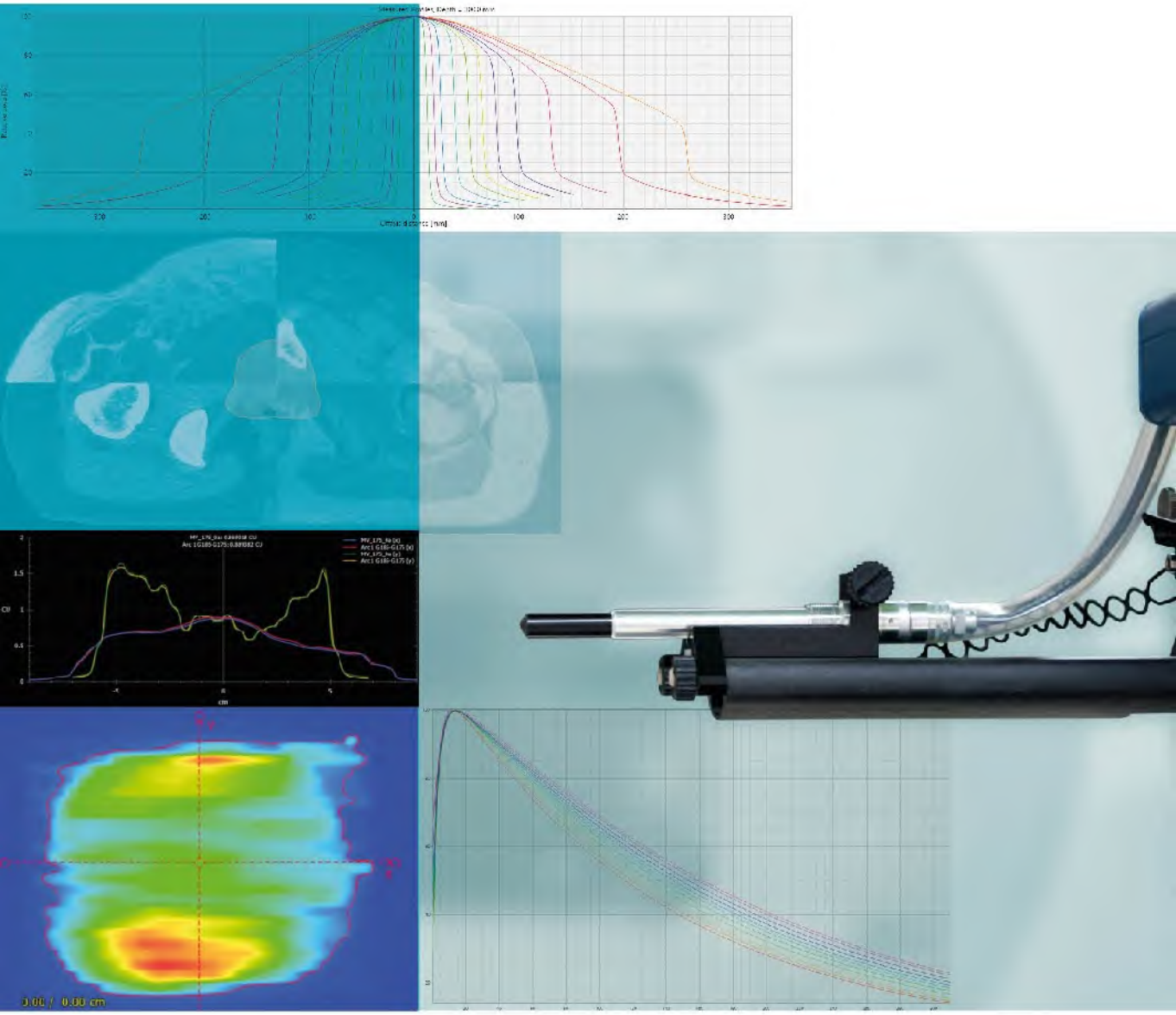


ฟิสิกส์ทางรังสีรักษา
(Physics of Radiotherapy)

บรรณาธิการ: ศิวลี สุริยาปี
ทวีป แสงแห่งธรรม
พันทิวา อุณห์ศิริ

ฟิสิกส์ทางรังสีรักษา
(Physics of Radiotherapy)

บรรณาธิการ: ศิวลี สุริยาปี
ทวีป แสงแห่งธรรม
พันทิวา อุณห์ศิริ

ข้อมูลห้องสมุด

616.0757
ฟิสิกส์ทางรังสีรักษา: พื้นฐานฟิสิกส์ในการใช้รังสีรักษาผู้ป่วยมะเร็ง
พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ
1. รังสีรักษา
2. ฟิสิกส์
I. ชื่อเรื่อง

ISBN: 978-616-407-554-2

พิมพ์ครั้งที่: 1, พฤศจิกายน พ.ศ. 2563
จำนวน 100 เล่ม
ราคา 1,200 บาท

จัดพิมพ์และจัดจำหน่ายโดย: สาขารังสีรักษาและมะเร็งวิทยา ภาค/ฝ่ายวิชารังสีวิทยา คณะแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, โรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์ สภากาชาดไทย ถนนพระราม 4 เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

ปกและศิลปกรรม: บริษัท อิมเมนซ เกรซ จำกัด

พิมพ์ที่: Ideol Digital Print

คณะผู้จัดทำได้ตรวจสอบความถูกต้องและความทันสมัยของเนื้อหา ตลอดจนอธิบายการใช้งานในรูปแบบที่สากลยอมรับ ณ ช่วงเวลาที่ทำการจัดทำหนังสือเล่มนี้ การนำความรู้จากหนังสือเล่มนี้ เพื่อไปใช้งานจริง ทั้งเพื่อการเรียน การสอน และการใช้งานทางคลินิก ขอให้อยู่ภายใต้ความรับผิดชอบแห่งมาตรฐานวิชาชีพ ทางทีมผู้เขียน ผู้ตรวจทาน และผู้จัดพิมพ์ จะไม่รับผิดชอบต่อผลของการนำข้อมูลจากหนังสือเล่มนี้ไปใช้ ไม่ว่าในกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น

ลิขสิทธิ์ของ: สาขารังสีรักษาและมะเร็งวิทยา ภาค/ฝ่ายวิชารังสีวิทยา คณะแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, โรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์ สภากาชาดไทย

สงวนลิขสิทธิ์ของหนังสือเล่มนี้ ไม่อาจทำซ้ำ หรือเก็บไว้เป็นฐานข้อมูล หรือส่งต่อในรูปแบบใด ๆ หรือวิธีใด ๆ ทางอิเล็กทรอนิกส์ เครื่องจักรกล การถ่ายเอกสาร การบันทึก หรือวิธีอื่น ๆ โดยไม่ได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากคณะผู้จัดทำ

รายนามผู้นิพนธ์

จารึก	ก้านเพชร
ชุลี	วรรณวิจิตร
โชติกา	จำปาเงิน
ทวีป	แสงแห่งธรรม
ธนวัฒน์	ถาวรวงษ์
พันทิวา	อุณห์ศิริ
มนัญชยา	วิมลโนช
มินตรา	แก้วเสมอ
ศักดา	กิ่งแก้ว
ศิริญญา	เรืองชาญ
สรจรส	อุณห์ศิริ
อิศรา	อิศรางกูร ณ อยุธยา

คำนำ

งานด้านรังสีรักษาและมะเร็งวิทยา คือ การรักษาผู้ป่วยมะเร็งด้วยรังสี ประกอบด้วยผู้ปฏิบัติงานร่วมสหสาขาวิชาชีพ ได้แก่ แพทย์รังสีรักษา นักฟิสิกส์การแพทย์ นักรังสีการแพทย์ และพยาบาลรังสีรักษา เป็นต้น งานฟิสิกส์การแพทย์เป็นงานพื้นฐานของการใช้เครื่องมือฉายรังสีสำหรับรักษาผู้ป่วย ซึ่งได้แก่ การกำหนดคุณลักษณะเฉพาะของเครื่อง การตรวจเครื่องมือแรกรับ การเก็บข้อมูลลำรังสี การวัดปริมาณรังสี การประกันคุณภาพเครื่องมือ รวมถึงการกระจายปริมาณรังสีในตัวผู้ป่วย หากบุคลากรมีความรู้ความเข้าใจในหลักการของเครื่องมือรังสีรักษา และเทคนิคการรักษา จะทำให้การปฏิบัติงานเป็นไปตามเป้าหมายที่วางไว้ นั่นคือ ผู้ป่วยได้รับการรักษาในเทคนิคถูกต้อง หายจากโรค และมีคุณภาพชีวิตที่ดี

หนังสือสือเล่มนี้จัดทำโดยนักฟิสิกส์การแพทย์ สาขารังสีรักษาและมะเร็งวิทยา ภาค/ฝ่ายวิชารังสีวิทยา คณะแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, โรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์ สภากาชาดไทย โดยผู้เขียนได้เรียบเรียงจากตำราหลาย ๆ เล่ม ถ่ายทอดประสบการณ์การทำงาน และการสอนหนังสือแก่นิสิตนักศึกษาทั้งระดับปริญญาบัณฑิต บัณฑิตศึกษา และแพทย์ประจำบ้าน

วัตถุประสงค์ของหนังสือเล่มนี้ เพื่อเป็นตำราสำหรับนิสิตนักศึกษาทั้งระดับปริญญาบัณฑิต บัณฑิตศึกษา ที่มีการเรียนการสอนในวิชาฟิสิกส์ทางรังสีรักษา รวมทั้งแพทย์ประจำบ้านฝึกอบรมในด้านรังสีรักษา นักรังสีการแพทย์ นักฟิสิกส์การแพทย์ที่ทำงานด้านรังสีรักษา เนื้อหาได้ครอบคลุมหลักการของงานฟิสิกส์ในรังสีรักษาทุกด้าน หนังสือนี้มีเนื้อหาที่มีรายละเอียด มีรูป ที่ทำให้เกิดความเข้าใจ เมื่ออ่านหนังสือเล่มนี้ควบคู่กับการเรียนในห้องเรียน จะทำให้นิสิตนักศึกษาทุกระดับ รวมทั้งแพทย์ประจำบ้านเกิดความเข้าใจเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากได้ปฏิบัติงานควบคู่ไปด้วย นอกจากนี้แล้ว นักรังสีการแพทย์ และนักฟิสิกส์การแพทย์ สามารถใช้หนังสือนี้เพิ่มพูนความรู้ และนำมาประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนางานด้านรังสีรักษาต่อไป

