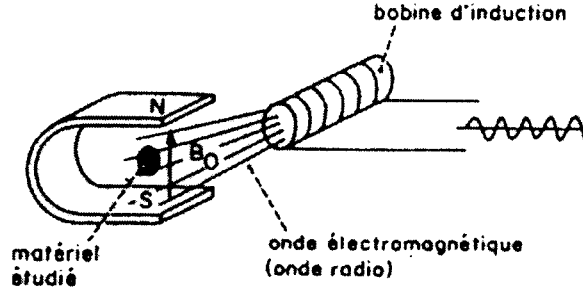


الفصل العاشر

التجاوب المغناطيسي النووي (N.M.R)

I - الامتصاص والاسترخاء

- الامتصاص: نخضع مادة ما إلى حقل مغناطيسي ثابت $\vec{B}_0$ ثم نطبق عليها موجة كهروطيسية بتردد متغير (الشكل 1).



الشكل 1

نلاحظ بأن الموجة تمتص من أجل بعض الترددات المحددة بشكل جيد؛ ولهذا نطلق اسم طيف N.M.R لمادة خاضعة لحقل مغناطيسي ثابت على الرسم البياني الذي يمثل هذا الامتصاص بتابعة التردد، وهو عبارة عن طيف مكون من قمم وإن تردد كل قمة مميز ببعض العناصر الذرية (جدول I) من أجل $\vec{B}_0$ محدد. وإن شدة كل قمة منه متناسبة مع تركيز العنصر الموافق في العينة المدروسة.

النظير	تردد التجاوب (MHZ) في حقل شدته (1) تسلا	$\frac{\gamma}{\gamma_H}$
1H	42,6	1
2H	6,5	0,15
^{13}C	10,7	0,25
^{14}N	3,1	0,07
^{15}N	4,3	0,10
^{17}O	5,8	0,14
^{19}F	40,1	0,94
^{31}P	17,2	0,41

جدول I

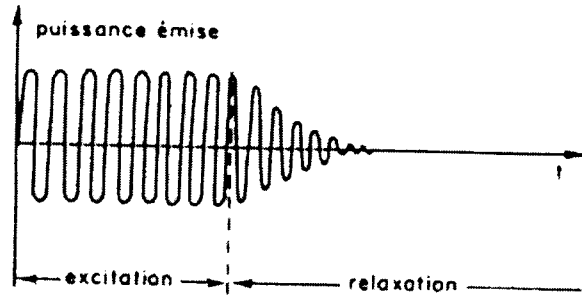
– الاسترخاء

نوجه منحى الموجه الكهرطيسية عمودياً على $\vec{B_0}$ ثم نضبط ترددها على قيمة موافقة لقيمة من طيفها المحدد بالتجربة السابقة.

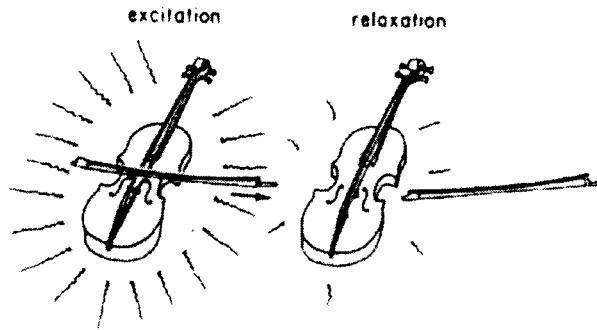
لنفترض بأن المادة تخضع لهذه الموجه خلال مدة زمنية محددة تماماً وإنه ابتداء من توقف الموجه، نستطيع تسجيل الحقل المغناطيسي الدوري الذي تصدره المادة وإن مطال هذا الحقل متناقص وله نفس تردد الموجه الكهرطيسية وهذه هي ظاهرة الاسترخاء، وإن الجملة تعود إلى حالتها التوازنية بعد أن كانت مهيجة بالموجه الكهرطيسية (الأشكال 2 و 3) وأن هذا الحقل المقاس بالقوى المحركة الكهربية V_1 و V_2 الخروضة في ملفات تحريض موضوعة عمودياً وموازية B_0 ، له ثوابت زمنية مختلفة هي على التسلسل T_1 و T_2 .

