บทที่ 2

เอ็นเอ็มอาร์

เอ็นเอ็มอาร์ หรือนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์นี้ เป็นวิชาที่เป็นที่รู้จักกันมานานกว่า 40 ปีแล้ว [3] และก็ได้มีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางทั้งในวงการฟิสิกส์และวงการเคมี ในฐานะที่เป็นวิธีการที่สามารถใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ได้ในหลายๆ รูปแบบ ในบทนี้จะกล่าวถึงเรื่องราวของเอ็นเอ็มอาร์ เฉพาะที่จำเป็นต้องใช้ในการทำความเข้าใจในการประมวลผลเชิงภาพจากสัญญาณเอ็นเอ็มอาร์เท่านั้น ส่วนผู้ที่ต้องการค้นคว้าเพื่อให้ได้รายละเอียดมากกว่าที่กล่าวไว้นี้ก็อาจค้นคว้าจากแหล่งข้อมูลอื่นได้ไม่ยากนัก เนื่องจากวิชานี้เป็นวิชาที่เป็นที่รู้จักและแพร่หลายพอสมควร

หลักการของเอ็นเอ็มอาร์

ในวัตถุต่างๆ ทั้งที่เป็นส่วนประกอบของสิ่งมีชีวิตและไม่มีชีวิตทั้งหลาย จะประกอบด้วยโปรตอน (proton) หรือโปรตอนและนิวตรอน (neutron) รวมกัน ซึ่งสามารถทำให้เกิด สปิน (spin) หรือโมเมนต์แม่เหล็ก (magnetic moment) ของนิวเคลียสขึ้น ซึ่งในความเป็นจริงตามธรรมชาติแล้ว สมบัติความเป็นโมเมนต์แม่เหล็กของนิวเคลียสใดๆ ขึ้นอยู่กับจำนวนของนิวตรอนและโปรตอนที่ประกอบกันขึ้นมาเป็นนิวเคลียสนั้น ดังแสดงในตารางที่ 2.1

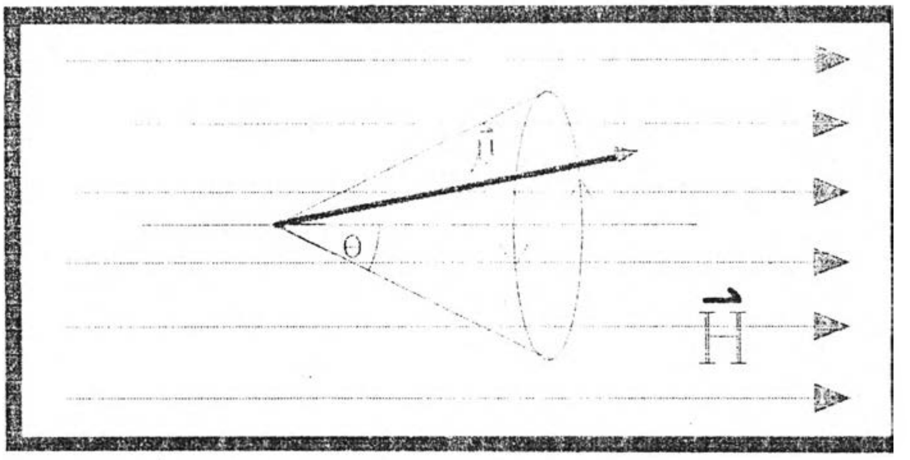
จำนวนโปรตอน	จำนวนโปรตอนรวมกับนิวตรอน	ความเป็นโมเมนต์แม่เหล็ก
คู่	คู่	ไม่มี
คู่	คี่	มี
คี่	คู่	มี
คี่	คี่	มี

ตารางที่ 2.1 แสดงความเป็นโมเมนต์แม่เหล็กของนิวเคลียส ซึ่งจะขึ้นกับจำนวนโปรตอนและนิวตรอน [6]

ตัวอย่างของสารที่สามารถแสดงความเป็นโมเมนต์แม่เหล็กออกมาออกมาได้ เช่น ^{1}H,^{2}H, ^{7}Li ,^{13}C ,^{31}P ,^{27}I และสารต่างๆอีกเป็นจำนวนมากกว่า 100 ชนิด ในสารประเภทที่คงตัวกว่า 250 ชนิด และอีกกว่า 800 ชนิด ในธาตุที่เป็นสารกัมมันตรังสี ซึ่งทั้งหมดนี้อาจจะอยู่ในรูปของของเหลวหรือของแข็งก็ได้ [3]

