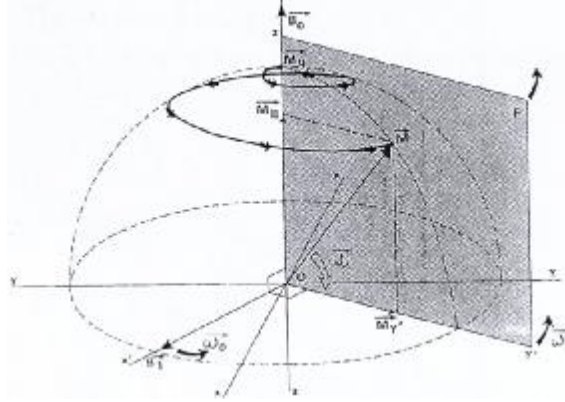


9.11. المبادرة الحرة، زمن التراخي (relaxation)

إن إيقاف تأثير المجال المغناطيسي H_0 (المهيج) يعني إيقاف حركة المبادرة الدائرية الناتجة عن الحقل، وهذا يعني أن البروتون سيعود إلى حركة المبادرة الأساسية حول المحور Z . وعلى هذا لن تكون العودة سريعة وإنما متخامدة كتخامد تابع أسي وسبب ذلك العطالة الموجودة في البروتون، تسمى حركة المبادرة المتخامدة هذه بالمبادرة الحرة.

إذن تدور النقطة M - وهي نهاية شعاع العزم المغناطيس OM متبعة في مسارها المتخامد الحلزوني المبدئي (في أثناء التهيج) العمودي على المجال H_0 محددة نهاية مرحلة التهيج.

تلك البروتونات تحرر طاقتها وذلك باليتين تم البرهان عليهما باستعمال أجهزة خاصة سميانهما (أي الآلتين) زمن التراخي سبين - محيط والثانية هي زمن التراخي: سبين-سبين كما في الشكل (12-11)

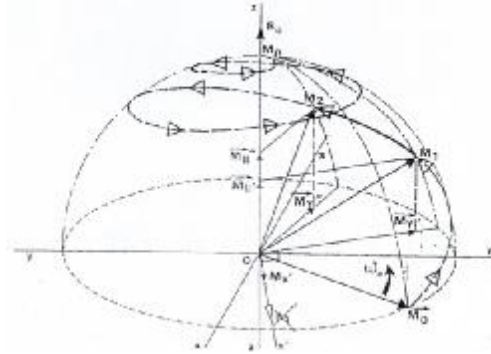


الشكل (12-11). يبين الإحداثيات الآنية للعزم الجاهري

11. 9. 1. زمن التراخي سبين - محيط

أطلقنا مصطلح زمن التراخي هنا على تبادل الطاقة بين البروتون ومحيطه الخارجي كإلكترونات المتعلقة بالذرة التي ندرسها أو إلكترونات ذرات أخرى. وبشكل عام فإن تبادل الطاقة هو تأثير كل ما يحيط بالبروتون المدروس، تحرر البروتونات المهيجة كمية من الطاقة لكي تعود إلى حالتها العادية وتلك الطاقة المحررة تتبدد في المحيط البروتوني. ويمكننا أن نعد هذه الظاهرة، ظاهرة معاكسة تماماً للتهييج الذي تمتص فيه البروتون كمية من الطاقة، وإن عودة البروتونات للحالة العادية يعنى عودة مركبة العزم الجاهري M إلى حالتها العادية متبعة للعودة مساراً حلزونياً تختلف خطوته باختلاف طبيعة العينة المدروسة، أكانت لزجة أو سريعة التطاير.

تتحرر الطاقة من البروتونات كما في الشكل (11-13) ويحدث تحرير الطاقة بإتباع عزم المغنطة الجاهري شكلاً حلزونياً دوائره متقاربة جداً في النهاية مع أنها كانت متباعدة في البداية وذلك بغض النظر عن طبيعة العينة المدروسة، حتى تعود النقطة M لتتطبق على المحور (Z) ، محور المجال المغناطيسي H_0 . إذن مركبة المغنطة M_{II} تعود إلى قيمة البدء M_0 أي M_y فهي تنتهي إلى قيمة منعدمة انظر الشكل (11-13).



الشكل (11-13). المبادرة الحرة - زمن التراخي سبين محيط

أما ظاهرة زمن التراخي سبين - محيط فيعبر عنها بالعلاقة التالية:

$$M_{11} = M_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}} \right)$$

T_1 زمن التراخي سبين - محيط وتعيينه هام قبل دراسة السوائل ذوات الصفات الخاصة (لزوجة أو تطاير مثلاً) لأن معرفة هذا الزمن تمكننا من الحصول على أفضل الأطياف المغناطيسية النووية.

