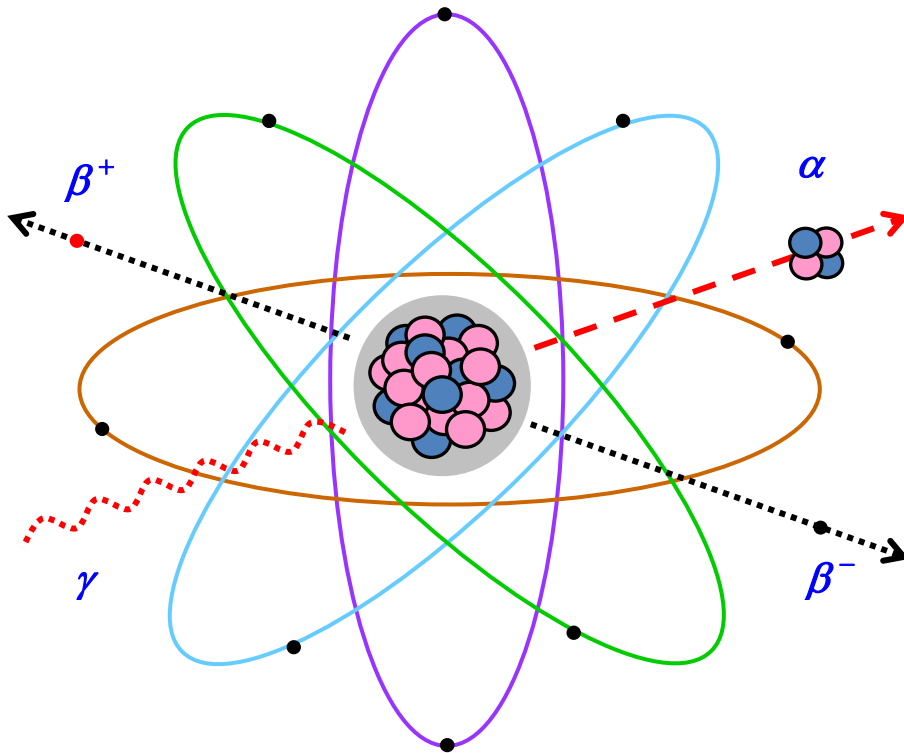


ฟิสิกส์เชิงรังสี

Radiological Physics

พิมพ์ครั้งที่ 2



ชื่อหนังสือ ฟิสิกส์เชิงรังสี (Radiological Physics)

ผู้เขียน นคร ไพศาลกิตติสกุล

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

พิมพ์ครั้งที่ 2 เมษายน พ.ศ. 2555 จำนวน 300 เล่ม

สงวนลิขสิทธิ์ © พ.ศ. 2555 ราคาเล่มละ 290 บาท

การผลิตและลอกเลียนแบบหนังสือเล่มนี้ไม่ว่ารูปแบบใด

ต้องได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากผู้เขียนเจ้าของลิขสิทธิ์

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของสำนักหอสมุดแห่งชาติ

นคร ไพศาลกิตติสกุล.

ฟิสิกส์เชิงรังสี.-- พิมพ์ครั้งที่ 2.-- กรุงเทพฯ : อักษรโสภณ, 2555.

229 หน้า.

1. ฟิสิกส์. 2. กัมมันตภาพรังสี. 0. ชื่อเรื่อง.

539.7

ISBN 978-974-253-280-2

พิมพ์ที่ Thai Print on Demand

บริษัท อักษรโสภณ จำกัด

58 สุขุมวิท 36 (ซอยนภาศัพท์ แยก 5)

แขวงคลองตัน เขตคลองเตย กรุงเทพฯ 10110

โทร. 02-258-5861-2 โทรสาร. 02-258-9130

คำนำ (พิมพ์ครั้งที่ 2)

ในเดือนเมษายนปี พ.ศ. 2554 ได้เกิดแผ่นดินไหวอย่างรุนแรงขึ้นที่เมืองฟูกุชิมะ ประเทศญี่ปุ่น ส่งผลให้เกิดคลื่นยักษ์ซึนามิขึ้น โรงไฟฟ้านิวเคลียร์หลายแห่งได้รับความเสียหายอย่างรุนแรง ถึงขั้นที่มีสารกัมมันตรังสีรั่วไหลออกสู่สภาพแวดล้อม ความรู้เรื่องการจัดการและการป้องกันสารกัมมันตรังสี รวมถึงอันตรายที่อาจเกิดขึ้นจากการได้รับกัมมันตภาพรังสีเป็นที่สนใจและกล่าวถึงในสังคมกว้างขวางมากขึ้น หลังจากที่ผู้เขียนได้ใช้หนังสือเล่มที่พิมพ์ในครั้งแรกประกอบการเรียนการสอนในห้องเรียน ได้พบข้อบกพร่องหลายแห่ง จึงได้ใช้โอกาสในการพิมพ์ครั้งที่ 2 นี้ปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องเหล่านั้น พร้อมกันนี้ได้เพิ่มเติมเนื้อหาบางส่วน เพื่อเสริมความเข้าใจของผู้อ่านในเนื้อหาที่มีอยู่เดิมและเพื่อความครบถ้วนของบทเรียน อย่างไรก็ตาม หากผู้อ่านยังพบสิ่งใดบกพร่องหรือผิดพลาดหรือมีข้อเสนอแนะที่คิดว่าเป็นประโยชน์กับหนังสือเล่มนี้ ขอได้โปรดแจ้งผู้เขียนเพื่อที่จะได้ทำการแก้ไขปรับปรุงให้เหมาะสมในการจัดพิมพ์ครั้งต่อไป จักขอบคุณยิ่ง

ผู้เขียนขอขอบคุณผู้อ่านทุกท่านที่ได้ให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์สำหรับการพิมพ์ในครั้งที่ 2 นี้ รวมถึง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ (Thailand Center of Excellence in Physics - ThEP) ที่ได้ให้การสนับสนุนบางส่วนจนทำให้หนังสือเล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

นคร ไพศาลกิตติสกุล

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำนำ (พิมพ์ครั้งที่ 1)