<u>โมเมนต์แม่เหล็กในสนามแม่เหล็กสถิต</u>

เมื่อเราวางวัตถุที่ประกอบด้วยสารที่สามารถแสดงความเป็นโมเมนต์แม่เหล็กนี้ลงในสนามแม่เหล็กสถิต (static magnetic field) โมเมนต์แม่เหล็กของนิวเคลียสซึ่งเดิมจัดทิศทางของมันอย่างไม่เป็นระเบียบก็จะมีการจัดตัวใหม่เนื่องจากจะมี ทอร์ก (torque) เกิดขึ้น ทำให้นิวเคลียสพยายามจัดตัวมันเองให้โมเมนต์แม่เหล็กหันตัวไปในลักษณะขนานกับสนามแม่เหล็กสถิตจากภายนอกที่ประยุกต์เข้ามา [3] อย่างไรก็ดีนิวเคลียสของสารยังมีสมบัติอีกอย่างหนึ่งคือ ความเป็นโมเมนตัมเชิงมุม (angular momentum) อยู่ด้วย ซึ่งเมื่อพิจารณาประกอบกันทั้งทอร์กที่เกิดจากสนามแม่เหล็กและผลจากโมเมนตัมเชิงมุมแล้วจะพบว่าทิศทางของโมเมนต์ไม่สามารถหันเข้ามาขนานกับสนามแม่เหล็กภายนอกแต่จะหมุนควง (precess) ไปรอบๆ [3],[6],[7] แนวของสนามแม่เหล็กภายนอก (รูปที่ 2.1)



รูปที่ 2.1 แสดงการหมุนควงของโมเมนต์แม่เหล็กรอบแนวสนามแม่เหล็กสถิต

ขนาดของทอร์กที่เกิดขึ้นจะคำนวณได้จากสมการ

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{H}_o \qquad (2.1)$$

เมื่อ $\vec{\mu}$ คือ ค่าโมเมนต์แม่เหล็กของนิวเคลียส

$\vec{H}_o$ คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก

และเมื่อพิจารณาโมเมนตัมเชิงมุมของนิวเคลียสแล้วจะพบว่าค่าโมเมนต์แม่เหล็กมีความสัมพันธ์กับโมเมนตัมเชิงมุมโดยสมการ [7]

$$\vec{\mu} = \gamma \cdot \vec{J} \qquad (2.2)$$

เมื่อ $\vec{J}$ คือ โมเมนตัมเชิงมุมของนิวเคลียส

γ คือ ค่า gyromagnetic ratio [8]

เมื่อนำทั้งสองสมการนี้มาพิจารณารวมกันจะได้ว่า

$$\vec{\tau} = d\vec{J}/dt = \vec{\mu} \times \vec{H_o}$$

$$d\vec{\mu}/dt = \vec{\mu} \times \gamma \vec{H_o} \qquad (2.3)$$

ซึ่งเป็นสมการที่แสดงถึงผลของสนามแม่เหล็กภายนอกต่อโมเมนต์แม่เหล็กของนิวเคลียส แต่ละตัว

สมการ (2.3) นี้ สามารถนำไปอธิบายได้ว่า ถ้าหากสนามแม่เหล็กภายนอกคงที่แล้ว โมเมนต์แม่เหล็กจะแกว่งไปรอบแนวของสนามแม่เหล็กภายนอกนั้นด้วยความถี่เชิงมุมคงที่ ความถี่นี้ถูกเรียกว่า ความถี่ของการหมุนควงของลาร์มอร์ (Larmor - precession frequency) [3],[7] ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$\omega_o = -\gamma H_o \qquad (2.4)$$

ในวิชาเอ็นเอ็มอาร์นี้ ในหลายๆกรณีจะพบว่าการคำนวณในกรอบอ้างอิงหมุนจะให้ความสะดวกในการคำนวณเป็นอย่างมาก ในกรณีของการคำนวณเพื่อแก้สมการ (2.3) ก็เช่นกัน เราพบว่า ถ้าใช้กรอบอ้างอิงหมุน (rotating frame of referance) ที่มีความเร็วเชิงมุม Ω แล้ว เวคเตอร์ $\vec{F}$ ใดๆ จะเขียนใหม่ให้อยู่ในกรอบอ้างอิงหมุนได้โดย [7]

$$d\vec{F}/dt = D\vec{F}/Dt + \vec{\Omega} \times \vec{F} \qquad (2.5)$$

โดย $D\vec{F}/Dt$ เป็นการหาอนุพันธ์ในกรอบอ้างอิงหมุน

และ $d\vec{F}/dt$ เป็นการหาอนุพันธ์ในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง

เมื่อนำ (2.4) ไปแทนค่าใน (2.3) จะได้

$$D\vec{\mu}/Dt = \vec{\mu} \times (\gamma \vec{H}o + \vec{\Omega}) \qquad (2.6)$$

พจน์ (γ $\vec{H}o$ x $\vec{\Omega}$) จะถูกเรียกว่าสนามแม่เหล็กยังผล (effective magnetic field) [7] คือ เมื่อพิจารณาในกรอบอ้างอิงหมุนแล้วค่าสนามแม่เหล็กที่ปรากฏให้สังเกตุได้ จะมีค่าเท่ากับ $\vec{H}_{eff} = (\vec{H}o - \vec{\Omega}/\gamma)$ ซึ่งถ้าเราเลือก ที่ทำให้ $\vec{H}_{eff} = \vec{0}$ พอดี จะพบว่า

$$D\vec{\mu}/Dt = \vec{\mu} \times (\vec{0}) = \vec{0}$$

นั่นคือ $\vec{\mu}$ จะคงที่ในกรองอ้างอิงหมุนหรือถ้ามองในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งแล้วจะเห็นว่า $\vec{\mu}$ หมุนไปกับกรอบอ้างอิงหมุนด้วยความเร็วเชิงมุม $\vec{\Omega} = -\gamma \vec{H}_o$ นั่นคือ โมเมนต์แม่เหล็กหมุนไปรอบๆแนวสนามแม่เหล็ก Ho ด้วยความเร็ว ω_o ดังสมการ (2.6) นั่นเอง

