

## เครื่องสร้างภาพเอ็มอาร์

แมกเนติกเรโซแนนซ์อิมเมจิง (Magnetic resonance imaging) หรือ เครื่องสร้างภาพเรโซแนนซ์แม่เหล็ก หรือ ที่เรียกกันทั่วไปว่า เครื่องสร้างภาพเอ็มอาร์ หรือ เครื่องเอ็มอาร์ไอ (MRI) เครื่องสร้างภาพชนิดนี้เป็นเครื่องสร้างภาพทางการแพทย์ที่ได้รับความนิยม นำมาใช้ประกอบการตรวจวินิจฉัยอวัยวะตามส่วนต่างๆของร่างกาย สามารถตรวจอวัยวะได้หลายระนาบ (multiplanar) แยกความแตกต่างของเนื้อเยื่อได้ดี การตรวจด้วยเครื่องตรวจนี้มีความปลอดภัย เนื่องจากไม่ได้มีการใช้รังสีชนิดที่ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นประจุ (non ionizing radiation) ซึ่งรังสีดังกล่าวอาจจะทำให้เกิดอันตรายต่อเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตในระหว่างการสร้างภาพได้

การให้ความสนใจและทำความเข้าใจความรู้พื้นฐานทางฟิสิกส์ของเครื่องสร้างภาพเอ็มอาร์ เป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้ผู้อ่าน สามารถนำสิ่งที่ได้เรียนรู้ไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ต่อการทำงาน การตรวจวินิจฉัย หรือ การแปลผลที่เกี่ยวข้องกับเครื่องสร้างภาพเอ็มอาร์ได้ต่อไป

### โครงสร้างอะตอม

อะตอม (Atom) คือ อนุภาคที่เล็กที่สุดของธาตุ ประกอบด้วยนิวเคลียส (nucleus) ที่อยู่ตรงศูนย์กลางซึ่งล้อมรอบด้วยกลุ่มของอิเล็กตรอน (electron) ที่มีประจุลบ นิวเคลียสของอะตอมประกอบด้วยโปรตอน (proton) ที่มีประจุบวก และ นิวตรอน (neutron) ไม่มีประจุ หรือ เป็นกลางทางไฟฟ้า

ตัวเลขที่แสดงจำนวนโปรตอนในนิวเคลียสของอะตอม เรียกว่า เลขอะตอม (atomic number, Z) เลขอะตอม จะเป็นค่าเฉพาะของธาตุ ธาตุชนิดเดียวกันจะมีเลขอะตอมเท่ากันเสมอ

ในสภาวะปกติจะมีจำนวนโปรตอนและอิเล็กตรอนเท่ากัน ส่วนตัวเลขที่แสดงจำนวนของโปรตอนและจำนวนนิวตรอน เรียกว่า เลขมวล (mass number, A)

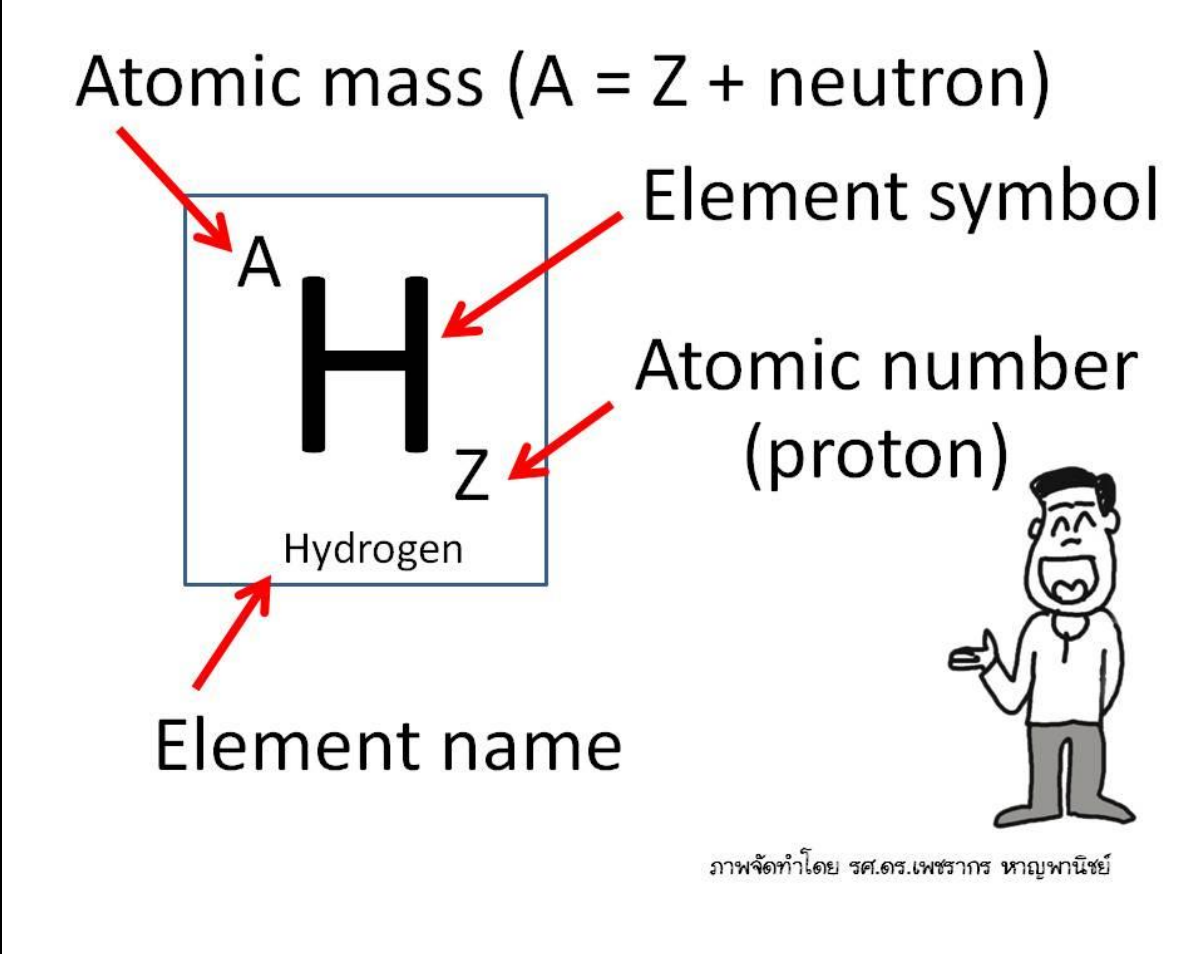
เลขมวล จะมีค่าใกล้เคียงกับเลขของอะตอม โดยเลขมวลเท่ากับเลขอะตอม (จำนวนโปรตอน) รวมกับจำนวนนิวตรอน

Atomic mass ( $A = Z + \text{neutron}$ )

Element symbol

Atomic number (proton)

Element name



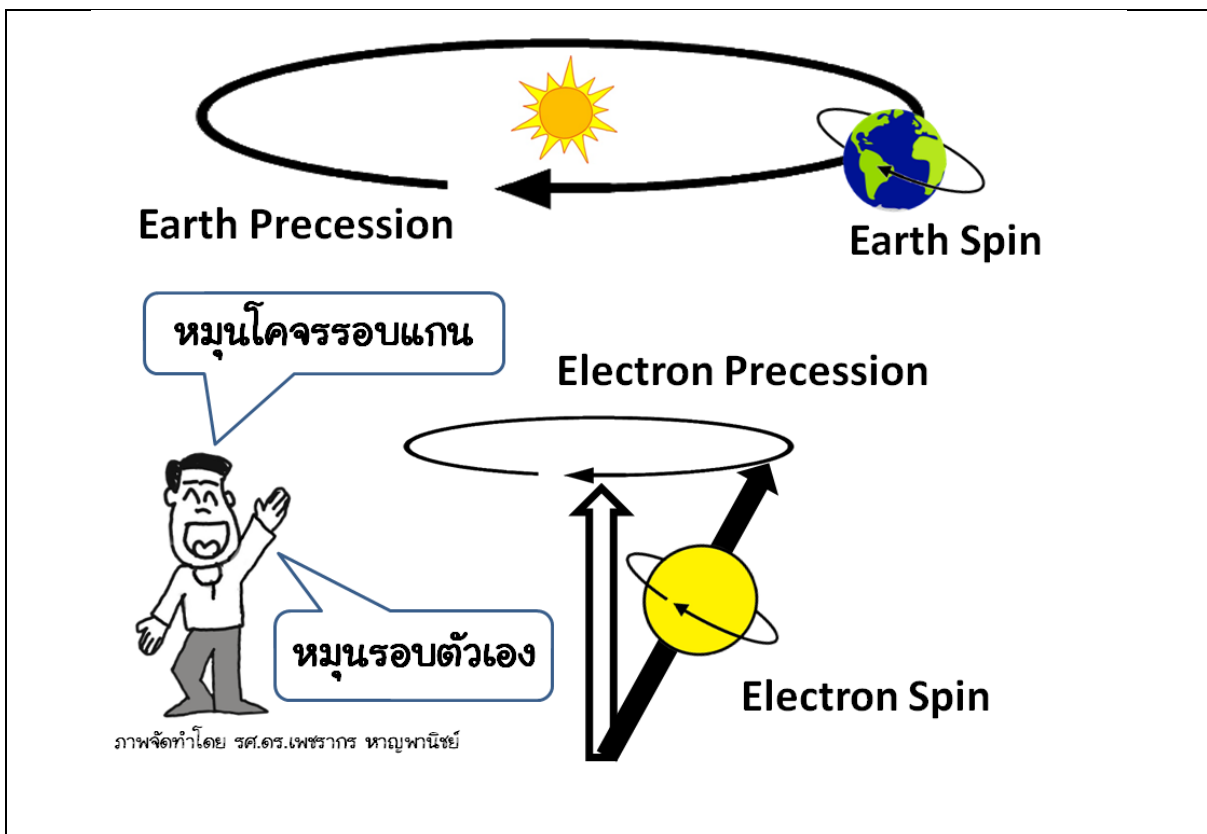
ภาพจัดทำโดย รศ.ดร.เพชรกรร หาญพานิชย์

สำหรับการสร้างภาพด้วยเครื่องสร้างภาพเอ็มอาร์นั้น จะให้ความสนใจที่จะเก็บสัญญาณที่ปล่อยออกมาจากอะตอมของไฮโดรเจนที่ถูกกระตุ้นในร่างกาย เนื่องจากไฮโดรเจนประกอบด้วยโปรตอนเพียงตัวเดียว สามารถแสดงคุณสมบัติแม่เหล็ก และเป็นธาตุที่เป็นองค์ประกอบของน้ำ ซึ่งน้ำมีสัดส่วนจำนวนมากที่อยู่ภายในอวัยวะตามส่วนต่างๆของร่างกาย หรือ เป็นโมเลกุลของสารอินทรีย์หลายชนิด นอกจากนี้ อาจให้ความสนใจสัญญาณจากอะตอมของธาตุอื่นๆ ที่เป็นองค์ประกอบสำคัญของสารชีวภาพ ได้แก่ คาร์บอน (Carbon,  $^{13}\text{C}_7$ ) หรือ ฟอสฟอรัส (Phosphorus,  $^{31}\text{P}_{15}$ ) โดยนำมาใช้สำหรับเทคนิคแมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (magnetic resonance spectroscopy; MRS) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ระดับสารเคมีในอวัยวะของร่างกาย <sup>1,2</sup>

## คุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของธาตุ

ธาตุแต่ละชนิด มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันได้ หนึ่งในคุณสมบัติที่แตกต่างกัน คือ คุณสมบัติความเป็นแม่เหล็ก สำหรับนิวเคลียสของธาตุที่มีจำนวนโปรตอนหรือนิวตรอนที่เป็นจำนวนเลขคี่ หรือ ทั้งโปรตอนและนิวตรอนที่ไม่มีคู่ เช่น ไฮโดรเจน (Hydrogen,  $^1\text{H}_1$ ) ไอโซโทปของไฮโดรเจน คือ ดิวเทอเรียม (Deuterium,  $^2\text{H}_1$ ) คาร์บอน (Carbon,  $^{13}\text{C}_6$ ) ฟลูออรีน (Fluorine,  $^{19}\text{F}_9$ ) ฟอสฟอรัส (Phosphorus,  $^{31}\text{P}_{15}$ ) เป็นต้น ซึ่งนิวเคลียสเหล่านี้ สามารถแสดงคุณสมบัติแม่เหล็ก

นอกจากนี้ คุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของธาตุ อาจแสดงได้จากจำนวนควอนตัมสปิน (spin quantum number; I) ที่เกี่ยวข้องกับอะตอมที่มีการเคลื่อนที่ อะตอมมีการหมุนในลักษณะเป็นเวกเตอร์ (vector) คือ มีทั้งขนาดและทิศทางที่เป็นได้ทั้งทิศทางขึ้นหรือลง ทิศทางบวกหรือลบ ทิศทางตามหรือทวนเข็มนาฬิกา โดยลักษณะการหมุนรอบตัวเอง (spin) เป็นการหมุนโมเมนตัมเชิงมุม (spin angular momentum) หรือ หมุนควงรอบแกน (precession) เป็นการหมุนรอบแกนในลักษณะโมเมนตัมเชิงโคจร (spin orbital angular momentum) การหมุนของอะตอมคล้ายๆ การหมุนของโลก เช่น โลกหมุนรอบตัวเอง นิวเคลียสหมุนรอบตัวเอง อิเล็กตรอนหมุนรอบตัวเอง โลกหมุนโคจรรอบแกนของดวงอาทิตย์ อิเล็กตรอนหมุนโคจรรอบแกนของนิวเคลียส เป็นต้น <sup>3-5</sup>



จำนวนควอนตัมสปินสัมพันธ์กับการหมุนของนิวเคลียส ธาตุที่มีจำนวนโปรตอนหรือนิวตรอนที่เป็นจำนวนเลขคี่ หรือ ทั้งโปรตอนและนิวตรอนที่ไม่มีคู่ หรือ มีจำนวนควอนตัมสปินเป็นเลขจำนวนเต็มที่เป็นจำนวนเลขคี่ เช่น ไอโซโทปของไฮโดรเจน คือ ดิวเทอเรียม ( ${}^2\text{H}_1$ ) และ ไนโตรเจน ( ${}^{14}\text{N}_7$ ) หรือ มีจำนวนควอนตัมสปินเป็นค่าครึ่งของจำนวนเต็ม (half-integral value ;  $1/2, 3/2, 5/2$ ) นิวเคลียสที่มีลักษณะแบบนี้ จะสามารถแสดงคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กได้<sup>3,6,7</sup>

