://content.answers.com/main/content/wp/en-commons/thumb/3/36/275px-Photoelectric_effect.svg.png)

การที่มีอิเล็กตรอนหลุดออกมาจากอะตอมนี้ทำให้เกิดที่ว่างขึ้นมาทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นพลังงานถัดไปตกลงมาแทนที่ทำให้เกิดการคายรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัว (characteristics x-ray) ของอิเล็กตรอนที่วิ่งเข้ามาแทน รังสีเอ็กซ์ที่เกิดขึ้นนี้สามารถที่จะทำอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นที่สูงกว่าในอะตอม แล้วทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาอีก เรียกว่า ออร์เจอร์อิเล็กตรอน (auger electron) ซึ่งทั้งอิเล็กตรอนและรังสีเอ็กซ์ที่เป็นผลจากการเกิดอันตรกิริยาดังกล่าว สามารถถูกดูดกลืนได้โดยอะตอมของผลึกที่ใช้เป็นหัววัดรังสี ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริกแล้วอะตอมของผลึกจะสามารถดูดกลืนพลังงานของรังสีแกมมาได้ทั้งหมด จึงนิยมใช้ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริกในการอธิบายการดูดกลืนพลังงานของรังสีแกมมาในการทำารทดลองและตรวจวัดทางรังสี และความน่าจะเป็นในการเกิดอันตรกิริยาจะขึ้นอยู่กับค่าเลขอะตอมของตัวดูดกลืน ดังแสดงในภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 การเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก

2.9.2 ปรากฏการณ์คอมพ์ตัน

การเกิดปรากฏการณ์คอมพ์ตัน หมายถึง การที่รังสีแกมมาหรือโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับ $h\nu$ วิ่งเข้ามาชนอิเล็กตรอนที่อยู่ในอะตอมของสสารแบบยืดหยุ่น คือ ทั้งโมเมนตัมและพลังงานไม่สูญหายไป รังสีแกมมาจะถ่ายทอดพลังงานบางส่วนให้กับอิเล็กตรอนที่ถูกชน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา เรียกว่า **คอมพ์ตันอิเล็กตรอน (compton electron)** และเคลื่อนที่ด้วยพลังงานจลน์ T_e ในทิศทางทำมุม ϕ กับทิศทางเดิมของรังสีแกมมาที่วิ่งเข้ามา ส่วนรังสีแกมมาจะมีพลังงานลดลงเป็น $h\nu'$ และเกิดการกระเจิงไปเป็นมุม θ ใดๆ ที่คิดเทียบกับทิศทางเดิมของรังสีแกมมา เช่นกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.10

เนื่องจากการชนแบบยืดหยุ่น เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ของพลังงานเริ่มต้นของรังสีแกมมา พลังงานของรังสีแกมมาที่กระเจิง และพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่ถูกชน ได้ดังนี้

$$h\nu = h\nu' + T_e \dots\dots\dots (2.15)$$

จากกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม จะได้ว่า

ในแนวแกน X

$$\frac{h\nu}{c} = \frac{h\nu'}{c} \cos \theta + P \cos \theta \dots\dots\dots (2.16)$$

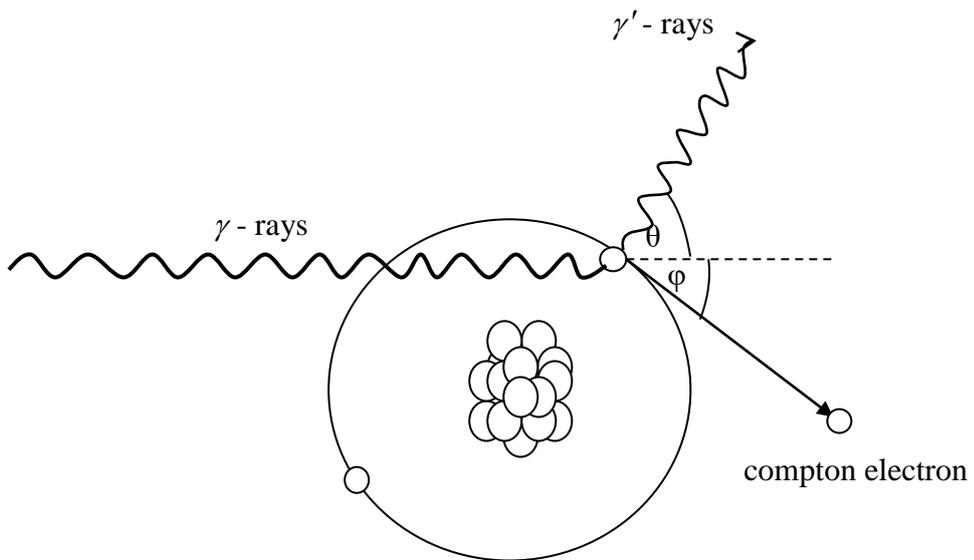
ในแนวแกน Y

$$0 = -\left(\frac{h\nu'}{c}\right) \sin \theta + P \sin \theta \dots\dots\dots (2.17)$$

และจากการแก้สมการทั้ง 3 ข้างต้นสามารถเขียนความสัมพันธ์ของพลังงานของรังสีแกมมาที่เข้าชนและพลังงานของรังสีแกมมาที่กระเจิงออกไป ได้ดังต่อไปนี้

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \left(\frac{h\nu}{m_0c^2}\right)(1 - \cos \theta)} \dots\dots\dots (2.18)$$

