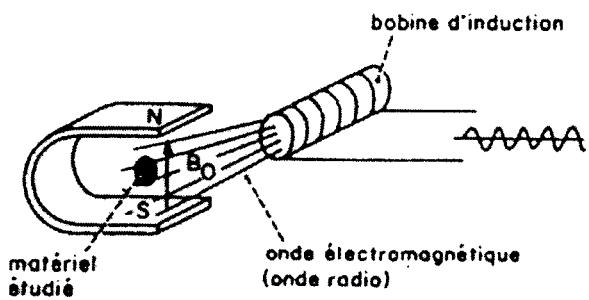
الفصل العاشر

التجاوب المغناطيسي النووي

(N.M.R)

I – الامتصاص والاسترخاء

– **الامتصاص**: نخضع مادة ما إلى حقل مغناطيسي ثابت $\overrightarrow{B_0}$ ثم نطبق عليها موجة كهرطيسية 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 بتابعية التردد، وهو عبارة عن طيف مكون من قمم وإن تردد كل قمة مميز ببعض العناصر الذرية (جدول I) من أجل $\overrightarrow{B_0}$ محدد. وإن شدة كل قمة منه متناسبة مع تركيز العنصر الموافق في العينة المدروسة.

النظير	تردد التجاوب (MHZ) في حقل شدته (1) تسلا	$\frac{\gamma}{\gamma_H}$
^{1}H	42,6	1
^{2}H	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

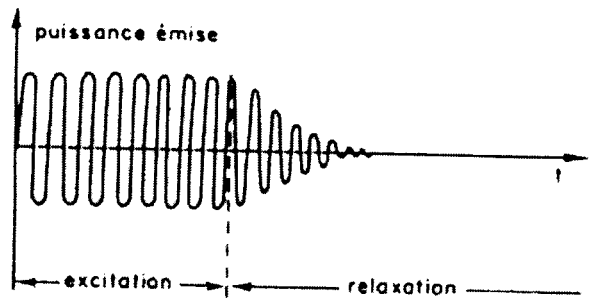
جدول I

– الاسترخاء

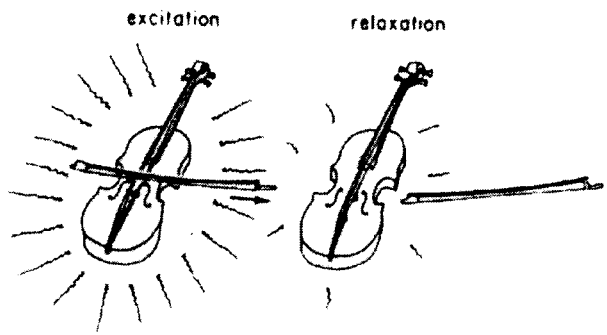
نوجه منحى الموجه الكهرطيسية عمودياً على $\overrightarrow{B_0}$ ثم نضبط ترددها على قيمة موافقة لقمة من طيفها المحدد بالتجربة السابقة.

لنفترض بأن المادة تخضع لهذه الموجة 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 الموجة الكهرطيسية وهذه هي ظاهرة الاسترخاء، وإن الجملة تعود إلى حالتها التوازنية بعد أن كانت مهيجة بالموجة الكهرطيسية (الأشكال 2 و3) وأن هذا الحقل المقاس بالقوى المحركة الكهربائية V_1 وV_2 المحرضة في ملفات تحريض موضوعة عمودياً وموازية Bo، له ثوابت زمنية مختلفة هي على التسلسل T_1 وT_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 كهرطيسية ترددها ν بالعلاقة التالية: $(\Delta E)_1 = h\upsilon$.

ويمكن لذرة أن تمتص هذه الطاقة إذا وافقت انتقال طاقتها المغناطيسية النووية.

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

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

حيث γ يسمى ثابت تناسب الجيرومغناطيسية وهـــو ممـــيز للـــذرة المعتـــبرة (جدولI).

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

$$\nu_o = B_O \frac{\gamma}{2\pi}$$

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

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

أما البروتون (^1H) الذي اسبينه النووي لا يساوي الصفر فيـــدرس جيـــداً 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 $\overrightarrow{B_o}$، فهو يتجه للتوازن موازياً أو معاكساً لهـــذا الحقل.