(نطلق اسم ثابت الزمن أو الزمن المميز على الفترة التي من أجلها تتغير الشدة بنسبة

$((e \approx 2,7))$.



الشكل 2



الشكل 3

II - التفسير:

- الامتصاص: تعطى طاقة موجة كهروطيسية ترددها ν بالعلاقة التالية: $(\Delta E)_1 = h\nu$.

ويمكن لذرة أن تمتص هذه الطاقة إذا وافقت انتقال طاقتها

المغناطيسية النووية.

فعندما تخضع ذرة اسبينها النووي لا يساوي الصفر لحقل مغناطيسي ثابت $\vec{B}_0$ فإن عزمها المغناطيسي النووي يكون كمياً وبالتالي فهي لا تستطيع أن تأخذ إلا بعض الحالات الممكنة وإن الطاقة الانتقالية ما بين هذه الحالات هي:

$$(\Delta E)_2 = \frac{h}{2\pi} \gamma B_0$$

حيث γ يسمى ثابت تناسب الجيرومغناطيسية وهو مميز للذرة المعتبرة (جدول I).

ويتم الامتصاص عندما $(\Delta E)_1 = (\Delta E)_2$ وهذا يوافق تردد ν_0 يسمى بالتجاوب بحيث إن:

$$\nu_0 = B_0 \frac{\gamma}{2\pi}$$

إن وجود هذا التردد يجعل من NMR طريقة قياس طيفية طينية (تجاوبية).

أما عندما يكون السبين النووي لبعض العناصر الذرية معدوماً، فإن هذه العناصر لا تملك عزماً مغناطيسياً نووياً وبالتالي لا يمكن دراستها بالطنين المغناطيسي النووي (N.M.R) وأهم هذه العناصر هي ^{12}C و ^{16}O .

أما البروتون (^1H) الذي اسبينه النووي لا يساوي الصفر فيدرس جيداً في NMR بسبب وفرته الطبيعية وارتفاع ثابت تناسب الجيرومغناطيسية.

- الاسترخاء (حالة البروتون)

يمكن اعتبار العزم المغناطيسي للبروتون كمتجه، سلوكه مشابه لسلوك قضيب مغناطيسي موضوع في حقل ثابت $\vec{B}_0$ ، فهو يتجه للتوازن موازياً أو معاكساً لهذا الحقل.

فمن أجل عدد كبير من البروتونات، يعطى التوزيع بقانون بولتزمان الإحصائي:

عدد البروتونات الموازية (N_p) أكبر بمقدار ضئيل من عدد البروتونات المعاكسة (N_a) وعملياً فالنسبة:

$$\frac{N_p}{N_a} = e^{\frac{hB}{2KT}}$$

لا تختلف عن الواحد إلا بحوالي 10^{-5}

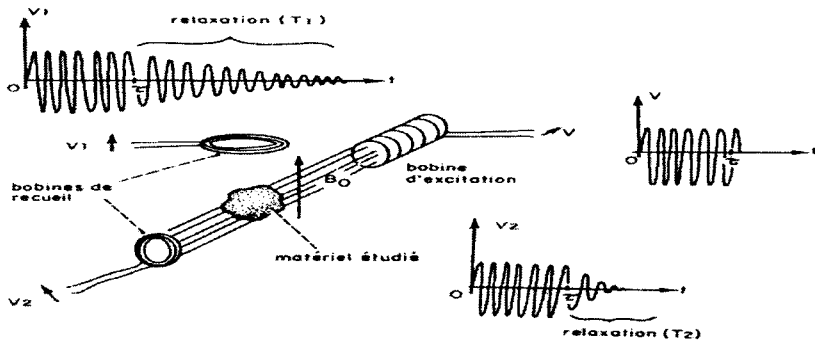
كما أن العزم المغناطيسي $\vec{M}$ لجموع البروتونات هو عبارة عن محصلة العزوم الفردية. وعند التوازن يكافئ هذا العزم $\vec{M}$ قضيئاً مغناطيسياً يوازي $\vec{B}_0$ لأن $N_p > N_a$ ولهذا فإن $\vec{M}$ يوازي $\vec{B}_0$ عند التوازن.