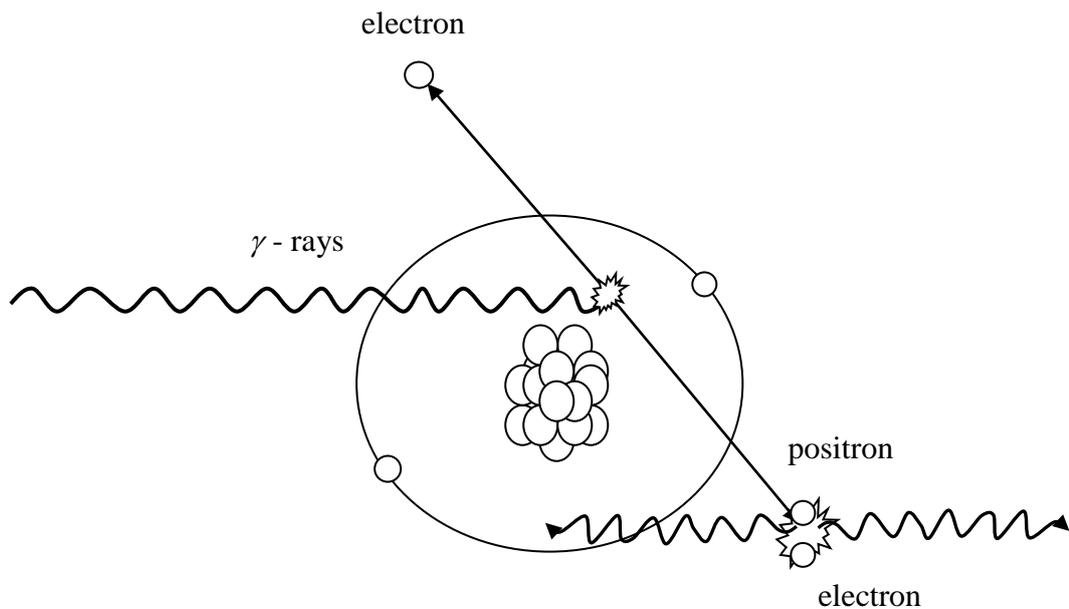
การเกิดปรากฏการณ์คอมพ์ตันจะมีค่าแปรผันตามอัตราส่วนระหว่างเลขอะตอมกับเลขมวล (Z/A) ของสารที่ใช้เป็นตัวดูดกลืนและขึ้นกับค่าพลังงานของโฟตอนอยู่ด้วย แต่ไม่มากเหมือนกับปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก



ภาพที่ 2.10 การเกิดปรากฏการณ์คอมพ์ตัน

2.9.3 การผลิตสารคู่

การผลิตสารคู่เกิดขึ้นได้เมื่อมีรังสีแกมมาที่วิ่งเข้ามาทำอันตรกิริยากับสสารและมีพลังงานอย่างน้อย 1.02 MeV หรือมีพลังงานเป็น 2 เท่าของพลังงานมวลนิ่งของอิเล็กตรอน แล้วทำอันตรกิริยากับสนามไฟฟ้าของนิวเคลียส ทำให้เกิดคู่ของอิเล็กตรอนและโพสิตรอน (positron) ขึ้นมาจากโฟตอนที่วิ่งเข้ามาชนแล้วหายไป ถ้ารังสีแกมมาที่วิ่งเข้ามา มีพลังงานมากกว่า 1.02 MeV พลังงานส่วนเกินจะเปลี่ยนไปเป็นพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนและโพสิตรอน การผลิตสารคู่มักจะเกิดขึ้นบริเวณใกล้ๆ นิวเคลียส อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากการผลิตสารคู่จะถูกดึงดูดด้วยนิวเคลียสของสสาร แต่โพสิตรอนจะถูกผลักออกไป ปกติแล้วโพสิตรอนที่เกิดขึ้นจะมีพลังงานจลน์มากกว่าอิเล็กตรอน แต่ทั้งอิเล็กตรอนและโพสิตรอนต่างก็ถูกสกัดกั้นได้อย่างรวดเร็วโดยผลึกของสสารที่ใช้เป็นตัวดูดกลืน ส่งผลให้อิเล็กตรอนและโพสิตรอนกลับมารวมกันกลายเป็นรังสีแกมมา 2 ตัวที่มีพลังงานเท่ากับ 0.511 MeV เรียกว่า **การประลัย (annihilation)** รังสีแกมมา 2 ตัวที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดขึ้นแล้วเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงกันข้ามซึ่งกันและกัน (180 องศา) ดังแสดงในภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 การเกิดการผลิตสารคู่

2.10 ผลของรังสีต่อสิ่งมีชีวิต

รังสี คือ พลังงานในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือลำของอนุภาคเล็ก ๆ ที่มีความเร็วสูงโดยทั่วไปแล้ว รังสีมีอยู่ทั่วไปในธรรมชาติรอบๆ ตัวเรา รังสีอาจจะมีผลต่อสุขภาพของมนุษย์ได้ ถ้าหากว่ารังสีดังกล่าวมีพลังงานและความเข้มของรังสีสูง ด้วยเหตุนี้ การใช้ประโยชน์จากรังสีและสารกัมมันตรังสี จึงต้องจัดให้มีมาตรการรักษาความปลอดภัยที่เหมาะสม เพื่อป้องกันอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานและสาธารณชน และจากข้อมูลเชิงวิชาการประเมินได้ว่า มนุษย์ได้รับรังสีส่วนใหญ่

จากธรรมชาติ เนื่องจาก รังสีเป็นพลังงานในรูปแบบหนึ่ง ดังนั้นเมื่อไปตกกระทบวัสดุต่าง ๆ หรือเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตก็ย่อมเกิดผลกระทบขึ้นได้ ทั้งนี้ผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องจากรังสีขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ ชนิด พลังงาน และปริมาณของรังสี นอกจากนี้ ยังขึ้นอยู่กับชนิดของอวัยวะหรือเนื้อเยื่อที่รังสีมาตกกระทบอีกด้วย โดยที่เซลล์เนื้อเยื่อและอวัยวะต่าง ๆ ในร่างกายของสิ่งมีชีวิตจะมีปฏิกิริยาตอบสนองต่อรังสีแตกต่างกันออกไป รังสีที่แผ่ออกจากธาตุกัมมันตรังสี เมื่อเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในสิ่งมีชีวิตทั้งหลายแล้ว จะทำให้เกิดการแตกตัวเป็น ไอออนของอะตอมที่เป็นส่วนประกอบของเนื้อเยื่อต่างๆตามแนวทางที่รังสีผ่าน ไป และสามารถทำให้เกิดผลเสียต่อสิ่งมีชีวิตได้ 2 แบบ คือ

2.10.1 ผลกระทบที่ชัดเจน (deterministic effect)