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ
Contents

รายนามผู้นิพนธ์ I

คำนำ II

สารบัญ III

รายการคำย่อ V

หน่วย VII

สัญลักษณ์ VIII

นิยามคำศัพท์ IX

1 ฟิสิกส์พื้นฐานทางรังสี
(Basic radiation physics)
ธนวัฒน์ ถาวรวงษ์ 1-12

2 อันตรกิริยาของโฟตอน
(Photon interactions)
ทวีป แสงแห่งธรรม 13-23

3 หน่วยและหลักการนับวัด
(Dosimetry principle and units)
อิศรา อิศรางกูร ณ อยุธยา 24-38

4 เครื่องวัดปริมาณรังสี
(Radiation dosimeters)
ทวีป แสงแห่งธรรม 39-54

5 เครื่องตรวจวัดปริมาณรังสี
(Radiation monitoring instruments)
ทวีป แสงแห่งธรรม 55-62

6 เครื่องฉายรังสี
(Radiotherapy machines)
ทวีป แสงแห่งธรรม 63-84

7 ฟิสิกส์รังสีรักษาระยะไกล
(Physical aspects of external beam radiotherapy)
จารึก ก้านเพ็ชร 85-100

8 การวางแผนการรักษา: การกระจายปริมาณรังสี
(Treatment Planning: Isodose distributions)
โชติกา จำปาเงิน 101-132

9 การวางแผนการรักษาทางคลินิก
(Clinical treatment planning)
พันทิวา อุณห์ศิริ 133-152

10 เทคนิคการฉายรังสีและเทคนิคพิเศษ
(Radiotherapy techniques and special techniques)
ชุลี วรรณวิจิตร 153- 172

11 ระบบภาพในงานรังสีรักษา
(Imaging in radiotherapy)
ทวีป แสงแห่งธรรม 173-188

12 **การวัดปริมาณรังสีจากระบบสร้างภาพ**
(Imaging dosimetry)
มนัญชยา วิมลโนช **189–202**

13 **การใช้อิเล็กตรอนในงานรังสีรักษา**
(Electron beams in radiotherapy)
ทวีป แสงแห่งธรรม **203–214**

14 **การรักษาด้วยอนุภาค**
(Ion beam therapy)
ศิริญญา เรืองชาญ **215–232**

15 **รังสีรักษาระยะใกล้**
(Brachytherapy)
ศักดา กิ่งแก้ว **233–252**

16 **การประกันคุณภาพแผนการรักษาของผู้ป่วย**
(Patient specific quality assurance)
สรจรส อุณห์ศิริ **253–266**

17 **รังสีชีววิทยา**
(Radiobiology)
มินตรา แก้วเสมอ **267–288**

18 **การป้องกันอันตรายจากรังสี**
(Radiation protection)
พันทิวา อุณห์ศิริ **289–300**

19 **การออกแบบห้องฉายรังสี**
(Shielding treatment room design)
ทวีป แสงแห่งธรรม **301–316**

Index 317

ดัชนี 320

รายการคำย่อ

CPE	charged particle equilibrium
CT	computed tomography
CTV	clinical target volume
DLG	dosimetric leaf gap
DNA	deoxyribonucleic acid
DVH	dose volume histogram
EPR	electron paramagnetic resonance
esu	electrostatic system of units
FDD	focal to detector distance
GTV	gross tumor volume
HVL	half-value layer
HDR	high dose rate
IGRT	image guided radiation therapy
IMAT	intensity modulated arc therapy
IMRT	intensity modulated radiotherapy
IORT	intraoperative radiation therapy
ITV	internal target volume
MeV	megaelectronvolt
MLC	multileaf collimator
MRI	magnetic resonance imaging
MU	monitor unit
NTCP	normal tissue complication probability
OAR	organ at risk
OSL	optically stimulated luminescence dosimeter
PET	positron emission tomography
PLD	potential lethal damage
PMT	photomultiplier tube
PTV	planning target volume
PTV-HR	high-risk planning target volume
PTV-IR	intermediate-risk planning target volume
PTV-LR	low-risk planning target volume
RNA	ribonucleic acid
RPLGD	radiophotoluminescence glass dosimeter

SAD	source to axis distance
SBRT	stereotactic body radiation therapy
SDD	source to detector distance
SLD	sub-lethal damage
SOBP	spread-out Bragg peak
SPECT	single photon emission computed tomography
SRS	stereotactic radiosurgery
SRT	stereotactic radiotherapy
TBI	total body irradiation
TCP	tumor control probability
TCPE	transient charged particle equilibrium
TLD	thermoluminescence dosimeter
TSEI	total skin electron irradiation
US	ultrasound
VMAT	volumetric modulated arc therapy

หน่วย

amu	Atomic mass unit
Bq	Becquerel
Ci	Curies
cm	Centrimeter
dps	Disintegration per second
eV	Electron volts
Gy	Gray
Hz	Hertz
J	Joule
kg	Kilogram
m	Meter
R	Roentgen
Sv	Sievert

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย
D	Absorbed dose
D_d	Absorbed dose at any depth
$H^*(d)$	Ambient dose equivalent
K_c	Collision kerma
λ	Decay constant
d_{max}	Depth of maximum dose
$H'(d)$	Directional dose equivalent
Ψ	Energy fluence
X	Exposure
Φ	Fluence
$\dot{\Phi}$	Fluence rate หรือ flux density
Gy	Gray
$T_{1/2}$	Half life
K	Kerma
μ	Linear attenuation coefficient
S	Linear stopping power
μ/ρ	Mass attenuation coefficient
μ_{en}/ρ	Mass energy absorption coefficient
μ_{tr}/ρ	Mass energy transfer coefficient
S/ρ	Mass stopping power
D_{max}	Maximum dose
N	Number of particles
$\%DD$	Percentage depth dose
$H_p(d)$	Personal dose equivalent
R_P	Practical range
R	Radiant energy
W_R	Radiation weighting factor
K_r	Radiative kerma
R_{res}	Residual range
W_T	Tissue weighting factor

นิยามศัพท์

คำ	ความหมาย
Absolute dosimetry	ปริมาณรังสีสัมบูรณ์
Absorbed	การดูดกลืน
Active monitoring	เครื่องวัดรังสีแบบอ่านค่าได้ทันที
Adaptive radiation therapy	การฉายรังสีแบบปรับเปลี่ยนแผนการรักษา
Atomic number	ค่าเลขอะตอม
Attenuate	การลดทอน
Back scattered radiation	รังสีกระเจิงย้อนกลับ
Beam line	ระบบลำเลียงอนุภาค
Beam weighting	อัตราส่วนของปริมาณรังสีในแต่ละลำรังสี
Bone absorption effect	ผลของการดูดกลืนรังสีจากกระดูก
Brachytherapy	รังสีรักษาระยะใกล้
Characteristic x-ray	รังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะ
Charged radiation	รังสีที่มีประจุ
Collimator	อุปกรณ์จำกัดพื้นที่ลำรังสี
Collision loss	การสูญเสียพลังงานจากการชน
Compensator	วัสดุปรับรูปร่างลำรังสี
Conventional simulator	เครื่องจำลองการรักษาด้วยเอกซเรย์แบบ 2 มิติ
Conversion coefficient	ค่าสัมประสิทธิ์การแปลง
CT simulator	เครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์เพื่อจำลองการรักษา
Decay constant	ค่าคงที่การสลายตัว
Depth of dose maximum	ความลึกที่ปริมาณรังสีสูงสุด
Directly ionizing radiation	รังสีที่ทำให้ประจุแตกตัวโดยตรง
Dose rate	อัตราปริมาณรังสีต่อหน่วยเวลา
Dose tolerance limits	ขีดจำกัดการได้รับปริมาณรังสี
Dose volume histogram	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรเนื้อเยื่อและปริมาณรังสีที่อวัยวะได้รับ
Elastic collision	การชนแบบยืดหยุ่น
Electronic equilibrium	สมดุลย์อิเล็กตรอน
Equivalent dose	ปริมาณรังสีสมมูล
Excitation	การถูกกระตุ้น
External beam radiotherapy หรือ teletherapy	การฉายรังสี

คำ	ความหมาย
Field size	ขนาดลำรังสี
Forward planning	การวางแผนการฉายรังสีแบบไปข้างหน้า
Free electron	อิเล็กตรอนอิสระ
Free radicals	อนุมูลอิสระ
Functional imaging	ภาพแสดงการทำงานของเนื้อเยื่อ
Gene mutation	การกลายพันธุ์ของยีน
Half-value layer	ค่าความหนาครึ่งค่า
Image guided radiation therapy	ระบบภาพนำวิถี
Impurity	การใส่สารเจือปน
Indirectly ionizing radiation	รังสีที่ทำให้ประจุแตกตัวโดยอ้อม
Inelastic collision	การชนแบบไม่ยืดหยุ่น
Inhomogeneity	ความแตกต่างของเนื้อเยื่อ
Intraoperative radiation therapy	การฉายรังสีในขณะทำผ่าตัด
Inverse planning	การคำนวณแบบย้อนกลับ
Ion pair	คู่ประจุ
Ionization	การแตกตัวเป็นประจุ
Ionizing radiation	รังสีที่ทำให้ประจุแตกตัว
Irregular field	ลำรังสีในรูปร่างต่าง ๆ
Irregular shape	ลักษณะผิวไม่เรียบ
Isodose curve	เส้นปริมาณรังสี
Isodose distribution	การกระจายปริมาณรังสี
Keloid	รอยแผลเป็นนูน
Latent image	ภาพแฝง
Light transmission	การส่งผ่านของแสง
Mean free path	ระยะทางเฉลี่ยอิสระ
Metastable states	ชั้นกระตุ้น
Multileaf collimator	วัสดุกำบังรังสีแบบซี่
Non-ionizing radiation	รังสีที่ทำไม่ให้ประจุแตกตัว
Optical density	ค่าความดำ
Passive monitoring	เครื่องวัดรังสีแบบที่ต้องผ่านกระบวนการเพื่อแสดงค่าปริมาณรังสี
Penumbra	เงามัว