<u>ผลจากสนามแม่เหล็กความถี่วิทยุ</u>

ในการทดลองเอ็นเอ็มอาร์นั้น ดังที่กล่าวมาแล้วว่าจะต้องวางวัตถุลงในสนามแม่เหล็กสถิตแล้วป้อนสนามแม่เหล็กความถี่วิทยุ (radio frequency magnetic field - RF field) เข้าไป ในหัวข้อที่ผ่านมานั้น ได้บรรยายถึงพฤติกรรมของโมเมนต์แม่เหล็กของนิวเคลียส เมื่อวางในสนามแม่เหล็กมาแล้ว ในหัวข้อนี้จะบรรยายถึง ผลของสนามแม่เหล็กที่มีความถี่วิทยุที่ป้อนเข้าไป

ปกติแล้วสนามแม่เหล็กความถี่วิทยุที่ป้อนเข้าไปจะมีทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กสถิต ในที่นี้จะสมมุติให้สนามแม่เหล็กสถิตมีทิศทางไปตามแนวแกน z และสนามแม่เหล็กความถี่วิทยุมีทิศทางแนวแกน x ในระบบพิกัดฉาก โดยทั่วไปสนามแม่เหล็กความถี่วิทยุจะมีขนาดแปรตามเวลาในลักษณะเป็นฟังชั่นรูปไซน์ (sinusidual function) หรือเขียนได้ว่า ขนาดของสนามจะมีค่าเป็น

$$\vec{H}_x(t) = \vec{i}\cdot H_{xo}\cos(\omega t)$$

$\vec{i}$ เป็นเวคเตอร์หนึ่งหน่วยในกรอบหยุดนิ่ง

ซึ่งสามารถแยกออกเป็นสองส่วนได้ดังนี้ คือ [9]

$$\vec{H}_x(t) = \vec{H}_L(t) + \vec{H}_R(t)$$

โดยที่

$$\vec{H}_L(t) = H_1\cdot(\ \vec{i}\cdot\cos(\omega t) + \vec{j}\cdot\sin(\omega t)\ )$$

$$\vec{H}_R(t) = H_1\cdot(\ \vec{i}\cdot\cos(\omega t) - \vec{j}\cdot\sin(\omega t)\ )$$

เมื่อความถี่ที่ใช้เข้าไปใกล้ความถี่ลาร์มอร์จะพบว่ามีเพียงเฉพาะ $\vec{H}_L$ หรือ $\vec{H}_R$ อันใดอันหนึ่ง ที่มีการหมุนตามทิศของการแกว่งกวัดของโมเมนต์แม่เหล็กเท่านั้นที่จะมีผลต่อระบบ ซึ่งจะเรียกชื่อเป็น $\vec{H}_1$ ส่วนอีกอันหนึ่งนั้นจะมีผลต่อระบบน้อยมากจนสามารถตัดการคำนวณในส่วนนี้ทิ้งไปได้ [7]

เมื่อพิจารณาผลของทั้งสนามแม่เหล็กสถิตและสนามแม่เหล็กความถี่วิทยุ ที่มีต่อสปินแล้ว จากสมการ (2.3) จะได้ [7]

$$d\vec{\mu}/dt = \vec{\mu} \times \gamma\,[\ \vec{H}_0 + \vec{H}_1(t)\ ]$$

ซึ่งเมื่อพิจารณาในกรอบอ้างอิงหมุนแล้วจะเขียนได้เป็น

$$D\vec{\mu}/Dt = \vec{\mu} \times [\ (\vec{\Omega} + \vec{H}_0\ ) + \vec{H}_1(t)\ ] \qquad (2.7)$$

ถ้าขนาดของ $\vec{\Omega}$ เท่ากับความถี่เชิงมุมของสนามแม่เหล็กความถี่วิทยุและมีทิศทางขนานไปกับ $\vec{H}_0$ คือไปทางแกน z หรือ