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

عدد البروتونات الموازية (Np) أكبر بمقدار ضئيل من عدد البروتونات المعاكسة (Na) وعملياً فالنسبة:

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

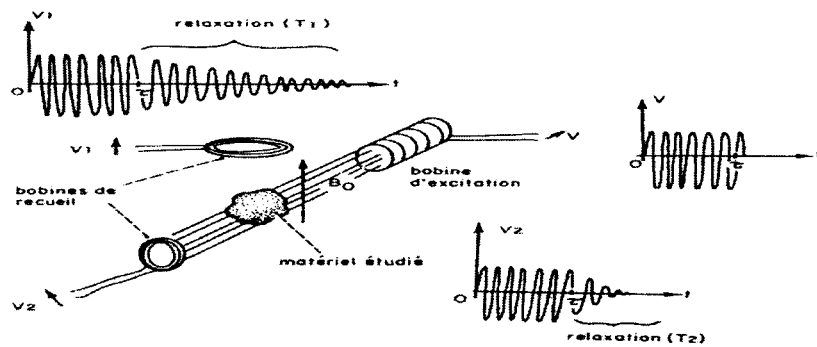
لا تختلف عن الواحد إلا بحوالي 10^{-5}

كما أن العزم المغناطيسي $\vec{M}$ لمجموع البروتونات هو عبارة عن محصلة العزوم الفردية. وعند التوازن يكافئ هذا العزم $\vec{M}$ قضيباً مغناطيسياً يوازي $\vec{B_o}$ لأن Np > Na ولهذا فإن $\vec{M}$ يوازي $\vec{B_o}$ عند التوازن.

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

$\nu_o = B_O \frac{\gamma}{2\pi}$ وإن رأس $\vec{M}$ يرسم شكلاً حلزونياً.

إن هذا الدوران الذي يولد حقلاً مغناطيسياً متغيراً يولد في الملفات الموازية والعمودية على $\vec{B_o}$ (الشكل 4) القوى المحركة الكهربائية V_1 وV_2 بتردد ν.

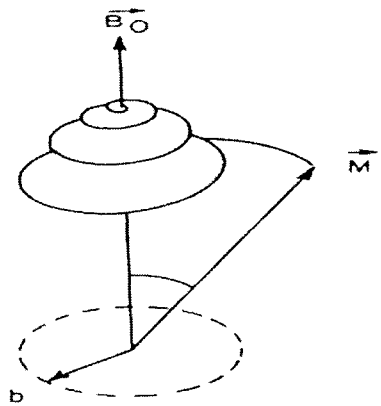


الشكل 4

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

يسمح التحليل المفصل لظاهرة الاسترخاء على المستوي الذري بفهم وجود ثابتي الزمن T_1 وT_2.

كما نبين أيضاً من أن T_1 (زمن استرخاء اسبين - شبكة). يميز التأثيرات المتبادلة ما بين كل بروتون وذرات الوسط الأخرى. وT_2 (زمن استرخاء اسبين - اسبين) يميز التأثيرات المتبادلة ما بين البروتونات.

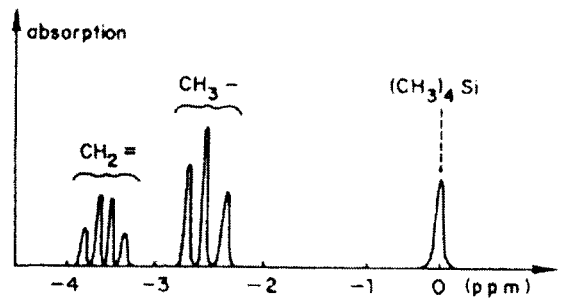


الشكل 5

III – تطبيقات بيولوجية:

يتعلق تردد التجاوب (أو لارمور) لبروتون بالحقل المغناطيسي الثابت الموجود فيه. وهذا الأخير ينتج من الحقل الخارجي $\overrightarrow{B_o}$ 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 والستيروئيدات والكالوئيدات.



الشكل 6

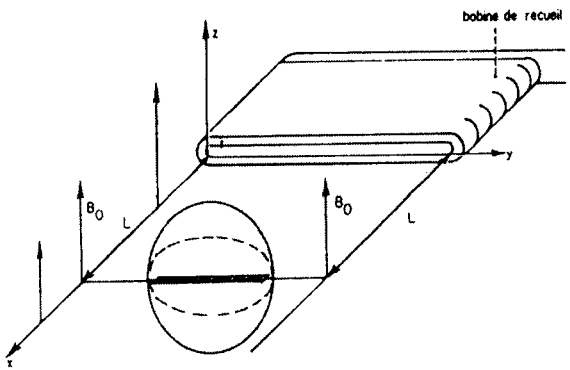
IV – تطبيقات طبية:

1 – التصوير بوساطة NMR:

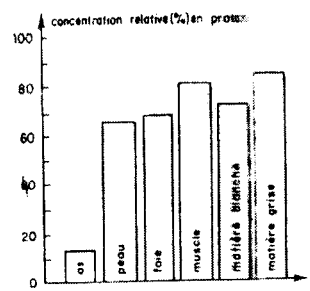
من الممكن الحصول على ألواح تصوير مقطعي لتوزع البروتونات وأزمان الاسترخاء T_1 وT_2 في الجسم. وإن طرق التصوير المستخدمة تستند جميعها على التأثير المرافق للحقل المغناطيسي للموجة الكهرطيسية وبواحد أو عدة حقول مغناطيسية وسكونية.