คำ	ความหมาย
Percentage depth dose	ร้อยละปริมาณรังสีตามแนวความลึก
Personal monitor	เครื่องวัดรังสีประจำตัวบุคคล
Phantom	หุ่นจำลองการรักษา
Polyenergetic beams	โฟตอนหลายค่าพลังงาน
Primary radiation	รังสีปฐมภูมิ
Radiation leakage	รังสีรั่วไหล
Radiation loss	การสูญเสียพลังงานจากการหน่วง
Radiation protection	การป้องกันอันตรายจากรังสี
Radiation safety	ความปลอดภัยทางรังสี
Radioactive sources	สารกัมมันตรังสี
Radioactivity	กัมมันตภาพรังสี
Radionuclides	สารกัมมันตภาพรังสี
Radiosurgery	รังสีร่วมพิกัด
Range of secondary electron	พิสัยของอิเล็กตรอนทุติยภูมิ
Relative dosimetry	ปริมาณรังสีสัมพัทธ์
Respiratory gated radiation therapy	การฉายรังสีร่วมกับการจับจังหวะการหายใจ
Scatter	การกระเจิง
Secondary cancer	มะเร็งทุติยภูมิ
Secondary electron	อิเล็กตรอนทุติยภูมิ
Secondary radiation	รังสีทุติยภูมิ
Semiconductor	สารกึ่งตัวนำ
Shielding	วัสดุกำบังรังสี
Side scattering	การกระเจิงออกด้านข้าง
Source to surface distance: SSD	ระยะทางจากแหล่งกำเนิดรังสีถึงผิวผู้ป่วย
Stereotactic radiation therapy	รังสีร่วมพิกัด
Surface dose	ปริมาณรังสีที่ผิว
Total body irradiation	การฉายรังสีผู้ป่วยทั่วทั้งลำตัว
Total skin electron irradiation	การฉายอิเล็กตรอนผู้ป่วยทั่วทั้งลำตัว
Tumor bed	ฐานก้อนมะเร็ง
Uncharged radiation	รังสีที่ไม่มีประจุ
Unpaired electron	อิเล็กตรอนไร้คู่
Water equivalent material	วัสดุที่สมมูลน้ำ

คำ	ความหมาย
Water phantom	หุ่นจำลองน้ำ
Wedge	ลิ่มปรับความเข้มรังสี

1 ฟิสิกส์พื้นฐานทางรังสี (Basic radiation physics)

ธนวัฒน์ ถาวรวงษ์

เนื้อหา

บทนำ
1.1 อะตอม (Atom)
1.2 นิวเคลียส (Nucleus)
1.3 มวลอะตอม (Atomic mass)
1.4 แรงพื้นฐาน (Fundamental forces)
1.5 สมมูลของมวลและพลังงาน (Mass-energy equivalent)
1.6 ระดับชั้นพลังงานในอะตอม (Atomic energy levels)
1.7 ระดับชั้นพลังงานในนิวเคลียส (Nuclear energy levels)
1.8 ค่าคงที่การสลายตัว ความแรงของธาตุกัมมันตรังสี และค่าครึ่งชีวิต
1.9 ชนิดของรังสี (Classification of radiation)
บรรณานุกรม

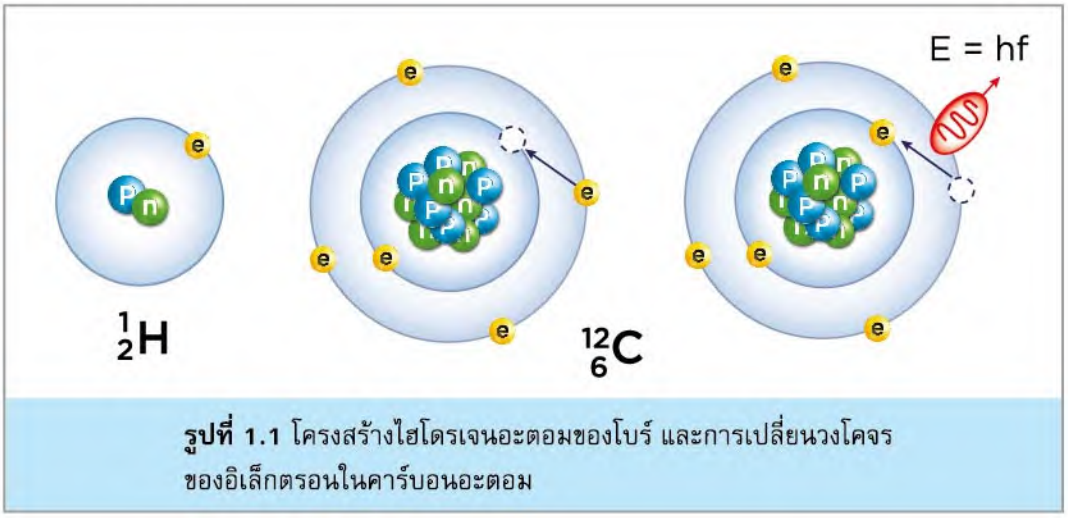
บทนำ

วัตถุประสงค์ในการศึกษาฟิสิกส์พื้นฐานทางด้านรังสีรักษา เพื่อให้เกิดความเข้าใจหลักของการเกิดรังสีทั้งจากธรรมชาติและจากที่มนุษย์สร้างขึ้น รวมถึงองค์ประกอบของการเกิดอันตรกิริยาระหว่างรังสีกับวัตถุตัวกลาง ซึ่งล้วนขึ้นกับคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีขององค์ประกอบพื้นฐานที่เรียกว่า “อะตอม”

1.1 อะตอม (Atom)

อะตอมเป็นองค์ประกอบพื้นฐานที่เล็กที่สุดของวัตถุตัวกลาง ประกอบด้วยอนุภาคมูลฐานที่สำคัญ คือ นิวเคลียสที่มีโปรตอนประจุบวกกับนิวตรอนเป็นแกนกลาง และล้อมรอบด้วยกลุ่มอิเล็กตรอนที่มีประจุลบเคลื่อนที่ไปรอบ ๆ มวลของอะตอมนั้นส่วนใหญ่มาจากมวลของนิวเคลียส ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10^{-15} เมตร และเมื่อรวมกับกลุ่มอิเล็กตรอน อะตอมจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10^{-10} เมตร คุณสมบัติของอะตอมนั้นสามารถอธิบายได้จากองค์ประกอบของนิวเคลียส (จำนวนโปรตอนและนิวตรอน) รวมถึงจำนวนและการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนในวงโคจรรอบนิวเคลียส (orbital electron)

ระบุจากทฤษฎีอะตอมของโบร์ (Bohr) ซึ่งได้รับความนิยมในการอธิบายโครงสร้างอะตอมของไฮโดรเจนระบุไว้ว่า อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่เป็นวงรอบนิวเคลียสในวงโคจรเฉพาะและมีโมเมนตัมเชิงมุมคงที่ อิเล็กตรอนจะรับหรือปล่อยพลังงานออกมาทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนวงโคจรในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยพลังงาน (E=hf) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นมีค่าเท่ากับส่วนต่างของระดับชั้นพลังงานของวงโคจร ดังรูปที่ 1.1 สำหรับอะตอมอื่นทฤษฎีอะตอมของซอมเมอร์เฟลด์ (Sommerfeld) ซึ่งพัฒนาเพิ่มจากทฤษฎีโบร์ จะสามารถอธิบายได้ดีกว่า



รูปที่ 1.1 โครงสร้างไฮโดรเจนอะตอมของโบร์ และการเปลี่ยนวงโคจรของอิเล็กตรอนในคาร์บอนอะตอม

1.2 นิวเคลียส (Nucleus)

นิวเคลียสนั้นประกอบด้วยโปรตอนและนิวตรอน ในขณะที่โปรตอนมีประจุเป็นบวก นิวตรอนนั้นไม่มีประจุ (เป็นกลางทางไฟฟ้า) ประจุบวกของโปรตอนมีค่าเท่ากันกับประจุลบของอิเล็กตรอน คือ 1.602×10^{-19} คูลอมบ์ (Coulomb) โดยในอะตอมที่มีความเป็นกลางทางไฟฟ้านั้น จะมีจำนวนของโปรตอนในนิวเคลียสเท่ากับจำนวนอิเล็กตรอนภายนอก

องค์ประกอบอะตอมของแต่ละธาตุสามารถระบุได้จากรูปแบบ $^{A}_{Z}X$ โดย X คือ สัญลักษณ์ของธาตุ A คือ เลขมวล ซึ่งบอกจำนวนรวมของโปรตอนและนิวตรอนในนิวเคลียส และ Z คือ เลขอะตอม ที่บ่งบอกถึงจำนวนของโปรตอน การจำแนกชนิดของอะตอมจากสัดส่วนจำนวนโปรตอนและนิวตรอนในนิวเคลียส ดังตารางที่ 1.1

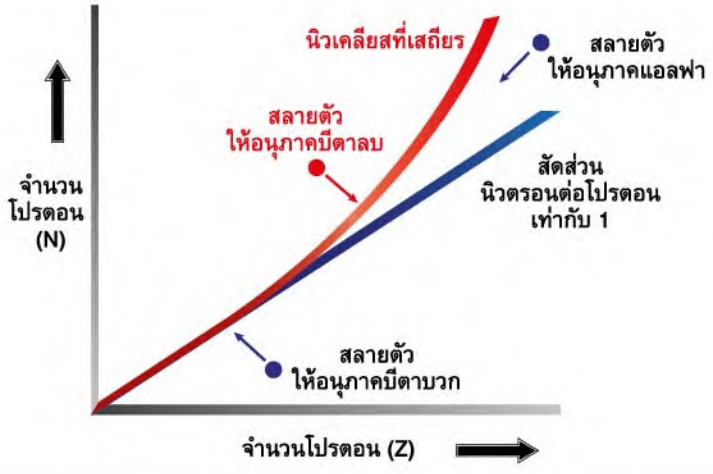
ตารางที่ 1.1 สัญลักษณ์และการแบ่งชนิดของอะตอม

