บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐาน

2.1 สมบัติของนิวเคลียส (1)

นิวเคลียสของบางอะตอมเช่น ^{1}H ^{13}C และ ^{31}P มีสมบัติที่เรียกว่า สปิน (Spin) ซึ่งอาจจะนึกภาพว่ามีลักษณะเหมือนอนุภาคขนาดเล็กที่กำลังหมุนรอบแกนตัวเองอยู่ นิวเคลียสที่มีสปินจะมีโมเมนตัมเชิงมุม (Angular momentum) $\vec{J}$ เช่นเดียวกับวัตถุที่กำลังหมุนทั้งหลาย และเนื่องจากนิวเคลียสมีประจุไฟฟ้า การหมุนของนิวเคลียสจึงทำให้เกิดสมบัติทางแม่เหล็ก คือ โมเมนต์แม่เหล็ก (Magnetic moment) ขึ้น

โมเมนต์แม่เหล็กและโมเมนตัมเชิงมุมของนิวเคลียส มีความสัมพันธ์กันตามสมการ

$$\vec{\mu} = \gamma \vec{J} \qquad (2.1)$$

โดย γ คือ อัตราส่วนไจโรแมกเนติก (Gyromagnetic ratio) ของนิวเคลียส

โมเมนตัมเชิงมุมของนิวเคลียสมีค่าไม่ต่อเนื่อง (Discrete values) ขนาดของโมเมนตัมเชิงมุมมีค่าตามสมการ

$$J = \hbar \sqrt{I(I+1)} \qquad (2.2)$$

เมื่อ $\bar{h} = h/2\pi$ และ h คือค่าคงที่ของแพลงค์ (Planck constant)

I คือเลขควันตัมโมเมนตัมเชิงมุม (Angular momentum quantum number)

เลขควันตัมโมเมนตัมเชิงมุม I อาจมีค่าเป็นจำนวนเต็ม (Integer) จำนวนเต็ม - ครึ่ง (Half-integer) หรือศูนย์ แล้วแต่กรณี ดังนี้

(1) I เป็นจำนวนเต็ม ถ้านิวเคลียสมีเลขมวล (Mass number) เป็นเลขคู่

(2) I เป็นศูนย์ ถ้านิวเคลียสมีจำนวนโปรตอนและนิวตรอนเป็นเลขคู่ เช่น ^{12}C และ ^{16}O นิวเคลียสเหล่านี้ไม่ทำให้เกิดสัญญาณนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์

(3) I เป็นจำนวนเต็ม-ครึ่ง ถ้านิวเคลียสมีเลขมวลเป็นเลขคี่ เช่น ^{1}H ^{13}C ^{31}P นิวเคลียสเหล่านี้มีความสำคัญทางนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์มาก

โมเมนตัมเชิงมุมเป็นเวกเตอร์ต้องระบุทั้งขนาดและทิศทาง ทิศของโมเมนตัมเชิงมุมกำหนดจาก เลขควันตัมแม่เหล็ก (Magnetic quantum number) m เมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กสถิติที่มีทิศตามแนว z องค์ประกอบของโมเมนตัมเชิงมุมตามแนวสนาม มีค่าเป็น

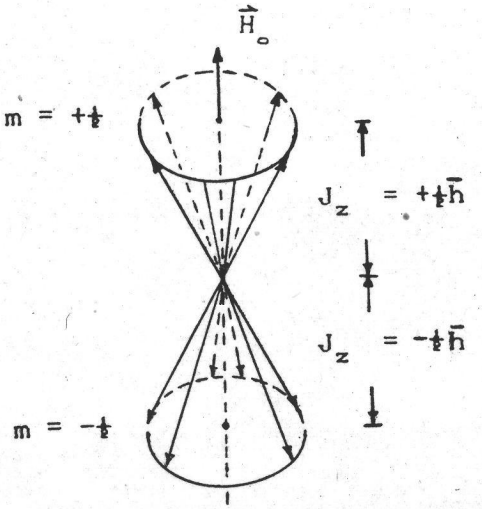
$$J_z = m\bar{h} \qquad (2.3)$$

โดย m มี (2I+1) ค่า คือ I, I-1, I-2,...,-I

นิวเคลียสที่มีสปิน 1/2 จึงมีค่า m เพียง 2 ค่า คือ 1/2 กับ -1/2 และกรณีนี้

$$J_z = \pm\tfrac{1}{2}\bar{h} \qquad (2.4)$$

สภาวะสปิน (Spin state) ทั้งสองสภาวะนี้เป็นดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงการวางตัว (Orientations) ที่มีได้ของเวกเตอร์โมเมนตัมเชิงมุมของนิวเคลียสที่มีสปิน 1/2