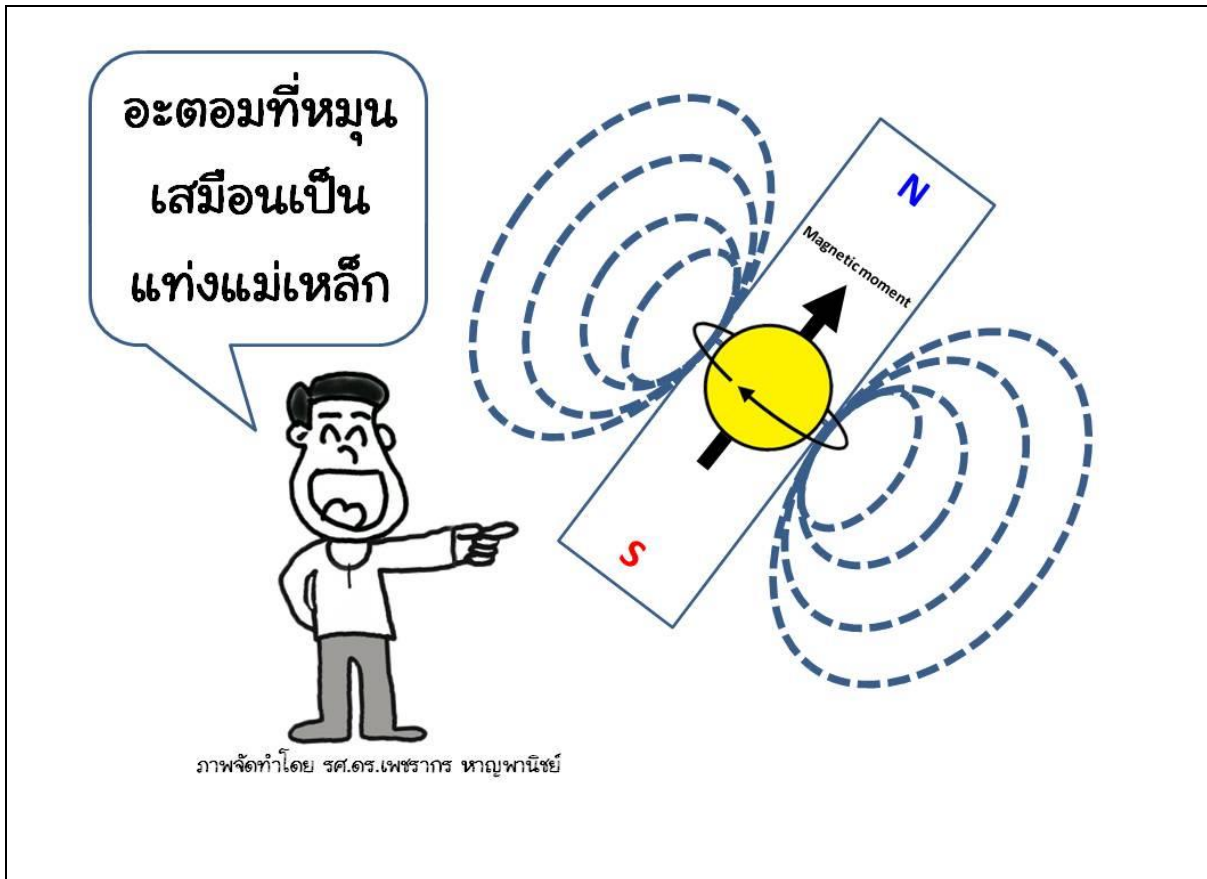
แต่... สำหรับนิวเคลียสที่ไม่มีคู่การหมุนตัว ( $I=0$ ) นิวเคลียสที่มีจำนวนอะตอมเป็นเลขจำนวนคู่ภายในอะตอมจำนวนของอิเล็กตรอนหรือโปรตอนทั้งหมดจะจับคู่กัน จะมีลักษณะการหมุนมีค่าสัญญาณหรือทิศทางที่ตรงกันข้าม เช่น ขึ้นและลง บวกและลบ ตามและทวนเข็มนาฬิกา เป็นต้น ซึ่งจะทำให้เกิดการหักล้างระหว่างของสนามแม่เหล็กในนิวเคลียส จึงทำให้นิวเคลียสเหล่านี้ จะไม่สามารถแสดงคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็ก เช่น คาร์บอน ( ${}^{12}\text{C}_6$ ) และ ออกซิเจน ( ${}^{16}\text{O}_8$ )

**ตารางที่ 1** แสดงบางส่วนของธาตุชนิดต่างๆ จำนวนโปรตอน จำนวนนิวตรอน จำนวนควอนตัมสปิน (spin quantum number) และคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของธาตุ

ธาตุ	จำนวนโปรตอน	จำนวนนิวตรอน	จำนวนควอนตัมสปิน (spin quantum number)	คุณสมบัติความเป็นแม่เหล็ก
${}^1\text{H}_1$	1	0	1/2	แม่เหล็ก
${}^2\text{H}_1$	1	1	1	แม่เหล็ก
${}^{12}\text{C}_6$	6	6	0	ไม่เป็นแม่เหล็ก
${}^{13}\text{C}_7$	7	6	1/2	แม่เหล็ก
${}^{14}\text{N}_7$	7	7	1	แม่เหล็ก
${}^{16}\text{O}_8$	8	8	0	ไม่เป็นแม่เหล็ก
${}^{19}\text{F}_9$	9	10	1/2	แม่เหล็ก
${}^{31}\text{P}_{15}$	15	16	1/2	แม่เหล็ก

## พฤติกรรมของนิวเคลียสในสนามแม่เหล็ก

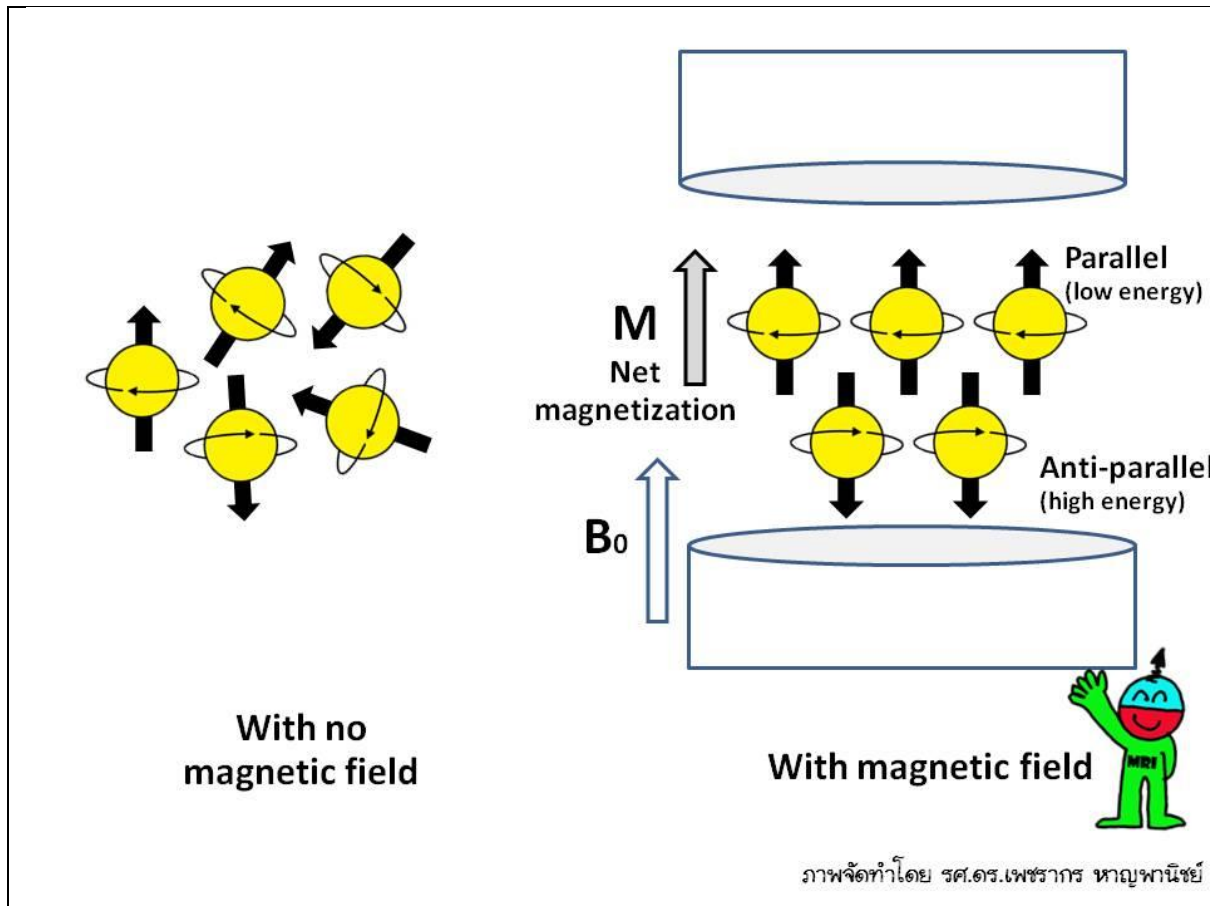
ในเชิงกลศาสตร์ควอนตัมและฟิสิกส์ของอนุภาค มวลที่มีประจุ เมื่อมีการเคลื่อนที่จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก เมื่ออะตอมมีการหมุน รอบๆอะตอมหรือนิวเคลียสจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก อะตอมจึงมีลักษณะเสมือนแท่งแม่เหล็กขนาดเล็กๆที่มีการหมุน เรียกว่า โมเมนต์แม่เหล็ก (magnetic moment) <sup>4,8,9</sup>



ในสภาวะปกติ นอกพื้นที่สนามแม่เหล็กแรงสูง โปรตอนมีโมเมนต์แม่เหล็กหมุนอย่างอิสระ หรือไม่เป็นระเบียบ เนื่องจากแต่ละโปรตอนมีเวกเตอร์ที่แตกต่างกัน ดังนั้นผลรวมโมเมนต์แม่เหล็ก หรือที่เรียกว่า ผลรวมเวกเตอร์สภาพแม่เหล็ก (net magnetization vector;  $M$ ) ซึ่งจะมีทิศทางที่แตกต่างกัน เวกเตอร์แม่เหล็กของโปรตอนแต่ละโปรตอนจะมีการหักล้างกัน ระหว่างโปรตอนที่มีพลังงานต่ำกับโปรตอนที่มีพลังงานสูง ที่มีทิศทางที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ผลรวมเวกเตอร์สภาพแม่เหล็ก มีค่าเป็นศูนย์

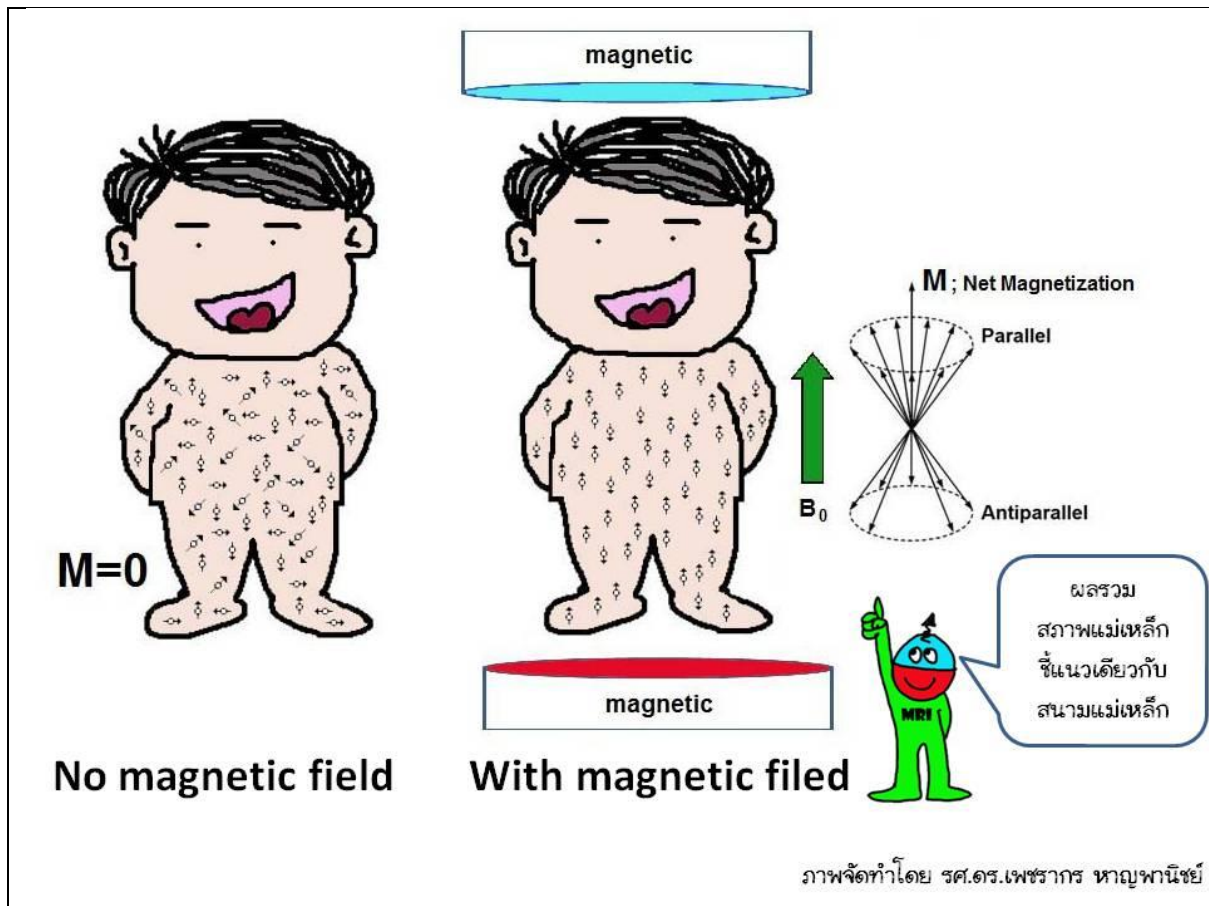
สำหรับการสร้างภาพด้วยเครื่องสร้างภาพเอ็มอาร์จะให้ความสนใจกับโปรตอน ในสภาวะปกติ โปรตอนเสมือนเป็นแม่เหล็กขนาดเล็กมีการหมุนอย่างอิสระ หรือ ไม่เป็นระเบียบ (random) พฤติกรรม

ของนิวเคลียสในเครื่องสร้างภาพเอ็มอาร์ที่มีสนามแม่เหล็ก (magnetic field;  $B_0$ ) แรงสูง และ เมื่อนำผู้ป่วยเข้าไปในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กแรงสูง โปรตอนของไฮโดรเจนภายในอวัยวะต่างๆในร่างกาย จะมีการจัดเรียงตัวใหม่ โดยโปรตอนที่มีระดับพลังงานต่ำ (low energy) จะเรียงตัวในทิศทางที่ขนาน หรือไปในแนวเดียว (parallel หรือ spin up) กับสนามแม่เหล็ก ส่วนโปรตอนที่มีระดับพลังงานสูง (high energy) จะเรียงตัวในทิศทางที่ตรงกันข้าม (anti-parallel หรือ spin down) กับสนามแม่เหล็กแรงสูง



พฤติกรรมของนิวเคลียสในภายใต้สนามแม่เหล็กแรงสูง ผลของสนามแม่เหล็กจะทำให้จำนวนโปรตอนที่มีระดับพลังงานต่ำ หรือ เรียงตัวในทิศทางที่ขนานไปในแนวเดียวกับสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีจำนวนมากกว่าโปรตอนที่มีระดับพลังงานสูง หรือเรียงตัวในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับสนามแม่เหล็ก