ตัวอย่าง $^{1}_{1}H$, $^{4}_{2}He$, $^{12}_{6}C$ และ $^{16}_{8}O$

ชนิดอะตอม	คำอธิบาย: ตัวอย่าง
ไอโซโทป (Isotopes)	จำนวนโปรตอนเท่ากัน และมี Z เท่ากัน: $^{60}_{27}Co$, $^{59}_{27}Co$ และ $^{192}_{77}Ir$, $^{191}_{77}Ir$ และ $^{191}_{77}Ir$
ไอโซโทน (Isotones)	จำนวนนิวตรอนเท่ากัน แต่มี Z ไม่เท่ากัน: $^{9}_{3}Li$, $^{10}_{4}Be$, $^{11}_{5}B$ และ $^{12}_{6}C$ (นิวตรอนเท่ากับ 6)
ไอโซบาร์ (Isobars)	มี A เท่ากัน แต่มี Z ไม่เท่ากัน: $^{60}_{27}Co$, $^{60}_{28}Ni$ และ $^{192}_{77}Ir$, $^{192}_{78}Pt$
ไอโซเมอร์ (Isomers)	มี A และ Z เท่ากัน ต่างกันที่ระดับชั้นพลังงาน $^{99}_{48}Tc$ และ $^{99m}_{43}Tc$ (m แสดงความไม่เสถียร)

สัดส่วนของจำนวนนิวตรอนต่อโปรตอน (n/p) ในนิวเคลียส ดังรูปที่ 1.2 บอกถึงความเสถียรของนิวเคลียสนั้น ๆ นิวเคลียสที่เสถียรส่วนใหญ่นั้นจะมีค่า n/p ใกล้เคียงหนึ่ง ส่วนนิวเคลียสที่มีค่า n/p ต่างออกไปนั้นจะมีการสลายตัว (decay) เพื่อให้เข้าใกล้สภาวะเสถียร โดยนิวเคลียสที่มีสัดส่วน n/p สูงจะมีการสลายตัวให้อนุภาคบีตาลบ (β^-) และสลายตัวให้อนุภาคแอลฟา (α) สำหรับนิวเคลียสที่มีขนาดใหญ่ ในขณะที่นิวเคลียสที่มีค่า n/p ต่ำ จะมีการสลายตัวแบบการจับกับอิเล็กตรอน (electron capture) และการสลายตัวให้อนุภาคบีตาบวก (β^+) รูปแบบการสลายตัวจะกล่าวต่อในข้อ 1.7

นิวเคลียสที่เสถียรส่วนใหญ่นั้นจะมีจำนวนนิวตรอนและโปรตอนเป็นเลขคู่ มีเพียง $^{1}_{2}H$, $^{6}_{3}Li$, $^{10}_{5}B$ และ $^{14}_{7}N$ เท่านั้น ที่เสถียรโดยมีนิวตรอนและโปรตอนเป็นจำนวนคี่



รูปที่ 1.2 สัดส่วนของจำนวนนิวตรอนและโปรตอนในนิวเคลียส และรูปแบบการสลายตัวของนิวเคลียสที่ไม่เสถียร (ดัดแปลงจาก: D.S. Chang, Basic Radiotherapy Physics and Biology. New York: Springer; 2014, หน้า 6)

1.3 มวลอะตอม (Atomic mass)

เป็นการเปรียบเทียบมวลของอะตอมใด ๆ กับมวลอะตอมของธาตุคาร์บอน ($^{12}_{6}C$)โดย 1 amu จะเท่ากับ 1/12 เท่าของ $^{12}_{6}C$ (ดังนั้นมวลอะตอมของคาร์บอนเท่ากับ 12 amu)
ซึ่งหนักเท่ากับ 1.66 x 10^{-27} kg มวลอะตอมของอิเล็กตรอน โปรตอน และนิวตรอน ดังตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 มวลอะตอมของอิเล็กตรอน โปรตอน และนิวตรอน และ Energy equivalent

ชนิดอนุภาค	Rest mass (amu)	Rest mass (kg)	Energy equivalent (MeV/c^2)
electron	0.000548	9.1 x 10^{-31}	0.511
Proton	1.00727	1.6726 x 10^{-27}	938.3
Neutron	1.00866	1.6749 x 10^{-27}	939.6

จากกฎพื้นฐานของไอน์สไตน์ว่าด้วยความสัมพันธ์ระหว่างมวลกับพลังงาน $E=mc^2$ มวลสามารถอธิบายในรูปของพลังงานสมมูล (energy equivalent) ได้จาก $m=E/c^2$ ซึ่งมีหน่วยเป็น MeV/c^2 โดยสามารถใช้หน่วยย่อเป็น เมกะอิเล็กตรอนโวล์ท (MeV) แทนได้

ในอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้า จำนวนอิเล็กตรอนจะเท่ากับจำนวนโปรตอน จำนวนอิเล็กตรอนต่อกรัมของอะตอมใด ๆ นั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1.1

$$\text{Number of electron/gram} = NA \cdot Z/A_W \qquad (1.1)$$

เมื่อ N_A คือ ค่าคงที่อาโวกาโดร (Avogadro number) มีค่าเท่ากับ 6.02 x 10^{23} อะตอม ต่อ gram atomic weight

Z คือ เลขอะตอม

A_W คือ น้ำหนักของอะตอมของสสาร (Atomic weight) หน่วยเป็น กรัม

นอกจากจะอธิบายมวลของอะตอมในหน่วย atomic mass และ atomic weight แล้ว ยังมีอีกหน่วยที่ใช้ได้คือ gram atomic weight ซึ่งอธิบายน้ำหนักของอะตอมในหน่วยของกรัม จากกฎของอาโวกาโดร (Avogadro's law) ในทุก ๆ gram atomic weight ของสสารใด ๆ จะมีจำนวนอะตอมที่เท่ากันเสมอ เท่ากับ Avogadro number หรือ Avogadro constant

เมื่ออิเล็กตรอน โปรตอน และนิวตรอน ประกอบรวมกันเป็นอะตอม มวลของอะตอมจะไม่เท่ากับผลรวมของอนุภาคทั้งสาม เนื่องจากในการรวมกันของนิวตรอนและโปรตอนเป็นนิวเคลียสนั้น จะมีมวลบางส่วนเปลี่ยนเป็นพลังงานที่ยึดเหนี่ยวทั้งสองอนุภาคนี้ไว้ในนิวเคลียส ผลต่างของมวลนี้จะเรียกว่า mass defect โดยถ้าเรามองในส่วนของพลังงานที่เท่ากับ mass defect นี้ จะเรียกว่าแรงยึดเหนี่ยวของอนุภาคในนิวเคลียส ซึ่งมีความแรงสูงสุดในแรงพื้นฐาน (Fundamental forces)

ตัวอย่างดังอะตอมคาร์บอน 12 ($^{12}_{6}C$) ที่มีมวลอะตอมเท่ากับ 12 amu แทนที่จะเป็น 12.09565 amu จากการที่มีโปรตอน 6 ตัว และนิวตรอน 6 ตัว ผลต่างของมวลอะตอม 0.9565 amu หรือเทียบเท่ากับพลังงาน 89.1 MeV ก็คือพลังงานยึดเหนี่ยวภายในนิวเคลียสนั่นเอง

1.4 แรงพื้นฐาน (Fundamental forces)

แรงพื้นฐาน ประกอบด้วยแรง 4 ชนิด และสามารถเรียงตามลำดับความแข็งแรงได้ดังนี้

- Strong nuclear force เป็นแรงที่แข็งแรงที่สุดในธรรมชาติ มีความแรงมากกว่าแรงดูดระหว่างขั้ว (electromagnetic force) จนสามารถยึดโปรตอนที่มีประจุบวก ให้อยู่ด้วยกันในนิวเคลียสได้

- Electromagnetic (Coulombic) force คือแรงดูดระหว่างขั้วลบและบวก มีความแรง 1/100 เท่าของ strong nuclear force ดึงอิเล็กตรอนให้อยู่ภายในอะตอม โดยอิเล็กตรอนในวงโคจรที่ใกล้นิวเคลียสมากที่สุด จะมีแรงยึดเหนี่ยวนี้สูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับอิเล็กตรอนในวงโคจรถัดๆ ไป

- Weak nuclear force มีความแรง 10^{-6} เท่าของ strong nuclear force เป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง ควาร์ก (Quarks) ซึ่งเป็นโครงสร้างย่อยของอนุภาคโปรตอนและนิวตรอน โดยแรงนี้สัมพันธ์กับการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี (radioactive decay)

- Gravity มีความแรงประมาณ 10^{-39} เท่าของ strong nuclear force เป็นแรงดึงดูดของโลกที่กระทำกับวัตถุ ไม่มีความสำคัญมากนัก ในระดับอะตอม

1.5 สมมูลของมวลและพลังงาน (Mass–energy equivalent)

หน่วยพื้นฐานของพลังงานคือ จูล (joule: J) มีค่าเท่ากับพลังงานจากงานที่ใช้ในแรง 1 newton (แรงที่ใช้เคลื่อนวัตถุมวล 1 kg ด้วยความเร่ง 1 m/s^2) ในระยะทาง 1 เมตร แต่หน่วยที่ใช้มากกว่าในทางนิวเคลียร์ฟิสิกส์คือ อิเล็กตรอนโวลต์ (electron volt: eV) ซึ่งมีค่าเท่ากับ พลังงานจลน์ (kinetic energy) ที่ได้จากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านความต่างศักย์ 1 โวลต์ พลังงานที่ได้จากงานนี้เป็นผลมาจากความต่างศักย์และประจุของอิเล็กตรอน จะได้ $1\ eV = 1\ V \times 1.602 \times 10^{-19}\ C = 1.602 \times 10^{-19}\ J$ จากกฎพื้นฐานของไอน์สไตน์ว่าด้วยความสัมพันธ์ระหว่างมวลกับพลังงาน ดังสมการที่ 1.2

$$E = mc^2 \qquad (1.2)$$

เมื่อ c คือความเร็วแสง (3×10^8 m/s)

ตัวอย่างดังอิเล็กตรอนมี rest mass เท่ากับ 9.1×10^{-31} kg ก็จะสามารถอธิบายในเทอมของพลังงาน (rest energy: E_0) ได้เท่ากับ $E_0 = 8.19 \times 10^{-14}\ J = 0.511\ MeV$ สำหรับโปรตอน และนิวตรอน ดังตารางที่ 1.2