และ จากสมการ (2.1) และ (2.3) องค์ประกอบของโมเมนต์ แม่เหล็กตามแนว z มีค่าเป็น

$$\mu_z = \gamma \hbar m \qquad (2.5)$$

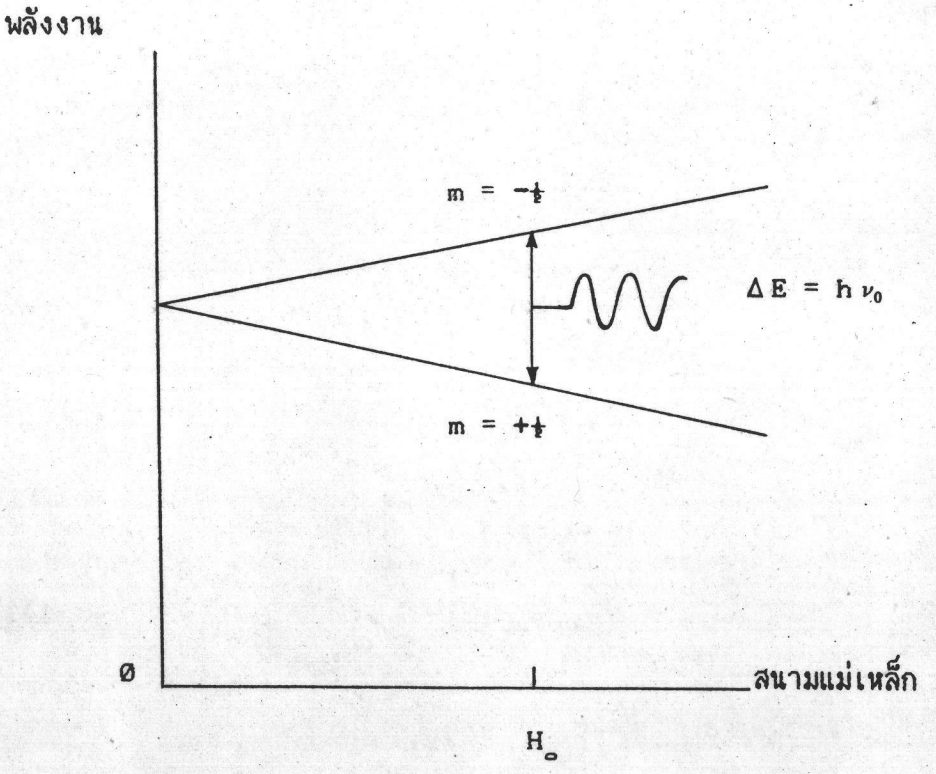
2.2 อันตรกริยาของนิวเคลียสกับสนามแม่เหล็กสถิต (11)

เมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กสถิต $\vec{H}_o$ นิวเคลียสได้รับพลังงาน E เนื่องจากอันตรกริยาระหว่างสนามแม่เหล็กกับโมเมนต์แม่เหล็กของนิวเคลียส โดยพลังงาน E มีค่าตามสมการ

$$E = -\mu_z H_o \qquad (2.6)$$

หรือ $$E = -\gamma \bar{h} m H_o \qquad (2.7)$$

เนื่องจาก m มี (2I+1) ค่า นิวเคลียสที่มีสปิน I = 1/2 เมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กจึงแยกออกเป็น 2 ระดับพลังงาน ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงระดับพลังงานของนิวเคลียสที่มีสปิน 1/2 ในสนามแม่เหล็ก

ผลต่างของพลังงาน ΔE ระหว่างระดับพลังงานทั้งสองมีค่าเป็น

$$\Delta E = \gamma \bar{h} H_o \qquad (2.8)$$

2.3 ผลของสนามแม่เหล็กสลับ (11, 12)

ในการทดลองทางนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์นั้น การเกิดทรานซิชัน (Transitions) ระหว่างระดับพลังงานทั้งสอง ชักนำให้เกิดขึ้นได้โดยการใช้สนามแม่เหล็กสลับที่เหมาะสม $\vec{H}_1$ ในระนาบ xy ซึ่งตั้งฉากกับแนวสนามแม่เหล็กสถิต $\vec{H}_0$ สนามแม่เหล็กสลับนี้ ต้องออสซิลเลต (Oscillate) ด้วยความถี่ ν_0 โดยที่

$$\Delta E = h\nu_0 \qquad (2.9)$$

ดังนั้น $$\nu_0 = \gamma H_0/2\pi \qquad (2.10)$$

ถ้า ω_0 คือความถี่เชิงมุม แล้ว $\omega_0 = 2\pi\nu_0$

จากสมการ (2.10) $$\omega_0 = \gamma H_0 \qquad (2.11)$$

สมการ (2.10) หรือ (2.11) คือเงื่อนไขเรโซแนนซ์ (Resonance condition) ในการทดลองนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ สังเกตว่าทรานซิชันระหว่างระดับพลังงานที่อยู่ติดกันเท่านั้นที่เกิดขึ้นได้ ทั้งนี้เป็นไปตาม กฎการเลือก (Selection rules) และเนื่องจากแต่ละไอโซโทปของนิวเคลียสมีค่า γ ต่างกันไป นิวเคลียสต่างกันจึงเกิดเรโซแนนซ์ในสนามแม่เหล็กสถิต $\vec{H}_0$ ที่ความถี่ต่าง ๆ กัน แต่โดยปกติความถี่เรโซแนนซ์อยู่ในย่านความถี่คลื่นวิทยุ และสนามแม่เหล็กสลับโดยทั่วไปจึงหมายถึงสนามอาร์ เอฟ (R.F. field)

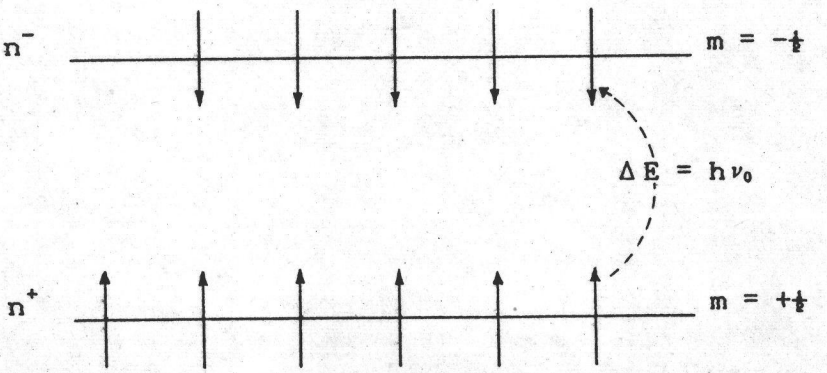
2.4 จำนวนนิวเคลียสในระดับพลังงานของนิวเคลียส (11)

จำนวนนิวเคลียสในระดับพลังงานต่าง ๆ หาได้จากการแจกแจงของโบลทซ์มานน์ (Boltzmann distribution) ณ ภาวะสมดุลทางความร้อนที่อุณหภูมิ T จำนวนสัมพัทธ์ n^+ และ n^- ของนิวเคลียสในระดับพลังงานที่มีเลขควันตัมแม่เหล็ก m เป็น $+\frac{1}{2}$ และ $-\frac{1}{2}$ เป็นไปตามสมการ

$$n^-/n^+ = \exp(-\Delta E/kT) = \exp(-\gamma\hbar H_o/kT) \qquad (2.12)$$

เมื่อ k คือค่าคงที่ของโบลทซ์มานน์ (Boltzmann Constant)

ซึ่งพิจารณาประกอบได้จากรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงจำนวนสัมพัทธ์ของนิวเคลียสที่มีสปิน $\frac{1}{2}$ ในสภาวะสปินทั้งสองที่มีได้