$$\vec{\Omega} = \omega \cdot \vec{k}$$

$$\vec{H}_0 = H_0 \cdot \vec{k}$$

เมื่อ $\vec{k}$ คือ เวคเตอร์หนึ่งหน่วยในแนวแกน z ของกรอบอ้างอิงสถิต

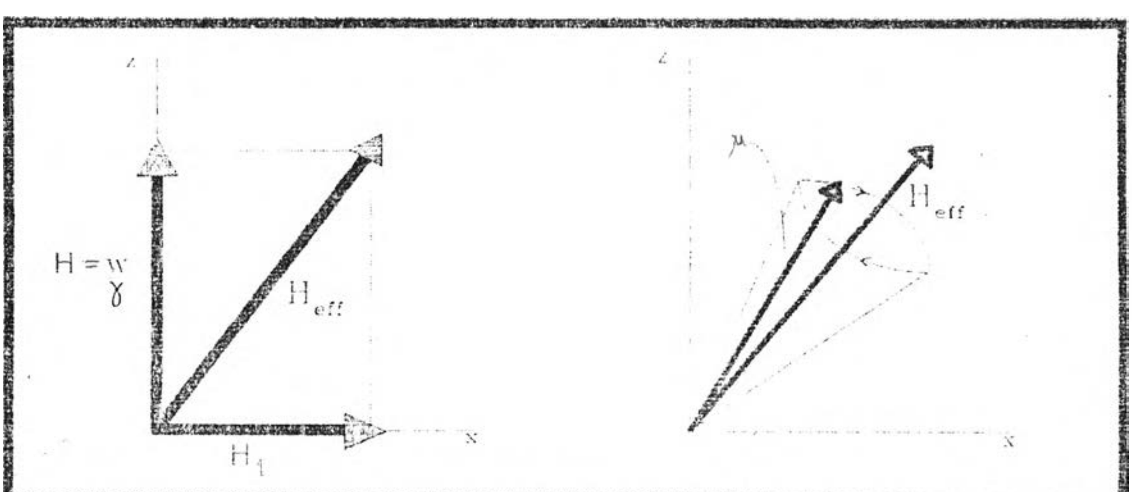
และเมื่อพิจารณา $\vec{H}_1(t)$ ในกรอบอ้างอิงหมุนที่มีความถี่เชิงมุม ω แล้วจะได้ว่า

$$\vec{H}_1(t) = H_1 \vec{i}'$$

เมื่อ $\vec{i}'$ เป็นเวคเตอร์หนึ่งหน่วยในแนวแกน x ของกรอบอ้างอิงหมุน นั่นคือ ในกรอบอ้างอิงหมุนจะเห็นได้ว่า สนามแม่เหล็กยังผลที่เกิดขึ้นคงที่ทั้งขนาดและทิศ โดย

$$\vec{H}_{eff} = \vec{k}\,(H_0 + \omega/\gamma) + \vec{H}_1 i' \qquad (2.8)$$

และถ้าสังเกตการณ์จากกรอบอ้างอิงหมุนจะพบว่า โมเมนต์แม่เหล็กจะแกว่งกวัดไปรอบๆ แนวของสนามแม่เหล็กยังผลนี้ ด้วยมุมที่คงที่ (รูปที่ 2.2)



รูปที่ 2.2 แสดงการแกว่งกวัดของสนามแม่เหล็กไปในกรอบอ้างอิงหมุน

ในกรณีทั่วๆไปแล้ว เมื่อวางวัตถุลงในสนามแม่เหล็กสถิต โมเมนต์แม่เหล็กจะแกว่งกวัดไปรอบๆ แนวสนามแม่เหล็กสถิตด้วยมุมคงที่ช่วงระยะเวลาหนึ่ง และในขณะเดียวกันด้วยผลจากโมเมนต์แม่เหล็กที่อยู่ใกล้เคียงและจากสิ่งแวดล้อมอื่นๆ จะทำให้โมเมนต์แม่เหล็กนั้นแกว่งกวัดไป พร้อมกับสูญเสียพลังงานไปเรื่อยๆ ทำให้มุมของการแกว่งกวัดนั้นลดลงจนขนานไปกับสนามแม่เหล็กสถิตจากภายนอกในที่สุด [3],[6],[7]

ถ้าเราวางวัตถุตัวอย่างลงในสนามแม่เหล็กสถิตแล้วรอจนกระทั่งโมเมนต์แม่เหล็กที่อยู่ในเนื้อวัตถุนั้นวางตัวขนานกับสนามแม่เหล็กสถิตภายนอก จากนั้นจึงป้อนสนามแม่เหล็กที่มีความถี่วิทยุเข้าไปเป็นช่วงเวลา T โดยใช้ความถี่เท่ากับความถี่ของลาร์มอร์ (Larmor frequency)

$$\omega = -\gamma \cdot H_0$$

จะพบว่าจากสมการ (2.8) สนามแม่เหล็กยังผลจะมีขนาดและทิศทางเป็น

$$\vec{H}_{eff} = H_1 \cdot \vec{i}' \qquad (2.9)$$

ซึ่งจะยังผลให้โมเมนต์แม่เหล็กกวาดลงมาจากแนวที่ขนานกับแกน z ในกรอบอ้างอิงหมุน ลงมาตามระนาบ z-y ในกรอบอ้างอิงหมุน [7] ทำมุม θ กับ แกน z โดย

