الفصل الحادي عشر

11. الرنين المغناطيسي النووي

مقدمة

إن أطياف الرنين المغناطيسي النووي تخص نويات الذرات التي تمتلك عدداً مفرداً من البروتونات بشكل عام "مع بعض الشواذ". تعتبر أطياف الرنين المغناطيسي طريقة فيزيائية وكيميائية حديثة تفيدنا في تحليل المركبات العضوية وغيرها كما تفيدنا في التعرف على شكل الجزئية الفراغي، تمتاز تلك الطريقة الطيفية عن غيرها في دقة معلوماتها وبذلك، تختلف عن الأطياف ما تحت الحمراء الجزيئية، إذ أن نتائجها ليست دائماً دقيقة وتحتمل أحياناً عدة تأويلات واحتمالات، زيادة على ذلك فإن أطياف ما تحت الحمراء نقطية أي تعطينا فكرة عن تركيب المادة في نقطة سقوط الأشعة الكهرطيسية على المادة. أما أطياف الرنين المغناطيسي فتمثل متوسط تركيب المادة أي أن الطيف يمثل تركيب المادة كاملة وليس نقاطاً منها.

11. 1. السبين

يعتقد أن كل الجسيمات الذرية من إلكترونات وبروتونات تتمتع بلف ذاتي وبما أن نواة ذرة الهيدروجين تتألف من بروتون واحد فهي إذن تدور ولها سبين نووي، يخضع السبين النووي لنظرية الكم الفيزيائية، هذا يعنى أن عزم السبين يتغير بقيم منفصلة تساوي ثابت بلانك h أو مضاعفاته.

11. 2. البروتون (نواة ذرة الهيدروجين)

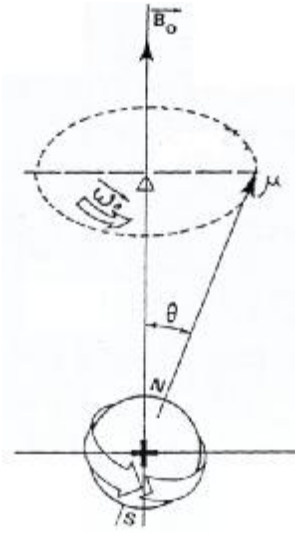
جسيم له وزن، حركته الدورانية سريعة جداً تمنحه عطالة كبيرة نسبياً مما يعطيه شكلاً ميكانيكاً معروفاً ألا وهو الجيروسكوب.

إن دوران شحنة كهربائية موجبة الشكل (11-1) كالبروتون يسبب ظهور مجال مغناطيسي. بما أن نواة الهيدروجين مؤلفة من بروتون واحد فإن عزمها المغناطيسي كبير نسبياً، هذا يعنى أن نواة الهيدروجين شبيهة بمغناطيس صغير يجتازه تدفق مغنطيسي، نرمز للعزم المغناطيسي بـــ(μ)، إن الربط بين العطالة والعزم المغناطيسي لجسيم يقودنا إلى ثابتة تسمى بنسبة الجيرومغناطيسية ونرمز لها بالرمز $g = \frac{m}{I}$

حيث g= ثابتة نسبة الجيرومغناطيسية.

g = العزم المغناطيسي.

I = عزم العطالة للنواة المدروسة.



الشكل (11-1). يمثل حركة مبادرة لبروتون

11. 3. مغناطيسية النويات

إن مغنطة النويات أضعف نحو ألف مرة من مغنطة الحديد، لذلك فإن مغنطة النويات أضعف من أن تلتقط بتجارب عادية، نظراً لطبيعة نواة الهيدروجين المؤلفة من بروتون واحد فإنه يعد أفضل ممثل للمغنطة النووية.

على العكس من هذا فإن تواجد نيترون واحد وبروتونين في نواة يجعلهما (أي البروتونين) بمثابة مغناطيسيين متعاكسين لذلك فإن محصلة المغنطة الناتجة عن هذه الحالة تكون معدومة وبذلك تكون ذرات الهليوم ^{2}He، الكربون ^{12}C والأكسجين ^{16}O معدومة المغنطة ولكن نظائر هذه العناصر تمتلك عزماً مغناطيسياً ضعيفاً.