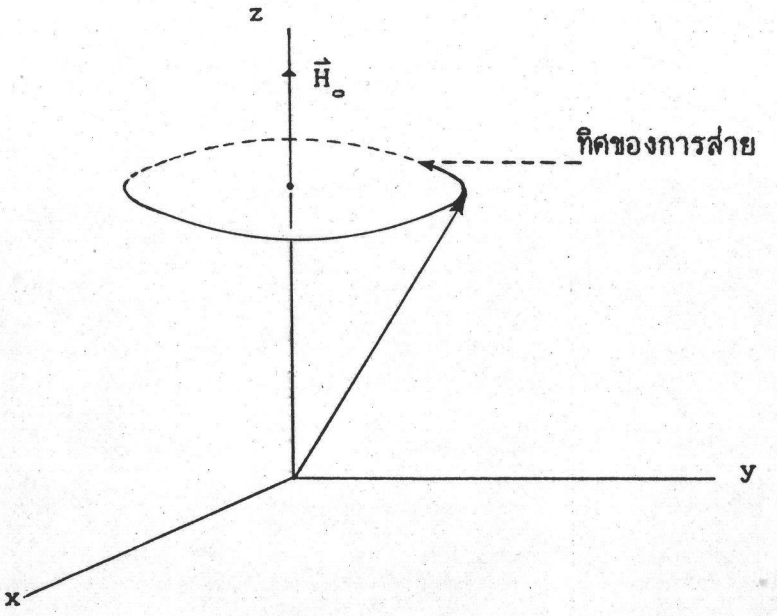
นิวเคลียสในระดับพลังงานที่มี $m = +\frac{1}{2}$ มีพลังงานต่ำกว่าแต่มีจำนวนมากกว่านิวเคลียสในระดับพลังงานที่มี $m = -\frac{1}{2}$ เล็กน้อย จากการใส่สนามแม่เหล็กสลับเข้าไปทำให้เกิดทรานซิชันจากระดับพลังงานต่ำไปยังระดับพลังงานสูงกว่า โดยดูดกลืนพลังงานจากสนามแม่เหล็กสลับ ผลจากทรานซิชันนี้จะทำให้จำนวนนิวเคลียสในระดับพลังงานทั้งสองเท่ากัน คือนำไปสู่สภาวะอิ่มตัว (Saturation)

การดูดกลืนพลังงานจากสนามแม่เหล็กสลับโดยนิวเคลียสขึ้นอยู่กับความแตกต่างของจำนวนนิวเคลียสในระดับพลังงานทั้งสองซึ่งอยู่ติดกัน ถ้าจำนวนนิวเคลียสเท่ากันจะมีทรานซิชันเท่ากันทั้งสองทิศทาง เป็นผลให้ไม่มีค่าสุทธิของการดูดกลืนพลังงาน (Net absorption) และไม่มีสัญญาณนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ ความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยของพลังงานในระดับพลังงานทั้งสอง ทำให้มีการดูดกลืนพลังงานน้อยมากเป็นเหตุให้นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ มีความไวต่ำ (Low sensitivity) โดยธรรมชาติแต่จากการเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็ก $\vec{H}_o$ ทำให้ความแตกต่างของพลังงานในระดับพลังงานทั้งสองเพิ่มขึ้น ($\Delta E = \gamma \hbar H_o$) และเพิ่มความแตกต่างของจำนวนนิวเคลียส [$n^-/n^+ = \exp(-\Delta E/kT)$] จึงเพิ่มค่าสุทธิของการดูดกลืนพลังงานขึ้นอย่างมากมาย สนามแม่เหล็กความเข้มสูงจึงเป็นสิ่งจำเป็นในการทดลองนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ เพราะจะช่วยทำให้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-noise ratio) ดีขึ้น

2.5 การเกิดและการตรวจวัดสัญญาณนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (11)

จากการที่ในเงื่อนไขเรโซแนนซ์ $\omega_o = \gamma H_o$ ไม่มีค่าคงที่ของแพลงค์ h ปรากฏอยู่ และการที่การทำนายทางทฤษฎีควันตัมและฟิสิกส์ยุคเก่าต่างกันอย่างมากสำหรับระบบซึ่งความแตกต่างของระดับพลังงาน ΔE มีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยของพลังงานความร้อนภายใน (Thermal energy) kT มาก แต่มีแนวโน้มที่จะสอดคล้องกันเมื่อ ΔE น้อยกว่า kT มาก ๆ ซึ่งกรณีหลังนี้เป็นกรณีของนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ อย่างเช่น โปรตอนในสนามแม่เหล็ก 0.2 เทสลา ขนาดของ ΔE มีค่าประมาณ 10^{-7}eV ขณะที่ ณ อุณหภูมิ 20 °C kT มีค่าประมาณ 2.5×10^{-2}eV การพิจารณานิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ด้วยฟิสิกส์ยุคเก่าในบางแง่มุม จึงเป็นไปได้ (โดยเฉพาะในทางปฏิบัติ) เช่น การเกิดและการตรวจวัดสัญญาณนิวเคลียร์แมกเนติกโรแนนซ์ ดังนี้