เมื่อจำนวนของโปรตอนที่มีระดับพลังงานต่ำที่มีจำนวนมากกว่าโปรตอนที่มีระดับพลังงานสูง จึงทำให้ผลรวมเวกเตอร์สภาพแม่เหล็กมีทิศทางไปในแนวเดียวกับสนามแม่เหล็ก



พฤติกรรมของนิวเคลียสในเครื่องสร้างภาพเอ็มอาร์ พิจารณาตามหลักของเวกเตอร์ของแม่เหล็ก จะพบว่า เมื่อผู้ป่วยเข้าไปอยู่ในสนามแม่เหล็กแรงสูง สนามแม่เหล็กจะทำให้ ผลรวมสภาพแม่เหล็กของโปรตอนในร่างกาย มีทิศทางไปในแนวเดียวกับสนามแม่เหล็ก การเพิ่มความแรงของสนามแม่เหล็กจาก 1.5 เทสลา เพิ่มขึ้นเป็น 3 เทสลา จะส่งผลทำให้จำนวนของไฮโดรเจนที่มีระดับพลังงานต่ำ มีจำนวนเพิ่มมากกว่าจำนวนไฮโดรเจนระดับพลังงานสูง จึงทำให้ผลรวมสภาพแม่เหล็กมีค่ามากขึ้น รวมถึงสัดส่วนของสัญญาณที่ต้องการต่อสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio; SNR) จะมีค่ามากขึ้นไปด้วย ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการสร้าง เนื่องจากมีค่าสัญญาณที่สูงขึ้น<sup>10,11</sup>

### ความถี่ลาร์เมอร์

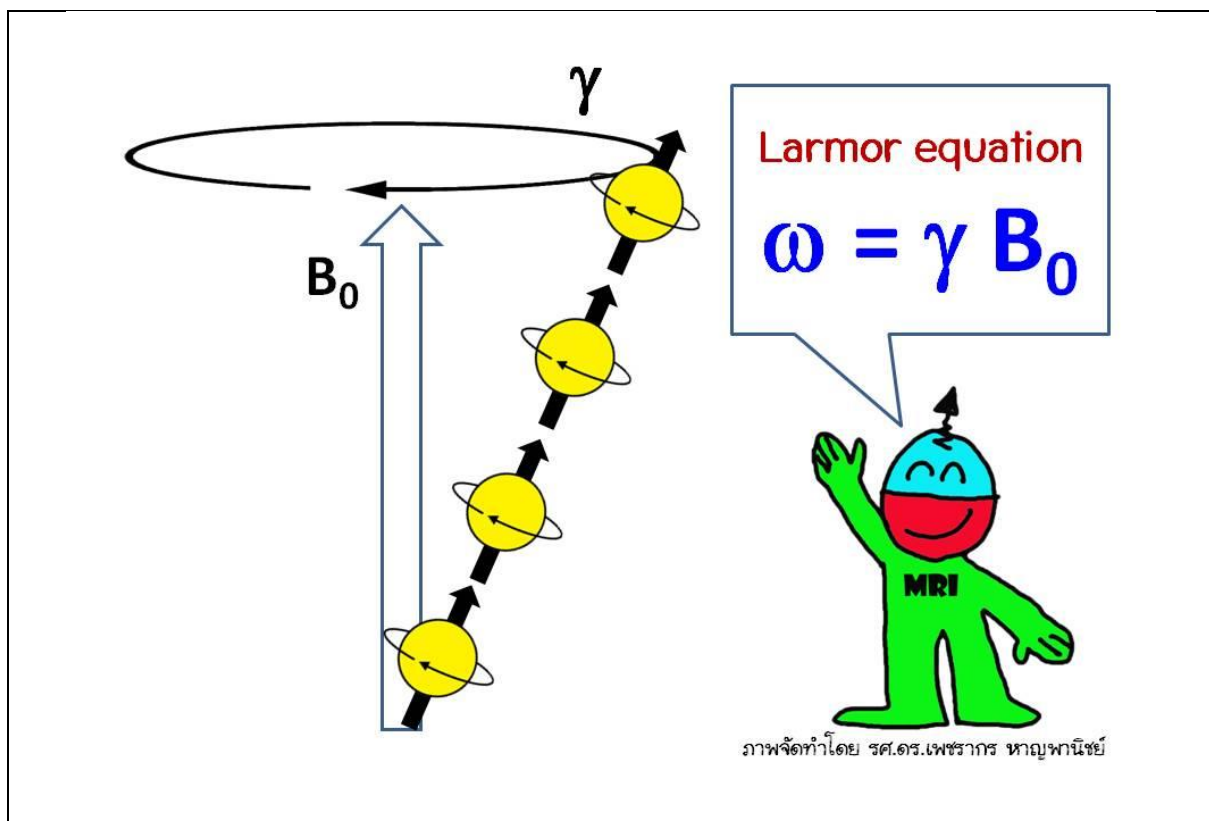
ดังที่กล่าวมาแล้ว อะตอม นิวเคลียส และ อิเล็กตรอนมีการหมุน การหมุนรอบตัวเอง การหมุนควงรอบแกน ซึ่งการหมุนของแต่ละอะตอมจะเป็นค่าคงที่ โดยกำหนดให้มีหน่วยเป็น เฮิรตซ์ (hertz) 1 เฮิรตซ์ คือ 1 รอบต่อวินาที (cycle per second)

สำหรับการสร้างภาพด้วยเครื่องสร้างภาพเอ็มอาร์ จะให้ความสนใจการหมุนควงของผลรวมเวกเตอร์สภาพแม่เหล็กของไฮโดรเจนที่หมุนรอบแกนสนามแม่เหล็ก ด้วยความถี่เชิงมุมค่าหนึ่ง เรียกความถี่นี้ว่า ความถี่ลาร์มอร์ (Larmor frequency) ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก สมการลาร์มอร์ (Larmor equation) คือ  $\omega = \gamma B_0$  เมื่อกำหนดให้

$\omega$  แทน ความถี่ลาร์มอร์

$\gamma$  แทน อัตราส่วนไจโรแมกเนติก (gyromagnetic ratio) หมายถึง สัดส่วนความถี่เชิงมุมของนิวเคลียสแต่ละชนิด ในการหมุนภายใต้สนามแม่เหล็กที่ใช้งาน

$B_0$  แทน ความแรงของสนามแม่เหล็กที่ใช้งาน





ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก หรือ ความแรงของสนามแม่เหล็ก จะมีหน่วย คือ เกาส์ (gauss;G) ในหน่วยเอสไอ (SI unit) ใช้หน่วยที่เรียกว่า เทสลา (tesla;T) โดยกำหนดให้ 10,000 เกาส์ เท่ากับ 1 เทสลา

ค่าความถี่ลาร์เมอร์ของไฮโดรเจน มีค่าคงที่เท่ากับ 42.57 เมกะเฮิร์ตซ์ (MHz) ภายใต้สนามแม่เหล็กที่มีความแรงเท่ากับ 1 เทสลา

จากสมการลาร์เมอร์

เมื่อเครื่องสร้างภาพเอ็มอาร์ที่มีความแรงสนามแม่เหล็ก 1.5 เทสลา

ค่าความถี่ลาร์เมอร์ของไฮโดรเจน มีค่าเท่ากับ  $42.57 \times 1.5 = 63.86$  MHz และ

เครื่องสร้างภาพเอ็มอาร์ที่มีความแรงสนามแม่เหล็ก 3 เทสลา

ค่าความถี่ลาร์เมอร์ของไฮโดรเจน มีค่าเท่ากับ  $42.57 \times 3 = 127.71$  MHz

จากค่านวณนี้แสดงให้เห็นว่า นิวเคลียสจะมีความถี่ในการหมุนคงเพิ่มขึ้น เมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกมีความเข้มเพิ่มขึ้น

## การสั่นพ้อง

ในการสร้างภาพด้วยเครื่องสร้างภาพเอ็มอาร์ จะมีขั้นตอนหนึ่งที่ต้องทำในระหว่างการตรวจ คือ การส่งคลื่นวิทยุ (radio frequency; RF) เข้าไปกระตุ้นโปรตอนของไฮโดรเจนในร่างกายที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กแรงสูง โดยค่าความถี่ของคลื่นวิทยุที่ส่งเข้าไปนั้น จะมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับค่าความถี่ของโปรตอนของไฮโดรเจน ขั้นตอนนี้เรียกว่า การสั่นพ้อง หรือ การกำทอน (resonance)

ธาตุแต่ละชนิด จะมีค่าความถี่ในการสั่นพ้อง และ ค่าอัตราส่วนไจโรแมกเนติก ไม่เท่ากัน

โดยค่าความถี่ของคลื่นวิทยุที่ส่งเข้าไป เสมือนเป็นการให้พลังงานในระดับที่พอเหมาะแก่โปรตอนของไฮโดรเจน (ผลรวมเวกเตอร์สภาพแม่เหล็กของอวัยวะต่างๆในบริเวณที่สนใจ) ทำให้สามารถเปลี่ยนสถานะจากสถานะที่สมดุลไปสู่สถานะอื่นได้ หรือ เปลี่ยนการหมุนเชิงมุมจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง ถ้าระดับพลังงานที่ให้ ไม่พอเหมาะหรือเท่ากับค่าความถี่ลาร์เมอร์ การสั่นพ้องก็จะไม่เกิด

1. ผลรวมเวกเตอร์สภาพแม่เหล็กของไฮโดรเจน ภายใต้สนามแม่เหล็กแรงสูง

0 องศา

คลื่นวิทยุ

2. กระตุ้นด้วยคลื่นวิทยุที่มีค่าความถี่ ตรงกับความถี่ของไฮโดรเจน

3. คลื่นวิทยุทำให้ ผลรวมเวกเตอร์สภาพแม่เหล็กเกิดการสั่นพ้อง เปลี่ยนสถานะ จากสมดุลงไปสู่สถานะที่กำหนด

90 องศา

ผลรวมเวกเตอร์ สภาพแม่เหล็กไฮโดรเจน เปลี่ยนมุมจาก 0 องศา ไปยังมุม 90 องศา

ภาพจัดทำโดย รศ.ดร.เพชรกร หาดูพานิชย์

4. หยุดส่งคลื่นวิทยุ หยุดการสั่นพ้อง

5. ผลรวมเวกเตอร์สภาพแม่เหล็กของไฮโดรเจน ค่อยๆ กลับคืน สู่สภาพสมดุลง

0 องศา

90 องศา

ผลรวมเวกเตอร์ สภาพแม่เหล็กของไฮโดรเจน เปลี่ยนมุมจาก 90 องศา กลับไปยังมุม 0 องศา

ภาพจัดทำโดย รศ.ดร.เพชรกร หาดูพานิชย์

เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจที่คล้ายกับ การสั้นพ้อง คือ การส่งพลังงาน (ค่าความถี่วิทยุ) ที่เท่ากับค่าความถี่ของไฮโดรเจนในร่างกาย ค่าความถี่วิทยุจะไปกระตุ้นให้ไฮโดรเจนเกิดการดูดกลืนพลังงาน และเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของยกตัวอย่างดังต่อไปนี้

เมื่ออาจารย์ขอให้นักศึกษาทุกคน ยกมือขึ้น (คำบอกวา... ยกมือขึ้น เปรียบเสมือนการส่งคลื่นวิทยุออกจากเครื่องสร้างภาพเอ็มอาร์) หลังจากนั้น จะมีนักศึกษาบางคน ได้ยินหรือรับรู้ ก็...ทำตามคำบอก เนื่องจาก หูและสมองรับรู้คำสั่งจากเสียงที่ส่งออกมาจากปากอาจารย์ แปลงเสียงให้เป็นสัญญาณ กระตุ้นทำให้ร่างกายเกิดการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรม ด้วยการยกมือขึ้น (เปรียบเสมือน การส่งคลื่นวิทยุออกจากเครื่องสร้างภาพเอ็มอาร์ ไปกระตุ้นที่ตรงกับค่าความถี่ของไฮโดรเจน ทำให้ไฮโดรเจนเกิดการสั้นพ้องดูดกลืนพลังงาน แล้วเปลี่ยนสถานะจากสถานะที่สมดุลไปสู่สถานะอื่นตามที่กำหนด)

แต่... สำหรับบางคนที่ไม่ทำตามคำบอก เนื่องจาก หู หรือ สมอง อาจไม่ได้ยิน ไม่สนใจต่อคำสั่งจากเสียงที่ส่งออกมาจากปากอาจารย์ ทำให้ร่างกายไม่แสดงพฤติกรรม การยกมือขึ้น (เปรียบเสมือน การส่งคลื่นวิทยุในค่าความถี่ที่มีค่าไม่ตรงกับค่าความถี่ของธาตุนั้นๆ เช่น ฟอสฟอรัส ดังนั้น ฟอสฟอรัส จึงไม่เกิดการสั้นพ้อง ไม่เปลี่ยนสถานะจากสถานะที่สมดุลไปสู่สถานะอื่นได้ตามที่ต้องการ)



## พฤติกรรมการณ์ผ่อนคลาย

ในการสร้างภาพเอ็มอาร์ เมื่อมีการส่งคลื่นวิทยุเท่ากับค่าความถี่ลาร์เมอร์ของไฮโดรเจน เข้าไปกระตุ้นอวัยวะบริเวณที่สนใจในร่างกาย ทำให้ไฮโดรเจนเกิดการสั่นพ้อง เปลี่ยนสถานะจากสถานะที่สมดุลไปสู่สถานะอื่น หรือ เปลี่ยนการหมุนเชิงมุมจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง และเมื่อหยุดกระตุ้นด้วยคลื่นวิทยุแล้ว ทำให้หยุดการสั่นพ้อง ณ ภายใต้อสนามแม่เหล็กแรงสูง ไฮโดรเจนในร่างกายจะกลับคืนสู่สถานะสมดุลอีกครั้ง พฤติกรรมนี้เรียกว่า การผ่อนคลาย

การสร้างภาพเอ็มอาร์จะให้ความสนใจเกี่ยวกับเวลาของพฤติกรรมการณ์ผ่อนคลาย ใน 2 ลักษณะ คือ เวลาในการผ่อนคลายทีหนึ่ง (T1 relaxation time) และ เวลาในการผ่อนคลายทีสอง (T2 relaxation time)

### เวลาในการผ่อนคลายทีหนึ่ง

เวลาในการผ่อนคลายทีหนึ่ง อาจเรียก เวลาการผ่อนคลายในแนวยาว (longitudinal relaxation time) หรือ การกลับคืนทีหนึ่ง (T1 recover) หรือ spin-lattice relaxation time ซึ่งพฤติกรรมการณ์ผ่อนคลายแบบนี้จะเกิดขึ้น หลังจากหยุดกระตุ้นด้วยคลื่นวิทยุ เป็นช่วงเวลาที่ผลรวมสภาพแม่เหล็กของไฮโดรเจนในร่างกาย ณ ขณะนั้นได้ กลับคืน (recover) เข้าสู่สถานะสมดุลเดิมตามแนวสนามแม่เหล็ก หรือ ตามแนวยาว (longitudinal) โดยทั่วไป เวลาในการผ่อนคลายกลับสู่สมดุลด้วยอัตราแบบเอกซ์โปเนนเชียล (exponential) เป็นเวลาคงที่ค่าหนึ่ง เป็นเวลาที่ผลรวมสภาพแม่เหล็กเพิ่มขึ้นตามแนวยาว เท่ากับร้อยละ 63 ของสมดุลตามแนวยาวของแต่ละเนื้อเยื่อ<sup>3,8</sup>