تلك النظائر نوردها كما يلي:

الدوتريوم ($Deuterium$) ^{2}H

نظير الكربون ($isotope\ de\ Carbone$) ^{12}C

الفلور ^{19}F

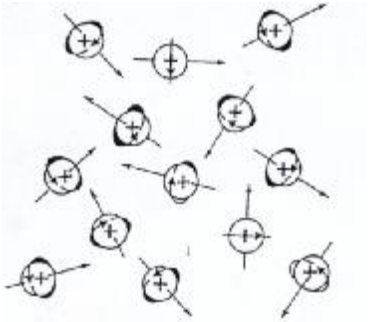
الصوديوم ($Sodium$) ^{23}Na

الفوسفور ($Phosphor$) ^{31}P

11. 4. التجاوب المغناطيسي للبروتون

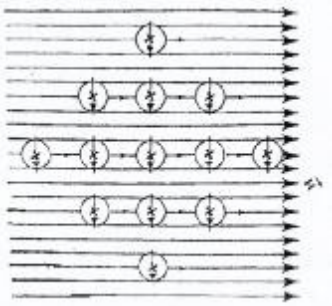
السبين المغناطيسي يحول البروتون في تأثيره إلى ما يشبه المغناطيس الصغير الذي له قطبان شمالي N وجنوبي S نسمي هذين القطبين بالثنائية المغناطيسية ($doublet\ magnetic$).

في الحالة، عندما تكون الذرات بوضع الراحة، فإن تلك الثنائيات المغناطيسية المتحركة تتمتع بأكبر عشوائية في اتجاهاتها، لذلك يستحيل التقاط أية ظاهرة مغناطيسية خارجية. الشكل (11-2) يمثل التوجهات العشوائية للثنائيات.



الشكل (11-2). يمثل الحالة العامية في التوجهات العشوائية للبروتونات وذلك في حال غياب المجال المغناطيسي

إذا أخضعنا الثنائيات المغناطيسية لحقل مغناطيسي قوي فإنها تتأثر وتأخذ اتجاهاً واحداً ضمن هذا الحقل المغناطيسي. تماماً على نحو ما يحدث في البروتونات التي تتمتع بعطالة ميكانيكية وجيروسكوبية لأن الظاهرة في التوجه حسب الحقل المغناطيسي ليست آنية، مثلها كمثل الجيروسكوب عندما يغير اتجاهه. إذن البروتون يقاوم هذه الظاهرة الآنية في التوجه، التي ينتج عنها في بدايتها حركة مبادرة (*preceslion*). في الشكل (11-3) بينا حركة المبادرة للبروتون.



الشكل (11-3). تحت تأثير مجال مغناطيسي خارجي تتوجه النويات توجهاً مشتركاً

يكون دوران البروتون حسب مخروط حول القوة الفاعلة أو المؤثرة، أما سرعة حركة المبادرة فهي ثابتة وتعطى بالعلاقة:

$$w = g H_0$$

ω = السرعة الزاوية للدوران.

γ = العلاقة الجيروسكوبية.

H_0 = المجال المغناطيسي السكوني.

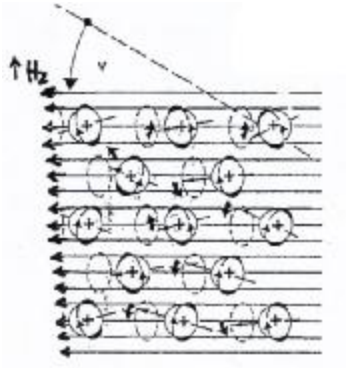
لهذا الدوران تواتر يعطى بالعلاقة:

$$v = \frac{w}{2p} = \frac{gH_0}{2p}$$

فإذا افترضنا أن تواتر الدوران هو ($21.3MHz$) في حقل مقداره ($0.5tesla$) فإن طول الموجة الكهرطيسية المهيجة لهذا الدوران هو ($14\ m$).