ถ้าวางแท่งแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก แท่งแม่เหล็กจะวางตัวในแนวขนานกับสนามแม่เหล็ก เพราะเป็นแนวการวางตัวที่มีพลังงานน้อยที่สุด แต่ถ้าแท่งแม่เหล็กมีโมเมนตัมเชิงมุม แท่งแม่เหล็กจะไม่อยู่ในแนวขนานกับสนามแม่เหล็ก แต่จะส่าย (Precees) รอบสนามแม่เหล็กด้วยความถี่เชิงมุมค่าหนึ่ง ดังรูปที่ 2.4

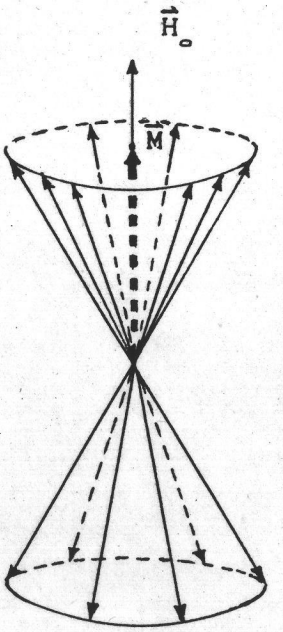


รูปที่ 2.4 การส่ายของแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก

ลักษณะเช่นนี้คล้ายกับการหมุนของลูกข่างในสนามความโน้มถ่วง นิวเคลียสซึ่งอาจถือได้ว่าเป็นแท่งแม่เหล็กขนาดจิ๋วที่มีโมเมนตัมเชิงมุม เมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก $\vec{H}_o$ จึงส่ายรอบทิศของสนามแม่เหล็กด้วยความถี่เชิงมุม $\omega_o = \gamma H_o$

014458

ในการทดลองทางนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ นิวเคลียสที่ศึกษาไม่ได้มีเพียงนิวเคลียสเดียว สารทดลอง (Sample) แต่ละอย่างประกอบด้วยนิวเคลียสจำนวนมาก และนิวเคลียสเหล่านี้เมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กต่างล่ายรอบสนามแม่เหล็กในทิศทางเดียวกัน เนื่องจากไม่มีการวางตัวที่มีลักษณะพิเศษ (Preferred orientation) ในระนาบ xy ซึ่งตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก $\vec{H}_o$ จึงไม่มีค่าสุทธิของโมเมนต์แม่เหล็กในระนาบ xy แต่เกิดแมกนีไทเซชัน (Magnetization) (โมเมนต์แม่เหล็กต่อหน่วยปริมาตร) $\vec{M}$ ตามแนว z ดังรูปที่ 2.5 เพราะมีนิวเคลียสที่วางตัวตามแนวสนามแม่เหล็กจำนวนมากกว่านิวเคลียสที่วางตัวต้านสนามแม่เหล็กเล็กน้อย คือมีนิวเคลียสในระดับพลังงานต่ำมากกว่าในระดับพลังงานสูง



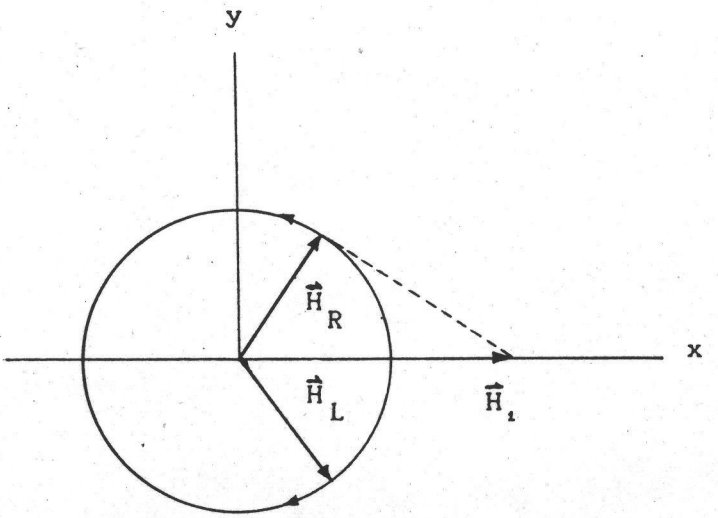
รูปที่ 2.5 แสดงแมกนีไทเซชันที่เกิดขึ้นเมื่อสารตัวอย่างอยู่ในสนามแม่เหล็กสถิต