إذاً بطريقة ما نبحنا في إبعاد $\vec{M}$ عن وضع توازنه، فإنه يعود إليه ببطء دائراً حول $\vec{B}_0$ بتردد يسمى تردد لارمور وهو مماثل لتردد الطنين المعطى بالعلاقة:

$$\nu_0 = B_0 \frac{\gamma}{2\pi}$$

وإن رأس $\vec{M}$ يرسم شكلاً حلزونياً.

إن هذا الدوران الذي يولد حقلاً مغناطيسياً متغيراً يولد في الملفات الموازية والعمودية على $\vec{B}_0$ (الشكل 4) القوى المحركة الكهربائية V_1 و V_2 بتردد ν .

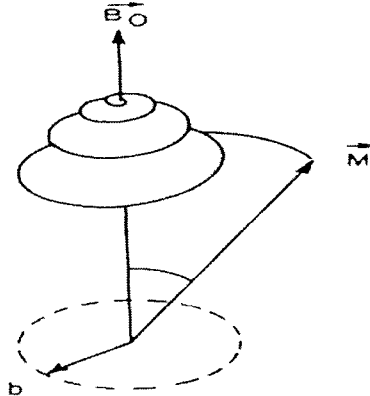


الشكل 4

ففي تجربة (الشكل 5) يسمح الحقل المغناطيسي ($\vec{b}$) للموجة الكهرومغناطيسية المحرصة بإبعاد $\vec{M}$ عن وضع توازنه. وبما أن $\vec{b}$ حقل دوار عمودي على $\vec{B}_0$. نستطيع أن نبين أن $\vec{M}$ سيدور حول $\vec{B}_0$ (بتردد $\nu = \frac{B_0}{2}$) وحول $\vec{b}$ (بتردد $\nu = \frac{b}{2}$)؛ ولهذا تكون الحركة الناتجة معقدة وملاحظة الاسترخاء يكفي حذف $\vec{b}$ عندما لا تكون $\vec{M}$ موازية $\vec{B}_0$ وعلى العموم نحذف $\vec{b}$ عندما تكون $\vec{M}$ عمودية على $\vec{B}_0$.

يسمح التحليل المفصل لظاهرة الاسترخاء على المستوي الذري بفهم وجود ثابتي الزمن T_1 و T_2 .

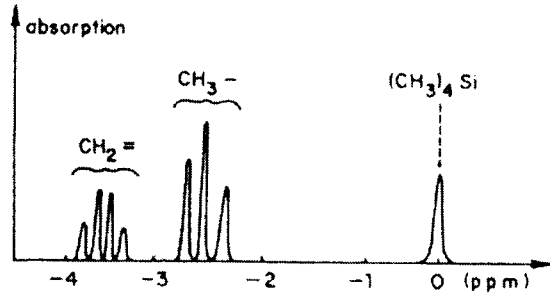
كما نبين أيضاً من أن T_1 (زمن استرخاء اسبين - شبكة). يميز التأثيرات المتبادلة ما بين كل بروتون وذرات الوسط الأخرى. و T_2 (زمن استرخاء اسبين - اسبين) يميز التأثيرات المتبادلة ما بين البروتونات.



الشكل 5

III - تطبيقات بيولوجية:

يتعلق تردد التجاوب (أو لارمور) لبروتون بالحقل المغناطيسي الثابت الموجود فيه. وهذا الأخير ينتج من الحقل الخارجي B_0 والحقول الموضعية المتوقعة الناتجة من ذرات مجاورة (كبروتون آخر)، وبالنتيجة فإن طيف NMR لبروتونات جزيء عضوي معقد يحتوي على عدة قمم (الشكل 6) مميزة لمجموعات كيميائية تحتوي البروتون وبنية الجزيء. يسمح NMR مثلاً بإيجاد أو إثبات هندسة السكريات والستيرويدات والكالويدات.