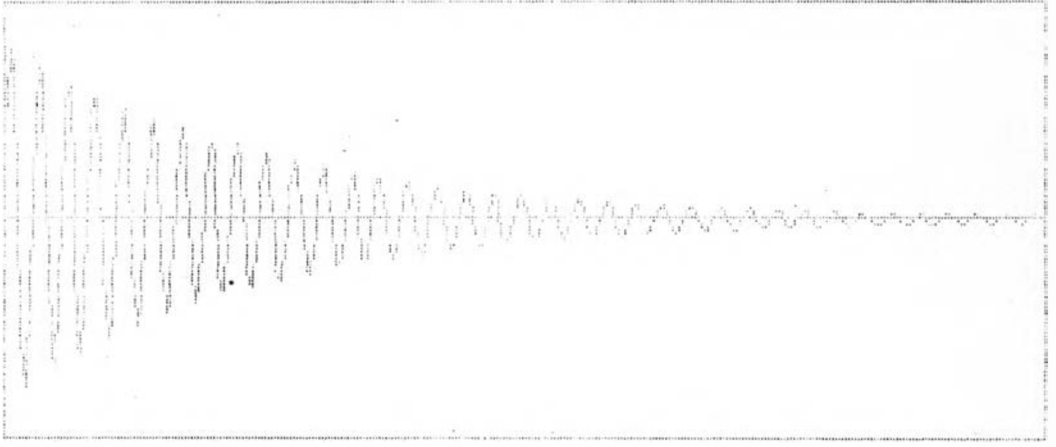
$$\theta = \gamma H_1 T \qquad (2.10)$$

จะเห็นได้ว่าหากเลือกช่วงเวลา T ที่เหมาะสมแล้วจะบังคับให้มุม θ กวาดลงมาเท่าใดก็ได้ เช่นถ้าเลือก $T = \pi/(2\gamma H)$ จะทำให้มุม θ กวาดไป $\pi/2$ หรือ 90° ในลักษณะนี้จะเรียกสัญญาณแม่เหล็กความถี่วิทยุที่ป้อนเข้าไปว่า พัลส์ 90° (90° pulse) หรือถ้าเลือก $T = \pi/(\gamma H)$ ก็จะทำให้ได้มุม θ กวาดไป 180° เป็นต้น

ในกรณีที่เราป้อนสัญญาณ $\pi/2$ เข้าไปจะทำให้โมเมนต์แม่เหล็กอยู่ในลักษณะตั้ง

ฉากกับสนามแม่เหล็กสถิต และแกว่งกวัดไปรอบๆ ด้วยความถี่เชิงมุม $\gamma \cdot H$ ซึ่งจะมีผลทำให้ฟลักซ์ (flux) แม่เหล็กในบริเวณนั้นมีความเปลี่ยนแปลงไปด้วย ถ้าหากว่ามีการนำขดลวด (Coil) ไปวนรอบวัตถุนั้นไว้จะพบว่า การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กนี้จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำศักดาไฟฟ้าขึ้นบนขดลวดนั้น สัญญาณที่ตรวจวัดได้จากขดลวดนี้เองที่จะถูกเรียกว่า เอฟไอดี (FID - Free Induction Decay) ซึ่งวิธีการตรวจวัดเอฟไอดีนี้ เป็นวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการทดลอง เกี่ยวกับ เอ็นเอ็นอาร์

ลักษณะของเอฟไอดีที่ตรวจวัดได้โดยทั่ว ๆ ไป แสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะของสัญญาณเอฟไอดีทั่วไปที่จะตรวจวัดได้

<u>สมการของบลอค</u>

จากหัวข้อก่อนนั้น เป็นการบรรยายถึงการแก้ปัญหาในกรณีที่มีโมเมนต์แม่เหล็กเพียงตัวเดียว โดยไม่ได้สัมพันธ์กับโมเมนต์แม่เหล็กที่อยู่ใกล้เคียง ซึ่งถ้าหากนำโมเมนต์แม่เหล็กที่อยู่ใกล้เคียงและสิ่งแวดล้อมอื่นๆ มาพิจารณาด้วยแล้ว จะพบความแตกต่างออกไปบ้างเล็กน้อย ซึ่งปรากฏการณ์นี้ได้ถูกอธิบายไว้โดย ศาสตราจารย์บลอค (Professor Bloch)

จากวิชากลศาสตร์ควอนตัม สำหรับอนุภาคที่มีหมายเลขสปินเป็น 1/2 แล้วจะมี

สถานะได้สองสถานะคือ หันตาม (parallel) ทิศของสนามแม่เหล็ก คือมีระดับพลังงานต่ำกว่า และหันทวน (anti - parallel) ทิศของสนามแม่เหล็กซึ่งจะมีระดับพลังงานสูงกว่า

ในกรณีที่พิจารณาผลจากสนามแม่เหล็กความถี่วิทยุจะได้ว่า [7]

$$dn/dt = -2 \cdot W \cdot n \qquad (2.11)$$

เมื่อ

n = จำนวนอนุภาคที่หันทวน - จำนวนอนุภาคที่หันตาม

W = ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนระดับพลังงานเนื่องจากการเหนี่ยวนำต่อวินาที