11. 9. 2. زمن التراخي (relaxation) سبين-سبين

عندما يعطي البروتون طاقته للبروتونات المحيطة به، فإن زمن هذه الظاهرة يسمى زمن التراخي سبين-سبين، تلك الظاهرة التي تسهم في عودة البروتونات إلى التوازن (الحالة العادية)، تخص هذه الآلية التبادل الطاقوي الذي يحدث بين البروتونات في الجملة نفسها، فإذا كان لدينا في العينة السائلة أو الغازية بروتون واحد قد تهيّج، فمن الممكن له أن يتبادل طاقة التهيّج هذه مع بروتون عادي (غير مهيج)، بأخذه تلك الطاقة الإضافية وذلك دون أي تبادل خارجي مع المحيط - نتيجة لهذا التبادل الطاقوي تتبادل البروتونات المواضع حسب الشكل (6-11)، ومن يتبع الظاهرة خارج الجملة يرى وكأن شيئاً ما لم يحدث، ولكن في الحقيقة أنه حدث ونتيجة هذا التبادل تأخذ العزوم M أطواراً مختلفة أما العزم الجاهري M فإنه يعود إلى وضع التوازن الشكل (7-11) عن طريقة نقص الأطوال في أقطار حلزون التراخي. الشكل (14-11).

نجد بالتجربة أن نقص M_1 (المركبة من M_x و M_y) يساعدنا على قياس زمن التراخي سبين - سبين.

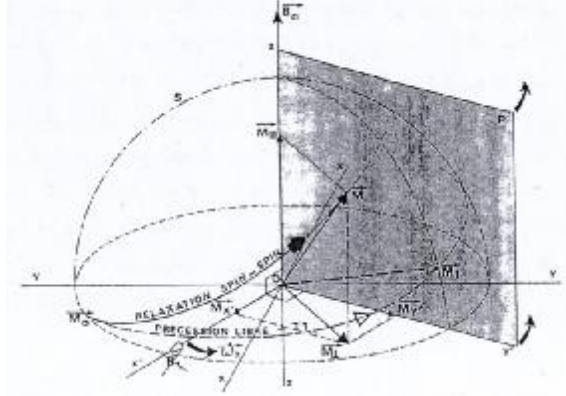
أما المعادلة الرياضية المستخدمة لهذا التعيين فتكتب على الشكل:

$$M_1 = M_0 e^{-t/T_2}$$

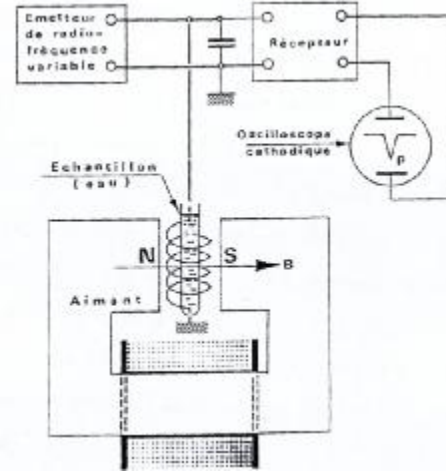
يسمى الثابت T_2 بزمن التراخي سبين-سبين
 يكون زمن التراخي سبين-سبين-محيط في الحالة العامة (T_1) أطول من زمن
 التراخي سبين-سبين (T_2) إلا في بعض حالات خاصة يكون فيها T_2 ينتهي إلى T_1 .

11. 10. إشارة التجاوب المغناطيسي النووي

لنضع داخل مغناطيس كهربائي قوي (مولد للمجال المغناطيسي H_0)
 عينة غنية بعنصر الهيدروجين-كالماء مثلاً وهناك وشيعة أخرى عمودية على
 المجال المغناطيسي H_0 يجتازها تيار ذو تواتر عال الشكل (11-15) تزودنا
 بمجال مغناطيسي آخر H_1 يفيدنا في الحصول على الطاقة الإضافية للتهييج.
 فالمستقبل ورسم الاهتزاز المهبطي الموجودان كوحدة أساسية في
 جهاز مقياس الطيف النووي (*spectrometer*) يكونان مناسبين لإجراء تجارب
 عدة من التجاوب النووي وليس فقط للحصول على طيف التجاوب النووي.