เมื่อให้สนามแม่เหล็กสลับ $\vec{H}_1$ ที่เหมาะสมเข้าไปในระนาบ xy จะเกิดเรโซแนนซ์ขึ้น กระบวนการนี้เกิดขึ้นได้อย่างไร ทำความเข้าใจได้โดยอาศัยแนวความคิดเกี่ยวกับกรอบอ้างอิงที่กำลังหมุน (The rotating frame of reference) ดังนี้

สนามแม่เหล็กสถิต $\vec{H}_0$ ทำให้นิวเคลียสส่ายรอบทิศสนามแม่เหล็กด้วยความถี่เชิงมุม $\omega_0 = \gamma H_0$ ถ้าพิจารณาในกรอบอ้างอิงที่กำลังหมุน (แกนพิกัดฉาก x ' y 'z ') ซึ่งหมุนด้วยความถี่เชิงมุม ω_r เทียบกับกรอบอ้างอิงเดิม (แกนพิกัดฉาก x y z) โดย z ' ซ้อนกับ z นิวเคลียสจะส่ายด้วยความถี่เชิงมุม $\omega = \omega_r$ หาก $\omega_0 = \omega_r$ แล้วในกรอบอ้างอิงที่กำลังหมุนนี้นิวเคลียสจะไม่ส่ายเลย และเมื่อเปรียบเทียบกับสมการ $\omega = \gamma H_0$ แล้ว สนามแม่เหล็กสถิต $\vec{H}_0$ เป็นศูนย์หรือไม่ปรากฏในกรอบอ้างอิงที่กำลังหมุน

เมื่อให้สนามแม่เหล็ก $\vec{H}_1$ ตามแนว x ' แมกนีไทเซชัน $\vec{M}$ จะส่ายรอบทิศของสนามแม่เหล็ก $\vec{H}_1$ ด้วยความถี่เชิงมุม γH_1 ทำนองเดียวกับการให้สนามแม่เหล็ก $\vec{H}_0$ ทำให้นิวเคลียสส่ายรอบทิศทาง $\vec{H}_0$ ด้วยความถี่เชิงมุม γH_0 เพราะมีเพียงสนามแม่เหล็ก $\vec{H}_1$ เท่านั้นที่ปรากฏในกรอบอ้างอิงที่กำลังหมุนนี้

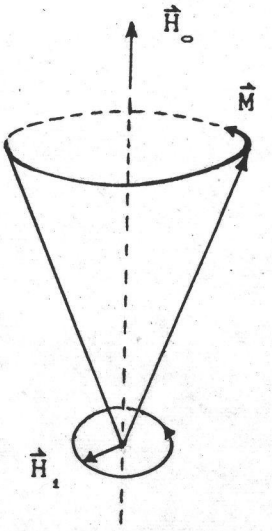
สนามแม่เหล็ก $\vec{H}_1$ นั้นเป็นสนามสถิตในกรอบอ้างอิงที่กำลังหมุน แต่เมื่อกลับมาพิจารณาในกรอบอ้างอิงเดิม (แกนพิกัดฉาก x y z) สนามแม่เหล็ก $\vec{H}_1$ นั้นเป็นสนามซึ่งหมุนรอบแนว z ด้วยความถี่เชิงมุม ω_0 สนามลักษณะเช่นนี้ทำให้เกิดขึ้นได้โดยการให้สนามที่กำลังออสซิลเลต (Oscillating field) ในทิศทางที่ต้องการ เช่นแนว x ในแนวระนาบ xy เพราะสนามเช่นนี้สามารถแยกออกเป็น 2 องค์ประกอบหมุนในทิศทางตรงข้ามกัน ดังรูปที่ 2.6 (6)