เป็นผลที่เกิดขึ้นเมื่อร่างกายได้รับรังสีปริมาณเกินขีดจำกัด จะทำให้เห็นผลที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจน ผลที่เกิดขึ้นนี้จะแปรผันตรงกับปริมาณรังสีที่ได้รับ เช่น เกิดเป็นผื่นแดงขึ้นตามผิวหนัง ผมร่วง เซลล์ตาย เป็นแผลเปื่อย มีภาวะเกิดพังผืดที่ปอด (fibrosis of the lung) มะเร็งเม็ดเลือดขาว (leukemia) และ ต้อกระจก (cataracts) เป็นต้น ซึ่งร่างกายของผู้ได้รับรังสีจะมีอาการมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของรังสีที่ได้รับ ส่วนหรือบริเวณของร่างกายที่ได้รับรังสี และอายุของผู้ได้รับรังสี ดังนั้น ผู้ได้รับรังสีหากมีอายุน้อยแล้วผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากรังสีจะมีผลมากกว่าผู้ที่มีอายุมาก ส่วนในทารกแรกเกิดที่ได้รับรังสีอาจได้รับอันตรายถึงพิการหรือเสียชีวิตได้ จากการเก็บรวบรวมข้อมูลที่ได้จากการใช้ลูกระเบิดนิวเคลียร์ในสงครามโลกครั้งที่ 2 อุบัติเหตุทางการใช้นิวเคลียร์ และการใช้รังสีทางการแพทย์ ทำให้สามารถแบ่งกลุ่มอาการของผู้ที่ได้รับรังสีทั่วร่างกายออกได้เป็น 3 กลุ่ม โดยต้องเกิดภายในเดือนใดต่าง ๆ ดังนี้

1. ได้รับรังสีภายในระยะเวลาสั้น ๆ (นาที)
2. ทั่วร่างกายได้รับรังสี
3. ต้นกำเนิดรังสีอยู่ภายนอกร่างกายและเป็นรังสีชนิดที่มีอำนาจทะลุทะลวงสูง

โดยในกลุ่มอาการทั้ง 3 จะมีระยะของการตอบสนองดังนี้

1. ระยะเตือนล่วงหน้า (prodromal stage)
 - อาเจียน ผิวหนังเป็นผื่นแดง หายใจไม่สะดวก ตาอักเสบ มีไข้
2. ระยะแฝง (latent stage)
 - ไม่มีการแสดงผล อาการออกมา
3. ระยะแสดงผล (manifest stage)
 - มีไข้ ท้องร่วง ดิซเซื่อ เม็ดเลือดลดลง โลหิตออก ผมร่วง ผิวหนังพอง บวม และเป็นแผลลึก ปวดท้องรุนแรง กล้ามเนื้อไม่ทำหน้าที่ร่วมกัน

ดังนั้นถึงแม้ว่ามนุษย์จะได้รับรังสีทั่วร่างกายแต่ผลที่เกิดขึ้นต่ออวัยวะต่าง ๆ จะไม่เท่ากันดังแสดงไว้ตารางที่ 2.10 ต่อไปนี้

ตารางที่ 2.10 ค่าปรับเทียบตามชนิดเนื้อเยื่อ (tissue weighting factor) ของอวัยวะต่าง ๆ

อวัยวะ	tissue weighting factor
อวัยวะสร้างเซลล์สืบพันธุ์ (gonad)	0.20
ไขกระดูก (bone marrow)	0.12
ลำไส้ใหญ่ (colon)	0.12
ปอด (lung)	0.12
กระเพาะ (stomach)	0.12
กระเพาะปัสสาวะ (bladder)	0.05
เต้านม (breast)	0.05
ตับ (liver)	0.05
หลอดอาหาร (esophagus)	0.05
ต่อมไทรอยด์ (thyroid)	0.05
ผิวหนัง (skin)	0.01
ผิวกระดูก (bone surface)	0.01
อวัยวะอื่น ๆ (remainder)	0.05

ที่มา: ICRP Publication 60, 1994

*tissue weighting factor หมายถึง ค่าปรับเทียบตามชนิดเนื้อเยื่อ ซึ่งแสดงถึงผลกระทบจากรังสีที่มีต่อเนื้อเยื่อหรืออวัยวะต่าง ๆ

2.10.2 ผลกระทบที่ไม่ชัดเจน (stochastic effect)

เป็นผลของรังสีต่อสิ่งมีชีวิตที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของผู้ได้รับรังสีที่ปริมาณน้อย ๆ ในระยะเวลาที่นาน ๆ ผลของรังสีต่อร่างกายมนุษย์ในระยะยาวสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเกิดมะเร็ง สำหรับมะเร็งซึ่งเชื่อว่าเป็นผลเนื่องมาจากการได้รับรังสี ได้แก่ มะเร็งของเม็ดเลือดขาว ผิวหนัง กระดูก ปอด ไทรอยด์ เต้านม ซึ่งจะมีระยะแอบแฝงประมาณ 20-30 ปี ยกเว้นมะเร็งเม็ดเลือดขาวซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 7-12 ปี
2. อายุสั้น ผู้ได้รับรังสีจะมีอายุสั้นกว่าที่ควรจะเป็น
3. การถ่ายทอดไปยังลูกหลาน ถ้ามีการผ่าเหล่าเกิดขึ้นกับเซลล์สืบพันธุ์(germ cells) จะทำให้มีโอกาสเป็นไปได้ที่ความผิดปกติจะถ่ายทอดไปยังรุ่นลูกรุ่นหลาน

จากข้อมูลและการตรวจสอบผลจากรังสีจากการทิ้งลูกระเบิดนิวเคลียร์ การศึกษาวิจัยและการปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับพลังงานนิวเคลียร์ รังสี และวัสดุกัมมันตรังสี ตลอดช่วงเวลา 100 ปี ที่ผ่านมา ได้มีการสรุปผลความเสี่ยงและอันตรายของรังสีต่อมนุษย์ และสรุปเป็นเกณฑ์อันตรายของรังสี ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.11 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.11 ระดับความแรงรังสีและอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้น