เนื้อเยื่อต่างชนิดในร่างกาย เช่น ไขมัน (fat) กล้ามเนื้อ (muscle) น้ำไขสันหลัง (cerebral Spinal Fluid ; CSF) มีโครงสร้างหรือมีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบในจำนวนที่แตกต่างกัน ทำให้ไฮโดรเจนยึดกับโมเลกุลอื่นที่อยู่ในสภาพแวดล้อม (lattice) ที่แตกต่างกัน มีทั้งที่เป็นลักษณะของแข็งหรือของเหลว เมื่อเกิดการผ่อนคลายกลับคืนเข้าสู่สถานะสมดุลเดิม จะมีการคายพลังงานจากไฮโดรเจนไปสู่สภาพแวดล้อมที่ไฮโดรเจนอาศัยอยู่ในระดับที่ต่างกัน ซึ่งจะทำให้ค่าเวลาในการผ่อนคลายแบบทีหนึ่งของเนื้อเยื่อต่างชนิดกันมีค่าที่แตกต่างกัน และค่านี้จะแตกต่างกันไปเมื่อสนามแม่เหล็กมีความแรงที่แตกต่างๆกัน



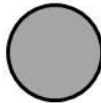
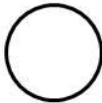



### การสร้างภาพที่เน้นน้ำหนักทึบหนึ่ง (T1 weighted image)

เป็นภาพที่แสดงความแตกต่างกันของความเข้มสัญญาณของอวัยวะที่แตกต่างกัน ไฮโดรเจนจับกับโมเลกุลที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน ทำให้มีค่าเวลาผ่อนคลายที่หนึ่งที่แตกต่างกัน เช่น ไขมันและน้ำไขสันหลัง ในไขมันมีค่าเวลาผ่อนคลายที่หนึ่งที่สั้นกว่าน้ำไขสันหลัง เมื่อเก็บข้อมูลมาสร้างภาพ ไขมันมีสัญญาณมากกว่าน้ำไขสันหลัง ไขมันจึงแสดงภาพเป็นสีขาว (high หรือ hyper signal intensity) และ น้ำไขสันหลังมีสัญญาณน้อยกว่าไขมัน น้ำไขสันหลังจึงแสดงภาพเป็นสีค่อนข้างดำ (low หรือ hypo signal intensity) เมื่อเปรียบเทียบกับไขมัน


สำหรับเนื้อเยื่อสีเทาในสมอง (gray matter) แสดงภาพเป็นสีเทา (Intermediate หรือ iso signal intensity) เนื่องจากให้สัญญาณน้อยกว่าไขมัน สำหรับ อากาศ กระดูกเนื้อแน่น (cortical bone) หรือบริเวณหลอดเลือดที่มีการไหล (blood flowing) จะไม่มีสัญญาณของข้อมูล (no signal หรือ signal void) จึงแสดงภาพที่เป็นสีดำสนิท

## T1 weighted image

			
No signal intensity Signal void	Low signal intensity Hypo-signal intensity	Intermediate signal intensity Iso-signal intensity	High signal intensity Hyper-signal intensity
Air Bone Calcium Flowing blood	Fluid /CSF Ligaments Muscles Spinal cord	High protein tissue Abscess Complex cysts	Fat Contrast media



Spinal cord  
CSF  
Fat



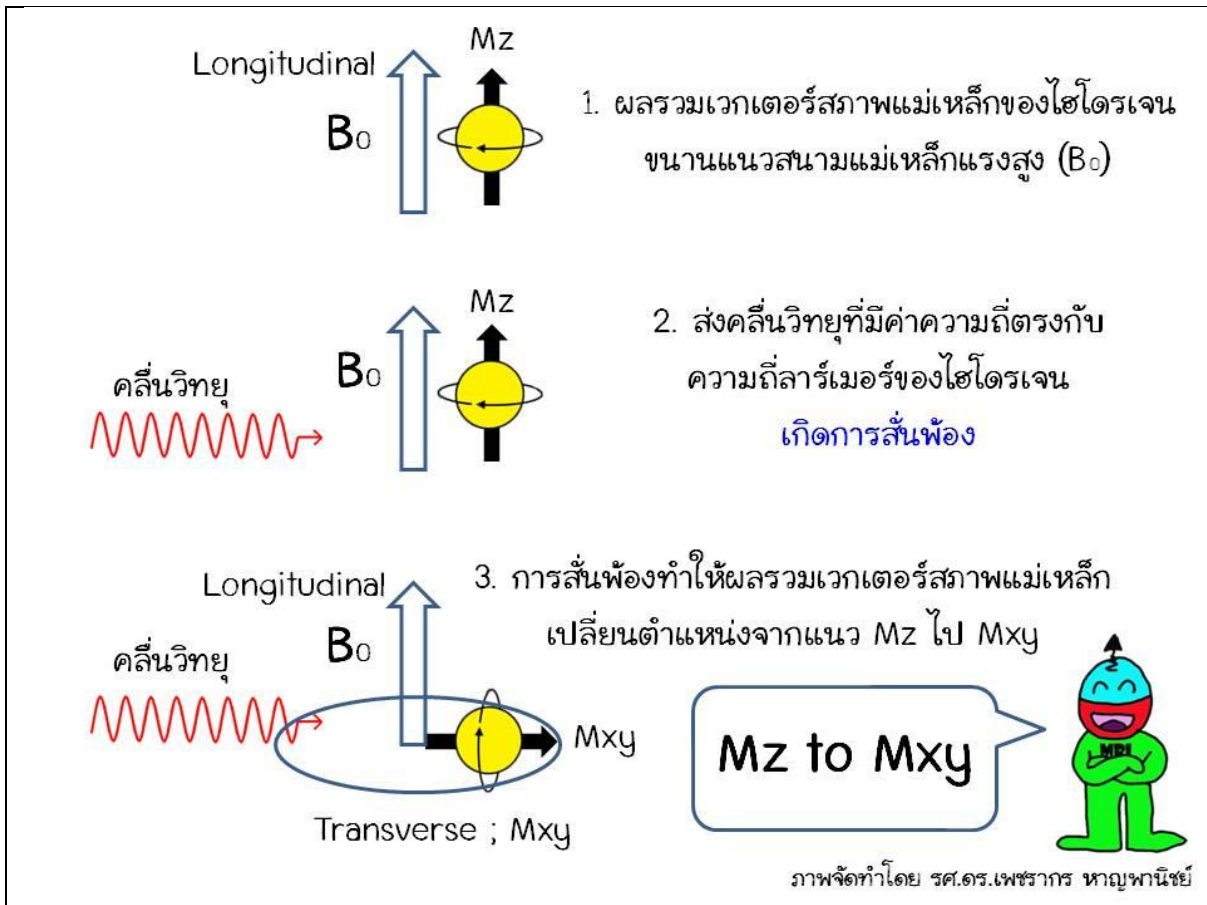
ไฮโดรเจนอยู่ในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน มีค่า T1 relaxation time ที่แตกต่างกัน สัญญาณในภาพจึงแตกต่างกัน

ภาพจัดทำโดย รศ.ดร.เพชรกรร หาญพานิชย์

## เวลาในการผ่อนคลายที่สอง

เวลาในการผ่อนคลายที่สอง อาจเรียกว่า เวลาการผ่อนคลายในแนวขวาง (transverse relaxation time) หรือ spin-spin relaxation time ซึ่งเป็นพฤติกรรมการที่ไฮโดรเจนคายพลังงานให้กันและกันในแนวขวาง

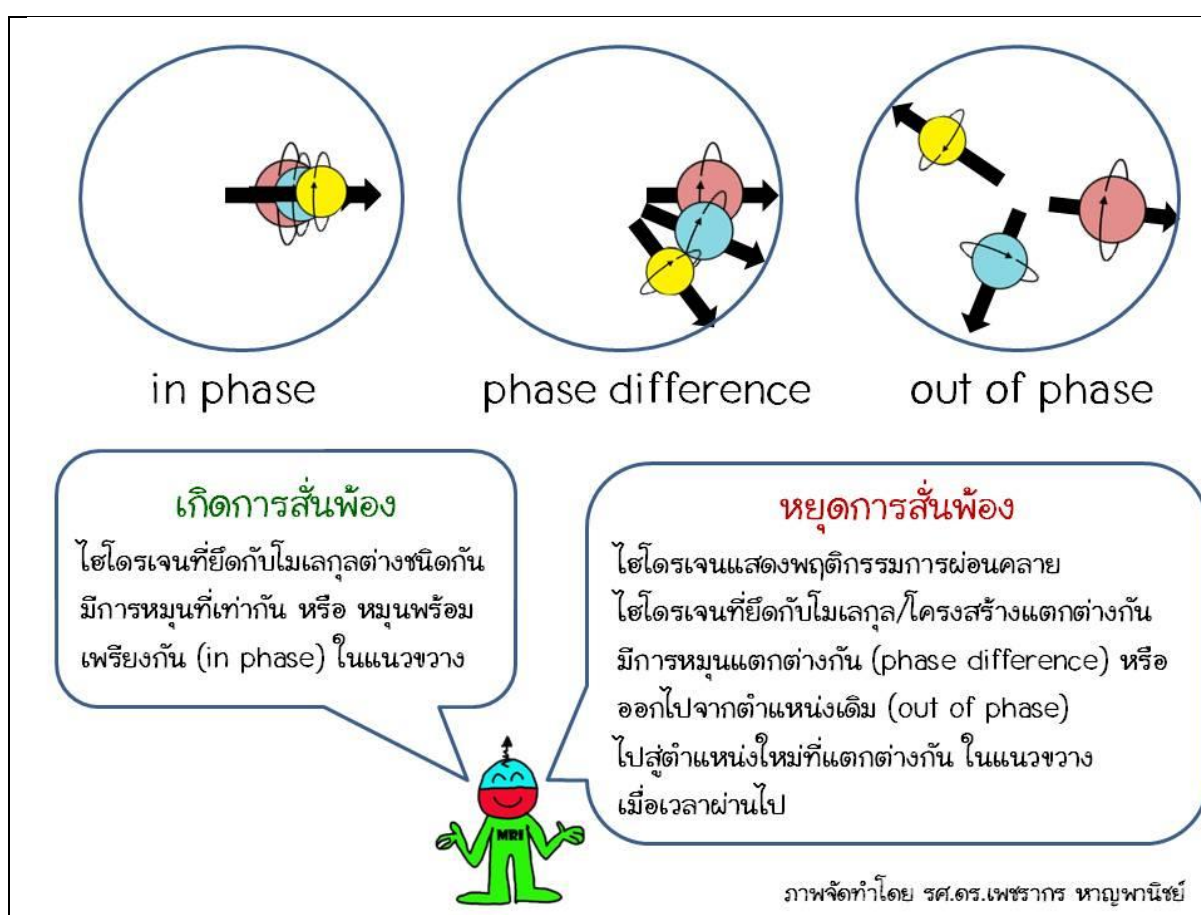
ในระหว่างที่มีการกระตุ้นด้วยคลื่นวิทยุจะทำให้เกิดขบวนการสั่นพ้อง โดยส่วนใหญ่จะทำให้ไฮโดรเจนที่ยึดกับโมเลกุลต่างชนิดกันมีการหมุนโมเมนต์เชิงมุมที่เท่ากัน หมุนพร้อมเพริยกัน หรือ หมุนร่วมเฟส (in phase) ซึ่งจะเป็นการเปลี่ยนจากแนวยาว (หรือที่ขนานตามแนวของสนามแม่เหล็ก) ไปสู่แนวที่กำหนด เช่น เริ่มต้นที่มุม 0 องศา (แนวยาว  $M_z$ ) เปลี่ยนไปสู่มุม 90 องศา (แนวขวาง  $M_{xy}$ )



หลังจากหยุดการกระตุ้นด้วยคลื่นวิทยุ ผลของการส่งพลังงานที่ทำให้เกิดการสั่นพ้องจะหมดไป

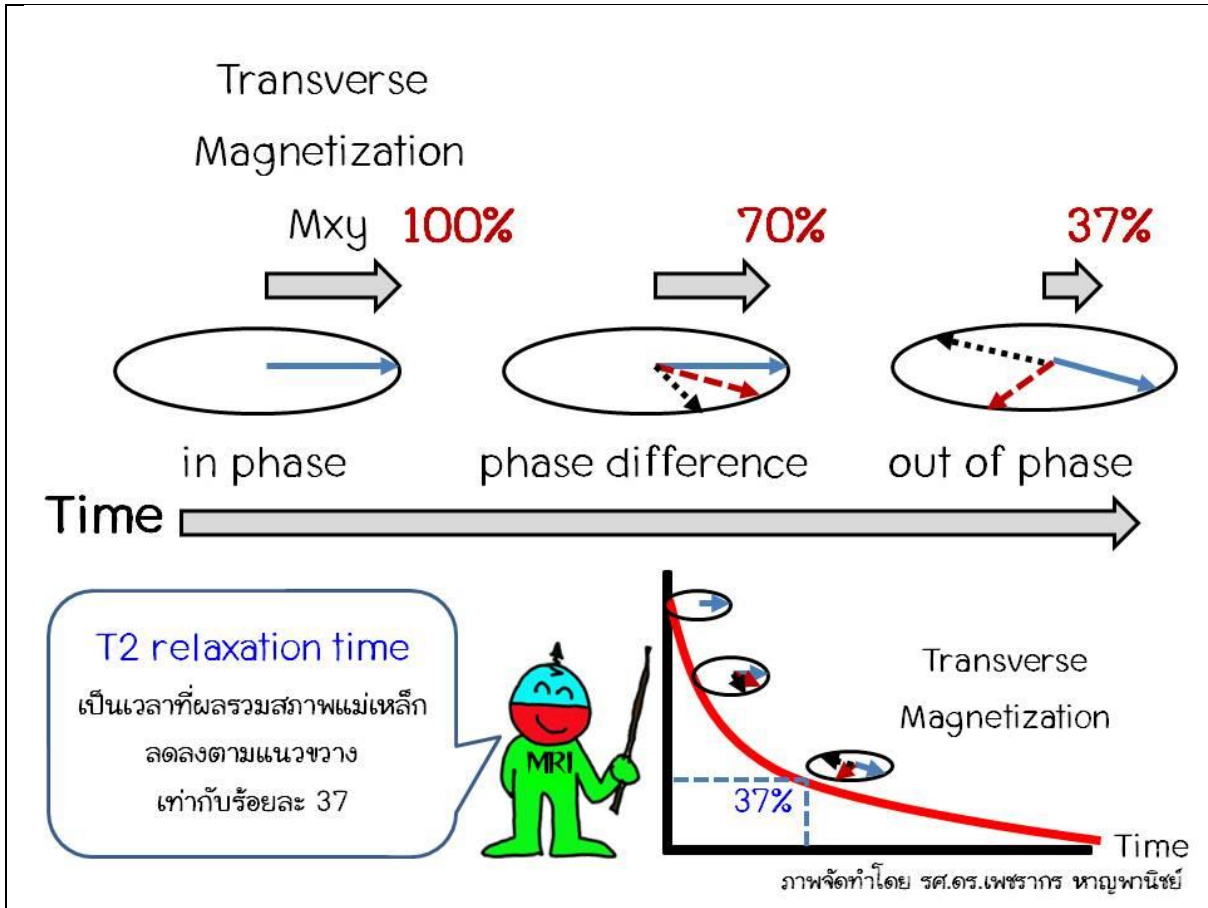
เมื่อหมดการสั่นพ้อง พฤติกรรมของไฮโดรเจนในร่างกาย เกิดพฤติกรรมการผ่อนคลาย กลับคืนเข้าสู่สมดุลของตัวเอง