หลังจากการค้นพบกัมมันตภาพรังสีในปี ค.ศ. 1896 ได้มีการศึกษาและประยุกต์ใช้รังสีจากสารกัมมันตรังสีที่มีในธรรมชาติอย่างมากมาย ครอบคลุมในหลายด้าน เช่น ด้านการศึกษาวิทยาศาสตร์พื้นฐาน การผลิตพลังงาน การรักษาและวินิจฉัยทางการแพทย์ ฯลฯ นอกจากนี้ยังได้มีการประดิษฐ์เครื่องมือผลิตรังสีขึ้นมาเองเช่น เครื่องเอกซเรย์ที่ใช้ในคลินิกทันตกรรมหรือโรงพยาบาล ด้วยเทคโนโลยีที่ทันสมัยในปัจจุบัน มนุษย์จึงมีความเกี่ยวข้องกับรังสีในชีวิตประจำวันไม่มากนักน้อย ผู้เขียนได้มีโอกาสสอนวิชาที่เกี่ยวข้องกับฟิสิกส์เชิงรังสีที่ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และที่โรงเรียนฟิสิกส์การแพทย์ ภาควิชารังสีวิทยา โรงพยาบาลรามาธิบดี มหาวิทยาลัยมหิดล พบว่าหนังสือหรือตำราภาษาไทยที่เกี่ยวข้องกับฟิสิกส์เชิงรังสียังขาดแคลนอยู่ ถึงแม้ว่าหลายมหาวิทยาลัยในประเทศไทยได้มีการจัดการเรียนการสอนในวิชาดังกล่าว ผู้เขียนจึงได้จัดทำหนังสือเล่มนี้ขึ้นมาโดยมีจุดประสงค์เพื่อใช้ประกอบการเรียนการสอนวิชาฟิสิกส์เชิงรังสี (Radiological Physics - 2304331) ที่ภาควิชาฟิสิกส์และวิชาฟิสิกส์รังสี และฟิสิกส์นิวเคลียร์ (Radiation and Nuclear Physics) สำหรับนักศึกษาโรงเรียนฟิสิกส์การแพทย์ อีกทั้งเพื่อเผยแพร่ความรู้ด้านฟิสิกส์เชิงรังสีให้กับนักเรียน นิสิต นักศึกษาหรือผู้ที่สนใจด้วย

หนังสือเล่มนี้มีเนื้อหาเกี่ยวกับความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับอะตอมและนิวเคลียสแบบจำลองของนิวเคลียส กัมมันตภาพรังสีและการสลาย อันตรกิริยาของรังสีกับสสาร การตรวจวัดและการป้องกันรังสี ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผู้อ่านจะได้รับประโยชน์จากหนังสือเล่มนี้ หากมีสิ่งใดบกพร่องหรือผิดพลาด ผู้เขียนขออภัยไว้ ณ ที่นี้และหากผู้อ่านพบความผิดพลาดหรือมีข้อเสนอแนะ ขอได้โปรดแจ้งผู้เขียนเพื่อที่จะได้ทำการแก้ไขปรับปรุงให้เหมาะสมในการจัดพิมพ์ครั้งต่อไป จักขอบคุณยิ่ง

นคร ไพศาลกิตติสกุล

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

คำนำ (พิมพ์ครั้งที่ 2)	I
คำนำ (พิมพ์ครั้งที่ 1)	II
สารบัญ	III
บทที่ 1 โครงสร้างอะตอม	1
การค้นพบรังสีเอกซ์	2
การค้นพบกัมมันตภาพรังสี	2
การค้นพบอิเล็กตรอน	3
แบบจำลองอะตอมของรัทเทอร์ฟอร์ด	3
สเปกตรัมของอะตอม	4
แบบจำลองอะตอมไฮโดรเจนของโบร์	6
รังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะ	9
แผนภาพของมอสลีย์	12
กลศาสตร์ควอนตัมเบื้องต้น	13
ปัญหาของอนุภาคในกล่องในหนึ่งมิติ	15
การจัดเรียงอิเล็กตรอนภายในอะตอม	19
เลเซอร์	21
คำถามท้ายบทที่ 1	24
บทที่ 2 โครงสร้างของนิวเคลียส	25
องค์ประกอบของนิวเคลียส	25
การจัดกลุ่มของนิวเคลียส	26
แรงนิวเคลียร์	27
มวลของนิวเคลียสและอะตอม	27
พลังงานยึดเหนี่ยวภายในนิวเคลียส	29
ความเสถียรของนิวเคลียส	33
ขนาดและโครงสร้างของนิวเคลียส	34
สปินและโมเมนต์แม่เหล็กของนิวเคลียส	37

คำถามท้ายบทที่ 2.....	40
บทที่ 3 แบบจำลองของนิวเคลียส.....	41
แบบจำลองหยดของเหลว	41
แบบจำลองแบบชั้น.....	47
คำถามท้ายบทที่ 3.....	50
บทที่ 4 กัมมันตภาพรังสี.....	51
กฎการสลายกัมมันตรังสี.....	52
กัมมันตภาพ.....	53
ครึ่งชีวิตและชีวิตเฉลี่ย	54
กัมมันตภาพสะสม	56
กัมมันตภาพจำเพาะ	57
รูปแบบการสลายของนิวเคลียสกัมมันตรังสี.....	58
สมดุลการสลายต่อเนื่อง.....	66
อนุกรมการสลาย	69
คำถามท้ายบทที่ 4.....	71
บทที่ 5 การสลายกัมมันตรังสี	73
การสลายแอลฟา	73
การสลายบีตา.....	79
การจับยึดอิเล็กตรอน.....	84
การสลายแกมมา	86
การแปลงผันภายใน.....	88
ภาพรวมการสลายของนิวเคลียสที่ไม่เสถียร	89
คำถามท้ายบทที่ 5.....	91
บทที่ 6 ปฏิกิริยานิวเคลียร์.....	93
การเขียนปฏิกิริยานิวเคลียร์.....	93
กฎการอนุรักษ์และค่าคิวของปฏิกิริยานิวเคลียร์.....	94
ภาคตัดขวางของปฏิกิริยานิวเคลียร์	96
พลังงานขีดเริ่มของปฏิกิริยานิวเคลียร์.....	100

ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชันและฟิวชัน	104
ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชัน.....	104
ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชัน.....	107
ชนิดของปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบอื่น.....	111
คำถามท้ายบทที่ 6	113
บทที่ 7 อันตรกิริยาของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้ากับสสาร	115
กระบวนการสูญเสียพลังงานของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า.....	115
กำลังหยุด	117
การคำนวณกำลังหยุดแบบประมาณ	118
สูตรของเบเตสำหรับกำลังหยุด	121
กำลังหยุดสำหรับโปรตอนในน้ำ	126
ระยะหยุด.....	127
กำลังหยุดของอนุภาคบีตา.....	131
การแกว่งของพลังงานและการแกว่งของระยะหยุด	133
คำถามท้ายบทที่ 7	135
บทที่ 8 อันตรกิริยาของโฟตอนกับสสาร	137
กระบวนการของอันตรกิริยา	138
การลดทอนของโฟตอน.....	139
อันตรกิริยาโฟโตอิเล็กทริก	144
อันตรกิริยาคอมป์ตัน	147
อันตรกิริยาการเกิดอนุภาคคู่.....	151
อันตรกิริยานิวเคลียร์.....	152
การลดทอนรวมของโฟตอนจากอันตรกิริยาแบบต่างๆ.....	153
สัมประสิทธิ์การดูดกลืนและการส่งผ่านพลังงาน.....	155
คำถามท้ายบทที่ 8	157
บทที่ 9 อันตรกิริยาของนิวตรอนกับสสาร.....	159
แหล่งกำเนิดนิวตรอน	160
ปฏิกิริยานิวเคลียร์จากรังสีแอลฟาและรังสีแกมมา	160
การสลายฟิชชันแบบเกิดเอง	162

เตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์.....	162
การจำแนกประเภทของนิวตรอน.....	163
อันตรกิริยาการชนและการจับตัวของนิวตรอน	165
คำถามท้ายบทที่ 9.....	174
บทที่ 10 ปริมาณรังสีและการตรวจวัด.....	175
หลักการตรวจวัดรังสีพื้นฐาน.....	175
เครื่องตรวจวัดรังสีแบบพื้นฐาน	176
เครื่องวัดแบบใช้แก๊ส.....	176
เครื่องวัดแบบใช้ตัวแปลงแสง.....	180
เครื่องวัดแบบใช้สารกึ่งตัวนำ.....	181
ตัววัดปริมาณรังสีแบบเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์	182
หน่วยที่เกี่ยวข้องกับการวัดปริมาณรังสี.....	184
คำถามท้ายบทที่ 10.....	191
บทที่ 11 การป้องกันและการกำบังรังสี.....	193
วัตถุประสงค์ของการป้องกันอันตรายจากรังสี.....	194
เกณฑ์การได้รับปริมาณรังสีตามมาตรฐานความปลอดภัยสากล	194
หลักการพื้นฐานในการป้องกันรังสี.....	196
การกำบังรังสีจากแหล่งกำเนิดภายนอก.....	197
การคำนวณความหนาของวัสดุกำบังสำหรับเครื่องผลิตรังสีเอกซ์.....	201
การกำบังรังสีปฐมภูมิ	203
การกำบังรังสีทุติยภูมิ.....	212
คำถามท้ายบทที่ 11.....	215
บรรณานุกรม.....	217
ประวัติผู้เขียน	218
ดัชนี	219

บทที่ 1 โครงสร้างอะตอม

ความรู้พื้นฐานที่สำคัญสำหรับฟิสิกส์เชิงรังสี คือความรู้ทางด้านฟิสิกส์ของอะตอมและนิวเคลียส เนื่องจากฟิสิกส์เชิงรังสีเป็นการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการปลดปล่อยพลังงานของนิวเคลียสหรืออะตอม ทั้งจากกระบวนการที่เกิดขึ้นเองทางธรรมชาติและที่ถูกกระตุ้นให้เกิดขึ้นจากปัจจัยทางกายภาพภายนอก นอกจากนี้ยังรวมถึงการศึกษานิวเคลียสของรังสีในสสารต่างๆ ด้วย ในบทนี้จะได้กล่าวถึงความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับอะตอมเป็นหลักสำหรับหัวข้อที่เกี่ยวข้องกับนิวเคลียสจะได้กล่าวในบทถัดไป

การค้นพบหรือแนวคิดที่สำคัญบางส่วนที่เกี่ยวข้องกับอะตอมและนิวเคลียส และนำมาสู่การพัฒนาความรู้ของฟิสิกส์ของการแผ่รังสีซึ่งจะกล่าวถึงในบทนี้ เรียงตามลำดับเวลา มีดังนี้

- ค.ศ. 1895 เรินต์เกนค้นพบรังสีเอกซ์
- ค.ศ. 1896 แบล็กเกอแรลค้นพบกัมมันตภาพรังสี
- ค.ศ. 1897 ทอมสันค้นพบอิเล็กตรอน
- ค.ศ. 1900 แพลงก์เสนอทฤษฎีพื้นฐานของการแผ่รังสีของวัตถุดำ
- ค.ศ. 1911 รัทเทอร์ฟอร์ดทำการทดลองเรื่องการกระเจิงของอนุภาคแอลฟา
- ค.ศ. 1913 โบร์เสนอแบบจำลองอะตอมไฮโดรเจน

เนื้อหาในบทนี้ยังกล่าวถึงสเปกตรัมของอะตอมซึ่งเป็นสิ่งบ่งชี้แสดงให้เห็นว่าระดับพลังงานภายในอะตอมมีค่าไม่ต่อเนื่องและนำมาสู่การเสนอแบบจำลองอะตอมไฮโดรเจนของโบร์ แผนภาพของมอสลีย์ซึ่งเป็นการศึกษารังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะของธาตุชนิดต่างๆ กลศาสตร์ควอนตัมเบื้องต้นซึ่งถือเป็นทฤษฎีที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์ในระดับอะตอม การจัดเรียงอิเล็กตรอนภายในอะตอมและเลเซอร์

การค้นพบรังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์ค้นพบครั้งแรกจากการทดลองโดยเรินต์เกน อุปกรณ์สำคัญในการผลิตรังสีเอกซ์คือ หลอดรังสีแคโทด ซึ่งเป็นหลอดสูญญากาศภายในมีขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วคือ ขั้วบวกเรียกว่า “แอโนด” และขั้วลบเรียกว่า “แคโทด” ซึ่งอยู่ห่างกัน โดยเมื่อให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วสูงและให้ความร้อนกับขั้วแอโนดเพื่อให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระ จะตรวจพบว่ามีการแผ่ไฟฟ้าเกิดขึ้น ซึ่งต่อมาภายหลังพบว่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมาจากอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากขั้วด้านลบ (แคโทด) วิ่งไปยังขั้วบวก (แอโนด) ซึ่งทำหน้าที่เป็นเป้าโลหะ เมื่ออิเล็กตรอนเข้ามาชน เกิดการสูญเสียพลังงานภายในเป้าโลหะ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพลังงานความร้อน มีส่วนน้อยเป็นการแผ่รังสีออกมาในลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ด้วยความไม่รู้ในตอนแรกของการค้นพบ จึงเรียกรังสีที่เกิดขึ้นนั้นว่า “รังสีเอกซ์” (X rays) เนื่องจากว่าตัวแปรเอกซ์มักจะถูกใช้เป็นชื่อตัวแปรที่ไม่ทราบค่าในทางคณิตศาสตร์