ทั้งนี้หากพิจารณาถึงความเร็วของอนุภาคร่วมด้วย มวลของอนุภาคจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น จากทฤษฎีสัมพันธภาพของไอน์สไตน์ เราจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างมวลกับความเร็ว ดังสมการที่ 1.3

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad (1.3)$$

เมื่อ m คือ มวลของอนุภาคเมื่อเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v

v คือ ความเร็วของอนุภาค

m_0 คือ rest mass ของอนุภาค

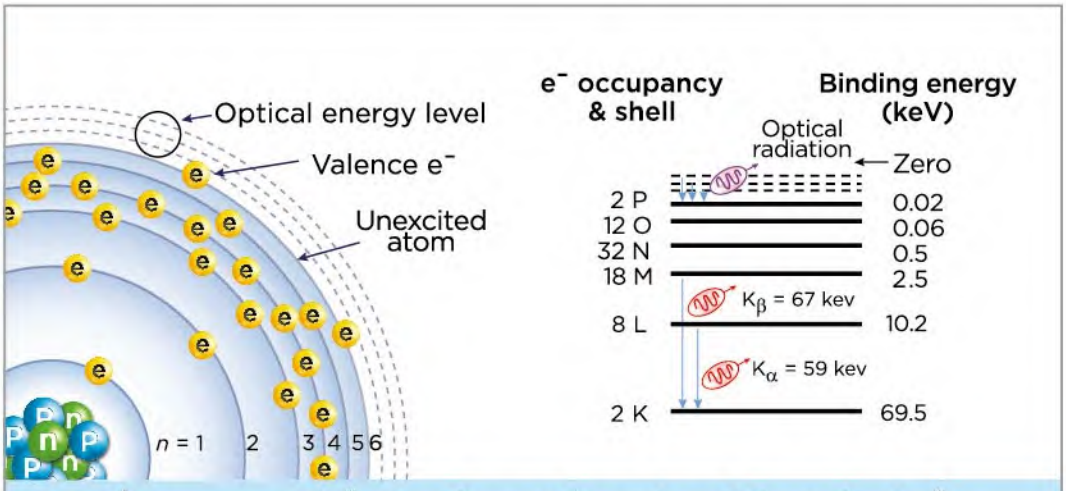
และสามารถหาพลังงานจลน์ (E_k) ได้จาก

$$E_k = mc^2 - m_0c^2 = m_0c^2 \left[\frac{m_0}{\sqrt{(1 - v^2/c^2)}} - 1 \right] \qquad (1.4)$$

1.6 ระดับชั้นพลังงานในอะตอม (Atomic energy levels)

การกระจายตัวของอิเล็กตรอนในอะตอมนั้น แบ่งตามวงโคจรของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียส โดยวงโคจรชั้นในสุดนั้นคือ ชั้น K และชั้นถัดๆ ขึ้นไป คือชั้น L, M, N และ O สามารถนับเลขวงโคจร (n) เริ่มตั้งแต่ n = 1 ที่ชั้น K และเรียงต่อเรื่อยไป จำนวนอิเล็กตรอนสูงสุดในแต่ละชั้นวงโคจรมีค่าเท่ากับ $2n^2$ แผนภาพระดับชั้นพลังงานในอะตอมทังสเตน ดังรูปที่ 1.3 พลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนกับนิวเคลียสนั้นจะเป็นค่าเฉพาะในแต่ละวงโคจร โดยวงโคจรที่ใกล้กับนิวเคลียสมากที่สุดจะมีพลังงานยึดเหนี่ยวมากที่สุด

จำนวนอิเล็กตรอนในแต่ละวงโคจรนั้น ไม่จำเป็นจะต้องเท่ากับจำนวนอิเล็กตรอนสูงสุดในวงโคจรเสมอ ตัวอย่างดังอะตอมทังสเตนในชั้น O ที่มีอิเล็กตรอนเพียง 12 ตัวจากจำนวนสูงสุด 50 ตัว ทั้งนี้เพื่อเติมอิเล็กตรอนในชั้นนอกสุด ที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวน้อยที่สุดที่เรียกว่า valence electron ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดคุณลักษณะทางเคมี และการปลดปล่อยพลังงานในรูปแบบ optical radiation หลังจากถูกกระตุ้น



รูปที่ 1.3 แผนภาพระดับชั้นพลังงานในอะตอมทังสเตน จำนวนอิเล็กตรอนในแต่ละชั้น และการปลอดปล่อยพลังงาน ทั้งในรูปแบบของ Optical radiation และ Characteristic x-rays

การเปลี่ยนชั้นพลังงานของอิเล็กตรอน เข้าสู่วงโคจรชั้นใน เช่น K L และ M จะมีการดูดกลืนและการปลดปล่อยพลังงานที่สูงขึ้น ถ้าพลังงานนั้นสูงมากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยว อิเล็กตรอนที่รับพลังงานนั้นก็จะสามารถดีดตัวออกจะอะตอม ทำให้เกิดที่ว่างในวงโคจร (hole) และจะมีการแทนที่แทบจะทันทีจากอิเล็กตรอนวงนอกถัดๆ ไป และเพื่อเป็นการอนุรักษ์พลังงาน จะมีการปลดปล่อยพลังงานในรูปแบบของ Characteristic x-rays หรือหากพลังงานนั้นถ่ายเทให้กับอิเล็กตรอนวงนอก จนทำให้มีการดีดออกของอิเล็กตรอนวงนอกนั้น เราจะเรียกอิเล็กตรอนนั้นว่า Auger electron

1.7 ระดับชั้นพลังงานในนิวเคลียส (Nuclear energy levels)

จาก Nuclear shell model อธิบายถึงการเรียงตัวของอนุภาคในนิวเคลียสที่เป็นระดับชั้นพลังงาน เช่นเดียวกับระดับชั้นพลังงานในอะตอม นิวเคลียสที่ไม่เสถียรของสารกัมมันตรังสี (radionuclide) หรือนิวเคลียสที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นหลังได้รับพลังงาน จะมีการสลายตัว (decay) หรือคายพลังงานที่มีค่าตามระดับชั้นพลังงานของนิวเคลียสนั้น ๆ เพื่อกลับสู่ภาวะเสถียรหรือ ground state โดยรูปแบบการสลายตัว (Modes of decay) ดังตารางที่ 1.3

- การสลายตัวให้อนุภาคแอลฟา (α) ซึ่งคือ ${}^{4}_{2}He$ อะตอม เกิดใน radionuclides ขนาดใหญ่ที่มีเลขอะตอมสูง มากกว่า 82

- การสลายตัวให้อนุภาคบีตา (β) เนื่องจากอนุภาคบีตาไม่มีอยู่จริงในนิวเคลียส การสลายตัวให้อนุภาคบีตานั้นเป็นกระบวนการต่อเนื่องจากการสลายตัวให้โปรตอนและนิวตรอน (เสียโปรตอน) ดังสมการที่ 1.5 และ 1.6

$$n \rightarrow p^{+} + \beta^{-} + antineutrino)(\tilde{\upsilon}) \qquad (1.5)$$

$$p^{+} \rightarrow n + \beta^{+} + neutrino(\upsilon) \qquad (1.6)$$

- Negatron (β^{-}) emission คือ การสลายตัวให้อนุภาคบีตาที่มีประจุลบ เกิดในนิวเคลียสที่มีโปรตอนจำนวนน้อย ต้องการโปรตอนมากขึ้น

- Positron (β^{+}) emission คือ การสลายตัวให้อนุภาค β ที่มีประจุบวก เกิดในนิวเคลียสที่มีโปรตอนมาก ต้องการนิวตรอนเพิ่ม จะต้องใช้พลังงานอย่างน้อย 1.02 MeV ซึ่งเมื่อโพซิตรอนที่ได้จากการสลายตัวนี้ชนกับอิเล็กตรอนจะเกิดกระบวนการ annihilation ให้โฟตอนพลังงาน 0.511 MeV สองตัวในทิศทางตรงกันข้าม เป็นประโยชน์กับการทำ Positron Emission Tomography (PET) scans

- Electron capture เกิดในนิวเคลียสที่มีโปรตอนมาก แต่พลังงานกระตุ้นที่นิวเคลียสได้รับน้อยกว่า 1.02 MeV ไม่สามารถสลายตัวแบบ β^{+}decay ได้ เป็นกระบวนการที่นิวเคลียสจับอิเล็กตรอนในวงโคจรและมีการเปลี่ยนโปรตอนไปเป็นนิวตรอน โดย Electron capture จะทำให้เกิดช่องว่างของอิเล็กตรอนในวงโคจร การแทนที่จากอิเล็กตรอนวงนอกจะทำให้เกิด characteristic x-rays และ/หรือ Auger electron เราเรียกกระบวนการนี้ว่า Internal photoelectric effect

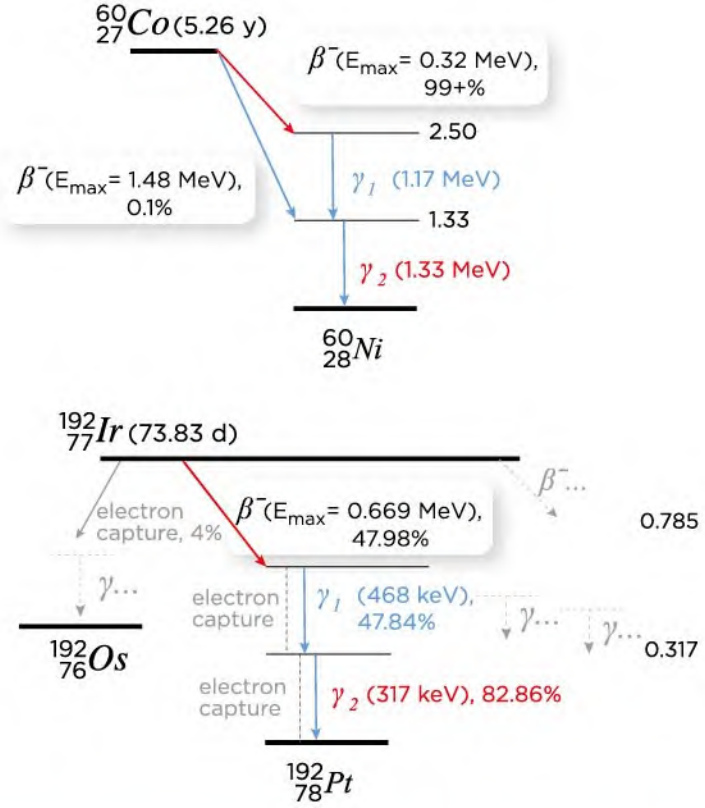
- Gamma (γ) emission คือการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินจากนิวเคลียสในรูปโฟตอน เลขมวลและเลขอะตอมเท่าเดิม ส่วนมากเกิดระหว่าง หรือ หลังจาก α และ β decay