เนื่องจากผลของความไม่สม่ำเสมอของสนามแม่เหล็ก การเคลื่อนไหวของโมเลกุลในเนื้อเยื่อ (สภาพแวดล้อม) ที่แตกต่างกัน จึงทำให้ไฮโดรเจนเหล่านั้น แสดงพฤติกรรมการผ่อนคลายที่แตกต่างกัน ทำให้การหมุนโมเมนต์เชิงมุมตำแหน่งที่แตกต่างกัน (phase difference) หรือ แยกออกไปจากตำแหน่งเดิม (out of phase) ไปสู่ตำแหน่งใหม่ที่แตกต่างกัน เมื่อเวลาผ่านไป



เวลาในการผ่อนคลายที่สอง จึงเป็นด้วยอัตราการลดลงของสัญญาณแบบเอกซ์โปเนนเชียล เป็นค่าเฉพาะของแต่ละเนื้อเยื่อ ในช่วงเวลาที่ผลรวมสภาพแม่เหล็กลดลงตามแนวขวาง เท่ากับร้อยละ 37



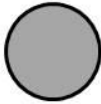
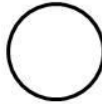





**การสร้างภาพที่เน้นน้ำหนักที่สอง (T2 weighted image)**


เป็นภาพที่แสดงความแตกต่างกันของความเข้มสัญญาณของอวัยวะที่แตกต่างกัน ไฮโดรเจนจับกับโมเลกุลที่แตกต่างกัน หมุนในแนวขวางในตำแหน่งที่แตกต่างกัน ทำให้มีค่าเวลาผ่อนคลายที่สองที่แตกต่างกัน เช่น ไขมันและน้ำไขสันหลัง ในไขมันมีค่าเวลาผ่อนคลายที่สองที่สั้นกว่าน้ำไขสันหลัง เมื่อเก็บข้อมูลมาสร้างภาพ ไขมันมีสัญญาณน้อยกว่าน้ำไขสันหลัง ไขมันจึงแสดงภาพเป็นสีดำ (low หรือ hypo signal intensity) และ น้ำไขสันหลังมีสัญญาณยาวกว่าไขมัน น้ำไขสันหลังจึงแสดงภาพเป็นสีค่อนข้างขาว (high หรือ hyper signal intensity) เมื่อเปรียบเทียบกับไขมัน

## T2 weighted image

			
No signal intensity Signal void	Low signal intensity Hypo-signal intensity	Intermediate signal intensity Iso-signal intensity	High signal intensity Hyper-signal intensity
Air Bone Calcium Flowing blood	Cartilage Ligaments, Liver, Spinal cord	Cartilage Fat, Muscles	Bile, CSF, Fluid Kidneys



Spinal cord  
CSF  
Fat



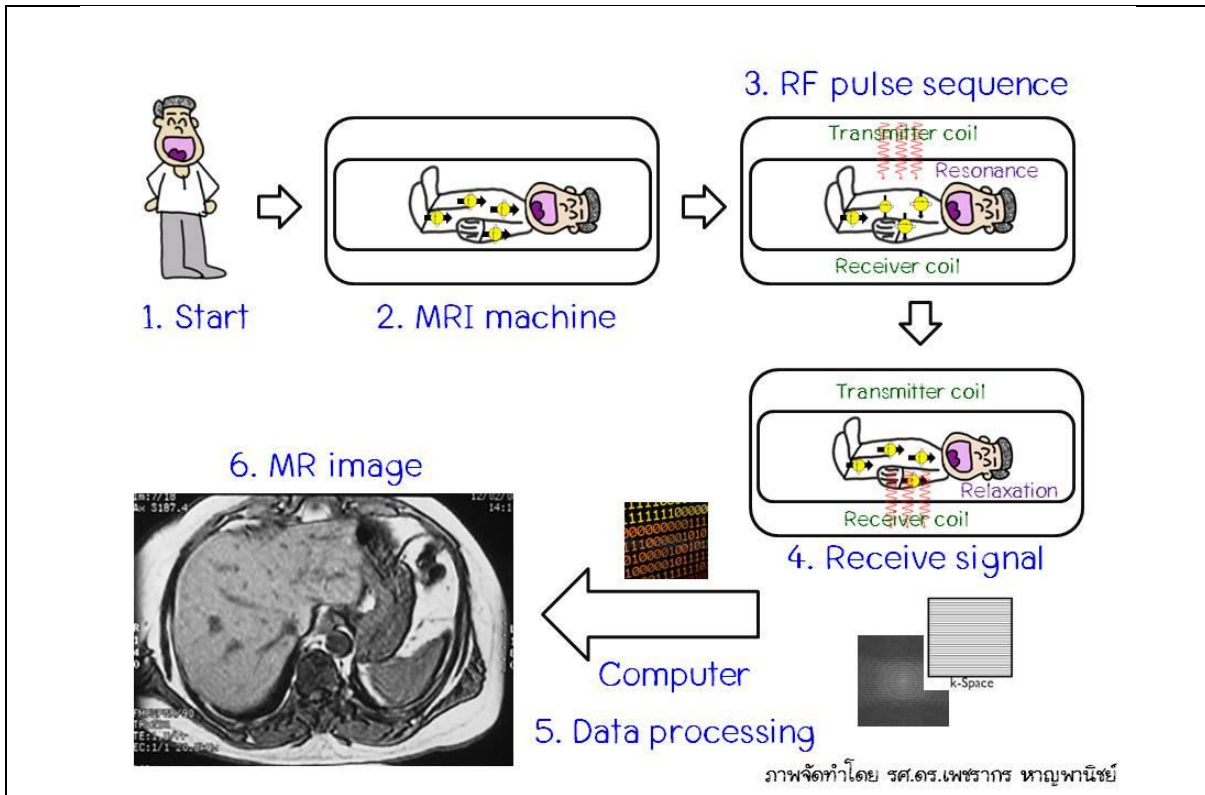
ไฮโดรเจน มีโมเมนต์เชิงมุม  
ในตำแหน่งที่แตกต่างกัน  
มีค่า T2 relaxation time  
ที่แตกต่างกัน  
สัญญาณในภาพจึงแตกต่างกัน

ภาพจัดทำโดย รศ.ดร.เพชรกร ชาญพานิชย์

### หลักการสร้างภาพ

แม่เหล็ก เสมือนเป็นหัวใจของเครื่องสร้างภาพเอ็มอาร์ เครื่องสร้างภาพเอ็มอาร์ในทางคลินิก ใช้เครื่องที่ความแรงของสนามแม่เหล็ก อยู่ประมาณ 0.5-4 เทสลา ในการตรวจอาศัยผลจากอันตรกิริยา (interaction) ด้วยการใช้ขดลวดส่งสัญญาณ (transmitter coil) ทำหน้าที่ส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มีค่าความถี่ในย่านความถี่คลื่นวิทยุ โดยจะทำการส่งคลื่นวิทยุเป็นช่วงๆ (RF pulse sequence) เข้าไปกระตุ้นให้โปรตอนของไฮโดรเจน (หรือ ผลรวมเวกเตอร์สภาพแม่เหล็กของอวัยวะต่างๆในบริเวณที่สนใจ) ทำให้เกิดขบวนการสั่นพ้อง โดยส่งคลื่นวิทยุที่มีค่าความถี่เท่ากับหรือใกล้เคียงกับค่าความถี่ลาร์มอร์ของไฮโดรเจน จึงทำให้ไฮโดรเจนที่อยู่ตามส่วนต่างๆในบริเวณการตรวจการสั่นพ้อง เมื่อเกิดการสั่นพ้องจะทำให้โปรตอนของไฮโดรเจนเปลี่ยนพฤติกรรม หรือ การหมุนเชิงมุมที่อยู่ในสภาวะที่สมดุลภายใต้สนามแม่เหล็กแรงสูง เปลี่ยนพฤติกรรมการหมุนเชิงมุมไปสู่แนวแกนที่เครื่องกำหนด หลังจากที่ยุติการกระตุ้นด้วยคลื่นวิทยุแล้ว ยุติการสั่นพ้อง ผลของสนามแม่เหล็กแรงสูงจะทำให้ไฮโดรเจนเหล่านั้นเกิดพฤติกรรมที่เรียกว่า การผ่อนคลาย (relaxation) คือ การกลับคืนเข้าสู่สภาวะสมดุลอีกครั้ง โดยจะมี

ขดลวดรับสัญญาณ (receiver coil) ทำหน้าที่รับสัญญาณคลื่นวิทยุจากไฮโดรเจนที่ปลดปล่อยสัญญาณออกมา แล้วส่งต่อเข้าไปสู่ระบบคอมพิวเตอร์ เพื่อทำหน้าที่ในการประมวลผลและสร้างออกมาเป็นภาพ



1. ผู้ป่วยอยู่นอกพื้นที่สนามแม่เหล็ก ผลรวมแม่เหล็กหมุนอย่างอิสระ
2. เมื่อผู้ป่วยเข้าไปอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กแรงสูง ผลรวมแม่เหล็กซิงโครนกับทิศทางสนามแม่เหล็ก
3. Transmitter coil ที่หน้าส่งคลื่นวิทยุ (RF) กระตุ้นไฮโดรเจน ทำให้เกิดขบวนการสั่นพ้อง
4. เมื่อหยุดกระตุ้นด้วยคลื่นวิทยุ หยุดการสั่นพ้อง ไฮโดรเจนที่อยู่ในอวัยวะหรือสารชีวโมเลกุลต่างๆ เกิดพฤติกรรมการณ์ผ่อนคลาย โดยมี receiver coil ทำหน้าที่รับสัญญาณและส่งเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์
5. ระบบคอมพิวเตอร์นำข้อมูลที่ได้อุปประมวลผลข้อมูลและสร้างภาพ
6. ภาพที่เกิดขึ้นจากขบวนการตรวจ

อวัยวะต่างๆในร่างกาย เช่น ลำไส้ หลอดเลือด เนื้อเยื่อ กล้ามเนื้อ กระดูก มีลักษณะ โครงสร้าง องค์ประกอบของสารชีวโมเลกุล หรือ ปริมาณของไฮโดรเจนที่แตกต่างกัน เมื่อสร้างภาพด้วยเครื่องสร้างภาพเอ็มอาร์ จึงทำให้เกิดสัญญาณที่ปรากฏออกมาเป็นภาพมีลักษณะที่แตกต่างกัน เช่น ภาพที่เน้น

น้ำหนักที่หนึ่ง (T1 weighted image) หรือ ภาพที่เน้นน้ำหนักที่สอง (T2 weighted image) หรือ อื่นๆ เพื่อใช้ประกอบการวินิจฉัยและรักษาต่อไป

### การจัดการความปลอดภัยจากการตรวจและใช้เครื่องสร้างภาพเอ็มอาร์

ปัจจุบันมีการใช้เครื่องสร้างภาพเอ็มอาร์ในการตรวจวินิจฉัยและรักษาโรคกันอย่างแพร่หลาย สิ่งหนึ่งที่ต้องคำนึงถึง คือ อันตราย ความเสี่ยง ผลข้างเคียงและความปลอดภัยจากการตรวจด้วยเครื่องสร้างภาพเอ็มอาร์ เนื่องจากในการตรวจไม่ว่าจะเป็นผู้ป่วย ญาติหรือเจ้าหน้าที่บุคลากรผู้เกี่ยวข้องกับการตรวจ มีโอกาสที่จะต้องสัมผัสหรือเกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็กแรงสูง คลื่นวิทยุ เสียงดังในห้องตรวจ เหล่านี้ จึงได้มีการศึกษาวิจัยค้นคว้า และ มีการรายงานผลการศึกษาออกมาถึงความปลอดภัยจากการตรวจหรือการใช้งานด้วยเครื่องเอ็มอาร์ โดยหลายหน่วยงานหรือหลายองค์การ<sup>12-14</sup>

ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต่อผู้เกี่ยวข้องต้องเข้าใจแนวทางด้านความปลอดภัยที่เกี่ยวข้อง เช่น การให้ข้อมูลการตรวจ การซักประวัติของผู้ป่วยหรือผู้เกี่ยวข้องได้รับทราบและเข้าใจก่อนที่จะเข้าไปในห้องตรวจ รวมถึงการบริหารจัดการสิ่งแวดล้อม กำหนดอาณาเขตพื้นที่การใช้งาน ใช้เครื่องมือและเทคนิคต่างๆที่ทำให้เกิดความปลอดภัยในการตรวจ

### การกำหนดเขตพื้นที่การใช้งานในอาคารตรวจ





เนื่องจากเครื่องสร้างภาพเอ็มอาร์ใช้แม่เหล็กแรงสูง เพื่อลดความเสี่ยงภัยต่อการเหนี่ยวนำวัสดุโลหะเข้าไปสู่เครื่อง รวมถึงการแผ่สนามแม่เหล็กแรงสูงออกมาสู่ภายนอก จึงได้มีการจำกัดหรือกำหนดอาณาเขตพื้นที่การเข้าห้องตรวจ โดยแบ่งออกเป็นอาณาเขตพื้นที่หรือโซน (zone) ในระดับความปลอดภัย 4 โซน ตามข้อกำหนดของวิทยาลัยรังสีวิทยาของอเมริกัน (ACR; American College of Radiology)<sup>15</sup> ดังนี้

โซนที่หนึ่ง (zone one) เป็นพื้นที่ทั่วไป ที่สามารถเข้าถึงได้โดยอิสระสำหรับสาธารณชนทั่วไป เป็นพื้นที่ปลอดภัยจากสนามแม่เหล็กแรงสูง

โซนที่สอง (zone two) เป็นพื้นที่บริเวณแผนกต้อนรับผู้รับบริการ ผู้ป่วย หรือญาติ โดยอยู่ภายใต้การกำกับดูแลทั่วไปของเจ้าหน้าที่หรือบุคลากรผู้รับผิดชอบ เป็นพื้นที่ปลอดภัยจากสนามแม่เหล็กแรงสูง