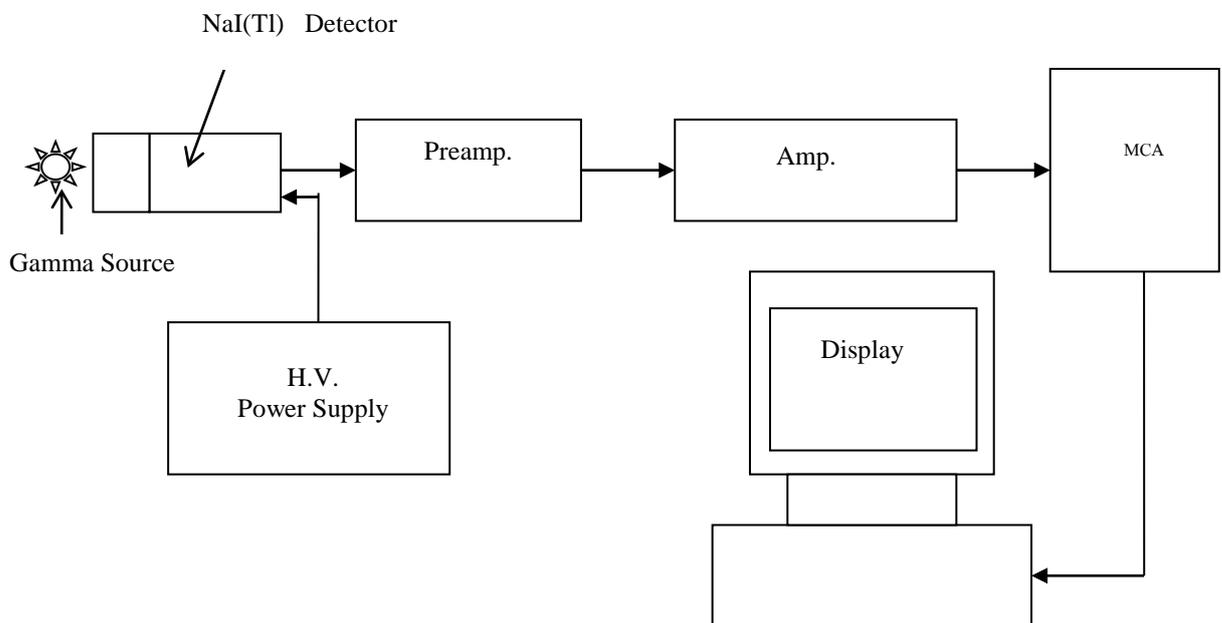
ระดับความแรงรังสี	อันตรายที่อาจจะเกิดขึ้น
ความแรงรังสีระดับ 10,000 มิลลิซีเวิร์ต ในระยะเวลาสั้น ๆ	เกิดการบาดเจ็บทางรังสีทันที และทำให้ถึงแก่ความตายใน 2-3 สัปดาห์
ความแรงรังสีระดับ 1,000 มิลลิซีเวิร์ต ในระยะเวลาสั้น ๆ	เกิดการบาดเจ็บทางรังสี เช่นคลื่นไส้ อาเจียน แต่ไม่ถึงตาย และอาจเกิดเป็นมะเร็งในระยะหลัง
ความแรงรังสีระดับ 20 มิลลิซีเวิร์ตต่อปี	เกณฑ์ความปลอดภัยทางรังสี สำหรับผู้ปฏิบัติงาน ในสถานปฏิบัติงานทางรังสี
ความแรงรังสีระดับ 2 มิลลิซีเวิร์ตต่อปี	ระดับรังสีปกติในธรรมชาติ
ความแรงรังสีระดับ 0.05 มิลลิซีเวิร์ตต่อปี	ระดับรังสีสูงสุด ที่ยอมให้มีอยู่ ณ รอบบริเวณสถานปฏิบัติงานนิวเคลียร์

ที่มา: "Radioactivity and Risk", University of Michigan, August 1996.

2.11 การตรวจวัดรังสีแกมมาในตัวอย่างจากธรรมชาติ

ในการตรวจวัดรังสีแกมมาในธรรมชาตินั้นจะต้องใช้หัววัดรังสีแกมมาที่มีความสะดวกและง่ายต่อการวัด นอกจากนี้ผลของการวัดที่ได้จะต้องมีความเที่ยงตรงและถูกต้องกับค่าที่เป็นจริง หัววัดรังสีแกมมาที่นิยมใช้กันอยู่อย่างแพร่หลายในปัจจุบันมีอยู่ 2 ชนิด คือ

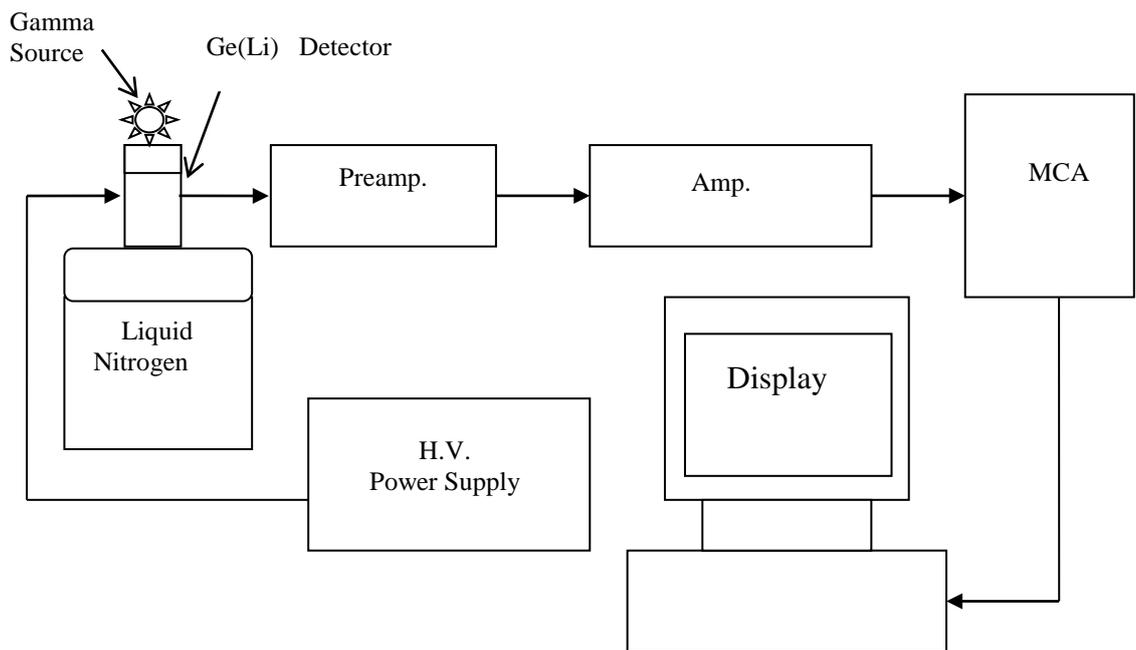
2.11.1 หัววัดแบบซิลทิลเลชัน (scintillation detector) โดยหลักการแล้วจะใช้สารที่เรียกว่า ฟอสเฟอร์ (phosphors) หรือ ซิลทิลเลเตอร์ (scintillators) มาใช้ตรวจวัดรังสีแกมมา เมื่อรังสีแกมมาตกกระทบกับสารดังกล่าวนี้แล้วจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนขึ้นมา อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นนี้สามารถทำให้อะตอมของสารอยู่ในสถานะที่ถูกกระตุ้น(excitation) และเมื่ออิเล็กตรอนลดระดับของพลังงานลงมาก็จะปลดปล่อยแสงออกมา แสงที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้จะเป็นปฏิกิริยากับพลังงานของรังสีแกมมาที่ถูกดูดกลืน หัววัดชนิดนี้จะทำการตรวจวัดแสงที่ได้นี้ซึ่งจะสามารถนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ปริมาณกัมมันตภาพรังสีของรังสีแกมมาได้ นอกจากนี้หัววัดซิลทิลเลชันจะต้องใช้ร่วมกับหน่วยวิเคราะห์ที่เรียกว่า ตัววิเคราะห์แบบหลายช่อง (multichannel analyzer) หรือ MCA และระบบขยายสัญญาณดังแสดงในภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 แผนภาพของหัววัดซิลทิลเลชันและระบบการตรวจวัดรังสีแกมมา