لنفحص عينة غنية بعنصر الهيدروجين- طبعاً سنفكر مباشرة بالماء، لنخضع هذه العينة لحقل مغناطيسي مناسب شدته H_0

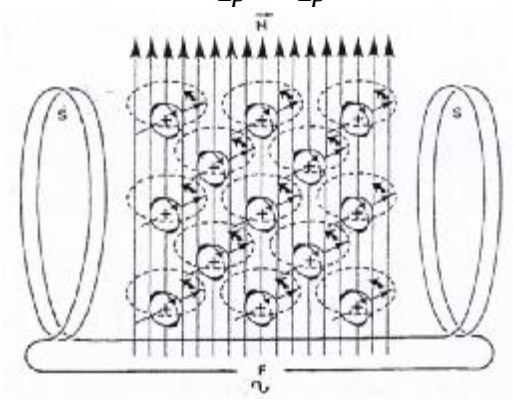
في هذه الحالة تتجه جميع الثنائيات المغناطيسية اتجاهاً مشتركاً كما تفعل الإبر المغناطيسية، الشكل (11-4)، وبما أن لكل حقل مغناطيسي عملية مبادرة خاصة به، فإن القيام بعملية تحويل اتجاه الحقل المغناطيسي فجأة يعني أن كل البروتونات ستدخل جميعاً بحركة مبادرة (*precesion*) جديدة بتواتر مشترك (v) الشكل (11-4).



الشكل (11-4). أي تغير مفاجئ في اتجاه المجال المغناطيس يحرّض لدينا حركة مبادرة للنويات

ونتيجة لهذا التأثير (تواتر υ) تدخل البروتونات في حركة مبادرة وتجاوب مع الموجة الكهرطيسية الشكل (11-5). من هذه التجربة نصل إلى علاقة طردية بين شدة المجال المغناطيسي H_0 وتواتر التجاوب.

$$\upsilon = \frac{w}{2p} = \frac{g H_0}{2p}$$



الشكل (11-5). التجاوب في الحركة على شكل مبادرة بتواتر υ تحت تأثير مجال مغناطيسي

يمكن أن يتحقق التجاوب المغناطيسي لنواة ما إذا تواجدت تلك النواة في مجال مغناطيسي شدته معطاة بالعلاقة التالية:

$$H_0 = 2pu / g$$

يسمى التواتر υ بتواتر لارمور "*LARMOR*".

11. 5. النظرية الكمية في التجاوب البروتوني النووي

تبين لنا الفقرات السابقة من الأشكال الشكل (11-3) والشكل (11-4) والشكل (11-5) صيغة تقريبية وجاهرية (*macroscopic*) لظاهرة التجاوب

المغناطيسي النووي. ولإكمال الدراسة يجب الأخذ بوجهة النظر الذرية للظاهرة مع استخدام النظرية الكمية. فعلى المستوى الذري، تكون الطاقة والأبعاد التابعة لها مثل كمية الحركة والسبين مثلاً، متغيرة بشكل منفصل (*discontinue*) وبكميات متتابعة وصغيرة جداً يدخل في حسابها الثابت h (ثابت بلانك). السبين لا يمكنه أن يأخذ إلا عدداً محدداً من القيم التي تتبع عدد العناصر البروتونية والنيترونية المشكلة للنواة. لنرمز بالحرف (m) إلى العدد الكمي للسبين النووي، ذلك العدد لا يمتلك إلا قيمة واحدة خاصة بالنواة.

أمثلة:

m بالنسبة لبروتون الهيدروجين ^1H =½

m من أجل الدوتريوم ^1D =1

وهكذا فإن طاقة السبين قيم m حسب العلاقة $2m+1$ ومن أجل نواة الهيدروجين تساوي:

$$2m+1=2\times 1/2+1=2$$

أي أن هنالك قيمتين من أجل البروتون H.

لنعد إلى الظاهرة المغناطيسية، إن دوران البروتون يحدث لدينا عزماً مغناطيسياً يرتبط بالعزم الحركي I، حسب ثابت العلاقة الجيروسكوبية كما يلي:

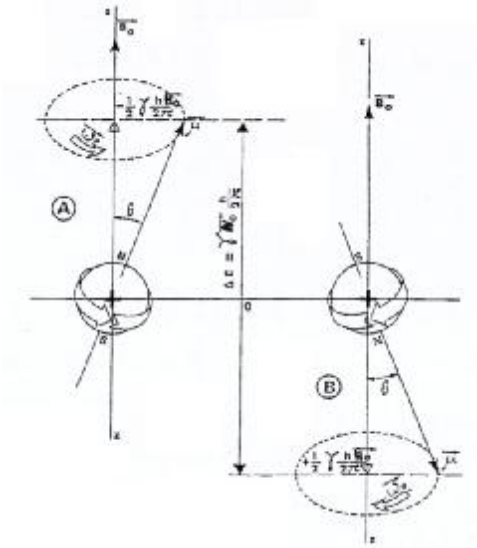
(النسبية الجيروسكوبية): $$g=\frac{m}{I}$$