ภายในหลอดรังสีแคโทดมีสภาพเป็นสูญญากาศ เนื่องจากหากมีอากาศอยู่ในหลอดจะทำให้อิเล็กตรอนที่วิ่งออกจากขั้วลบไปยังขั้วบวกเกิดการชนกับโมเลกุลของอากาศ ทำให้มีการเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่และเสียพลังงานบางส่วนไป ส่งผลให้ปริมาณรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นน้อยลง

การค้นพบกัมมันตภาพรังสี

แบ็กเกอเรลสังเกตเห็นแผ่นฟิล์มที่วางบริเวณที่ทึบแสงแต่ว่าอยู่ใกล้กับสารยูเรเนียมเกิดมีรอยฝ้าคล้ายกับแผ่นที่โดนแสงแดด ต่อมาจึงได้ข้อสรุปว่ามีรังสีแผ่ออกมาจากสารยูเรเนียม ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดเองตามธรรมชาติ ในตอนแรกพบการแผ่รังสีใน 3 ธาตุหลักคือ ยูเรเนียม เรเดียม และ พลูโตเนียม ซึ่งรังสีที่แผ่ออกมาจำแนกในเบื้องต้นออกเป็น 3 ชนิดคือ รังสีแอลฟา (α ray) รังสีบีตา (β ray) และรังสีแกมมา (γ ray) รังสีแต่ละชนิดมีประจุไฟฟ้าและมวลแตกต่างกัน รังสีแอลฟาเป็นนิวเคลียสของธาตุฮีเลียม (${}^4_2\text{He}$) มีประจุไฟฟ้าเป็นบวก มีมวลมากที่สุดในรังสีทั้ง 3 ชนิด รังสีบีตาเป็นอนุภาคที่มีมวลเท่ากับอิเล็กตรอน มีทั้งแบบที่เป็นประจุบวกเรียกว่ารังสีบีตาบวก (β^+ ray) และที่เป็นประจุลบเรียกว่ารังสีบีตาลบ (β^- ray) ซึ่งคือลำของอนุภาคโพสิตรอนและอิเล็กตรอนตามลำดับ ส่วนรังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพลังงานสูง ที่เกิดมาจากการเปลี่ยนแปลงของนิวเคลียสที่ไม่เสถียร ทิศทางการแผ่รังสีของลำรังสีทั้งสามชนิดแตกต่าง

กันภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก อันเนื่องมาจากประจุไฟฟ้าและมวลที่แตกต่างกันของรังสีทั้งสาม

การค้นพบอิเล็กตรอน

ในปลายศตวรรษที่ 19 แนวคิดที่คิดว่าสสารประกอบด้วยหน่วยย่อยเล็กที่สุดเรียกว่า “อะตอม” เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไป แต่ทว่าไม่มีนักวิทยาศาสตร์คนใดทราบแน่ชัดว่าองค์ประกอบของอะตอมมีอะไรบ้าง จนกระทั่งนักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษชื่อทอมสันค้นพบจากการทดลองที่มีหลอดรังสีแคโทดภายใต้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าว่าอะตอมมีอนุภาคซึ่งมีประจุลบเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วยเสมอ ซึ่งต่อมาเรียกอนุภาคนั้นว่าอิเล็กตรอน โดยค่าประจุไฟฟ้าต่อมวลของอิเล็กตรอนที่คำนวณได้มีค่าเท่ากันสำหรับโลหะชนิดต่างๆ ที่นำมาใช้เป็นขั้วแคโทด

สืบเนื่องจากการค้นพบอิเล็กตรอนของทอมสัน มิลลิแกนได้ออกแบบการทดลองเพื่อที่จะหาค่าประจุไฟฟ้าหรือมวลของอิเล็กตรอน ซึ่งต่อมารู้จักกันในชื่อการทดลองหยดน้ำมันของมิลลิแกน จากผลการทดลองมิลลิแกนรายงานค่าประจุไฟฟ้าที่เป็นลบของอิเล็กตรอนเท่ากับ -1.6×10^{-19} คูโลมบ์ ซึ่งถือเป็นหน่วยย่อยเล็กที่สุดของประจุไฟฟ้าอิสระที่พบในธรรมชาติ และจากค่าประจุต่อมวลจากการทดลองของทอมสันทำให้ได้ว่ามวลของอิเล็กตรอนมีค่าประมาณ 9.109×10^{-31} กิโลกรัม

แบบจำลองอะตอมของรัทเทอร์ฟอร์ด

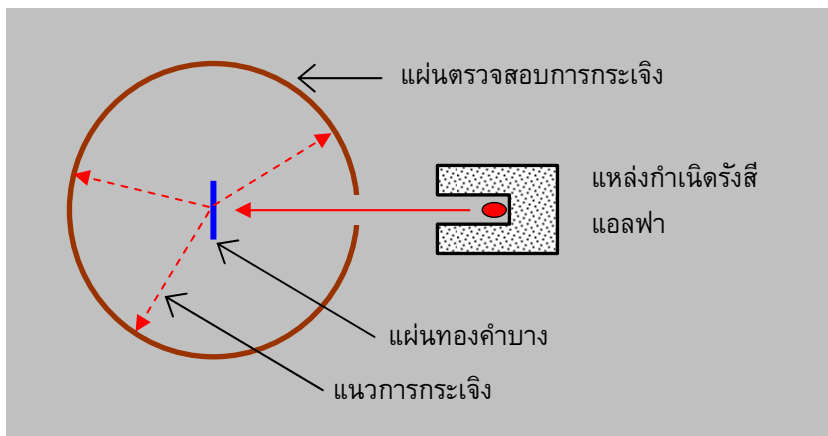
การค้นพบอิเล็กตรอนของทอมสัน นำมาซึ่งแบบจำลองของอะตอมแบบต่างๆ แต่ไม่มีผลการทดลองใดที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะการเคลื่อนที่หรือการเรียงตัวของอิเล็กตรอนภายในอะตอม จนกระทั่งมีผลจากการศึกษาการกระเจิงของอนุภาคแอลฟาของรัทเทอร์ฟอร์ด โดยทำการทดลองให้อนุภาคแอลฟาที่ได้จากการแผ่รังสีของสารกัมมันตรังสีวิ่งตรงไปยังแผ่นทองคำบางๆ แล้วสังเกตทิศทางการกระเจิงของมัน แผนภาพการทดลองเรื่องการกระเจิงของรัทเทอร์ฟอร์ดอย่างคร่าวๆ แสดงในรูปที่ 1.1 รัทเทอร์ฟอร์ดได้ผลการสังเกตที่สำคัญคือ