2.11.2 หัววัดแบบสารกึ่งตัวนำ (semiconductor detector) เป็นหัววัดที่ได้รับความนิยมสูงมาก เนื่องจากเป็นหัววัดที่มีประสิทธิภาพสูง มีอยู่หลายชนิด บางชนิดวัดได้ทั้งรังสีเอ็กซ์และรังสีแกมมาพลังงานต่ำ ตัวอย่างเช่น หัววัดแบบ lithium-drifted silicon หรือ Si(Li) ส่วนหัววัดแบบ high-purity germanium หรือ HPGe เป็นหัววัดที่เหมาะสมแก่การใช้วัดรังสีแกมมาที่มีพลังงานสูงๆ เป็นต้น หลักการโดยย่อของหัววัดชนิดนี้ จะใช้ผลึกของสารกึ่งตัวนำซึ่งต้องแช่ไว้ในไนโตรเจนเหลว ที่อุณหภูมิ 77 องศาเซลเซียส แล้วใช้ตรวจวัดรังสี เมื่อรังสีผ่านเข้าไปในผลึกจะทำให้เกิดไอออนที่มีประจุบวกและลบ ได้แก่ อิเล็กตรอนและโฮล(holes) จำนวนเท่าๆกัน และเมื่อนำขั้วไฟฟ้าสองขั้วมาต่อเข้ากับผลึกคนละด้าน แล้วผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไป จะทำให้ผลึกนั้นมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้น ไอออนหรืออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้านั้นจะถูกดึงดูดไปยังขั้วไฟฟ้า ไอออนที่

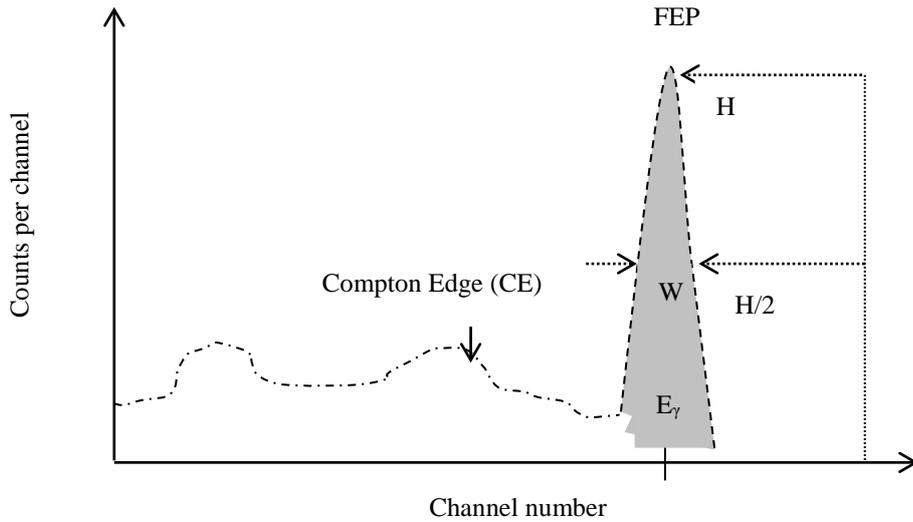
เกิดขึ้นนี้จะเป็นปฏิภาคกับพลังงานของรังสีที่สูญเสียไปในผลึกนั้น ด้วยเหตุนี้ เมื่อต่อหัววัดชนิดนี้เข้ากับระบบขยายสัญญาณและ MCA ดังแสดงในภาพที่ 2.13 ซึ่งมีลักษณะคล้ายกันกับในภาพที่ 2.12 เราจะสามารถตรวจวัดและวิเคราะห์ปริมาณกัมมันตรังสีได้จากข้อมูลที่ตรวจวัดออกมาในรูปของกราฟที่เขียนขึ้นระหว่างจำนวนช่องของ MCA และ จำนวนนับที่นับได้จากหัววัดในแต่ละช่องของ MCA (counts per channel) เราเรียกว่า “สเปกตรัมพลังงานของรังสีแกมมา”(gamma ray energy spectrum) ซึ่งเราจะได้กล่าวถึงในหัวข้อต่อไป



ภาพที่ 2.13 แผนภาพของหัววัดสารกึ่งตัวนำและระบบการตรวจวัดรังสีแกมมา

2.12 สเปกตรัมพลังงานของรังสีแกมมา

รังสีแกมมาที่เกิดจากการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีจะมีพลังงานที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นเมื่อวิ่งไปตกกระทบกับหัววัดชนิดต่างๆดังกล่าวแล้วข้างต้น จะมีการถ่ายทอดพลังงานสู่ผลึกของสารที่ใช้เป็นหัววัดที่แตกต่างกันด้วย ดังนั้น ขนาดของสัญญาณที่ได้จากระบบตรวจวัดรังสีก็จะมีค่าแตกต่างกันตามไปด้วย เมื่อนำสัญญาณดังกล่าวที่วัดได้ในแต่ละช่องของ MCA (counts per channel) ในช่วงเวลาที่ใช้ นำมาเขียนกราฟกับจำนวนช่องของ MCA (สัมพันธ์กับพลังงานของรังสีแกมมา) ดังแสดงในภาพที่ 2.14 จะได้ กราฟที่เป็นสเปกตรัมพลังงานของรังสีแกมมาดังกล่าวแล้วข้างต้นนั่นเอง