إذا تواجد البروتون المرتبط بالعزم المغناطيسي μ في مجال مغناطيسي خارجي شدته H_0 وكانت الزاوية بينهما تساوي θ. الشكل (11-6) في هذه الحالة يخضع البروتون لقوة تجبر عزمه المغناطيس على أخذ اتجاه مواز لـــH_0 وتكون السرعة الزاوية للحركة حول H_0 معطاة بالعلاقة:

$$w_0=gH_0$$

يجب أن نفسر الفكرة السابقة بالطريقة التالية:

بروتون -نواة لوسط غنى بالهيدروجين - موضوع في مجال مغناطيسي يمكنه أن يأخذ قيمتين كما مثلنا في الشكل (11-6).



الشكل (11-6). يبين حركتي المبادرة والتحريض للبروتون وذلك بأخذه لقيمتين في الدوران السالب والموجب

- في الحالة A- البروتونات في الحالة العادية - أي دون تهييج - تقوم بحركة مبادرة حول المجال المغناطيسي H_0.
- في الحالة B- تقوم البروتونات الممتصة للطاقة الإضافية ΔE والمتهيجة -بسبب هذا الامتصاص- بحركة مبادرة جديدة معاكسة تقريباً للمجال المغناطيسي.

لكي نمضي بالبروتون من الحالة العادية إلى الحالة المهيجة يجب أن نزوده بكمية من الطاقة تساوي ΔE، فإن كانت هذه الكمية من الطاقة مأخوذة من موجة كهرطيسية تواترها g وطاقتها hu أمكننا أن نكتب:

$$\Delta E = hu = g H_0 . h$$

$$u = g \frac{H_0}{2p}$$

11. 6. العزم الجاهري، تهييج التجاوب المغناطيسي

في وسط جاهري غني بالبروتونات موجود في مجال مغناطيسي، تدخل جميع البروتونات في حركة مبادرة، ويكون فرق الطاقة بين الحالة العادية والحالة المهيجة للبروتونات فرق صغير جداً بالقيمة المطلقة أما عدد البروتونات في الحالة المهيجة والحالة العادية فيكاد يكون متساوياً لولا زيادة طفيفة جداً لعدد البروتونات في الحالة العادية تلك التي تمتلك طاقة دنيا.

زيادة على ذلك فإن العزوم المغناطيسية لمختلف البروتونات ليست واحدة وإنما تختلف بالنسبة لبعضها، والزيادة الطفيفة للبروتونات في الحالة العادية تولد لدينا عزماً مغناطيسياً جاهرياً يساوي:

(العزم المغناطيسي للبروتون) $\vec{m}_i$ $\vec{M} = \sum \vec{m}_i$ (العزم المغناطيسي الجاهري)

إن العزم المغناطيسي الجاهري M هو العزم الوحيد الذي يمكن قياسه بأجهزة الرنين المغناطيس النووي.

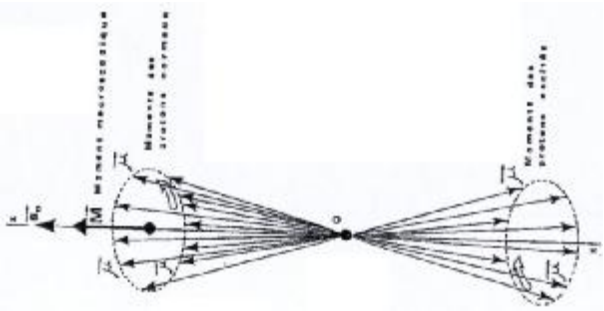
لتهييج التجاوب المغناطيسي النووي ينبغي تزويد البروتونات بطاقة إضافية، وذلك باستعمال مجال مغناطيس آخر عمودي على الأول يكون تأثيره في جهة مبادرة البروتونات، ويمتلك نفس السرعة الزاوية للمجال الأول، وذلك بتطبيق موجة كهرطيسية أخرى لها نفس التواتر أو قريب من تواتر لارمور (*LARMOR*) والمحسوب بالطريقة التالية:

$$u = \frac{w_0}{2p} = g \frac{H_0}{2p}$$

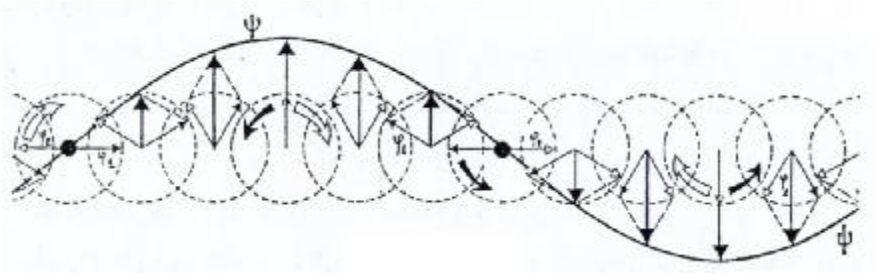
يمكن التأكد من أن الموجة الكهرطيسية هي جيبية ومكافئة لمجالين متساويين يدوران باتجاهين متعاكسين، نستفيد من المجال الدوار مع حركة

المبادرة للبروتونات الشكل (11-8) في إحداث ظاهرة التهييج النووي التي يظهر تأثيرها في مختلف النويات على عدة أشكال هي:

1. يقوم بمنح البروتونات طاقة كافية لتهييجها وذلك بقلبها من الحالة A إلى الحالة B حسب الشكل (11-6)
2. يمكن لهذا المجال أن يحرّض الحالة المعاكسة المتمثلة في عودة البروتونات إلى الحالة B إلى الحالة A بامتصاص كمية الطاقة نفسها.
3. نتيجة لهذه الحركة يختلف توزيع البروتونات بين الحالة العادية والحالة المهيجة ونتيجة لهذا تتغير قيمة العزم الجاهري $\vec{M}$.
4. يعمل المجال الدوّار المانح للطاقة الإضافية H_1 على جمع الأطوار المغناطيسية المختلفة للبروتونات في طور واحد. الشكل (11-7).



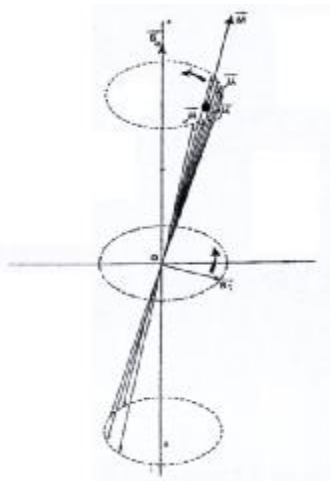
الشكل (11-7). يمثل العزم الجاهري M، لمجموعة بروتونات يمتلك فيها كل بروتونا عزماً مجهرياً قدره μ



الشكل (11-8). يمثل موجة كهرومغنطيسية (موجة جيبية) ذات توتر F

11. 7. تأثير المجال الدوار في العزم الجاهري

بتجميع العزوم المغناطيسية المنفردة μ للبروتونات نحصل على العزم المغناطيسي الجاهري M. ذلك العزم الذي يبتعد عن المجال المغناطيس الأساسي H_0 كما في الشكل (11-9) ليأخذ في النهاية حركة مبادرة بالسرعة نفسها.



الشكل (11-9). المبادرة الأولى للعزم الجاهري مع العزوم المنفردة الميكروسكوبية

$$\vec{w}_0 = g\vec{H}_0$$

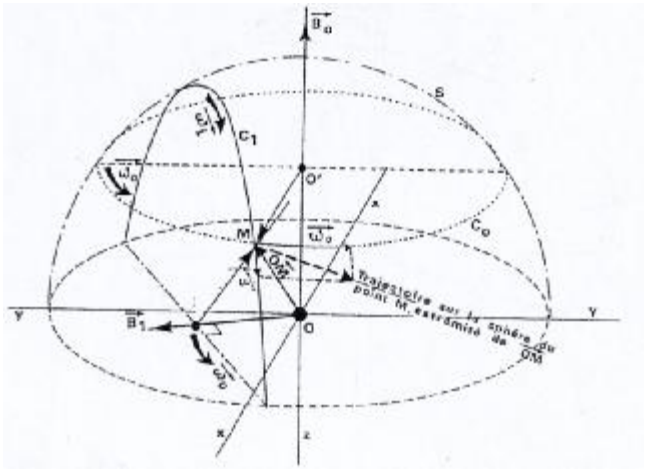
يطبق المجال المغناطيسي الدوّار H_1 على عزوم البروتونات المغناطيسية المنفردة μ، وبالنتيجة على العزم الجاهري - المفعول الفيزيائي نفسه أي تأثير المجال H_0.