โซนที่สาม (zone three) เป็นพื้นที่อนุญาตเฉพาะบุคลากรผู้เกี่ยวข้องหรือที่ได้รับการอนุมัติ เช่น ผู้รับบริการ หรือ ผู้ป่วย หรือ ญาติ ที่ให้ข้อมูลหรือตอบแบบสอบถามทางการแพทย์ สัมภาษณ์ ซักประวัติ ตรวจร่างกาย การทำหัตถการ การให้การดูแลรักษาแก่ผู้รับบริการหรือผู้ป่วย รวมถึงห้องควบคุมหรือห้องคอมพิวเตอร์ตั้งอยู่ภายในโซนที่สาม เป็นขอบเขตที่สนามแม่เหล็กต่ำกว่าระดับ 5 เกาส์

โซนที่สี่ (zone four) เป็นบริเวณที่อยู่ภายในพื้นที่ห้องตรวจที่มีเครื่องตรวจ การเข้าถึงห้องหรือโซนนี้ ควรให้ผ่านโซนที่สามเท่านั้น โซนนี้เป็นขอบเขตที่สนามแม่เหล็กสูงกว่าระดับ 5 เกาส์ เป็นพื้นที่อนุญาตเฉพาะบุคลากรผู้เกี่ยวข้องหรือที่ได้รับการอนุมัติเท่านั้น

<h2 style="text-align: center; background-color: #00FF00; color: black; padding: 5px;">MRI : Zone I</h2>	<h2 style="text-align: center; background-color: #0000FF; color: white; padding: 5px;">MRI : Zone II</h2>
<div style="display: flex;"> <div style="flex: 1;">  </div> <div style="flex: 2; padding-left: 10px;"> <ul style="list-style-type: none"> <li>- พื้นที่ทั่วไป พื้นที่สาธารณะ</li> <li>- พื้นที่ปลอดภัยจากสนามแม่เหล็กแรงสูง</li> <li>- ใต้ถ้ำ ห้อง หรือ ทางเข้าออกของอาคารตรวจ MRI</li> </ul> </div> </div>	<div style="display: flex;"> <div style="flex: 1;">  </div> <div style="flex: 2; padding-left: 10px;"> <ul style="list-style-type: none"> <li>- อยู่ระหว่าง Zone I กับ Zone III</li> <li>- พื้นที่เฉพาะผู้เกี่ยวข้องหรือได้รับอนุญาต อยู่ภายใต้การกำกับดูแลทั่วไป</li> <li>- พื้นที่ปลอดภัยจากสนามแม่เหล็กแรงสูง</li> <li>- ใต้ถ้ำ พื้นที่ติดต่อหรือต้อนรับผู้ป่วย ห้องเปลี่ยนชุด</li> </ul> </div> </div>
<h2 style="text-align: center; background-color: #FFFF00; color: black; padding: 5px;">MRI : Zone III</h2>	<h2 style="text-align: center; background-color: #FF0000; color: white; padding: 5px;">MRI : Zone IV</h2>
<div style="display: flex;"> <div style="flex: 1;">  </div> <div style="flex: 2; padding-left: 10px;"> <ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นทางผ่านเข้าออกไปมาของ Zone IV</li> <li>- พื้นที่เฉพาะผู้เกี่ยวข้องหรือได้รับอนุญาต อยู่ภายใต้การกำกับดูแลของเจ้าหน้าที่</li> <li>- พื้นที่ใกล้สนามแม่เหล็กแรงสูง</li> <li>- สนามแม่เหล็กไม่เกิน 5 เกาส์ (gauss)</li> <li>- ใต้ถ้ำ พื้นที่สัมภาษณ์ ให้หรือรับข้อมูล ซักประวัติ ประเมินอาการ ดูแลผู้ป่วย อารวมถึงห้องควบคุมคอมพิวเตอร์</li> </ul> </div> </div>	<div style="display: flex;"> <div style="flex: 1;">  </div> <div style="flex: 2; padding-left: 10px;"> <ul style="list-style-type: none"> <li>- พื้นที่ภายในห้องตรวจ MRI</li> <li>- พื้นที่สนามแม่เหล็กแรงสูง</li> <li>- พื้นที่เฉพาะผู้เกี่ยวข้อง หรือได้รับอนุญาตโดยอยู่ภายใต้การกำกับดูแลของเจ้าหน้าที่ผู้รับผิดชอบ</li> </ul> </div> </div> <p style="text-align: right; font-size: small;">ภาพจัดทำโดย รศ.ดร.เพชรกรร หาญพานิชย์</p>

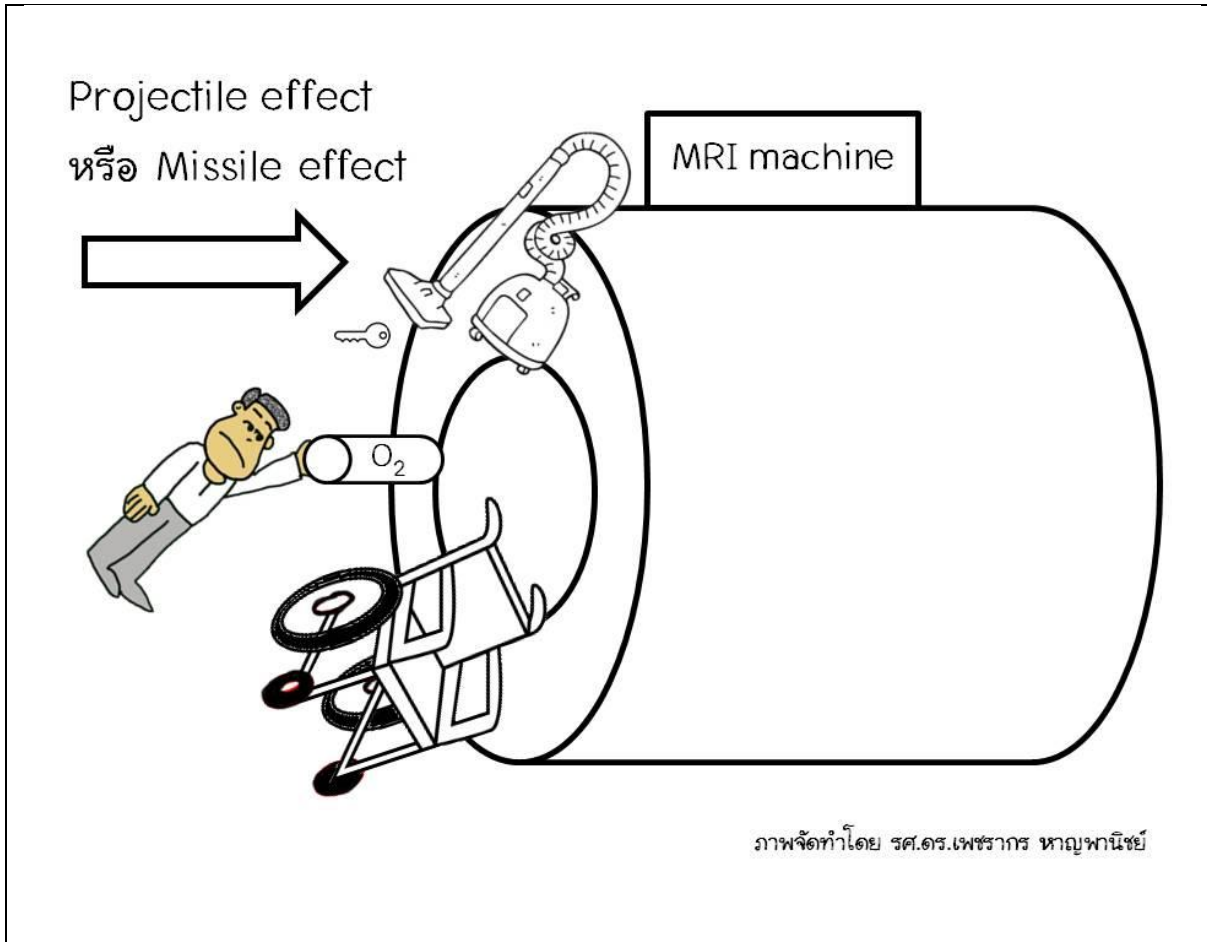
## แรงเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กต่อวัตถุ

สนามแม่เหล็ก ในที่นี้จะหมายถึง สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากแม่เหล็กที่เป็นตัวหลัก (main magnetic field;  $B_0$ ) ที่อยู่ในเครื่องสร้างภาพเอ็มอาร์ ความแรงของสนามแม่เหล็กหลักจะมีความแรงมากกว่าแม่เหล็กทุกชนิดที่ใช้ในเครื่อง ปัจจุบันใช้สนามแม่เหล็กหลักที่ใช้สำหรับการตรวจวินิจฉัยอยู่ในช่วง 0.5-3 เทสลา โดยมีแนวโน้มว่าจะมีการเพิ่มความแรงของสนามแม่เหล็กที่นำมาใช้ในการตรวจให้สูงขึ้น

สนามแม่เหล็กที่แผ่ออกมาตัวเครื่องจะส่งแรงเหนี่ยวนำต่อวัตถุที่มีส่วนประกอบ หรือ ส่วนผสมของสารที่ตอบสนองกับแม่เหล็ก สารพาราแมกเนติก (paramagnetic substance) หรือ สารเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic substance) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ใช้งานชนิดต่างๆ เช่น โด๊สหรือแก้อิโลหะ เสา น้ำเกลือ รถเข็น เครื่องดูดฝุ่น ถังออกซิเจน เป็นต้น โดยสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า projectile หรือ missile effect คือ ปรากฏการณ์ที่เกิดจากแรงเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กทำให้วัตถุพุ่งด้วยความเร็วสูงเข้าสู่แกนกลางสนามแม่เหล็ก วัตถุจะสามารถพุ่งด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน ถ้าวัตถุที่มีขนาดใหญ่ เมื่อได้รับแรงเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กแรงสูง วัตถุจะพุ่งด้วยความเร็วที่สูงเข้าสู่แกนกลางสนามแม่เหล็ก และ ผลของการพุ่งชน ก็จะก่อให้เกิดความเสียหายต่อวัตถุที่ถูกชนอย่างรุนแรง ในระหว่างการตรวจผู้ป่วย หากมีวัตถุพุ่งเข้าสู่ตัวเครื่องเอ็มอาร์ อาจมากระทบผู้ป่วยทำให้เกิดการบาดเจ็บหรือเป็นอันตรายต่อชีวิตผู้ป่วยได้<sup>16-18</sup> หรือถ้าหากเป็นวัสดุขนาดเล็ก เช่น กิ๊บติดผม คลิปหนีบกระดาษ วัสดุเหล่านี้ไปปิดบังสนามแม่เหล็กที่แผ่ออกมา อาจจะทำให้เกิดการรบกวนต่อการรับสัญญาณในการสร้างภาพในการตรวจวินิจฉัยได้

นอกจากนี้อาจรวมถึง กุญแจที่ใช้ระบบรีโมท นาฬิกาชนิดที่ใช้กลไก โทรศัพท์มือถือ บัตรเครดิต บัตรอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ที่จะนำเข้าไปในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กแรงสูง อุปกรณ์เหล่านี้ อาจเกิดความเสียหาย อันเนื่องมาจากผลของสนามแม่เหล็ก โดยสนามแม่เหล็กจะไปรบกวน หยุดยั้งการทำงาน หรือ ลบข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์ของอุปกรณ์ดังกล่าว ทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์เหล่านั้นได้

วัสดุใดที่ไม่แน่ใจว่าจะชำรุดหรือไปรบกวนการทำงานของเครื่องสร้างภาพเอ็มอาร์ ก็ไม่ควรนำเข้าไปในห้องตรวจ ควรเก็บนอกบริเวณสนามแม่เหล็กจะเป็นการปลอดภัยที่สุด หากไม่แน่ใจว่าอุปกรณ์ใดเป็นสารแม่เหล็กหรือไม่ อาจตรวจสอบได้ด้วยการใช้แม่เหล็กขนาดเล็กกับวัสดุนั้น เพื่อตรวจสอบปฏิกิริยาที่แม่เหล็กมีต่อวัสดุดังกล่าว ก่อนนำเข้าไปในห้องตรวจ และบริเวณที่ปลอดภัยที่จะไม่มีสนามแม่เหล็กไปรบกวนต่อวัสดุต่างๆ หรือบริเวณนอกห้องตรวจ ควรมีความแรงของสนามแม่เหล็กไม่เกิน 5 เกาส์<sup>19,20</sup>



### ป้ายเตือนที่ใช้ในอาคารตรวจ

เพื่อเป็นมาตรการรักษาความปลอดภัย หรือ ลดความเสี่ยงภัยที่เกิดจากแรงเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กทำให้วัตถุพุ่งด้วยความเร็วสูงเข้าสู่แกนกลางสนามแม่เหล็ก ดังนั้นหน่วยงานควรจัดทำป้ายเตือนชนิดต่างๆ เช่น ป้ายติดไว้บริเวณประตูทางเข้าพื้นที่ที่มีสนามแม่เหล็กแรงสูง เป็นการแจ้งให้ผู้ป่วยและบุคลากรที่จะเข้าออกในพื้นที่ที่มีสนามแม่เหล็กได้รับรู้ รับทราบ โดยป้ายดังกล่าว ควรระบุข้อความ ไม่อนุญาตให้ผู้ป่วยที่มีเครื่องกระตุ้นหัวใจไฟฟ้า หรือ สอดใส่โลหะในร่างกาย เข้าห้องตรวจก่อนได้รับอนุญาต รวมถึงไม่ควรนำอุปกรณ์ชนิดต่างๆ เช่น บัตรเครดิต พวงกุญแจ นาฬิกา โทรศัพท์ เข้าไปในพื้นที่สนามแม่เหล็กแรงสูง

นอกจากนั้น อาจจัดทำป้ายเตือนนี้ เพื่อแจ้งให้บุคลากรได้รับทราบว่า ระบุว่า อุปกรณ์ชนิดใดมีความปลอดภัยหรือไม่ปลอดภัย หรือ มีเงื่อนไขพิเศษ หากนำเข้าไปในห้องที่มีสนามแม่เหล็กแรงสูง หรือ

โซนที่ 4 จะมีผลต่อความปลอดภัยหรือเกิดอันตรายได้ ตามข้อกำหนดขององค์การอาหารและยาของสหรัฐอเมริกา (U.S. Food and Drug Administration) ร่วมกับหน่วยงานอื่นและวิทยาลัยรังสีวิทยาของอเมริกัน (ACR; American College of Radiology)<sup>15</sup> ได้กำหนดลักษณะสัญลักษณ์ หรือ ลักษณะไอคอน (icon) ที่ใช้งาน มี 3 รูปแบบ ด้วยกันดังนี้

**MRI safe** ควรติดรายการอุปกรณ์ที่มีความปลอดภัยที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายใดๆ ในทุกสภาพแวดล้อม ไม่มีความเสี่ยงสำหรับผู้ป่วยหรือบุคคลอื่น แต่อาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของข้อมูลการวินิจฉัย ลักษณะไอคอน ประกอบด้วยตัวอักษร MR เป็นสีเขียวในสี่เหลี่ยมสีขาวที่มีเส้นขอบสีเขียวหรือตัวอักษร MR เป็นสีขาวภายในสี่เหลี่ยมสีเขียว

**MRI conditional** ควรติดรายการอุปกรณ์ที่มีการทดสอบหรือพิสูจน์ว่าไม่ก่อให้เกิดอันตรายใดๆ มีความปลอดภัยสามารถใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีสนามแม่เหล็กตามเงื่อนไขที่กำหนด เช่น เครื่องกระตุ้นหัวใจชนิดพิเศษ หรืออุปกรณ์อื่นๆที่ทำจากวัสดุที่ไม่ใช่วัสดุแม่เหล็กอย่างแรง ลักษณะไอคอน ประกอบด้วยตัวอักษร MR เป็นสีดำภายในรูปสามเหลี่ยมสีเหลืองและมีเส้นขอบสีดำ

**MR unsafe** ควรติดรายการอุปกรณ์ที่ไม่ปลอดภัย เป็นอันตราย มีความเสี่ยงสำหรับผู้ป่วยหรือบุคคลอื่น เมื่อนำเข้าไปในพื้นที่สนามแม่เหล็ก เช่น วัสดุที่มีส่วนประกอบเป็นเหล็ก หรือ ส่วนผสมด้วยวัสดุแม่เหล็กอย่างแรง ลักษณะไอคอน ประกอบด้วยตัวอักษร MR เป็นสีดำบนฟิลด์สีขาวภายในวงกลมสีแดงที่มีแถบสีแดงทแยงมุม



MR safe

MR conditional

MR unsafe

**DANGER**  
RESTRICTED ACCESS

Magnetic Field Hazard Area

\* NO CARDIAC PACEMAKERS OR IMPLANTABLE  
CARDIOVERTER DEFIBRILLATORS (ICDs)  
Persons with certain metallic, electronic, magnetic or  
mechanical implants, devices or objects may not enter  
this area.  
Serious injury may result.