ภาพที่ 2.14 สเปกตรัมพลังงานของรังสีแกมมา

2.13 การวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพรังสีจากสเปกตรัมพลังงานของรังสีแกมมา

จะเห็นว่าลักษณะของสเปกตรัมของรังสีแกมมานั้น จะเริ่มต้นจากรังสีที่มีค่าพลังงานต่ำๆที่เกิดขึ้นในระหว่างการตรวจวัด ได้แก่ รังสีเอ็กซ์ โฟตอนที่สะท้อนกลับ (backscattered photons) ขอบของคอมพ์ตัน (compton edge; CE) หรือ เรียกรวมนๆว่า บริเวณต่อเนื่องแบบคอมพ์ตัน (compton continuum) และส่วนสำคัญที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ คือ พีคพลังงานของแกมมา (photo peak หรือ full energy peak ; FEP) พลังงานที่พีคดังกล่าวนี้เป็นพลังงานของรังสีแกมมาจริง เราจะทำการวิเคราะห์หาค่ากัมมันตภาพรังสีของสารกัมมันตรังสีที่สลายตัวให้รังสีแกมมาโดยใช้พีคที่เรียกว่า โฟโตพีค (photo peak) นั่นเอง จะเห็นได้ว่า **พื้นที่ใต้พีคของสเปกตรัมรังสีแกมมาจะเป็นปริมาณโดยตรงกับปริมาณกัมมันตภาพรังสี** ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยการพิจารณาจากภาพที่ 2.14 ซึ่งเราสามารถหาพื้นที่ใต้สเปกตรัมพลังงานของรังสีแกมมาในส่วนที่เรานั่งหรือ บริเวณที่ต้องการได้ ซึ่งเรียกว่าเป็น จำนวนนับสุทธิ (net count: n) ที่ไม่นับรวมเอาจำนวนนับที่เป็นรังสีพื้น (background: n_b) เข้าไปด้วย นั่นคือ จำนวนที่นับได้ทั้งหมด (n_t) ลบด้วยจำนวนนับที่เป็นรังสีพื้น เขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

$$n = n_t - n_b \dots\dots\dots(2.19)$$

ดังนั้น อัตรานับสุทธิ (net count rate : R_n) หมายถึง จำนวนนับสุทธิต่อเวลาที่ทำการวัดได้ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

$$R_n = \frac{n}{t} \text{ (count/second: cps) } \dots\dots\dots(2.20)$$

สำหรับ ค่าประสิทธิภาพ(ξ) ของหัววัดรังสี คำนวณได้จาก

$$\xi = \frac{R_n}{A} \dots\dots\dots(2.21)$$

เมื่อ R_n คือ ค่าอัตราการนับสุทธิที่ได้จากการทดลอง (ในหน่วยของ Bq หรือ dps)

A คือ ค่ากัมมันตภาพหรือค่าความแรงของรังสีจากสารมาตรฐานที่ใช้ในการเปรียบเทียบ ณ เวลาปัจจุบัน (ในหน่วยของ Bq หรือ dps) คำนวณได้จากสมการที่ 2.12

สำหรับการวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพจำเพาะ (specific activity) ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่สนใจจากสเปกตรัมพลังงานของรังสีแกมมาที่ตรวจวัดได้ในช่วงเวลาหนึ่งๆ ที่ทำการตรวจวัด (counting time) สามารถคำนวณหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟของโฟโตพีคบริเวณที่สนใจ และโดยอาศัยค่าประสิทธิภาพของหัววัดรังสีในสมการที่ 2.21 ดังนั้นค่ากัมมันตภาพจำเพาะในตัวอย่างดินหรือทรายที่ต้องการตรวจวัดและวิเคราะห์สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$S.A. = \frac{Area/counting\ time}{\xi \times P_\gamma \times W_t} \dots\dots\dots(2.22)$$

เมื่อ S.A. คือ ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของตัวอย่างที่ตรวจวัด

Area/counting time คือ อัตราการนับสุทธิ (dps) ที่ได้จากตัวอย่าง

ξ คือ ประสิทธิภาพของหัววัดรังสี

P_γ คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ของรังสีแกมมาที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดรังสี(% yield)

W_t คือ น้ำหนักของตัวอย่างที่ตรวจวัด (kg)

นอกจากนี้การคำนวณค่ากำลังแยกของหัววัด (detector resolution) ก็เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่จะต้องพิจารณา ทั้งนี้เพื่อเป็นการตรวจสอบศักยภาพของหัววัดที่ใช้ และต้องมีความเข้าใจในเทคนิคที่ดีพอจึงจะได้ข้อมูลของหัววัดเพื่อใช้ประกอบในการทำการทดลองตรวจวัดและวิเคราะห์ที่ยู่ยากซับซ้อนต่อไป สำหรับสมการที่ใช้ในการคำนวณค่ากำลังแยกของหัววัด ได้แสดงไว้ดังต่อไปนี้

$$r(\%) = \frac{W}{E_\gamma} \times 100 \dots\dots\dots(2.23)$$

เมื่อ $r(\%)$ คือ กำลังแยกของหัววัด (คิดเป็นร้อยละ)

W คือ ค่าความกว้างของโฟโตพีคที่ครึ่งหนึ่งของความสูงพีค (FWHM)

E_γ คือ พลังงานของรังสีแกมมา

2.14 ค่าขีดจำกัดในการวัด (lower limit of detection, LLD)

ในทางปฏิบัติ จะทำการตรวจวัดรังสีจากธรรมชาติ (background) ก่อนการวัดตัวอย่าง ซึ่งเราสามารถระบุบอกคุณสมบัติของระบบเครื่องวัดว่ามีระดับความสามารถที่จะตรวจวัดความแตกต่างของค่าวัดรังสีจากธรรมชาติและค่าวัดรังสีในตัวอย่างได้อย่างน่าเชื่อถือที่ระดับเท่าไร เราเรียกระดับนี้ว่า ค่าขีดจำกัดในการวัด ทั้งนี้เป็นเพราะการวัดค่ารังสีจากธรรมชาติและค่าวัดรังสีในตัวอย่างมีการกระจายทางสถิติอยู่ด้วย ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ระดับความเชื่อมั่นที่ ร้อยละ 95 โดยในการวัดจะต้องได้ผลการวัดจากตัวอย่างมากกว่าค่าขีดจำกัดในการวัดจึงถือได้ว่าเป็นผลจากการสลายตัวทางรังสีในตัวอย่างซึ่งสามารถหาค่าขีดจำกัดในการวัดได้จากสมการต่อไปนี้

$$LLD = \frac{4.66S_n}{\xi} \dots\dots\dots (2.24)$$

- เมื่อ LLD คือ ค่าขีดจำกัดในการวัด
 ξ คือ ค่าประสิทธิภาพของหัววัด
 S_n คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของจำนวนนับที่หัววัดนับได้