- Internal conversion นิวเคลียสในสภาวะถูกกระตุ้น ถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนในวงโคจร ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม เป็นกระบวนการที่แข่งขันกันกับ gamma emission โดยพลังงานที่เกินจากพลังงานยึดเหนี่ยว จะกลายเป็นพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่หลุดออก (อิเล็กตรอนนี้ไม่ใช่อนุภาค β) และส่งผลต่อเนื่องในการเกิด characteristic x-rays และ/หรือ Auger electron เช่นเดียวกันกับ Electron capture

ตารางที่ 1.3 รูปแบบการสลายตัว (Modes of decay)

รูปแบบการสลายตัว	ตัวอย่าง
α-decay	$^{241}_{95}Am \rightarrow {}^{237}_{93}Np + {}^{4}_{2}He$
β^- decay	$^{32}_{15}P \rightarrow {}^{32}_{16}S + {}^{0}_{-1}\beta + \tilde{\upsilon}$
β^+ decay	$^{18}_{9}F \rightarrow {}^{18}_{8}O + {}^{0}_{+1}\beta + \upsilon$
Electron capture	$P^+ + e^- \rightarrow n + \upsilon$
Gamma (γ) emission	$^{60}_{27}Co \rightarrow {}^{60}_{28}Ni + {}^{0}_{-1}\beta + \tilde{\upsilon}$ + 1.17 MeV(γ) + 1.33 MeV(γ)
Internal conversion	-

การสลายตัวของสารกัมมันตรังสี ในธาตุหลายๆ ชนิดที่ใช้ในงานรังสีรักษา จะมีรูปแบบของการสลายตัวหลายชนิดนี้รวมอยู่ด้วย ตัวอย่างการสลายตัวของโคบอลต์ 60($^{60}_{27}Co$) และอิริเดียม 192($^{192}_{77}Ir$) ดังรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 การสลายตัวของ (บน) ธาตุโคบอลต์ 60 ($^{60}_{27}Co$) และ (ล่าง) อิริเดียม 192 ($^{192}_{77}Ir$)

1.8 ค่าคงที่การสลายตัว ความแรงของธาตุกัมมันตรังสี และค่าครึ่งชีวิต

ค่าคงที่การสลายตัว (decay constant: λ) สำหรับธาตุที่มีการสลายตัวของนิวเคลียส ทั้งในรูปแบบของอนุภาคและแกมมา ถูกเรียกว่า radioactivity โดยการสลายตัวนี้เป็นปรากฏการณ์ทางสถิติที่บอกถึงการลดลงของจำนวนอะตอมของธาตุกัมมันตรังสีต่อหน่วยเวลา ($\Delta N/\Delta t$) โดยมีความสัมพันธ์กับค่าคงที่การสลายตัว ดังสมการที่ 1.7 และ 1.8

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda N \qquad (1.7)$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \qquad (1.8)$$

เมื่อ N_0 คือ จำนวนอะตอมของธาตุกัมมันตรังสีเริ่มต้น

N คือ จำนวนอะตอมของธาตุกัมมันตรังสี ณ เวลา t

λ คือ ค่าคงที่การสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี

โดยเมื่อแทนที่ ($\Delta N/\Delta t$) ด้วย A แสดงได้ดังสมการ 1.9 และ 1.10

$$A = \lambda N \qquad (1.9)$$

$$A = A_0\, e^{-\lambda t} \qquad (1.10)$$

เมื่อ A คือ activity ที่เหลืออยู่ ณ เวลา t

A_0 คือ activity เริ่มต้น ซึ่งเท่ากับ λN_0

ความแรงของธาตุกัมมันตรังสี (Activity: A) คือ จำนวนของการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี มีหน่วย คูรี่ (Curie: Ci) หรือหน่วย SI คือ Becquerel (Bq) หรือ disintegration per second (dps) ความสัมพันธ์ของหน่วยทั้งสอง ดังสมการ 1.11

$$1\ \text{Ci} = 3.7 \times 10^{10}\ \text{Bq} \qquad (1.11)$$

ค่าครึ่งชีวิต (Half-life: $T_{1/2}$) คือเวลาที่จำนวนอะตอมหรือจำนวนของการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีลดลงเหลือครึ่งเท่าของค่าเริ่มต้น จากสมการ 1.8 หรือ 1.10 จะได้ ดังสมการ 1.12

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda t_{1/2}} \text{ หรือ } T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \qquad (1.12)$$

ตัวอย่างที่ 1.1 จงหาจำนวนอะตอม และ activity ของ ^{226}Ra น้ำหนัก 1 กรัม (ค่าครึ่งชีวิต = 1622 ปี)

a. หาจำนวนอะตอมจากส่วน 1.3

$$\text{Number of atoms/gram} = N_A / A_W$$

เมื่อ N_A คือ Avogadro's number มีค่าเท่ากับ 6.02×10^{23} atoms per gram atomic weight และ AW คือ atomic weight ซึ่งใกล้เคียงกับเลขมวล จะได้

$$\text{Number of atoms/gram} = \frac{6.02\ x\ 10^{23}}{226} = 2.66 \times 10^{21}$$

b. จาก Activity = λN และ $\lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}}$ จะได้

$$\text{Activity} = \frac{0.693}{(1622\ years)\ (3.15\ x\ 10^{7} seconds/y)} (2.66 \times 10^{21}/g)$$

$$= 3.61 \times 10^{10} \text{ dps/g}$$

$$= 0.975 \text{ Ci/g}$$

ค่า activity ต่อกรัมนี้ เรียกว่า Specific activity โดยในตัวอย่างพบว่า ค่า activity ของเรเดียมนั้นมีค่าประมาณ 1 Ci/g เป็นที่มาของการกำหนดปริมาณ 1 Ci ว่าเท่ากับอัตราการสลายตัวของธาตุเรเดียมที่หนัก 1 กรัม

ตัวอย่างที่ 1.2 จงคำนวณหาค่า decay constant ของ ^{60}Co (T1/2 = 5.26 years) ในหน่วยเดือน และหา activity ของ 5000 Ci ^{60}Co เมื่อเวลาผ่านไป 4 ปี

a. จากสมการ 1.12 จะได้

$$\lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}} = \frac{0.693}{(5.26\ years)\ (12\ months/y)} = 1.0979 \times 10^{-2} \text{ month}^{-1}$$

b. t = 4 ปี = 48 months จากสมการ 1.10 จะได้

$$A = A_o e^{-\lambda t}$$

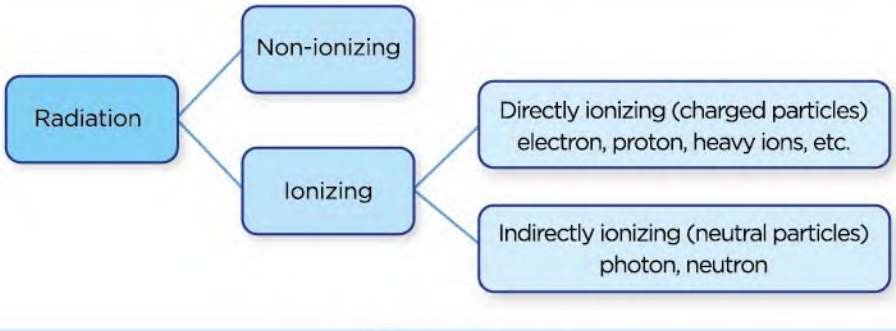
$$= 5000 \text{ Ci} \times e^{-1.0979 \times 10^{-2} \times 48}$$

$$= 2952 \text{ Ci}$$

1.9 ชนิดของรังสี (Classification of radiation)

รังสีคือพลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมาในรูปของอนุภาคหรือคลื่น ที่มีความยาวคลื่นและพลังงานแตกต่างกันไป โดยสามารถแบ่งชนิดของรังสีจากพลังงาน และความสามารถในการทำให้ประจุแตกตัว (Ionization) หรือกระบวนการที่ทำให้อะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้า กลายเป็นอะตอมที่มีประจุบวกหรือประจุลบ ดังรูปที่ 1.5 รังสีสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ

- รังสีที่ทำไม่ให้ประจุแตกตัว (Non-ionizing radiation) เป็นรังสีที่มีพลังงานไม่สูงพอที่จะทำให้พันธะทางเคมีแตกตัว ได้เพียงแค่ทำให้เกิดการสั่นของอะตอม รังสีประเภทนี้คือรังสีที่ใช้ในชีวิตประจำวัน ได้แก่ คลื่นวิทยุ ไมโครเวฟ อินฟราเรด แสง รังสีเหนือม่วง เป็นต้น
- รังสีที่ทำให้ประจุแตกตัว (Ionizing radiation) เป็นรังสีหรืออนุภาคที่มีพลังงานสูงมากพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอมสสารหลุดออกมาได้ รังสีประเภทนี้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในทางการแพทย์ ได้แก่ รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา และอนุภาคต่าง ๆ เป็นต้น