– **طرق سكونية:** يسمح ملف مسطح بقياس امتصاص الموجـــة الكهرطيســية في شريحة سماكتها محدودة بسماكة الملف.

فعند تطبيق حقل منتظم $\overrightarrow{B_0}$، يمكن قياس (عند التجاوب) الامتصاص المتعلـق بالكمية الكلية للبروتونات في الشريحة، وعند نفس الشروط يَستعاض عن $\overrightarrow{B_0}$ بحقـل $\vec{B}(x)$ متغير في الحيز بتابعية المسافة x عن الملف، وبالتالي لا يحدث الطنين (التجاوب) إلا على المسافة من الملف حيث $\vec{B}(x)$ يساوي $\overrightarrow{B_0}$ وإن قياس التركـــيز المتوســط للبروتونات يتم في عنصر مستطيل (الشكل 7).



الشكل 7



جدول II

وبتغيير $\vec{B}(x)$ يتم تغيير المسافة عن الملف حيث الحقل يساوي $\overrightarrow{B_0}$ وبالتـــالي يتغير مكان عنصر القياس. وبالمسح هكذا لكل العينة يتم الحصول على توزع التركيز المتوسط للبروتونات المسقطة على المحور X.

ثم يتم بعد ذلك تدوير العينة أو الجهاز حول العينة وتعاد القياسات وهكـــذا دواليك. وإنه ابتداء من جميع هذه الإسقاطات يسمح الحاسوب بإعـــادة تشـــكل التوزع البروتوني في المستوي المقطعي x,y على شكل موزاييك.

- طرق تحريكية:

باستخدام الجهاز السابق يتم تهيج عنصر من العينة على شكل مستطيل وإنـــه 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 $\vec{B}$ بغية تغيير طول العنصر الحجمي وفق منحى y ، في هـــذه الحالـــة ســـيتغير تـــردد الاسترخاء على طول العنصر وبالتالي ستكون القوى المحركة الكهربائية V_1 وV_2 على شكل إشارات معقدة وإن تحويلات فورية لها تكون متناسبة مع تركيز البروتونـــات على طول العينة.

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

تسمح هذه الطريقة وعلى عكس طريقة الإسقاطات بالحصول علـــى لوحـــة التوزع الزمنية للاسترخاء.

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

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 ترتكز 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 وT_2) وإن الطريقة السكونية عملياً غير مستخدمة وإنه لم يتم التكلم عنها إلا بهدف تعليمي.

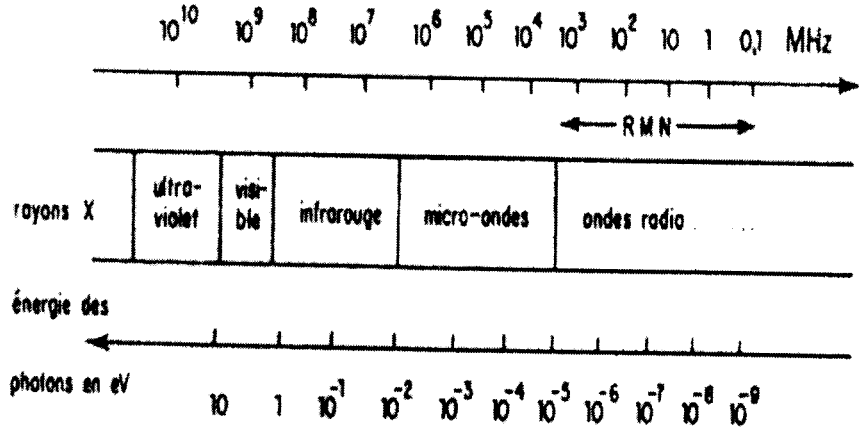
2 – التحليل الطيفي لعضو حي:

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

V – الفائدة الطبية لتقنيات NMR:

يعتبر التصوير باستخدام NMR طريقة تصوير طبية هامة جداً لأنها:

- تسمح بالحصول على صور بالتصوير المقطعي لتوزع العناصر الذرية مثل $^1H, P...$ 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 المحرضة ev (10^{-5}-10^{-9}) صغيرة جداً بالمقارنة مع طاقة التهيج الحراري عند درجة حرارة الوسط ev ($\approx 10^{-2}$) (جدول III) وإن الأمواج المستخدمة غير مؤينة والطاقة المبددة بشكل حراري مهملة.
- أزمان استرخاء بروتونات نسج سرطانية مختلفة عن تلك الخاصة بالنسج السليمة. أي إن خواص روابط جزيئات ماء نسج سرطانية مختلفة عن تلك للنسج السليمة.

كما أن إماهة النسج السرطانية أو النسج السليمة الملامسة لها مباشرة مختلفة عن إماهة النسج 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.