\* NO LOOSE METAL OBJECTS  
Objects made from ferrous materials must not be taken  
into this area.  
Serious injury or property damage may result.  
Electronic objects such as cell phones, hearing aids, and  
beepers may also be damaged.

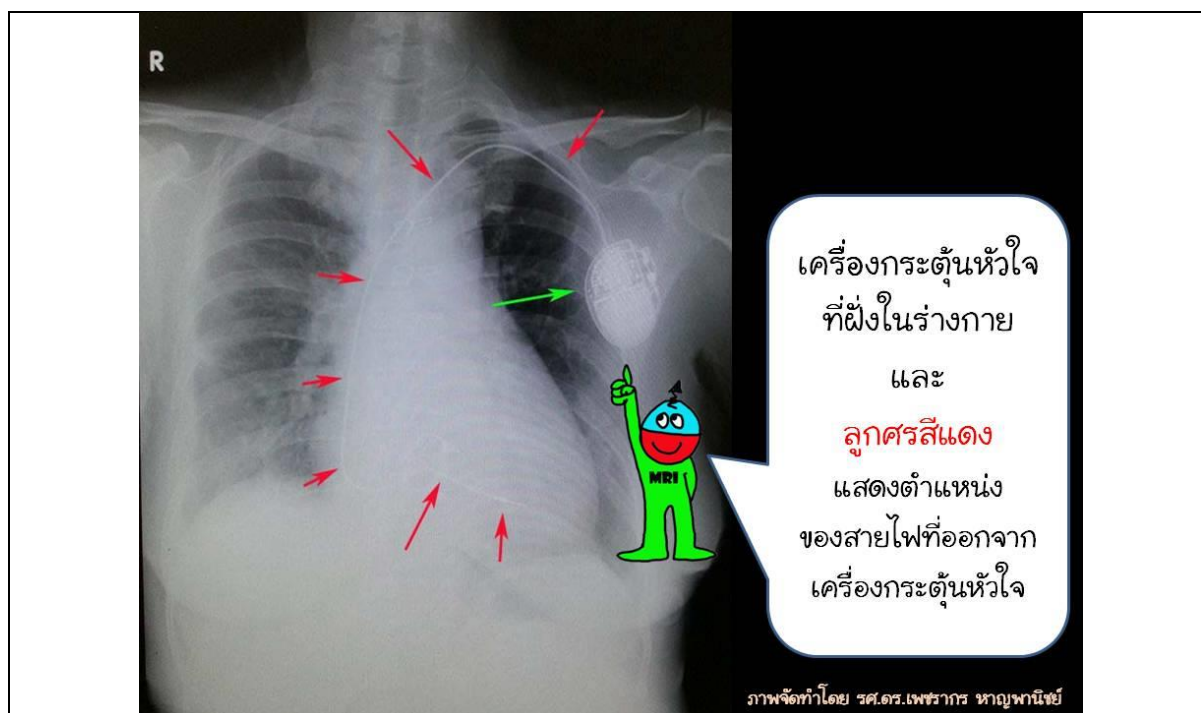
เขตสนามแม่เหล็ก

ป้ายรูปแบบต่างๆ  
ที่ใช้ในพื้นที่ MRI

ภาพจัดทำโดย รศ.ดร.เพชรกรร หาญพานิชย์

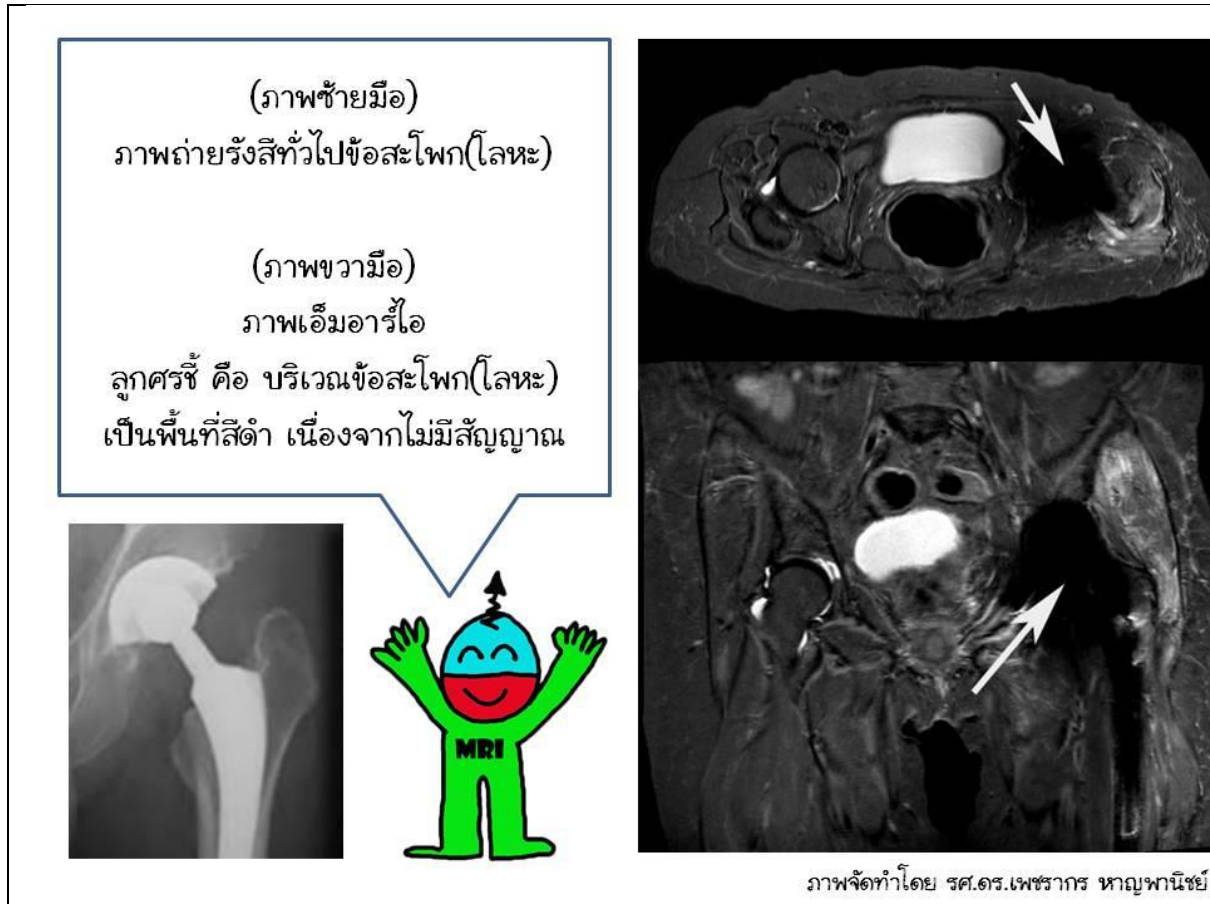
### วัสดุที่อยู่สอดใส่ในร่างกาย

ผู้ที่ใช้เครื่องกระตุ้นหัวใจ (Cardiac pacemaker) ชนิดสอดใส่ในร่างกาย จะไม่ได้รับอนุญาตเข้าห้องตรวจเอ็มอาร์ เนื่องจากอุปกรณ์นี้ภายในเป็นอุปกรณ์ที่มีส่วนผสมของสารพาราแมกเนติก หรือ เฟอร์โรแมกเนติก หรือ มีการทำงานด้วยอิเล็กทรอนิกส์ เมื่ออุปกรณ์ได้รับแรงเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กแรงสูง จะทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายหรือเปลี่ยนตำแหน่งของสายไฟที่วางไว้กระตุ้นหัวใจ หรือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หยุดทำงาน ส่งผลให้ต่อผู้ป่วยโดยตรงและอาจเป็นอันตรายถึงกับเสียชีวิตได้ ในปัจจุบันมีการจัดทำเครื่องกระตุ้นหัวใจชนิดพิเศษที่ปลอดภัย สามารถใช้งานภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด เข้ารับการตรวจด้วยเครื่องเอ็มอาร์ได้แล้ว



ผู้ป่วยที่มีอุปกรณ์ยึดหลอดเลือด หรือ คลิปโลหะที่ใช้ในการผ่าตัด (Intra vascular clips or surgical clips or pins) ที่ทำด้วยวัสดุที่เป็นสารแม่เหล็ก เมื่อได้รับแรงเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กแรงสูง จะสามารถทำให้วัสดุเหล่านี้เคลื่อนที่หรือเปลี่ยนตำแหน่งหรือหมุนวน เกิดความร้อนได้หรือทำอันตรายต่ออวัยวะที่คลิปโลหะเหล่านี้ยึดเอาไว้ เช่น ทำให้หลอดเลือดฉีกขาดได้ นอกจากนี้อาจมีวัสดุอื่นๆ ที่แทรกสอดในอวัยวะในตำแหน่งที่อาจเป็นอันตรายได้ เช่น ลิ้นหัวใจเทียม เครื่องช่วยฟังที่ฝังในร่างกาย ลูกกระสุนปืนที่อยู่ในร่างกาย ในปัจจุบันมีการจัดทำคลิปโลหะชนิดพิเศษที่ปลอดภัย สามารถใช้งานภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด เข้ารับการตรวจด้วยเครื่องเอ็มอาร์ได้แล้ว ผู้ป่วยเหล่านี้หากไม่แน่ใจว่าจะปลอดภัย หรืออาจมีความเสี่ยงที่วัสดุจากเกิดการเคลื่อนที่ ก็ไม่ควรเสี่ยงที่จะนำเข้าไปในห้องตรวจ

อุปกรณ์ที่สอดใส่ (Implants) เพื่อช่วยยึดกระดูก ใช้ในการรักษา เช่น ข้อเทียม ลวด หรือ เกลียวยึดกระดูกที่ทำด้วยโลหะ อุปกรณ์เหล่านี้ทำจากวัสดุหลายชนิด มีทั้งที่เป็นสารแม่เหล็กและไม่เป็นสารแม่เหล็ก ผู้ป่วยหรือบุคลากรที่มีอุปกรณ์ดังกล่าว สามารถเข้าไปในห้องตรวจเอ็มอาร์ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด โดยที่ผู้ป่วยหรือผู้ที่มีอุปกรณ์ดังกล่าวจะไม่เป็นอันตราย เนื่องจากแรงเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็ก ไม่สามารถทำให้อุปกรณ์ดังกล่าวเคลื่อนที่หรือเปลี่ยนตำแหน่งได้ แต่อุปกรณ์เหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อภาพที่ตรวจ โดยวัสดุดังกล่าวจะปิดกั้นคลื่นวิทยุหรือทำให้ไม่มีสัญญาณนำมาสร้างภาพ เกิดเป็นพื้นที่สีดำในบริเวณที่มีอุปกรณ์ดังกล่าวอยู่ อาจมีผลรบกวนของอวัยวะบริเวณใกล้เคียง

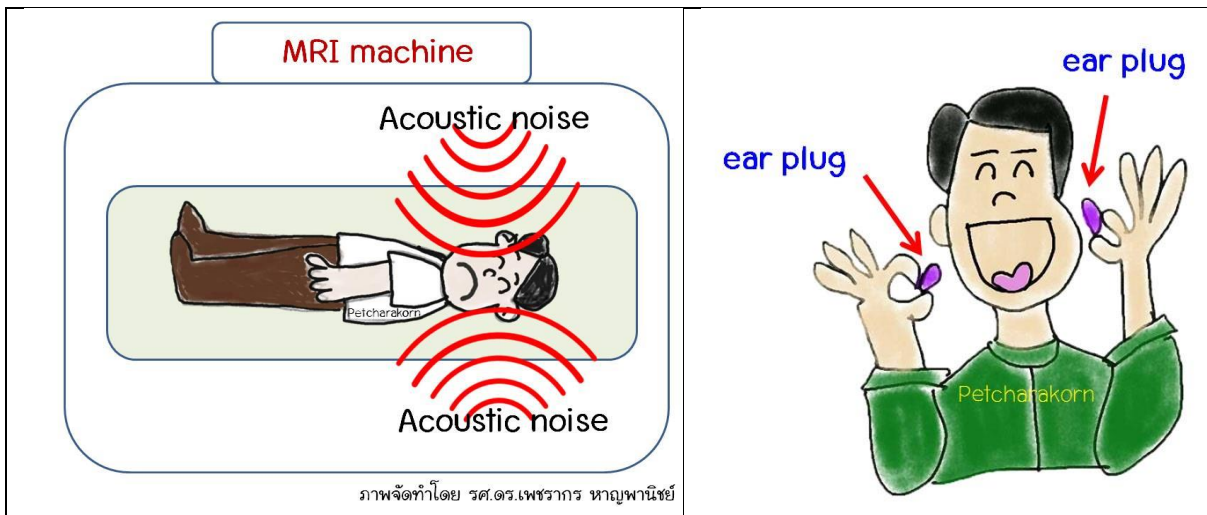


นอกจากมาตรการที่กล่าวมาแล้ว สิ่งหนึ่งที่มีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่ง ต้องดำเนินการอย่างเป็นรูปธรรม คือ การซักประวัติผู้ป่วย ก่อนเข้ารับการตรวจด้วยเครื่องสร้างภาพเอ็มอาร์ไอ เพื่อเป็นการรวบรวมข้อมูลเรื่องราวความเจ็บป่วยของผู้ป่วย ข้อมูลเกี่ยวกับวัสดุที่อยู่สอดใส่หรือยึดติดอยู่ในร่างกาย อาจรวมถึงการให้ข้อมูลที่ควรทราบก่อนการตรวจ ขณะเข้ารับการตรวจ เพื่อลดความเสี่ยงภัยทำให้เกิดความเข้าใจ การให้ร่วมมือในการตรวจ ก่อให้เกิดสัมพันธภาพและส่งผลที่ดีต่อการตรวจ