และในกรณีที่พิจารณาผลจากสนามแม่เหล็กสถิตจะได้ [7]

$$dn/dt = (n_o - n) / T_1 \qquad (2.12)$$

เมื่อ n_o = ผลต่างของจำนวนอนุภาคหันตามและหันทวนที่จุดสมดุลความร้อน

สิ่งที่ศาสตราจารย์บลอคอธิบายไว้ได้แก่ ลักษณะที่ปรากฏให้สังเกตได้ในมหัพภาคของโมเมนต์แม่เหล็กของนิวเคลียส เขาอธิบายว่าเมื่อวางวัตถุตัวอย่างลงในสนามแม่เหล็กจะเกิดโมเมนต์แม่เหล็กรวมต่อหน่วยปริมาตรขึ้น เนื่องจากจำนวนของโมเมนต์แม่เหล็กของนิวเคลียสที่มีทิศหันไปทางเดียวกับสนามจะมีมากกว่าสนามแม่เหล็กที่หันต้านกับสนาม

ที่จุดสมดุลทางความร้อน โมเมนต์แม่เหล็กต่อหน่วยปริมาตรจะมีทิศหันขนานไปกับสนามแม่เหล็กสถิตโดยมีขนาดเป็น [7]

$$M_o = \gamma \hbar n_o / 2 = \chi_o H_o \qquad (2.13)$$

χ_o คือสภาพรับไว้ได้ของความเป็นแม่เหล็ก (magnetic susceptibility)

และจะเขียนสมการที่ใช้อธิบายค่าโมเมนต์แม่เหล็กในแนวแกน z ที่เวลาใดๆได้โดยพิจารณาจากจากสมการ (2.12) และโดยความสัมพันธ์ [7]

$$M_z(t) = \gamma \hbar\, n(t) / 2 \qquad (2.14)$$

จะได้ว่า

$$dM_z/dt = (M_0 - M_z) / T_1 \qquad (2.15)$$

เมื่อรวมกับผลจากสนามแม่เหล็กที่มีต่อโมเมนต์แม่เหล็กแล้วจะได้ว่า

$$dM_z/dt = (M_0 - M_z) / T_1 + \gamma (\vec{M} \times \vec{H})_z \qquad (2.16)$$

ในแนวแกน x และแกน y ก็เช่นกัน โดยพิจารณาจากสมการ (2.11) ซึ่งเป็นสมการที่ใช้อธิบายถึงการจัดตัวของโมเมนต์แม่เหล็กเมื่อไม่มีผลจากสนามแม่เหล็กสถิตจะได้

$$dM_x/dt = - M_x / T_2$$

รวมผลจากสนามแม่เหล็กภายนอกได้

$$dM_x/dt = \gamma (\vec{M} \times \vec{H})_x - M_x / T_2 \qquad (2.17)$$

และในทำนองเดียวกันก็จะได้

$$dM_y/dt = \gamma (\vec{M} \times \vec{H})_y - M_y / T_2 \qquad (2.17)$$

สมการที่ (2.6),(2.7) และ (2.18) นี้ ถูกรวมเรียกว่าสมการของบลอค (Bloch equations) [3],[7] ซึ่งเป็นสมการที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์เอ็นเอ็มอาร์ในระดับ

มหัพภาค

สำหรับค่าคงที่สองตัวคือ T_1 และ T_2 นั้น เป็นค่าคงที่ที่มีความหมายมากในการทำเอ็นเอ็มอาร์ ซึ่งอาจอธิบายความหมายในลักษณะของมันได้ดังนี้

สำหรับค่า T_1 มีชื่อเรียกว่า ค่าเวลาแห่งการผ่อนคลายตามยาว (longitudinal relaxation time) เป็นค่าที่กำหนดอัตราในการลดลงโมเมนต์แม่เหล็กเนื่องจากการเสียพลังงานให้กับสิ่งแวดล้อมมีชื่อเรียกได้อีกชื่อหนึ่งว่า ค่าเวลาแห่งการผ่อนคลายแบบ สปิน - แลตทิซ (spin - lattice relexation time)

ส่วน T_2 มีชื่อเรียกว่าค่าเวลาแห่งการผ่อนคลายตามขวาง (transverse relaxation time) เป็นค่าที่กำหนดอัตราการลดลงของโมเมนต์แม่เหล็กโดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่สิ่งแวดล้อมแต่ลดลงเนื่องจากการแยกวัฏภาค (dephase) ของโมเมนต์แม่เหล็กของนิวเคลียสแต่ละตัว T_2 นี้มีชื่อเรียกอีกอย่างว่า ค่าเวลาแห่งการผ่อนคลายแบบ สปิน - สปิน (spin - spin relaxation time)

วิธีเทคนิคย้อนกลับสัญญาณสปิน

วิธีเทคนิคย้อนกลับสัญญาณสปิน (spin - echo technique) เป็นอีกวิธีการหนึ่งในการตรวจวัดสัญญาณเอฟไอดี และเกี่ยวข้องกันมากกับการสร้างภาพจากสัญญาณเอ็นเอ็มอาร์ ซึ่งวิธีการนี้ที่น่าสนใจมีอยู่สองแบบด้วยกันคือ [3]