- อนุภาคแอลฟาส่วนมากจะเบี่ยงเบนไปจากแนวเดิมเพียงเล็กน้อย
- อนุภาคแอลฟาส่วนน้อยเบี่ยงเบนไปจากแนวเดิมด้วยมุมขนาดใหญ่
- อนุภาคแอลฟาเพียงบางตัวจะสะท้อนกลับ (สวนทางกับแนวเดิม)

บทที่ 1 โครงสร้างอะตอม

จากการสังเกตเหล่านี้ รัทเทอร์ฟอร์ดได้แสดงให้เห็นว่าภายในอะตอมส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ว่างเปล่า จากที่ทราบกันดีว่าอนุภาคแอลฟามีประจุบวก เมื่อยิงไปแล้วมีการกระเจิงกลับด้วยมุมกว้าง จึงคาดว่าเกิดจากการไปชนกับอนุภาคที่มีประจุที่เหมือนกันคือประจุบวก เพราะแรงผลัทางไฟฟ้ามีขนาดมาก ส่วนที่มีการเบี่ยงเบนและสะท้อนกลับนั้นมีเพียงอนุภาคส่วนน้อยนั้นแสดงว่าประจุบวกที่อยู่ในอะตอมนั้นมีขนาดเล็ก

รัทเทอร์ฟอร์ดจึงได้เสนอแบบจำลองอะตอมว่า ภายในอะตอมประกอบด้วยนิวเคลียสที่มีประจุเป็นบวก มีมวลมาก มีขนาดเล็ก โดยมีอิเล็กตรอนโคจรเป็นวงรอบๆ นิวเคลียสและส่วนใหญ่ภายในอะตอมเป็นพื้นที่ว่างเปล่า



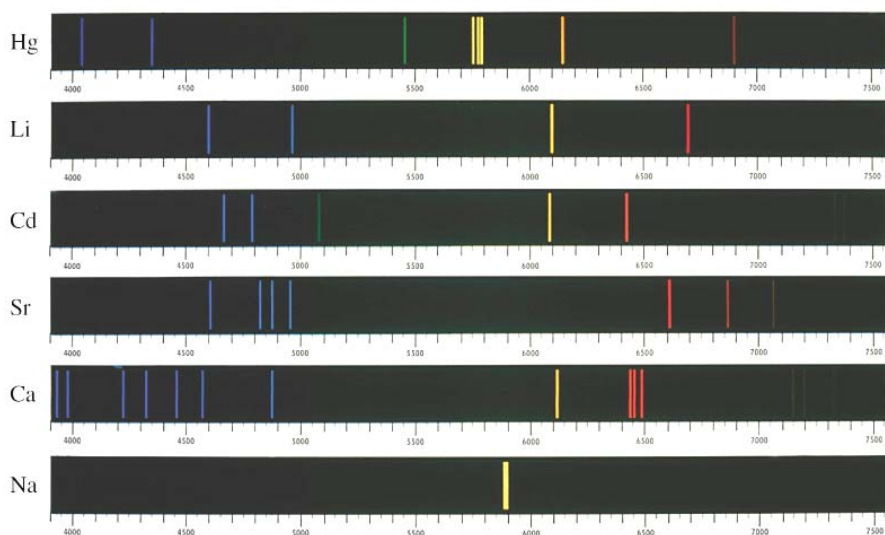
รูปที่ 1.1 แผนภาพแสดงการทดลองการกระเจิงของรัทเทอร์ฟอร์ด

สเปกตรัมของอะตอม

อะตอมหรือโมเลกุลของแก๊สที่มีความดันต่ำ เมื่อได้รับพลังงานสามารถปลดปล่อยหรือดูดกลืนรังสีในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ เพื่อที่จะศึกษาการปล่อยหรือดูดกลืนในอะตอมที่เป็นอิสระเพียงตัวเดียวจึงเลือกศึกษาแก๊สที่มีความดันต่ำ เนื่องจากสถานะแก๊สที่มีความดันต่ำ แรงดึงดูดระหว่างอะตอมมีค่าน้อย ผลการศึกษาพบว่าอะตอมหรือโมเลกุลของแก๊สปล่อยหรือดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความยาวคลื่นบางค่าไม่ต่อเนื่องเรียกว่าเส้นสเปกตรัม ในรูปที่ 1.2 แสดงเส้นสเปกตรัมที่ไม่ต่อเนื่องของแก๊สชนิดต่างๆ จะสังเกตได้ว่าแก๊สแต่ละชนิดให้เส้นสเปกตรัมที่แตกต่างกัน

การปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของอะตอมทำได้โดยการให้พลังงานความร้อนแก่อะตอมของแก๊ส เมื่ออะตอมมีพลังงานสูงขึ้นอิเล็กตรอนก็จะอยู่ในสถานะถูกกระตุ้น จากนั้นอิเล็กตรอนจะทำการลดระดับพลังงานลงโดยการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา เส้นสเปกตรัมที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้เรียกว่า *เส้นสเปกตรัมการปลดปล่อย* (Emission spectra) การดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของอะตอม ทำโดยให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นช่วงพลังงานซึ่งมีความยาวคลื่นต่อเนื่องแก่อะตอมของแก๊ส จากนั้นก็วัดส่วนของพลังงานที่เหลือออกมาในรูปของสเปกตรัม จะพบว่าบางส่วนของความยาวคลื่นหายไป ส่วนนั้นคือพลังงานที่ถูกดูดกลืนไป เส้นสเปกตรัมในลักษณะนี้เรียกว่า *เส้นสเปกตรัมการดูดกลืน* (Absorption spectra)

เส้นสเปกตรัมของธาตุแต่ละชนิดมีลักษณะเฉพาะ บอกได้ว่าอะตอมแต่ละชนิดมีการปล่อยหรือดูดกลืนพลังงานเฉพาะบางค่าเท่านั้น ลักษณะเฉพาะตัวนี้ สามารถนำมาใช้ประกอบการวิเคราะห์หาชนิดของธาตุเจือปนในสารตัวอย่าง นอกจากนี้ปริมาณของธาตุเจือปนยังหาได้จากการวิเคราะห์ความสว่างของเส้นสเปกตรัมแต่ละเส้นได้ด้วย