โดยที่

$$S_n = \sqrt{S_T^2 + S_B^2} \dots\dots\dots (2.25)$$

และ

$$S_T^2 = \frac{R_T}{t_c} \dots\dots\dots (2.26)$$

$$S_B^2 = \frac{R_B}{t_c} \dots\dots\dots (2.27)$$

- เมื่อ R_B คือ ค่าอัตราการนับรังสีพื้น (background count rate)
 R_T คือ ค่าอัตราการนับรวม (gross count rate)
 S_B^2 คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ R_B
 S_T^2 คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ R_T

2.15 สมการสำหรับการคำนวณค่าดัชนีแสดงความเป็นอันตรายทางรังสี (radiation hazard index)

การตรวจวัดค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์สารรังสีธรรมชาติ โดยเฉพาะในบริเวณชายหาดที่มีระดับรังสีสูงในต่างประเทศเช่นประเทศบราซิลและอินเดียเป็นที่สนใจต่อนักวิจัยและ

นักวิทยาศาสตร์ ทางรังสีเป็นอย่างมาก ได้มีกลุ่มของนักวิจัยจากทั้งสองประเทศ ได้แก่ กลุ่มวิจัยของ A. S. Alencar และ A.C. Freitas จากประเทศบราซิล และ กลุ่มของ A.K. Mohanty และ D. Sengupta ในประเทศอินเดีย เป็นต้น ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการวัดค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์สารรังสี ชนิด ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K ในตัวอย่างทรายชายหาดจากบริเวณที่มีระดับรังสีสูงของประเทศบราซิลและอินเดียตามลำดับอย่างต่อเนื่อง ข้อมูลของค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์สารรังสีชนิด ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K สามารถนำมาใช้คำนวณหาค่าอัตราปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืนของพื้นที่ที่เก็บตัวอย่างได้ ดังสมการต่อไปนี้ (Singh et al., 2005)

$$D = (0.461C_{\text{Ra}} + 0.623C_{\text{Th}} + 0.0414C_{\text{K}}) \dots\dots\dots(2.28)$$

โดยที่ D คือ ค่าอัตราปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืน ในหน่วยของ (nGyh^{-1})

C_{Ra} คือ ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra ในหน่วยของ (Bq/kg)

C_{Th} คือ ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th ในหน่วยของ (Bq/kg)

C_{K} คือ ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{40}K ในหน่วยของ (Bq/kg)

ในการทำงานเดียวกันค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์สารรังสี ชนิด ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K สามารถนำมาใช้คำนวณหาอัตราปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืนของพื้นที่ที่เก็บตัวอย่างได้เช่นกัน ดังสมการต่อไปนี้ (Alencar and Freitas, 2005)

$$D = (0.662C_{\text{Th}} + 0.427C_{\text{U}} + 0.043C_{\text{K}}) + CR \dots\dots\dots(2.29)$$

โดยที่ C_{U} คือ ปริมาณความเข้มข้นทางรังสีของ ^{238}U ในหน่วยของ (Bq/kg) และ

CR คือ ปริมาณเฉลี่ยของการแผ่รังสีคอสมิก ในหน่วยของ (nGyh^{-1})

นอกจากนี้ ยังสามารถนำค่า D ที่ได้ในสมการที่ 2.28 และ 2.29 ในการคำนวณหาอัตราปริมาณรังสียังผลที่ได้รับจากภายนอกร่างกายประจำปี (annual external effective dose rate) ในพื้นที่ที่เก็บตัวอย่าง ดังสมการต่อไปนี้ (Mohanty et al., 2004)

$$\text{Annual external effective dose rate (mSvy}^{-1}\text{)} = D(\text{nGyh}^{-1}) \times 8760 \text{ h} \times 0.2 \times 0.7 \text{ SvGy}^{-1} \times 10^{-6} \dots\dots\dots(2.30)$$

ค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลของเรเดียม (radium equivalent activity : Ra_{eq}) เป็นค่าดัชนีแสดงความเป็นอันตรายทางรังสี (radiation hazard index) ชนิดหนึ่งที่ได้ถูกกำหนดขึ้นมาเพื่อใช้เป็นตัวแทนของค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ซึ่งสามารถคำนวณให้เป็นค่าเพียงค่าเดียว ดังแสดงในสมการดังต่อไปนี้ (Beretka and Mathew, 1985)

$$\text{Ra}_{\text{eq}} = C_{\text{Ra}} + 1.43C_{\text{Th}} + 0.077C_{\text{K}} \dots\dots\dots(2.31)$$

โดยที่ค่าสูงสุดของ Ra_{eq} ต้องมีค่าไม่เกิน 370 Bq/kg

นอกจากนี้ ยังได้มีการกำหนดค่าดัชนีวัดความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกาย (external hazard index : H_{ex}) เพื่อใช้ในการประเมินการได้รับรังสีของจากภายนอกร่างกายนิวไคลด์สารรังสีธรรมชาติ ดังแสดงในสมการต่อไปนี้ (Veiga et al., 2006)

$$H_{ex} = \frac{C_{Ra}}{370} + \frac{C_{Th}}{259} + \frac{C_K}{4810} \leq 1 \dots \dots \dots (2.32)$$

สำหรับค่า H_{ex} ที่มีค่าปลอดภัยจะต้องมีค่าไม่เกิน 1 $mSy y^{-1}$

จะเห็นได้ว่า เมื่อทราบค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์สารรังสีในธรรมชาติ เช่น ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K ในหน่วยของ Bq/kg ในตัวอย่างทรายชายหาดจากชายหาดต่างๆ ในจังหวัดภูเก็ต จะสามารถหาคำนวนหาค่า D , Ra_{eq} , H_{ex} และค่า annual external effective dose rate ของพื้นที่บริเวณดังกล่าวนี้ๆ ได้

2.16 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ(information)ที่เกี่ยวข้อง