1. วิธีเทคนิคย้อนกลับสัญญาณสปิน แบบ ฮาห์น (Hahn spin - echo technique)
2. วิธีเทคนิคแบบ ซีพีเอ็มจี (CPMG , Carr - Purcell and Meiboom - Gill technique)

วิธีการแบบฮาห์นนั้นจะมีลำดับกระบวนการดังนี้คือ

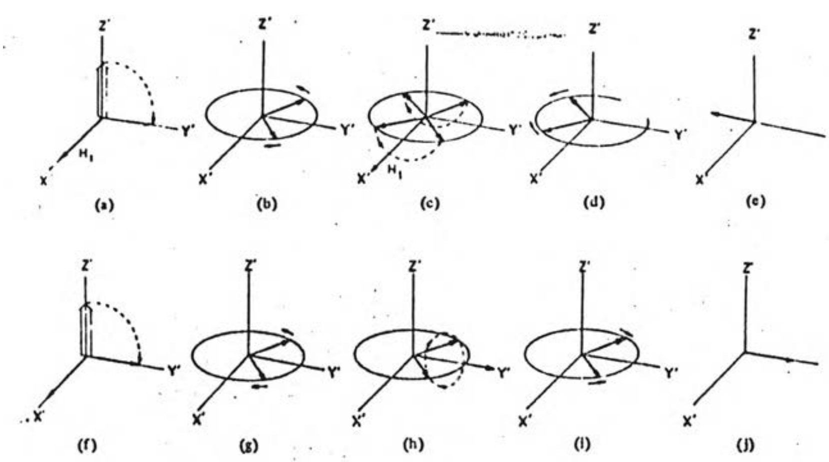
(1) ป้อน พัลส์ 90° เข้าไปเพื่อทำให้ โมเมนต์แม่เหล็กรวมพลิกจากแนวขนานกับสนามแม่เหล็กสถิตมาตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กสถิตในแนวแกน y ดังรูปที่ 2.4 (a)

(2) โมเมนต์แม่เหล็กจะเริ่มแยกวัฏภาคออกจากกันทำให้สัญญาณเอฟไอดีอ่อนลง ดังภาพที่ 2.4(b)

(3) ป้อน พัลส์180° เข้าไปในแนวแกน x ซึ่งจะทำให้โมเมนต์แม่เหล็กพลิกกลับด้านกันไป 180° รอบแกน x ดังในรูปที่ 2.4 (c)

(4) โมเมนต์แม่เหล็กจะหมุนต่อเนื่องไปเรื่อยๆ แต่ครั้งนี้จะเริ่มคืนวัฏภาค (rephase) เข้าด้วยกันดังในรูปที่ 2.4 (d) และ (e) ทำให้มีสัญญาณเอฟไอดี เกิดขึ้นมาอีกครั้งสัญญาณในช่วงนี้เองที่เรียกว่าสัญญาณย้อนกลับของสปิน (spin echo)

ส่วนวิธีการแบบซีพีเอ็มจี จะแตกต่างจากวิธีแบบฮาห์นที่ขั้นที่ (3) จะป้อนสัญญาณเข้าไปในแนวแกน Y ทำให้โมเมนต์แม่เหล็กพลิกตัวไปรอบแกน y แทนที่จะเป็นแกน x ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (f),(g),(h),(i),และ(j)



รูปที่ 2.4 ภาพแสดงถึงกระบวนการที่เกิดในการทำสัญญาณย้อนกลับของสปิน

เทคนิควิธีการทั้งสองที่กล่าวถึงนี้ให้ประโยชน์มากในการทำงานกับเอ็นเอ็มอาร์กล่าว

คือ มันสามารถลดเวลาที่ต้องใช้ในการตรวจวัดและเก็บข้อมูลซึ่งตามปกติแล้วจะถูกจำกัดโดยค่าเวลาแห่งการผ่อนคลายตามยาว T_1 และจะส่งผลไปถึงการลดอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนโดยวิธีเฉลี่ยสัญญาณด้วย

<u>ผลเฉลยของสมการของบล็อค</u>

ในการหาผลเฉลยของสมการของบลอค (solution of Bloch equation) นั้นปรกติแล้วจะหาได้ยากมาก แต่ถ้าหากกำหนดเงื่อนไขบางประการเข้าไปจะช่วยให้การหาผลเฉลยทำได้ง่ายขึ้น เงื่อนไขที่จะใช้ก็คือค่าความแรงของสนามแม่เหล็กสลับความถี่วิทยุจะต้องมีค่าน้อยมากจนไม่สามารถทำให้เนื้อสารเกิดการอิ่มตัวขึ้นมาได้นั่นคือ H_1 ต้องน้อยกว่า H_o มาก ๆ จะทำให้ได้ผลเฉลยของสมการของบลอคในกรอบอ้างอิงหมุนเป็น [7]

$$M_x = \chi_o(\omega_o T_2)\cdot H_1\cdot(\omega_o-\omega)\cdot T_2 \,/\, (1+(\omega_o-\omega)^2\cdot T_2^2) \quad (2.19)$$