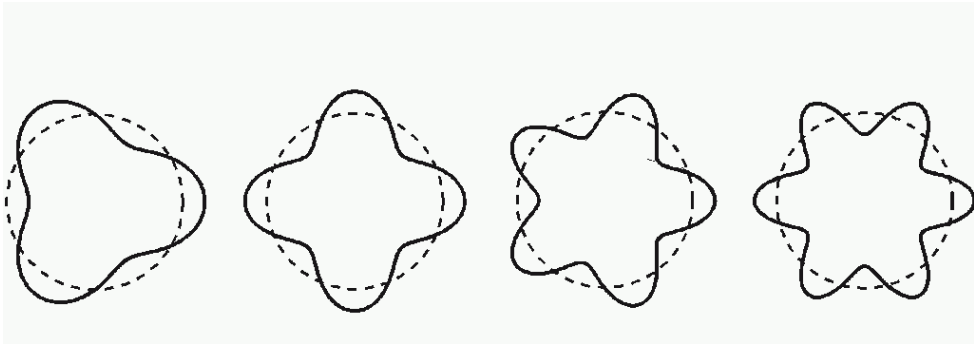
รูปที่ 1.2 สเปกตรัมที่ไม่ต่อเนื่องของแก๊สชนิดต่างๆ

แบบจำลองอะตอมไฮโดรเจนของโบร์

จากผลการสังเกตที่พบว่าสเปกตรัมของอะตอมมีความไม่ต่อเนื่อง แสดงถึงพลังงานภายในอะตอมมีความไม่ต่อเนื่องด้วย โบร์จึงได้เสนอสมมติฐานเพื่อใช้เป็นแนวคิดสำคัญในแบบจำลองอะตอมเพื่อที่พยายามจะอธิบายเส้นสเปกตรัมที่ไม่ต่อเนื่อง โดยได้เจาะจงเฉพาะอะตอมไฮโดรเจน เนื่องจากเป็นอะตอมที่มีความซับซ้อนน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอะตอมชนิดอื่นๆ ซึ่งมีอิเล็กตรอนหลายตัว

สมมติฐานสำคัญในแบบจำลองอะตอมไฮโดรเจนของโบร์มีดังนี้

1. ภายในอะตอมมีสถานะเสถียร (วงโคจรพิเศษ) ที่อิเล็กตรอนสามารถโคจรรอบๆ นิวเคลียสได้โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานจากการแผ่รังสีอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า สถานะเสถียรนี้มีค่าพลังงานเฉพาะและไม่ต่อเนื่อง
2. การดูดกลืนพลังงานหรือการปลดปล่อยรังสีของอิเล็กตรอนในอะตอมเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสถานะเสถียร (หรือการเปลี่ยนชั้นวงโคจรพิเศษ)
3. ในสถานะเสถียรหรือวงโคจรพิเศษนี้ อิเล็กตรอนประพฤติตัวเป็นคลื่นที่มีความยาวคลื่นเดอ บรอยส์ (de Broglie wavelength) เป็นจำนวนเท่าพอดีกับเส้นรอบวงของวงโคจรพิเศษ ($2\pi R$) ดังแสดงในรูปที่ 1.3 ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ว่า $n\lambda = 2\pi R$ (n เป็นจำนวนเต็มบวก $\lambda = h/p$ โดยที่ p คือโมเมนตัม R คือรัศมีของวงโคจรและ h คือค่าคงที่ของพลังค์มีค่าเท่ากับ 6.626×10^{-34} J.s) เมื่อทำการจัดรูปสมการใหม่จะได้ความสัมพันธ์ $n\hbar = pR = L$ จึงอาจกล่าวได้ว่าโมเมนตัมเชิงมุม (L) ของอิเล็กตรอนที่โคจรรอบนิวเคลียสมีค่าเป็นจำนวนเท่าของ $\hbar = h/2\pi$ สำหรับวงโคจรพิเศษของสถานะเสถียร



รูปที่ 1.3 ลักษณะวงโคจรของอิเล็กตรอนในวงโคจรพิเศษซึ่งมีความยาวคลื่นเดอบรอยล์เป็นจำนวนเท่าของเส้นรอบวงโคจรพอดี ตามรูปจากซ้ายไปขวามีจำนวนคลื่นหนึ่งวงโคจรเป็น 3 4 5 และ 6 ตามลำดับ

จากแนวคิดที่ว่าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นวงกลมรอบนิวเคลียสอันเนื่องมาจากผลของแรงดึงดูดทางไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เป็นแรงสู่ศูนย์กลาง เมื่อนำมารวมกับแนวคิดสำคัญของโบร์จะได้ผลที่สำคัญคือ

- พลังงานของอิเล็กตรอนภายในอะตอมของไฮโดรเจนมีค่าเท่ากับ $-13.6/n^2$ อิเล็กตรอนโวลต์ โดยที่ $n = 1, 2, 3, \dots$ ซึ่งเป็นตัวเลขแสดงสถานะเสถียรต่างๆ สำหรับสถานะ $n = 1$ เรียกว่า “สถานะพื้น” (ground state) เนื่องจากเป็นสถานะที่มีพลังงานต่ำที่สุด ที่ค่า n อื่นๆ เรียกว่า “สถานะถูกกระตุ้น” (excited state) เช่น $n = 2$ เรียกว่าสถานะถูกกระตุ้นที่ 1 เมื่อ $n = 3$ เรียกว่าสถานะถูกกระตุ้นที่ 2 ฯลฯ ระดับพลังงานที่ไม่ต่อเนื่องของอิเล็กตรอนแสดงในรูปที่ 1.4
- ค่าพลังงานที่ได้มีค่าเป็นลบบ่งบอกถึงสถานะกักขัง (bound state) หรือเป็นค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy) ระหว่างอิเล็กตรอนและนิวเคลียสเข้าไว้ด้วยกันเป็นอะตอม หากให้พลังงานที่เท่ากับกับอะตอมก็จะทำให้การยึดเหนี่ยวระหว่างอิเล็กตรอนและนิวเคลียสนั้นหมดไป อิเล็กตรอนจึงหลุดเป็นอิสระจากอะตอม
- รัศมีวงโคจรของสถานะเสถียรมีค่าเป็น $R_n = 0.53 n^2$ อังสตรอม จึงกล่าวได้ว่าขนาดของอะตอมอยู่ในระดับของอังสตรอม (10^{-10} เมตร)

บทที่ 1 โครงสร้างอะตอม



รูปที่ 1.4 ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในอะตอมไฮโดรเจนที่ได้จากแบบจำลองอะตอมไฮโดรเจนของโบร์

เส้นสเปกตรัมที่เกิดขึ้นในกรณีของอะตอมไฮโดรเจนจึงสามารถคำนวณหาได้จากผลต่างของระดับพลังงาน ซึ่งสามารถนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองได้ อาศัยแนวคิดที่ว่า การเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจะมีการดูดกลืนหรือปล่อยพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรืออนุภาคโฟตอน ซึ่งจากการศึกษาเรื่องการแผ่รังสีของวัตถุดำ (Blackbody radiation) พบว่าโฟตอนแต่ละตัวมีพลังงานเป็น $E = h\nu$ โดย ν คือความถี่ของคลื่น ถ้าหากกำหนดให้สถานะเสถียรเริ่มต้นระบุด้วยสถานะ $n = i$ และมีการเปลี่ยนสถานะไปยัง $n = f$ จะได้ความสัมพันธ์

$$|E_f - E_i| = h\nu \quad (1.1)$$

เมื่อแทนพลังงานของแต่ละสถานะ และ $\nu = c / \lambda$ จะได้

$$(13.6 \text{ eV}) \left| \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right| = h \frac{c}{\lambda} \quad (1.2)$$