รูปที่ 2.6 การแยก $\vec{H}_1$ ออกเป็น 2 องค์ประกอบหมุนในทิศตรงข้ามกัน

องค์ประกอบที่กำลังหมุนในทิศทางตรงกันข้ามกับการส่ายของนิวเคลียสไม่มีผลต่อนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ ดังนั้นสนามที่กำลังออสซิลเลตนี้จึงเป็นสนามซึ่งหมุนรอบสนามแม่เหล็ก $\vec{H}_0$ (หรือแนว z) ตามต้องการ

การให้สนาม $\vec{H}_1$ ทำให้แมกนีไทเซชัน $\vec{M}$ เคลื่อนออกจากแนวสนามแม่เหล็กสถิต $\vec{H}_0$ โดยจะส่ายรอบทิศสนามแม่เหล็ก $\vec{H}_0$ ด้วยความถี่ลาร์มอร์ (Larmor frequency) $\omega_0 = \gamma H_0$ ถ้าสนาม $\vec{H}_1$ มีความถี่เชิงมุมเท่ากับความถี่ลาร์มอร์ $\vec{M}$ และ $\vec{H}_1$ จะหมุนไปพร้อม ๆ กัน เรียกว่าเกิดเรโซแนนซ์ ดังรูปที่ 2.7 (13)



รูปที่ 2.7 องค์ประกอบของสนาม $\vec{H}_1$ กำลังหมุนไปพร้อม ๆ กับแมกนีไทเซชัน $\vec{M}$ รอบทิศสนามแม่เหล็ก $\vec{H}_o$ ด้วยความถี่ลามอร์ขณะเกิดเรโซแนนซ์

การเท่ากันของความถี่ในการส่ายของนิวเคลียสกับความถี่ของสนาม $\vec{H}_1$ ก็คล้ายคลึงกับปรากฏการณ์เรโซแนนซ์อื่น ๆ ที่ความถี่ซึ่งมากระตุ้นต้องเท่ากับความถี่ธรรมชาติของระบบ จึงจะเกิดเรโซแนนซ์ขึ้น

ในทางปฏิบัติการให้สนาม $\vec{H}_1$ ทำได้โดยผ่านกระแสอาร์.เอฟ (R.F.current) เข้าไปในขดลวดซึ่งล้อมรอบสารทดลอง โดยแกนของขดลวดตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก $\vec{H}_o$ เมื่อเกิดเรโซแนนซ์ แมกนีไทเซชันที่กำลังส่ายจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวด ตามกฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้ออสซิลเลตด้วยความถี่ลาร์มอร์ เรียกว่านิวเคลียร์ อินดัคชัน ซิกแนล (Nuclear induction signal) ถ้าให้สนามอาร์.เอฟ $\vec{H}_1$ เป็นช่วงเวลาสั้น ๆ คือเป็นพัลส์ นิวเคลียร์ อินดัคชัน ซิกแนล ที่

เป็นผลจาก อาร์ เอฟ พัลส์ (R.F.pulse) จะหายไปในที่สุด เรียกว่าเกิด ฟรี อินดัคชัน ดีเคย์ (Free induction decay) นิวเคลียร์ อินดัคชัน ซิกแนลหรือฟรีอินดัคชัน ดีเคย์ ซิกแนลแล้วแต่กรณีจะได้รับการขยายและแสดงบนออสซิลโลสโคป ทำให้สามารถตรวจพบปรากฏการณ์นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ และตรวจวัดสัญญาณนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ได้

เทคนิคการตรวจวัดสัญญาณนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ มี 2 วิธี เรียกชื่อตามลักษณะการให้สนามอาร์ เอฟ เข้าไปในขดลวด คือ (12)

(1) คอนทินูอัส เวฟ นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (Continuous wave nuclear magnetic resonance) เป็นวิธีที่ให้สนามอาร์ เอฟ เข้าไปในขดลวดที่ล้อมรอบสารทดลองอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในการวิจัยนี้

(2) พัลส์ นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (Pulse nuclear magnetic resonance) เป็นวิธีที่ให้สนามอาร์เอฟ เข้าไปในขดลวดที่ล้อมรอบสารทดลองเป็นพัลส์อาร์เอฟ

2.6 <u>ความแตกต่างระหว่างสัญญาณนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์จากของแข็งและของเหลว</u> (14)