และ

$$M_y = \chi_o(\omega_o T_2)\cdot H_1 \,/\, (1 + (\omega_o-\omega)^2\cdot T_2^2) \quad (2.20)$$

เมื่อ

χ_o เป็นสภาพรับไว้ได้ของความเป็นแม่เหล็กของวัตถุ

ω_o เป็นความถี่ของลาร์มอร์

ซึ่งจากผลเฉลยในกรอบอ้างอิงหมุนนี้สามารถแปลงไปเป็นกรอบอ้างอิงสถิตได้เป็น

$$M_x' = M_x\cdot\cos(\omega t) + M_y\cdot\sin(\omega t) \quad (2.21)$$

แต่จาก

$$M_x' = \chi\cdot H_x'$$

เขียนได้ว่า

$$M_x' = (\chi' \cdot \cos(\omega t) + \chi'' \cdot \sin(\omega t)) \cdot H_x' \qquad (2.22)$$

โดยการเปรียบเทียบ (2.21),(2.22),(2.19) และ (2.20) จะได้

$$\chi' = (\chi_0/2) \cdot (\omega_0 T_2) \cdot H_1 \cdot (\omega_0 - \omega) \cdot T_2 \, / \, (1 + (\omega_0 - \omega)^2 \cdot T_2^2)$$

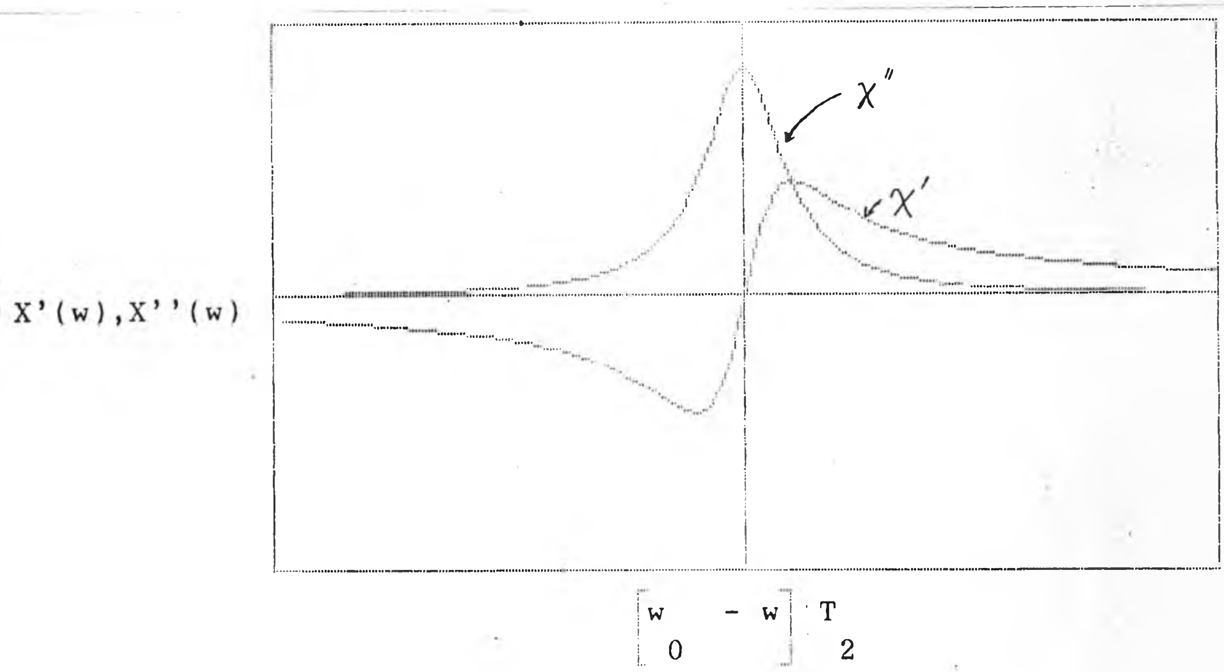
และ

$$\chi'' = (\chi_0/2) \cdot (\omega_0 T_2) \cdot H_1 \, / \, (1 + (\omega_0 - \omega)^2 \cdot T_2^2)$$

จะนิยามสภาพรับไว้ได้ของความเป็นแม่เหล็กเชิงซ้อนได้ว่า

$$\chi = \chi' - i \cdot \chi''$$

ซึ่งกราฟของ χ' และ χ'' สามารถเขียนได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ของสภาพรับไว้ได้ของความเป็นแม่เหล็ก
กับความถี่ของสนามแม่เหล็กสลับที่ป้อนเข้าไป

ค่า χ'' นี้จะแสดงถึงการดูดกลืนพลังงานเมื่อป้อนสนามแม่เหล็กสลับความถี่วิทยุเข้าไปผ่านขดลวดที่วนรอบวัตถุ ส่วน χ' จะแสดงถึงค่าที่เปลี่ยนไปของความเหนี่ยวนำของขดลวดนั้น [7]