หรือเขียนได้ในรูปของความยาวคลื่นของเส้นสเปกตรัมได้เป็น

$$\frac{1}{\lambda} = R_c \left| \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right| \quad (1.3)$$

โดยที่ R_c คือ ค่าคงที่ของริดเบิร์ก (Rydberg's constant) มีค่าเท่ากับ 1.097×10^7 เมตร⁻¹

ชุดของเส้นสเปกตรัมที่มีสถานะสุดท้าย n_f เท่ากับ 1 ($n_i = 2, 3, 4, \dots$) เรียกว่าอนุกรมไลแมน (Lyman series) มีความยาวคลื่นยาวที่สุดเป็น 122 นาโนเมตร (เมื่อ $n_i = 2$) และมีความยาวคลื่นสั้นที่สุดเป็น 91.2 นาโนเมตร (เมื่อ $n_i = \infty$) ชุดของเส้นสเปกตรัมที่มีสถานะสุดท้าย n_f เท่ากับ 2 ($n_i = 3, 4, 5, \dots$) เรียกว่าอนุกรมบาล์มเมอร์ (Balmer series) มีความยาวคลื่นยาวที่สุดเป็น 656 นาโนเมตร (เมื่อ $n_i = 3$) และมีความยาวคลื่นสั้นที่สุดเป็น 365 นาโนเมตร ชุดของเส้นสเปกตรัมที่มีสถานะสุดท้าย n_f เท่ากับ 3 เรียกว่าอนุกรมพาเชน (Paschen series) จะสังเกตได้ว่ามีเพียงเส้นสเปกตรัมจากอนุกรมบาล์มเมอร์เท่านั้นที่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่าของมนุษย์

ผลการคำนวณที่ได้นี้เมื่อหาค่าความยาวคลื่นในการเปลี่ยนสถานะแบบต่างๆ ของอิเล็กตรอนในอะตอมไฮโดรเจนพบว่าสอดคล้องกับผลการสังเกตของเส้นสเปกตรัม ดังนั้นแนวคิดในแบบจำลองอะตอมไฮโดรเจนของโบร์จึงได้รับความน่าเชื่อถือและต่อมาได้กลายเป็นส่วนหนึ่งของกลศาสตร์ควอนตัม ซึ่งเป็นทฤษฎีที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ ในระดับอะตอมได้เป็นอย่างดี

รังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะ

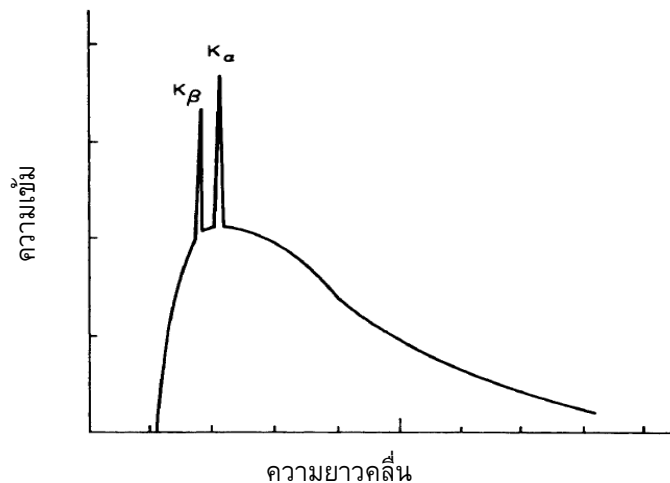
แบบจำลองอะตอมไฮโดรเจนของโบร์สามารถนำไปใช้อธิบายปรากฏการณ์พื้นฐานอื่นที่เกี่ยวข้องกับการแผ่รังสีสำหรับอะตอมที่มีความซับซ้อนมากขึ้นได้ ด้วยการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (qualitative analysis) ถึงแม้ว่าผลเชิงตัวเลขไม่ค่อยถูกต้องแม่นยำมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากจำนวนอิเล็กตรอนที่มีหลายตัวภายในอะตอม อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนด้วยกันส่งผลกระทบต่อระดับชั้นพลังงานที่นำมาคำนวณความถี่หรือความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สังเกตได้ในเส้นสเปกตรัม อย่างไรก็ตามแนวความคิดของระดับชั้นพลังงานยังคงเอาไว้โดยที่แต่ละระดับชั้นพลังงานมีอิเล็กตรอนอยู่ได้จำนวนจำกัด ซึ่งเป็นไปตามหลักการกีดกันของพอลลี (Pauli's Exclusion Principle)

เส้นสเปกตรัมของอะตอมแต่ละชนิดมีลักษณะเฉพาะตัวของมันเอง เนื่องจากองค์ประกอบภายในอะตอมที่แตกต่างกัน เช่นจำนวนอิเล็กตรอน ขนาดประจุไฟฟ้าของ

บทที่ 1 โครงสร้างอะตอม

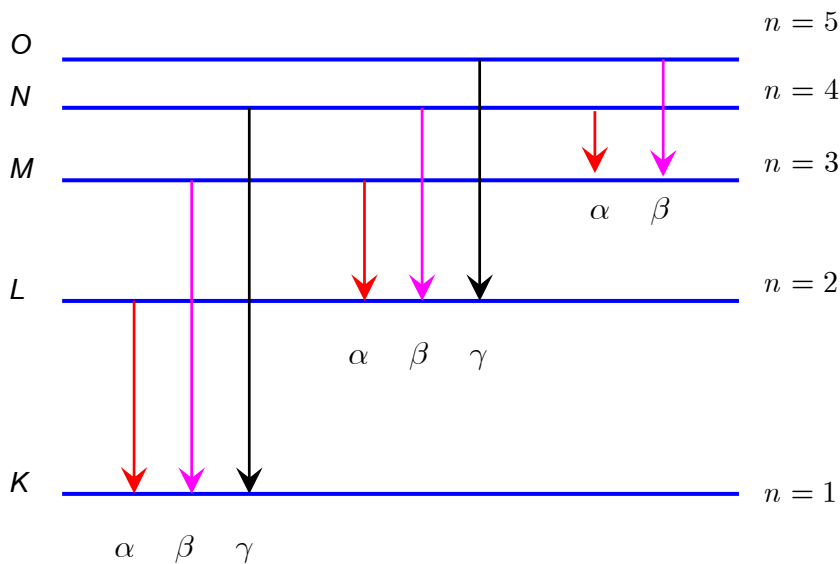
นิวเคลียส เป็นต้น การวิเคราะห์เส้นสเปกตรัมนี้เองสามารถนำมาประยุกต์ใช้หาธาตุองค์ประกอบของสารตัวอย่างได้จากลักษณะเฉพาะของแต่ละธาตุ