A. S. Alencar และ A.C. Freitas ได้ทำการคำนวณหาค่าระดับรังสีแกมมา(gamma dose rate) โดยการใช้หัววัดรังสีในสิ่งแวดล้อม(environmental radiation detector) ในทรายชายหาดจากบริเวณชายหาด 10 แห่งในประเทศบราซิล นอกจากนี้ยังได้คำนวณหาค่ากัมมันตภาพจำเพาะของสารกัมมันตรังสีในอนุกรม ^{232}Th และอนุกรม ^{238}U รวมทั้ง ^{40}K ในตัวอย่างทรายที่ระดับความลึกต่างๆ กัน 3 ระดับ คือ 0-10 ซม. 10-20 ซม. และ 20-30 ซม. โดยใช้เทคนิคทางการวิเคราะห์แบบรังสีแกมมาสเปกโตรเมตรี(gamma ray spectrometry)

A.C. Freitas และ A. S. Alencar ได้ทำการตรวจวัดค่ากัมมันตภาพจำเพาะของสารกัมมันตรังสีชนิด ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K ในตัวอย่างทรายซึ่งเก็บที่ระดับความลึก 0-10 ซม. จากบริเวณชายหาดต่างๆ ของเกาะ 2 แห่ง ทางตอนตะวันออกเฉียงใต้ของประเทศบราซิล ตลอดระยะเวลา 1 ปี นอกจากนี้ได้ตรวจวัดค่าระดับรังสีคอสมิกแกมมาในอากาศ ณ ตำแหน่งสูง 1 เมตรจากระดับพื้นดินและได้ตรวจวัดค่าระดับรังสียังผลประจำปี ณ บริเวณดังกล่าวด้วย

A. Veiga และคณะ ได้ศึกษาและคำนวณค่าการแจกแจงของสารกัมมันตรังสีในธรรมชาติ(natural radionuclide distribution) และค่าปริมาณรังสียังผลที่ได้รับจากภายนอกร่างกายประจำปี(annual external effective dose rate) โดยใช้ปริมาณของสารกัมมันตรังสี ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ที่ตรวจวัดได้ในตัวอย่างทรายในการคำนวณ โดยเก็บตัวอย่างทรายจากบริเวณชายหาดของประเทศบราซิลจำนวน 4 แห่ง

S. Singh และคณะ ได้ทำการตรวจวัดค่าความเข้มข้นของกัมมันตภาพรังสีของสารกัมมันตรังสีชนิด ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K โดยใช้เทคนิคทางการวิเคราะห์แบบรังสีแกมมาสเปกโตรเมตรี และค่าระดับรังสีดูดกลืนแกมมา(gamma-absorbed dose rate)ในตัวอย่างดินที่เก็บจากพื้นที่บางแห่งของรัฐ ปัญจาบ(Punjab)และรัฐฮิมาจัลประเทศ (Himachal Pradesh) ในประเทศอินเดีย

S. Selvasekarapandian และคณะ ได้ทำการตรวจวัดค่าความเข้มข้นของกัมมันตภาพรังสีของสารกัมมันตรังสีชนิด ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K ในตัวอย่างดินที่เก็บจากพื้นที่จากรัฐกูดาลอร์(Gudalore state) ในประเทศอินเดีย พร้อมทั้งคำนวณหาค่าการแจกแจงของสารกัมมันตรังสีในธรรมชาติ(natural radionuclide distribution) ค่าเฉลี่ยระดับรังสีดูดกลืนแกมมาในอากาศและค่าปริมาณรังสียังผลที่ได้รับจากภายนอกร่างกายประจำปี นอกจากนี้ ยังได้เปรียบเทียบผลที่ได้กับค่ากัมมันตภาพรังสีที่วัดและคำนวณได้ทั่วโลก(global radioactivity measurement and evaluations) อีกด้วย

A.K. Mohanty และคณะ ได้ทำการตรวจวัดค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นของกัมมันตภาพรังสีบางชนิดเช่น ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K ในตัวอย่างทรายจากบริเวณที่มีการตรวจพบว่ามีระดับรังสีในธรรมชาติสูงตามชายฝั่งในประเทศอินเดีย ในที่นี้ได้แก่พื้นที่ที่ค้นพบใหม่ทางฝั่งตะวันออกแยกใต้ของประเทศ คือ พื้นที่ในรัฐโอริสสา (Orissa state)โดยใช้เทคนิคทางการวิเคราะห์แบบรังสีแกมมาสเปกโตรเมตรีและใช้หัววัดแบบเจอร์มานเนียมบริสุทธิ์(HPGe detector) นอกจากนี้ยังได้ทำการตรวจวัดค่าระดับรังสีดูดกลืนแกมมาในอากาศ และค่าปริมาณรังสียังผลที่ได้รับจากภายนอกร่างกายประจำปี อีกด้วย

D. Sengupta และคณะ ได้ทำการตรวจวัดค่าของความเข้มข้นของกัมมันตภาพรังสีบางชนิดเช่น ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K ในตัวอย่างทรายจากบริเวณที่มีการตรวจพบใหม่ว่ามีระดับรังสีในธรรมชาติสูงในประเทศอินเดีย ได้แก่ บริเวณชายหาดอีราซามา(Erasama beach) ในรัฐโอริสสา ซึ่งเป็นพื้นที่ในทิศตะวันออกเฉียงใต้ของประเทศ โดยใช้เทคนิคทางการวิเคราะห์แบบรังสีแกมมาสเปกโตรเมตรีและใช้หัววัดแบบเจอร์มานเนียมบริสุทธิ์(HPGe detector) การตรวจวัดและคำนวณพบว่า ณ บริเวณดังกล่าวนี้มีค่ากัมมันตภาพรังสีในธรรมชาติและค่าระดับรังสีดูดกลืนแกมมาในอากาศค่อนข้างสูง

A. M. El-Arabi และคณะ ได้ทำการศึกษาและตรวจวัดปริมาณกัมมันตภาพรังสีในธรรมชาติในตัวอย่างทราย ณ ชายฝั่งทะเลแดงในประเทศอียิปต์ เพื่อใช้ในการบำบัดทางความร้อน (thermal therapy) สำหรับการท่องเที่ยวเชิงการแพทย์ (medical tourism) ในการนี้ได้ทำการตรวจวัดค่าความเข้มข้นของสารกัมมันตรังสีของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K และได้คำนวณค่าดัชนีความเป็นอันตรายของรังสี (radiation hazard indices) อีกด้วย