ในของแข็ง นิวเคลียสแต่ละตัวอยู่ใกล้กันจนกระทั่งสนามแม่เหล็กที่แต่ละนิวเคลียสเป็นผลรวมของสนามแม่เหล็กสถิต $\vec{H}_o$ และสนามเนื่องจากโมเมนต์แม่เหล็กของนิวเคลียสข้างเคียง โมเมนต์แม่เหล็ก $\vec{\mu}$ สร้างสนามแม่เหล็ก $\Delta\vec{H}$ ณ นิวเคลียสข้างเคียง โดยที่

$$\Delta\vec{H} = 3r^{-5}(\vec{\mu}\cdot\vec{r})\vec{r} - \vec{\mu}r^{-3} \qquad (2.13)$$

เมื่อ $\vec{r}$ เป็นระยะจากโมเมนต์แม่เหล็กไปยังตำแหน่งที่ต้องการหาค่า $\Delta\vec{H}$ ถ้าเป็นนิวเคลียสของ ไฮโดรเจน (โปรตอน) ซึ่งอยู่ห่างกัน 1 Å สนามแม่เหล็กเนื่องจากนิวเคลียสข้างเคียงมีค่าประมาณ μ/r^3 หรือประมาณ 15 เกาส์ ดังนั้นสนามแม่เหล็ก ณ โปรตอนแต่ละตัวในของแข็งจึงมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามสนามแม่เหล็กจากโปรตอนข้างเคียง เพราะสนามนี้อาจจะเสริมหรือหักล้างสนามแม่เหล็กสถิตขึ้นอยู่กับการวางตัวของโปรตอนข้างเคียง โปรตอนในของแข็งจึงเกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่าง ๆ กันจึงได้สัญญาณนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ ซึ่งกว้าง (Broad)

อีกวิธีหนึ่งในการค้นหาผลที่เกิดขึ้นนี้คือการพิจารณาระบบนิวเคลียสที่เดิมส่ายไปด้วยเฟสเดียวกันทำให้เกิดแมกนีไทเซชันที่กำลังส่าย (Precessing magnetization) ขึ้นในสารทดลอง ความถี่ลาร์มอร์ในการส่ายกระจายออก $\Delta\nu = \gamma\Delta H/2\pi$ ดังนั้นเมื่อเวลาผ่านไป $1/\Delta\nu = 2\pi/\gamma\Delta H$ นิวเคลียสทั้งหลายจะมีเฟสต่างกัน (Out of phase) และแมกนีไทเซชันของสารทดลองจะหายไป

ส่วนในของเหลว ผลจากการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วของโมเลกุลของเหลว เฉลี่ยค่าสนามแม่เหล็กจากนิวเคลียสข้างเคียง $\Delta\vec{H}$ จนมีค่าน้อยภายในเวลาน้อยกว่าเวลาที่ทำให้นิวเคลียสซึ่งเดิมส่ายด้วยเฟสเดียวกันมีเฟสต่างกันเนื่องจากมีความถี่ลาร์มอร์ในการส่ายต่างกัน กรณีนี้เกิดขึ้นเมื่อ

$$\gamma\Delta H/2\pi \ll \tau_c \qquad (2.14)$$

โดย τ_c คือ เวลาสหสัมพันธ์ (Correlation time)

เวลาสหสัมพันธ์ (Correlation time) มีค่าประมาณเวลาที่โมเลกุลหมุนไปหนึ่งเรเดียนหรือเคลื่อนไปเป็นระยะเท่ากับขนาดของโมเลกุล เป็นการวัดว่าการเปลี่ยนแปลงโครงร่างของโมเลกุล (Molecular configuration) รอบโมเมนต์แม่เหล็ก

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รวดเร็วเพียงใด เพราะมีการเคลื่อนที่อย่างอิสระ (Random motion) ด้วยแอมปลิจูดโตในของเหลว τ_c จึงน้อยพอที่จะเป็นไปตามสมการ (2.14) ในกรณีนี้สนามเนื่องจากนิวเคลียสข้างเคียงไม่มีผลทำให้สัญญาณนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ กว้างขึ้น สัญญาณที่ได้รับจึงแคบ (Narrow) เป็นเศษส่วนของเกาส์

ด้วยเหตุนี้การวัดสัญญาณ นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ ทำให้สามารถหาความมากน้อยของโปรตอนซึ่งอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่เป็นของแข็ง (Rigid or frozen environments) และในสารละลาย (Solution) ได้