กรณีพิเศษของการแผ่รังสีจากการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนภายในอะตอมคือ การที่อิเล็กตรอนวงใน (ใกล้นิวเคลียส) ได้รับพลังงานมากพอจนหลุดออกไปจากอะตอม เป็นผลให้มีสถานะเสถียรว่างอยู่ อิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นนอก (มีพลังงานยึดเหนี่ยวต่ำกว่า) สามารถเปลี่ยนสถานะลงมาเพื่อให้อะตอมมีพลังงานต่ำลง การลดพลังงานเกิดขึ้นด้วยการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจะมีค่าความถี่และความยาวคลื่นเฉพาะตัวสำหรับอะตอมแต่ละชนิด รังสีที่ปล่อยออกมาในลักษณะดังกล่าวนี้เรียกว่า “รังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะ” (Characteristic x-ray) รูปที่ 1.5 ประกอบ



รูปที่ 1.5 รังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะ (ในส่วนที่เป็นยอดแหลม)

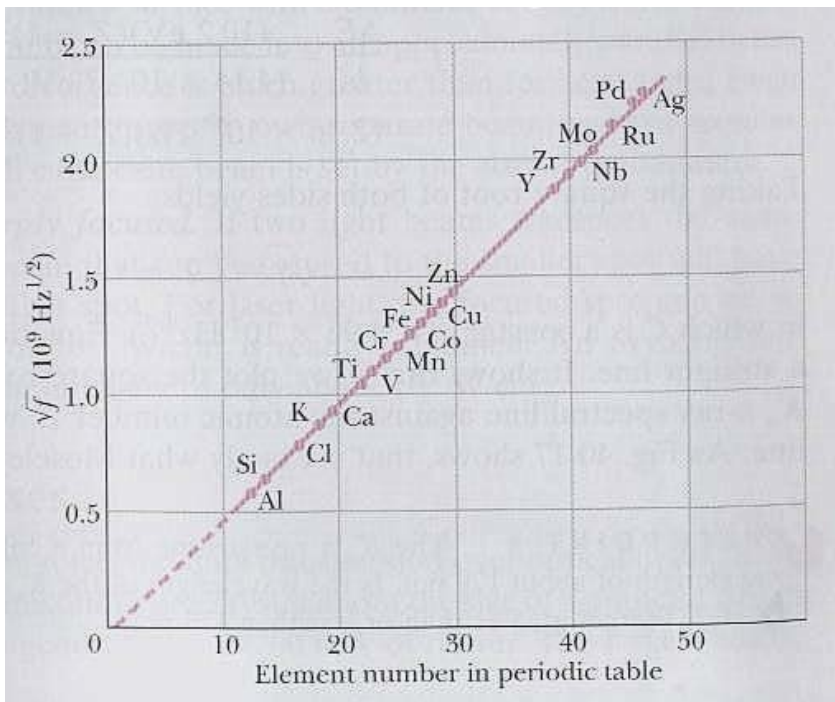
ถ้าหารังสีที่ปลดปล่อยมาเกิดจากการเปลี่ยนชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนวงนอกมายังชั้นในสุด ($n = 1$) จะเรียกเส้นสเปกตรัมนี้ว่า เส้นเค (K line) โดยเรียกตามลำดับพลังงานที่เพิ่มขึ้น (ความยาวคลื่นลดลง) ว่า เคแอลฟา เคบีตา เคแกมมา ... ($K_\alpha, K_\beta, K_\gamma, \dots$) โดยคำต่อท้าย “แอลฟา” หมายถึงผลต่างของชั้นพลังงานเป็น 1 “เบตา” หมายถึงผลต่างของชั้นพลังงานเป็น 2 และ “แกมมา” หมายถึงผลต่างของชั้นพลังงานเป็น 3 ฯลฯ หากเกิดจากการเปลี่ยนจากชั้นพลังงานสูงลงมายังชั้น $n = 2$ ก็จะถูกเรียกว่า เส้นแอล ซึ่งอาจย่อเป็นเส้นแอลแอลฟา แอลบีตา แอลแกมมา ... (L line, $L_\alpha, L_\beta, L_\gamma, \dots$) ในทำนองเดียวกัน หากเกิดจากการเปลี่ยนลงมายังชั้น $n = 3$ ก็จะถูกเรียกว่า เส้นเอ็มซึ่งอาจย่อเป็นเส้นเอ็มแอลฟา เอ็มบีตา เอ็มแกมมา ... (M line, $M_\alpha, M_\beta, M_\gamma, \dots$) ฯลฯ ดังแสดงเป็นแผนภาพในรูปที่ 1.6



รูปที่ 1.6 ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนกับเส้นรังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะแบบต่างๆ

แผนภาพของมอสลีย์

รังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะของอะตอมที่มีความยาวคลื่นมากที่สุด (ความถี่น้อยที่สุด) คือเส้นเคแอลฟา (K_α line) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษชื่อมอสลีย์ (H.G.J. Moseley) ได้ทำการทดลองวัดความยาวคลื่นของเส้นเคแอลฟาของธาตุต่างๆ เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟระหว่างรากที่สองของความถี่ของโฟตอนจากเส้นสเปกตรัมเคแอลฟากับเลขอะตอมของธาตุ (Z) พบว่ามีความสัมพันธ์กันแบบเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 1.7 กราฟที่เขียนนี้จึงรู้จักกันว่าเป็น **แผนภาพของมอสลีย์ (Moseley plot)** ก่อนหน้าผลการศึกษาของมอสลีย์ ธาตุชนิดต่างๆ ถูกนำมาเรียงลำดับในตารางธาตุตามลำดับของมวล ผลการศึกษาของมอสลีย์จากการสังเกตเส้นสเปกตรัมลักษณะเฉพาะของอะตอม ทำให้เกิดการเรียงลำดับที่ถูกต้องตามเลขอะตอมของธาตุในตารางธาตุ



รูปที่ 1.7 แผนภาพของมอสลีย์ แกนนอนคือเลขอะตอม ส่วนแกนตั้งคือรากที่สองของความถี่จากเส้นสเปกตรัมลักษณะเฉพาะ เคแอลฟา