الشكل (11-14). زمن التراخي سبين-سبين



الشكل (11-15). مخطط تمثيلي لإشارة التجاوب المغناطيسي

11. 11. طريقة أجهزة الطيف المعتمدة على الموجة المستمرة (spectrometer-onde continue)

إذا زدنا جهاز مقياس الطيف بمرسل ذي تواتر راديوي متغير يمكنه إرسال أمواج مستمرة متغيرة الطول فإننا نحصل على أطياف مختلفة بمرورنا بقيم تواترات لارمور (Larmor) المحققة للمعادلة:

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

g - نسبة الجير ومغنيتيك للهيدروجين.

H_0 - شدة الحقل المغناطيسي.

أما راسم الاهتزاز المهبطي فيلتقط الموجة التي تزود بالطاقة الإضافية المهيجة. رأينا سابقاً أن حقلاً مغناطيسياً شدته 0.5 تسلا (5000 غوص) يزودنا بتجاوب بروتوني تواتره يساوي 21,3 ميغا هرتز. سيكون وكذلك فإن لنويات الذرات الأخرى كالكربون ^{13}C ، الفلور ^{19}F ، الصوديوم ^{23}Na ، فوسفور ^{31}P

تواترات مختلفة للتجاوب النووي، وتختلف باختلاف قيمة γ .
 إذا وضعنا عينة تحتوي على جميع العناصر السابقة في داخل مغناطيس
 قوي فإننا نحصل على أطيف تجاوبيه لجميع العناصر السابقة ولكن بشدة
 تتناسب مع:

أ- الحساسية الخاصة بكل نواة.

ب- نوعية النواة التي نحن بصدد دراستها.

تلك الطريقة في تحقيق أجهزة التجاوب المغناطيسي النووي ($R.M.N$)
 أصبحت قديمة، دخلت محلها طريقة أخرى مازالت معتمدة
 وتحرز الكثير من التقدم والتحديث حتى الآن ألا وهي:

11. 12. طريقة أجهزة التجاوب المغناطيسي النووي المعتمدة على

الإرسال النبضي

لنعتبر حسب الشكل (11-15) أن المرسل عوضاً عن إرساله لتواتر
 راديوي متغير القيمة- يقوم بإرسال تواتر محدد القيمة، ثابت مساو إلى قيمة
 التواتر المحسوب في العلاقة:

$$u = \frac{gH_0}{2p}$$

أ- علاقة الجيرومغنيتيك γ للعنصر الذي نحن بصدد دراسته.

ب- قيمة شدة الحقل المغناطيسي H_1 للحقل الأساسي.

بالإضافة لهذا، فإن شدة الموجة الراديوية H_1 إذا كانت معروفة القيمة
 فإنه يكفي إرسال نبضات سريعة لمدة:

$$t_1 = p / 2W_1 = \frac{p}{2gH_1}$$

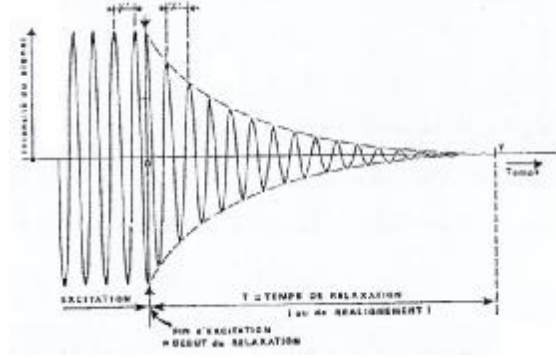
وذلك لتهييج معظم النويات وجعل العزم المغناطيسي الجاهري يدور
بزواوية $p/2$ كما يبين الشكل (11-11).

في نهاية هذا النبض المطبق لمدة قصيرة من قبل الوشيعة المحرصة
ينقلب دور تلك الوشيعة إلى مستقبلية للإشارة المرسله من العينة ذات
البروتونات المهيجة، تلك الإشارة يقوم المستقبل بنقلها إلى راسم الاهتزاز
المهبطي (أو أي جهاز قياس آخر) ويقوم المستقبل بالتقاط الإشارة المحرصة
الناجمة عن حركة المبادرة لحركة البروتونات المهيجة وتسمى عادة (F.I.D)،
إذن في هذه الحالة يمكننا التقاط منح اهتزازي متخامد طوال مدة الاسترخاء
للبروتونات ريثما يعودون إلى الحالة العادية. الشكل (11-16).

زيادة على ما سبق، تعطينا الشدة العظمى لمنحني الاهتزاز المتخامد
إمكانية تقدير عدد النويات التي تقوم بالتجاوب، هذا يبين لنا أن هذه الطريقة
الطيفية غنية بالمعلومات وتمكننا من التعرف على الكثير من المجاهيل المختلفة.