### ผลของเสียงที่เกิดขึ้นในห้องตรวจ

ในขณะการตรวจวินิจฉัยด้วยเครื่องสร้างภาพเอ็มอาร์ไอ จะเกิดเสียงดังที่รบกวนขึ้น เสียงนี้เรียกว่า acoustic noise ซึ่งเป็นเสียงที่เกิดจากการสั่นของขดลวดที่ทำหน้าที่ส่งคลื่นวิทยุ ไปกระตุ้นอวัยวะใน

ร่างกาย รูปแบบของเสียงที่เกิดขึ้นอาจมีความแตกต่างกันได้ ซึ่งเกิดขึ้นจากหลายๆปัจจัย เช่น ลักษณะ ลำดับของส่งคลื่น (pulse sequence) ที่ใช้ในการตรวจ รูปแบบของการสร้างภาพ เพื่อสร้างหรือสแกน ภาพแบบอ้างอิง (reference scan) หรือ สแกนแบบปกติขณะตรวจ (routine scan) เป็นต้น เสียงนี้มีลักษณะเสียงสูงๆ ต่ำๆ อาจทำให้ผู้เข้ารับการตรวจรู้สึกรำคาญ อึดอัด ไม่สะดวกสบาย หรือ อาจเข้ามา รบกวนการสื่อสารระหว่างผู้เข้ารับการตรวจกับเจ้าหน้าที่ในขณะที่ทำการตรวจ ระดับของเสียงที่ใช้ในการ ตรวจอยู่ในระดับประมาณ 82 - 103 เดซิเบล ซึ่งสามารถป้องกันหรือลดความดังของเสียงในการตรวจ ได้ โดยการใช้ที่ครอบหูป้องกันเสียง ลำลึ หรือ ฟองน้ำ (Ear plug) <sup>14,21</sup> ดังนั้นก่อนทำการตรวจเจ้าหน้าที่ จะใช้อุปกรณ์ช่วยลดความดังของเสียงให้กับผู้ป่วย ในปัจจุบันเครื่องสร้างภาพเอ็มอาร์บางรุ่น จะมีเทคนิค การตรวจที่ช่วยลดเสียงที่ดังนี้ให้ลดน้อยลงไปเรื่อยๆ



## สรุป

- เครื่องสร้างภาพเอ็มอาร์ ให้ความสนใจเก็บสัญญาณหรือข้อมูลที่ปล่อยออกมาจากอะตอมของไฮโดรเจนที่อยู่ในส่วนต่างๆของร่างกาย ที่สามารถนำมาสร้างเป็นภาพ
- ไฮโดรเจน ประกอบด้วยโปรตอนเพียงตัวเดียว สามารถแสดงคุณสมบัติแม่เหล็ก และ เป็นธาตุที่เป็นองค์ประกอบของน้ำ มีสัดส่วนจำนวนมากอยู่ภายในอวัยวะตามส่วนต่างๆของร่างกาย หรือ เป็นโมเลกุลของสารอินทรีย์หลายชนิด
- คุณสมบัติทางแม่เหล็กของธาตุดูอาจแสดงได้จาก จำนวนควอนตัมสปิน (spin quantum number; I)
- สำหรับนิวเคลียสของธาตุที่มีจำนวนโปรตอน หรือ นิวตรอนที่เป็นจำนวนเลขคู่ หรือ ทั้งโปรตอนและนิวตรอนที่ไม่มีคู่ หรือ มีจำนวนควอนตัมสปิน เป็นเลขจำนวนเต็ม ที่เป็นจำนวนเลขคู่ หรือ มีจำนวนควอนตัมสปิน เป็นค่าครึ่งหนึ่งของจำนวนเต็ม สามารถแสดงคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็ก
- อะตอมมีลักษณะเสมือนแท่งแม่เหล็กขนาดเล็กๆที่มีการหมุน เรียก โม่เมนต์แม่เหล็ก
- โม่เมนต์แม่เหล็กโปรตอนที่มีระดับพลังงานต่ำ จะเรียงตัวในทิศทางที่ขนานไปในแนวเดียวกับสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะมีจำนวนมากกว่า โม่เมนต์แม่เหล็กโปรตอนที่มีระดับพลังงานสูง ที่เรียงตัวในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับสนามแม่เหล็ก
- พฤติกรรมของนิวเคลียสในภายใต้สนามแม่เหล็กแรงสูง เมื่อผู้ป่วยเข้าไปอยู่ในสนามแม่เหล็กแรงสูง ผลรวมสภาพแม่เหล็กของโปรตอนในร่างกาย มีทิศทางไปในแนวเดียวกับสนามแม่เหล็ก
- นิวเคลียสจะมีความถี่ในการหมุนคงเพิ่มขึ้น เมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกมีความเข้มเพิ่มขึ้น
- การสั่นพ้อง หรือ การกำทอน (resonance) เป็นการส่งคลื่นวิทยุที่ตรงกับค่าความถี่ลาร์เมอร์ของไฮโดรเจน ทำให้ไฮโดรเจนได้รับพลังงาน เกิดการเปลี่ยนสถานะจากสถานะที่สมดุลไปสู่สถานะอื่น หรือ เปลี่ยนการหมุนเชิงมุมจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง
- ธาตุแต่ละชนิด จะมีค่าอัตราส่วนไจโรแมกเนติก และ ค่าความถี่ในการสั่นพ้องไม่เท่ากัน
- การสร้างภาพเอ็มอาร์จะให้ความสนใจเกี่ยวกับเวลาของพฤติกรรมการผ่อนคลาย ใน 2 ลักษณะ คือ เวลาในการผ่อนคลายทีหนึ่ง (T1 relaxation time) และ เวลาในการผ่อนคลายทีสอง (T2 relaxation time)
- เวลาในการผ่อนคลายทีหนึ่ง อาจเรียก เวลาการผ่อนคลายในแนวยาว (longitudinal relaxation time) หรือ การกลับคืนทีหนึ่ง (T1 recover) หรือ spin-lattice relaxation time มีเวลาในการผ่อนคลายกลับสู่สมดุลด้วยอัตราแบบเอกซ์โปเนนเชียล (exponential)

เป็นเวลาคงที่ค่าหนึ่ง เป็นเวลาที่ผลรวมสภาพแม่เหล็กเพิ่มขึ้นตามแนวยาว เท่ากับร้อยละ 63 ของสมดุลงตามแนวยาวของแต่ละเนื้อเยื่อ

- เวลาในการผ่อนคลายที่สอง อาจเรียกว่า เวลาการผ่อนคลายในแนวขวาง (transverse relaxation time) หรือ spin-spin relaxation time ซึ่งเป็นพฤติกรรมการณ์ที่ไฮโดรเจนคายพลังงานให้กันและกันในแนวขวาง เวลาในการผ่อนคลายที่สอง จึงเป็นตัววัดอัตราการลดลงของสัญญาณแบบเอกซิปโนเนนเชียล เป็นค่าเฉพาะของแต่ละเนื้อเยื่อ ในช่วงเวลาที่ผลรวมสภาพแม่เหล็กลดลงตามแนวขวาง เท่ากับร้อยละ 37
- อาณาเขตพื้นที่หรือโซน (zone) ในระดับความปลอดภัย 4 โซน ตามข้อกำหนดของวิทยาลัยรังสีวิทยาของอเมริกัน
- โซนที่หนึ่ง (zone one) เป็นพื้นที่ทั่วไป โซนที่สอง (zone two) เป็นพื้นที่บริเวณแผนกต้อนรับผู้รับบริการ ผู้ป่วย หรือญาติ โดยอยู่ภายใต้การกำกับดูแลทั่วไปของเจ้าหน้าที่หรือบุคลากรผู้รับผิดชอบ เป็นพื้นที่ปลอดภัยจากสนามแม่เหล็กแรงสูง
- โซนที่สาม (zone three) เป็นพื้นที่อนุญาตเฉพาะบุคลากรผู้เกี่ยวข้องหรือที่ได้รับการอนุมัติ
- โซนที่สี่ (zone four) เป็นบริเวณที่อยู่ภายในพื้นที่ห้องตรวจที่มีเครื่องตรวจ การเข้าถึงห้องหรือโซนนี้ ควรมีให้ผ่านโซนที่สามเท่านั้น โซนนี้เป็นขอบเขตที่สนามแม่เหล็กสูงกว่าระดับ 5 เกาส์ เป็นพื้นที่อนุญาตเฉพาะบุคลากรผู้เกี่ยวข้องหรือที่ได้รับการอนุมัติเท่านั้น
- สนามแม่เหล็กที่แผ่ออกมาตัวเครื่องจะส่งแรงเหนี่ยวนำต่อวัตถุที่มีส่วนประกอบ หรือส่วนผสมของสารที่ตอบสนองกับแม่เหล็ก โดยสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า projectile หรือ missile effect คือ ปรากฏการณ์ที่เกิดจากแรงเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กทำให้วัตถุ พุ่งด้วยความเร็วสูงเข้าสู่แกนกลางสนามแม่เหล็ก วัตถุจะสามารถพุ่งด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน
- วัสดุใดที่ไม่แน่ใจว่าจะชำรุดหรือไปรบกวนการทำงานของเครื่องสร้างภาพเอ็มอาร์ ก็ไม่ควรนำเข้าไปในห้องตรวจ ควรเก็บนอกบริเวณสนามแม่เหล็กจะเป็นการปลอดภัยที่สุด
- ป้าย MRI safe ควรติดรายการอุปกรณ์ที่มีความปลอดภัยที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายใดๆ ในทุกสภาพแวดล้อม
- ป้าย MRI conditional ควรติดรายการอุปกรณ์ที่มีการทดสอบหรือพิสูจน์ว่าไม่ก่อให้เกิดอันตรายใดๆ มีความปลอดภัยสามารถใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีสนามแม่เหล็กตามเงื่อนไขที่กำหนด
- ป้าย MR unsafe ควรติดรายการอุปกรณ์ที่ไม่ปลอดภัย เป็นอันตราย มีความเสี่ยงสำหรับผู้ป่วยหรือบุคคลอื่น เมื่อนำเข้าไปในพื้นที่สนามแม่เหล็ก
- ผู้ที่ใช้เครื่องกระตุ้นหัวใจ หรือ วัสดุโลหะ ชนิดสอดใส่ในร่างกาย ควรได้รับการตรวจประเมินก่อนนำเข้าไปที่สนามแม่เหล็ก

- acoustic noise ซึ่งเป็นเสียงที่เกิดจากการสั่นของขดลวดที่ทำหน้าที่ส่งคลื่นวิทยุ ก่อนทำการตรวจเจ้าหน้าที่จะใช้อุปกรณ์ช่วยลดความดังของเสียงให้กับผู้ป่วย

## เอกสารอ้างอิง

1. Hajek M, Dezortova M. Introduction to clinical in vivo MR spectroscopy. Eur J Radiol. 2008;67(2):185–93.
2. Posse S, Otazo R, Dager SR, Alger J. MR spectroscopic imaging: Principles and recent advances. J Magn Reson Imaging. 2013;37(6):1301–25.
3. Currie S, Hoggard N, Craven IJ, Hadjivassiliou M, Wilkinson ID. Understanding MRI: Basic MR physics for physicians. Postgrad Med J. 2013;89(1050):209–23.
4. Pooley RA. AAPM/RSNA physics tutorial for residents: fundamental physics of MR imaging. Radiogr Rev Publ Radiol Soc N Am Inc. 2005;25(4):1087–99.
5. Nacher P–J. Magnetic resonance imaging: From spin physics to medical diagnosis. In 2009. p. 159–93.
6. Oppelt A. Physical Principles and Technology of Magnetic Resonance Imaging. In: Magnetism in Medicine: A Handbook: Second Edition [Internet]. 2007. p. 297–342.
7. Mark A. Brown, Richard C. Semelka. Production of Net Magnetization. In: MRI: Basic Principles and Applications, Third Edition. United States of America: John Wiley & Sons, Inc.; p. 1–10.
8. Chrysikopoulos HS. Clinical MR imaging and physics: A tutorial [Internet]. 2009. 1 p. (Clinical MR Imaging and Physics: A Tutorial).
9. Martinez GV. Introduction to MRI physics [Internet]. 2018. 3 p. (Methods in Molecular Biology; vol. 1718).
10. Maximilian F. Reiser, Wolfhrd Semmlerb, Hedvig Hricak. Basics of Magnetic Resonance Imaging and Magnetic Resonance Spectroscopy. In: Magnetic Resonance Tomography. Verlag Berlin Heidelberg: Springer; 2008. p. 3–165.

11. Hashemi RH, Bradley WG, Lisanti CJ. MRI: The basics [Internet]. 2012. 1 p. (MRI: The Basics).
12. Coskun O. Magnetic resonance imaging and safety aspects. *Toxicol Ind Health*. 2011;27(4):307–13.
13. Stikova E. Magnetic resonance imaging safety: principles and guidelines. *Pril Makedon Akad Na Nauk Umet Oddelenie Za Biološki Med Nauki Contrib Maced Acad Sci Arts Sect Biol Med Sci*. 2012;33(1):441–72.
14. Dempsey MF, Condon B, Hadley DM. MRI safety review. *Semin Ultrasound CT MRI*. 2002;23(5):392–401.
15. Kanal E, Barkovich AJ, Bell C, Borgstede JP, Bradley Jr. WG, Froelich JW, et al. ACR guidance document on MR safe practices: 2013. *J Magn Reson Imaging*. 2013;37(3):501–30.
16. Landrigan C. Preventable deaths and injuries during magnetic resonance imaging [5]. *N Engl J Med*. 2001;345(13):1000–1.
17. Preventing accidents and injuries in the MRI suite. *Jt Comm Perspect Jt Comm Accreditation Healthc Organ*. 2008;28(3):6–8.
18. Colletti PM. Size ‘H’ Oxygen Cylinder: Accidental MR Projectile at 1.5 Tesla. *J Magn Reson Imaging*. 2004;19(1):141–3.
19. Weidman EK, Dean KE, Rivera W, Loftus ML, Stokes TW, Min RJ. MRI safety: A report of current practice and advancements in patient preparation and screening. *Clin Imaging*. 2015;39(6):935–7.
20. Schenck JF. Safety and sensory aspects of main and gradient fields in MRI [Internet]. 2013. 55 p. (eMagRes; vol. 2).
21. Kumamoto M, Kida M, Hirayama R, Kajikawa Y, Tani T, Kurumi Y. Active noise control system for reducing MR noise. *IEICE Trans Fundam Electron Commun Comput Sci*. 2011;E94–A(7):1479–86.