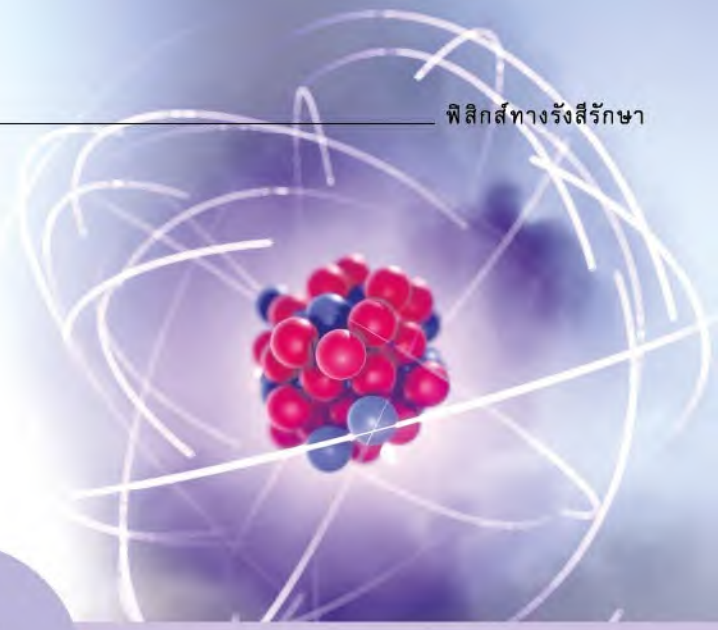
รูปที่ 1.5 ชนิดของรังสี

รังสีที่ทำให้ประจุแตกตัวนั้นสามารถแบ่งย่อยออกเป็น directly ionizing radiation (อนุภาคที่มีประจุ: Charged particles) และ indirectly ionizing radiation (อนุภาคที่ไม่มีประจุ: Uncharged particles) โดยสำหรับ directly ionizing radiation นั้น อนุภาคที่มีประจุสามารถถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนในตัวกลางผ่านปฏิกิริยาทางไฟฟ้าได้โดยตรง ในขณะที่ indirectly ionizing radiation จะต้องถ่ายเทพลังงานให้กับอนุภาคที่มีประจุก่อน และอนุภาคที่มีประจุนั้นจึงถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนในตัวกลางต่อไป

คุณสมบัติของรังสีแต่ละชนิด รวมถึงการเกิดอันตรกิริยากับวัตถุตัวกลาง การนำไปใช้ในทางรังสีรักษา ตลอดจนการป้องกันอันตรายจากรังสีชนิดต่าง ๆ นี้ จะถูกอธิบายในบทต่อ ๆ ไป

บรรณานุกรม

1. Khan FM. The physics of radiation therapy. 5th ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2014.
2. Chang DS, Lasley FD, Das IJ, Mendonca MS, Dynlacht JR. Basic Radiotherapy Physics and Biology. New York: Springer; 2014.
3. Mayles P, Nahum A, Rosenwald JC. Handbook of radiotherapy physics: theory and practice. New York: Tayler & Francis; 2007.
4. Podgorsak EB. Radiation oncology physics: a handbook for teachers and students. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2005.



2 อันตรกิริยาของโฟตอน (Photon interactions)

ทวีป แสงแห่งธรรม

เนื้อหา

บทนำ
2.1 การกระเจิงทอมสัน-เรย์เลห์ (Thomson-Rayleigh scattering)
2.2 อันตรกิริยาแบบโฟโตอิเล็กตริค (Photoelectric interaction)
2.3 อันตรกิริยาแบบคอมป์ตัน (Compton interaction)
2.4 อันตรกิริยาแบบผลผลิตคู่ (Pair production)
2.5 อันตรกิริยาแบบโฟโตดิสอินทริเกรชัน (Photodisintegration)
บรรณานุกรม

บทนำ

โฟตอน (Photon) มีรากศัพท์มาจากภาษากรีก แปลว่า แสง อยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ประพฤติตัวเสมือนเป็นอนุภาค ไม่มีมวล ไม่มีประจุไฟฟ้า และเสถียร มักใช้เรียกกับรังสีเอกซ์และรังสีแกมมา โดยพลังงานของโฟตอนแปรผันตามความถี่และแปรผกผันกับความยาวคลื่น ดังสมการที่ 2.1

$$E = hf = hc/\lambda \qquad (2.1)$$

เมื่อ h คือ ค่าคงที่แพลงค์ = 6.626×10^{-34} จูลวินาที (J•s),
f คือ ความถี่ของโฟตอน มีหน่วยเป็นเฮิร์ต (Hz)
c คือ อัตราเร็วแสงในสูญญากาศ มีค่าประมาณ 3×10^{8} เมตร/วินาที
λ คือ ความยาวคลื่น เป็นระยะห่างระหว่างยอดคลื่น มีหน่วยเป็นเมตร

เมื่อโฟตอนชนวัตถุตัวกลาง จะมีการดูดกลืน (absorb) โดยการถ่ายเทพลังงานให้กับตัวกลาง หรือมีการกระเจิง (scatter) ไปในทิศทางอื่นกลายเป็นรังสีทุติยภูมิ (secondary radiation) หรือมีการส่งผ่าน (transmit) ผ่านไปในตัวกลางโดยไม่มีการเกิดอันตรกิริยา ถือเป็นรังสีปฐมภูมิ (primary radiation) เมื่อโฟตอนมีการดูดกลืนหรือกระเจิง อาจกล่าวได้ว่ามีการลดทอน (attenuate) เกิดขึ้น จำนวนโฟตอนที่มีการส่งผ่านออกมาเมื่อผ่านตัวกลางใด ๆ สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 2.2 สำหรับกรณีจัดรูปแบบการวัดชนิดลำรังสีแคบ (narrow-beam geometry) แสดงดังรูปที่ 2.1 (ก) ถือเป็นสภาวะของการวัดที่ถูกต้อง ขณะที่สมการที่ 2.3 เป็นสมการแสดงสำหรับกรณีจัดรูปแบบการวัดลำรังสีแบบกว้าง (board-beam geometry) ดังรูป 2.1 (ข) ซึ่งเป็นสภาวะของการวัดที่ไม่เหมาะสม เนื่องจากมีรังสีกระเจิงรวมเข้ามาในหัววัดรังสี

$$I = I_0 e^{-\mu x} \qquad (2.2)$$

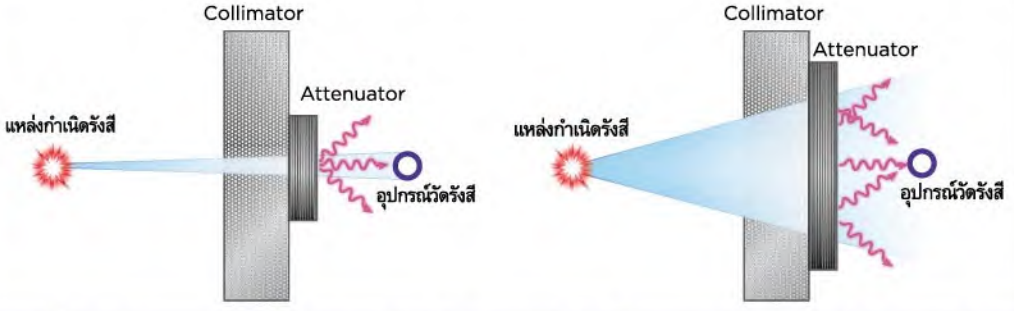
$$I = B I_0 e^{-\mu x} \qquad (2.3)$$

เมื่อ I คือ จำนวนโฟตอนก่อนผ่านวัตถุตัวกลาง

I_0 คือ จำนวนโฟตอนหลังผ่านวัตถุตัวกลาง

μ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (linear attenuation coefficient), เซนติเมตร$^{-1}$

B คือ build-up factor จากผลของรังสีกระเจิง



รูปที่ 2.1 ลักษณะการจัดรูปแบบการวัดรังสีชนิด (ก) ลำรังสีแบบแคบ และ (ข) ลำรังสีแบบกว้าง

ตัวอย่างที่ 2.1 ในสภาวะการวัดรังสีแบบแคบ เมื่อมีโฟตอนพลังงานเดียวจำนวน 5000 ตัว ถูกลดทอนเหลือเพียง 1000 ตัวเมื่อผ่านแผ่นทองแดง ความหนา 2 เซนติเมตร จงหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของทองแดงนี้

จาก $I = I_0 e^{-\mu x}$

$I/I_0 = e^{-\mu x}$

$\ln (I/I_0) = -\mu x$ หรือ $\ln (I_0/I) = \mu x$

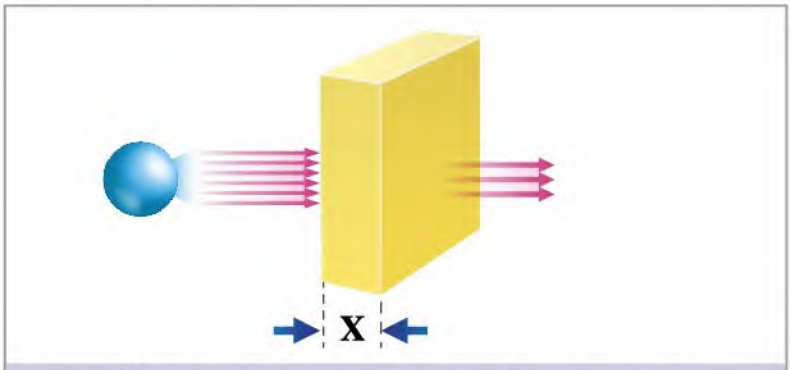
$\ln (5000/1000) = \mu$(2 เซนติเมตร)

$\mu = \ln (5) / 2$ เซนติเมตร

$\mu = 1.61 / 2$ เซนติเมตร $= 0.81$ เซนติเมตร$^{-1}$

โดย $1/\mu$ เรียกว่าระยะทางเฉลี่ยอิสระ (mean free path หรือ mean path length หรือ relaxation length) เป็นระยะทางเฉลี่ยที่โฟตอนเคลื่อนที่ก่อนชนตัวกลางมีหน่วยเป็นเซนติเมตร