الشكل 6

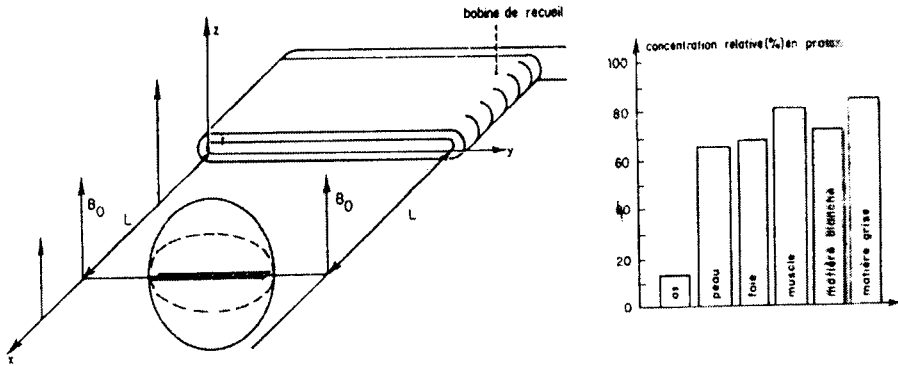
IV - تطبيقات طبية:

1 - التصوير بواسطة NMR:

من الممكن الحصول على ألواح تصوير مقطعي لتوزيع البروتونات وأزمان الاسترخاء T_1 و T_2 في الجسم. وإن طرق التصوير المستخدمة تستند جميعها على التأثير المرافق للحقل المغناطيسي للموجة الكهرومغناطيسية وبواحد أو عدة حقول مغناطيسية وسكونية.

- طرق سكونية: يسمح ملف مسطح بقياس امتصاص الموجة الكهرومغناطيسية في شريحة سماكتها محدودة بسماكة الملف.

فعند تطبيق حقل منتظم $\vec{B}_0$ ، يمكن قياس (عند التجاوب) الامتصاص المتعلق بالكمية الكلية للبروتونات في الشريحة، وعند نفس الشروط يستعاض عن $\vec{B}_0$ بحقل $\vec{B}(x)$ متغير في الحيز بتابعية المسافة x عن الملف، وبالتالي لا يحدث الطنين (التجاوب) إلا على المسافة من الملف حيث $\vec{B}(x)$ يساوي $\vec{B}_0$ وإن قياس التركيز المتوسط للبروتونات يتم في عنصر مستطيل (الشكل 7).



الشكل 7

جدول II

وبتغيير $\vec{B}(x)$ يتم تغيير المسافة عن الملف حيث الحقل يساوي $\vec{B}_0$ وبالتالي يتغير مكان عنصر القياس. وبالمسح هكذا لكل العينة يتم الحصول على توزيع التركيز المتوسط للبروتونات المسقطة على المحور X .

ثم يتم بعد ذلك تدوير العينة أو الجهاز حول العينة وتعاد القياسات وهكذا دواليك. وإنه ابتداء من جميع هذه الإسقاطات يسمح الحاسوب بإعادة تشكّل التوزيع البروتوني في المستوي المقطعي x,y على شكل موزائيك.

– طرق تحريكية:

باستخدام الجهاز السابق يتم تهيج عنصر من العينة على شكل مستطيل وإنه عند لحظة محددة بشكل جيد يتم قطع الحقل المحرض فنلاحظ الاسترخاء عند تردد ν لكامل هذا العنصر الحجمي. كما يمكن أيضاً بعد قطع الحقل المحرض تغيير الحقل $\bar{B}$ بغية تغيير طول العنصر الحجمي وفق منحى y ، في هذه الحالة سيتغير تردد الاسترخاء على طول العنصر وبالتالي ستكون القوى المحركة الكهربائية V_1 و V_2 على شكل إشارات معقدة وإن تحويلات فورية لها تكون متناسبة مع تركيز البروتونات على طول العينة.

وهنا أيضاً الحاسوب هو الذي يتولى الحسابات. وبتغيير مكان عنصر القياس نحصل تدريجياً على لوحة توزيع البروتونات.

تسمح هذه الطريقة وعلى عكس طريقة الإسقاطات بالحصول على لوحة التوزيع الزمنية للاسترخاء.