- تأثير المجالين H_1 وH_0 في العزوم المغناطيسية μ، وبالتلى في العزم الجاهري يمنحه مساراً حلزونياً معقداً، ولفهم هذه الظاهرة نفترض ما يلي:

لنتصور أن العزم M يمكن أن يمثل بشعاع أوله في مبدأ الإحداثيات ونهايته في النقطة M ولنمثله بـــ $\vec{OM}$– ذلك الشعاع يتحول في قيمه ملامساً

السطح الداخلي للكرة S. الشكل (11-11). إذن النقطة M تتبع حركتين في وقت واحد، ولكن سرعتهما مختلفتان.

1. الأولى حول المحور Z أي المجال H_0 مع سرعة زاوية ثابتة قدرها ω_0.
2. الثانية حول المجال H_1 العمودي على H_0 ذلك المجال الدوراني الأفقي والمنطبق على المحور x أو المحور y.



الشكل (11-10). يمثل مسار العزم الجاهري OM

لننظر إلى الشكل (11-10) إن النقطة M تقع على الدائرة C_0 العمودية على zz التي مركزها o' وأيضاً على الدائرة C_1 وC_0، سرعة النقطة M على C_0 هي ω_0 أما على C_1 فتساوي

$$\mathbf{w}_1 = g\mathbf{H}_1$$

يكون عادة $H_1 > H_0$ وبالتالي: $w_1 > w_0$

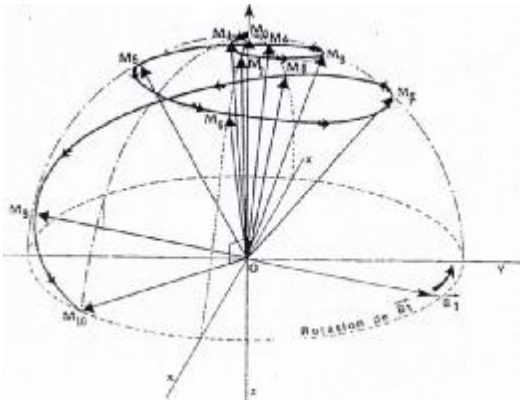
الشكل (11-11) يبين أن النقطة M ترسم مساراً حلزونياً على السطح الداخلي للكرة ابتداء من نقطة ما قبل بدء التحريض وانتهاء بمنتصف الكرة عند انتهاء التحريض. كما في الشكل (11-11).

11. 8. استعمال النبض π/2 والنبض π:

يبين الشكل (11-11) المسار الحلزوني للشعاع *OM*، ذلك المسار الذي ينتهي بموضع يكون فيه العزم الجاهري في وضع عمودي على المجال المغناطيسي H_0 (النقطة M_{10}) ومن أجل إكمال هذا الدر وان $\pi/2$ سنكون بحاجة إلى بعض الوقت الذي يساوي:

$$t_1 = \frac{p}{2w_1}$$

وهو الوقت اللازم للنبض $p/2$



الشكل (11-11). يبين الحركة الحلزونية للعزم الجاهري OM ابتداء من OM_0 وحتى OM_{10}

فإذا استمر تأثير المجال المغناطيسي H_1 لوقت أطول فإن مسار النقطة *M* سيجري منقلباً في نفس المسار الحلزوني ولكن في الجزء الأسفل للكرة وبذلك يكون الوقت المناسب.

$$t_2 = \frac{p}{w_1} = 2t_1$$

يجب ملاحظة أن انقلاب (*RENUER SEMENT*) العزم الجاهري *M* يحدث تدريجياً وذلك بمراعاة أن الظاهرة الكلية تحدث نتيجة انقلاب العزوم الفردية μ_1 بروتون بعد الآخر.