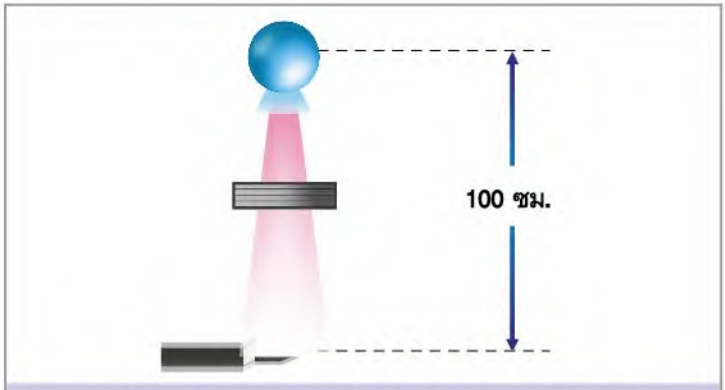
พารามิเตอร์ตัวหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น คือ ค่าความหนาครึ่งค่า (half-value layer: HVL) เป็นความหนาของวัสดุใดๆ ที่ลดทอนจำนวนโฟตอนหรือความเข้ม (intensity) ของลำรังสีลงเหลือครึ่งหนึ่งจากเดิม ภายใต้สภาวะการวัดรังสีแบบแคบ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งความหนา X คือค่า HVL และสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 2.4



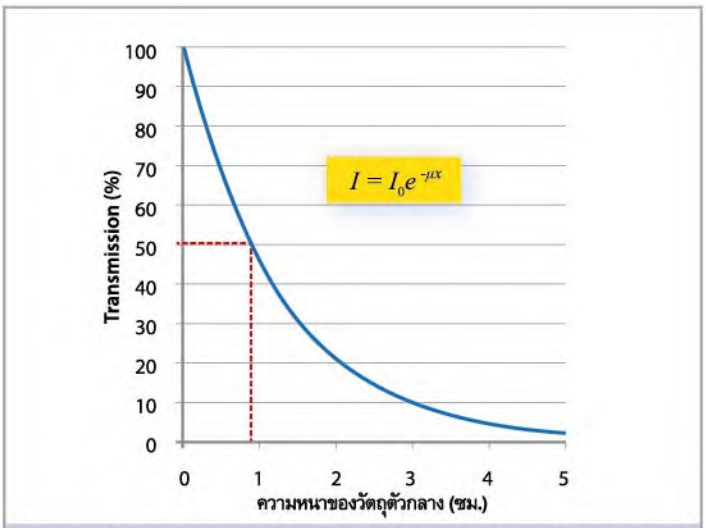
รูปที่ 2.2 แสดงการลดทอนของโฟตอนเมื่อผ่านวัตถุตัวกลาง

$$HVL = \ln 2/\mu = 0.693/\mu \qquad (2.4)$$

ค่า HVL นี้สามารถวัดได้โดยการใช้เครื่องวัดรังสี ionization chamber ทำโดยการตั้งค่า kVp, mAs และกำหนดระยะจากจุดโฟกัสถึงหัววัด (focal to detector distance: FDD) คงที่ ดังรูปที่ 2.3 หรือกำหนดเวลาและระยะจากแหล่งกำเนิดรังสีถึงหัววัด (source to detector distance: SDD) คงที่ กรณีที่แหล่งกำเนิดรังสีเป็นสารกัมมันตรังสี เริ่มจากนับวัดค่าประจุที่เกิดขึ้นกรณีที่ไม่มีวัสดุลดทอนรังสี โดยมากนิยมใช้อะลูมิเนียมในกรณีที่เป็นโฟตอนพลังงานต่ำ จากนั้นค่อย ๆ เพิ่มความหนาของวัสดุทอนรังสีจนกระทั่งอ่านค่าประจุหลังผ่านวัสดุทอนรังสีน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของประจุเริ่มต้น นำค่าประจุที่วัดได้มาแสดงกราฟความสัมพันธ์กับความหนาของวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยความหนาที่ประจุหรือปริมาณรังสีที่เล็ดลอดออกมาลดลงเหลือ 50% จากค่าเริ่มต้นคือ HVL

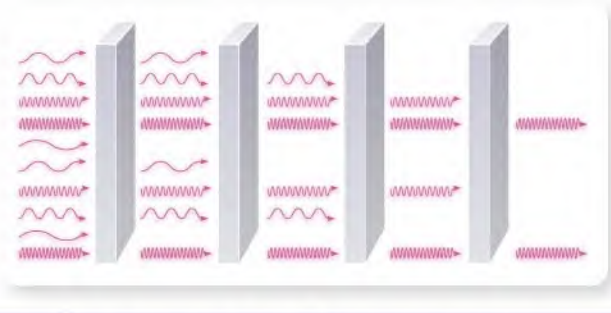


รูปที่ 2.3 แสดงการจัดเครื่องมือเพื่อทำการวัดค่า HVL



รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซนต์ที่ลำรังสีทะลุผ่านวัสดุทดลอนรังสีกับความหนาของวัสดุลดทอนรังสี

ในกรณีที่แหล่งกำเนิดรังสีมีพลังงานค่าเดียว $HVL_1 = HVL_2 = HVL_3 = \ldots$ อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่โฟตอนมีหลายค่าพลังงาน (polyenergetic beams) เช่น รังสีเอกซ์ 90 kVp จากเครื่องเอกซเรย์ ประกอบด้วยรังสีเอกซ์พลังงานต่ำไปจนถึงพลังงานสูงสุด ในกรณีนี้เมื่อรังสีผ่านวัสดุลดทอนรังสี พลังงานต่ำจะถูกลดทอนมากกว่า เหลือพลังงานสูงเล็ดลอดออกมาทำให้พลังงานเฉลี่ยสูงขึ้น ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า beam hardening effect การจะลดปริมาณรังสีลง ให้เหลือครึ่งหนึ่งจึงต้องใช้ความหนาที่มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ส่งผลให้ $HVL_1 < HVL_2 < HVL_3 < \ldots$ เสมอ

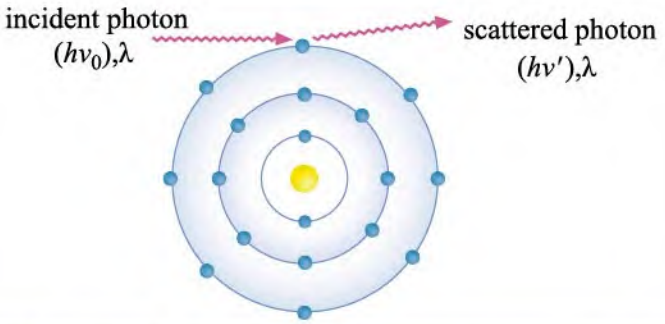


รูปที่ 2.5 แสดงการอธิบายถึง beam hardening effect

2.1 การกระเจิงทอมสัน-เรย์เลห์ (Thomson–Rayleigh scattering)

แสดงโอกาสการเกิดด้วยสัญลักษณ์ ω เกิดขึ้นในกรณีที่อันตรกิริยาระหว่างโฟตอนและอิเล็กตรอนของอะตอมในตัวกลางที่ไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนหรือกระตุ้นอะตอม นั่นคือเป็นการชนกันแบบยืดหยุ่น โดยพลังงานของโฟตอนที่ถ่ายเทให้กับอิเล็กตรอนในอะตอมมีน้อยมาก ดังนั้นโฟตอนจึงมีการเพียงแค่กระเจิงออกไปเป็นมุมแคบ ๆ โดยแทบไม่มีการสูญเสียพลังงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.6 จะเห็นว่า

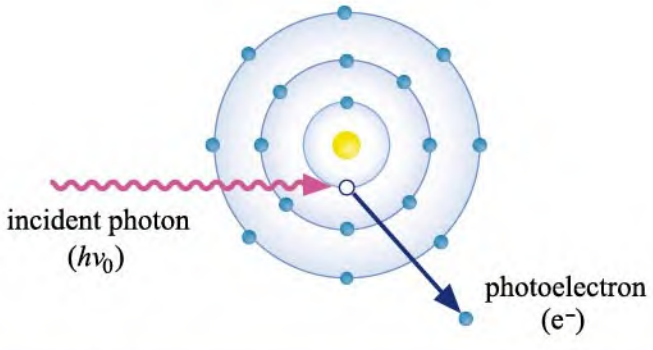
ความยาวคลื่นของโฟตอนตัวที่วิ่งเข้าชน (incident photon) ใกล้เคียงกับโฟตอนที่กระเจิงออกมา (scattered photon) โดยอันตรกิริยาแบบนี้มักพบในโฟตอนพลังงานต่ำมาก



รูปที่ 2.6 การเกิดอันตรกิริยาแบบ Thomson-Rayleigh scattering

2.2 อันตรกิริยาแบบโฟโตอิเล็กตริค (Photoelectric interaction)

แสดงโอกาสการเกิดด้วยสัญลักษณ์ τ เป็นอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อโฟตอนพลังงานต่ำเกิดการชนกับอิเล็กตรอนวงใน (ชั้น K หรือ L) ในวงโคจรแบบไม่ยืดหยุ่น ดังรูป 2.7 โฟตอนถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้อิเล็กตรอนที่ถูกชน ส่งผลให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากวงโคจรไปด้วยพลังงานจลน์ ที่เป็นผลต่างของพลังงานโฟตอนที่เข้าชนกับพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในวงโคจร ดังสมการที่ 2.5 จะเห็นว่าการเกิดโฟโตอิเล็กตริกได้ พลังงานของโฟตอนที่เข้าชนจะต้องมากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในวงโคจรเสมอ ภายหลังการเกิด photoelectric จะเกิด ที่ว่าง (hole) ขึ้น ทำให้อิเล็กตรอนจากวงนอก ๆ เข้ามาแทนที่ hole นี้ เนื่องจากอิเล็กตรอนในแต่ละชั้นมีพลังงานยึดเหนี่ยวที่ไม่เท่ากัน เมื่ออิเล็กตรอนจากวงนอกเข้ามาแทนที่วงใน จะมีการปล่อยพลังงานในรูปของรังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะ (characteristic x-ray) ที่มีพลังงานเท่ากับผลต่างของระดับชั้นพลังงานทั้งสอง ดังรูปที่ 2.8 (ก) นอกจากนี้ characteristic x-ray ที่ปล่อยออกมาอาจชนหรือถ่ายเทพลังงานให้อิเล็กตรอนวงนอก ๆ ให้หลุดจากวงโคจรได้ อิเล็กตรอนที่หลุดออกมานี้ เรียกว่า auger electron ดังรูปที่ 2.8 (ข)



รูปที่ 2.7 การเกิดอันตรกิริยาแบบ Photoelectric effect