هذا ويوجد عدد آخر من الطرق التحريكية تستخدم دائماً الحقل السكوني $\bar{B}$ المتغير ضمن الحيز ومع الزمن، وهذا يسمح بانتخاب حجم القياس، فمثلاً تطبيق

حقل $\vec{B}$ متغير وفق منحاه الخاص يسمح بانتخاب شريحة للقياس دون الحاجة لاستخدام ملف مسطح جداً وإن هذه الطرق الأخرى تستخدم أيضاً تحويل فورييه. كما أنها تركز على ظاهرة التجاوب وعلى ظاهرة الاسترخاء. وبالمقارنة مع الطريقة السكونية للاسقاطات فهي تسمح بالحصول ليس فقط على أفضل الصور خلال زمن أقصر، بل أيضاً بالحصول على معلومات إضافية (T_1 و T_2) وإن الطريقة السكونية عملياً غير مستخدمة وإنه لم يتم التكلم عنها إلا بهدف تعليمي.

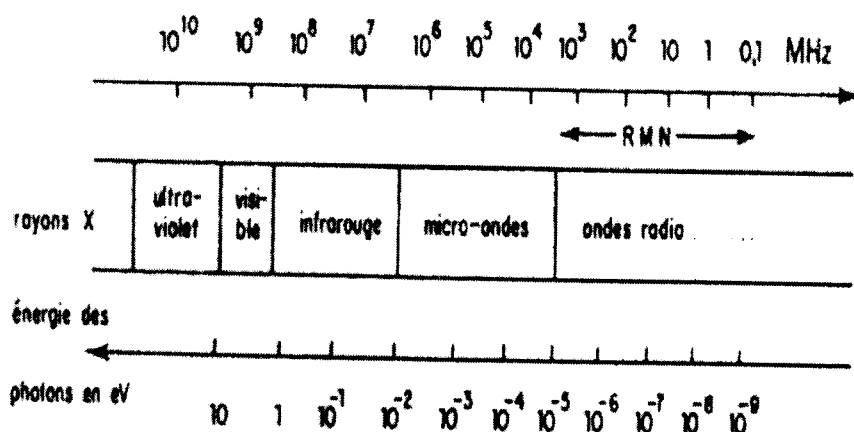
2 - التحليل الطيفي للعضو حي:

بتضافر التقنيات الطيفية والتصويرية يكون ممكناً تحديد طيف NMR لعنصر حتمي شبه نقطي للعضو. وهكذا يكون ممكناً قياس بطريقة خارجية تركيز ATP لبعض أجزاء الكبد.

٧ - الفائدة الطبية لتقنيات NMR:

يعتبر التصوير باستخدام NMR طريقة تصوير طبية هامة جداً لأنها:

- تسمح بالحصول على صور بالتصوير المقطعي لتوزيع العناصر الذرية مثل $^1H, P, \dots$ وأزمنتها الاسترخائية، وإن المعلومات التي يتم الحصول عليها مختلفة عما يتم الحصول عليه بالصورة الإشعاعية، وبما أن محتوى الماء (إذاً بروتونات) يتغير من نسيج إلى آخر (جدول II) لهذا يسمح NMR بالحصول على صور بالتصوير المقطعي تمثل البنى التشريحية المختلفة.



جدول III

- غير ضارة؛ لأن الطاقة الفردية للفوتونات المحرصة (10^{-5} - 10^{-9}) eV صغيرة جداً بالمقارنة مع طاقة التهيج الحراري عند درجة حرارة الوسط (10^{-2}) eV (جدول III) وإن الأمواج المستخدمة غير مؤينة والطاقة المبذولة بشكل حراري مهملة.

- أزمان استرخاء بروتونات نسيج سرطانية مختلفة عن تلك الخاصة بالنسيج السليمة. أي إن خواص روابط جزيئات ماء نسيج سرطانية مختلفة عن تلك للنسيج السليمة. كما أن إمالة النسيج السرطانية أو النسيج السليمة الملاصقة لها مباشرة مختلفة عن إمالة النسيج المحيطة؛ لذا يسمح NMR بتشخيص الأورام في العضو الحي.

تعتبر تقنيات NMR المطبقة في الطب في مرحلة التوضيح، وإن الأجهزة المستخدمة مكلفة جداً. لكن الصور التي يتم الحصول عليها في الوقت الحاضر واضحة جداً.

أخيراً نستطيع التفاؤل بالمستقبل المشرق للتطبيقات الطبية لهذه التقنية.