11. 13. قياس زمن الاسترخاء سبين-محيط، سبين-سبين

يتبين لنا مما سبق أنه يمكن الاستفادة من طريقة الإرسال النبضي في
القياس التجريبي لأزمنة الاسترخاء سبين-محيط، سبين-سبين.



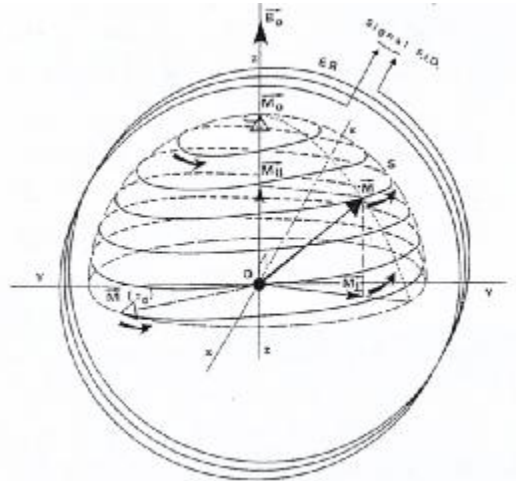
الشكل (11-16). زمن التراخي

تقوم وشيعة التهييج والانتقاط (الإرسال والاستقبال) المتوضعة في المغناطيس الكهربائي بشكل يكون محورها عمودياً على المجال المغناطيسي الأساسي الشكل (16-11) والشكل (17-11).

في نهاية عملية التهييج الذي يدوم زمناً t_0 يكون العزم المغناطيسي الجاهري في موضع لنفترض أنه عمودي على H_0 (وذلك باستعمال نبض قدره $\pi/2$) في تلك اللحظة تبتدئ عملية "المبادرة الحرة" انظر الشكل (13-11) والشكل (14-11) والشكل (17-11) وتستمر في حركة الدوران المتخامد حتى العودة إلى الحالة العادية (غير المهيجة) وكذلك العزم M يدور بسرعة مبادرة محددة بالعلاقة:

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

متبعاً في مساره منحنياً حلزونياً طويلاً.



الشكل (17-11). يبين تلقي الإشارة F.I.D.

بالنظر إلى الوشيعة (مرسل-مستقبل) في الشكل (17-11) نلاحظ أن

الشعاع الأفقي OM_{\perp} مسقط OM في المستوى xoy ، يظهر وكأنه شعاع كهربائي محرض متناوب، ذلك الشعاع هو الذي يحرض في الوشيعية (مرسل مستقبل) الإشارة المتخامدة كما في الشكل (11-16)، الشعاع OM_{\perp} هو الذي يعطينا فكرة عن زمن الاسترخاء سبين-سبين حسب العلاقة التي شهدناها سابقاً T_1 - زمن الاسترخاء سبين-سبين، هذا يعنى أنه بالاعتماد على منحني المبادرة الحرة يمكننا أن نقيس زمن الاسترخاء (*temps de relaxation*): لنعد إلى الشعاع M^{II} ذلك الشعاع الذي يمكننا من قياس زمن الاسترخاء: T_1 (سبين-استقبال) وذلك بتحديد زمن عودة $M_{10} \leftarrow M_0$.

إن التحول البطيء في قيمة M يجعل من الصعب الحصول على إشارة محرّضة في الوشيعية (إرسال - استقبال) وبالتالي لا يمكننا قياس إشارة محرّضة تصف هذه الظاهرة في حين أن M_{\perp} يمكن قياسها وذلك لانحسارها، حيث أن انتهاء قيمتها إلى الصفر يعني أن الإشارة المتولدة عنها ستتحسر أيضاً للصفر في الوقت الذي تكون فيه M_{II} ما تزال غير مطبقة على M_0 (العزم المغناطيسي الجاهري في الحالة العادية دون التهيج)، في الحقيقة نتيجة لعملية التبادل الطاقى بين البروتونات المهيجة وغير المهيجة فإن العزوم المغناطيسية الفردية μ تفقد التوافق في أطوارها المتوجهة بمساعدة الحقل المغناطيسي الشكل (11-10) أما الإشارة المتولدة عن كل عزم مغناطيس لها فإنها ستبدو بالداخل مع الإشارات المتولدة عن الفروع المغناطيسية الأخرى، وبذلك تفقد إشارة التجاوب المغناطيس النووي. "ترابط" العزوم المغناطيسية المشكلة للإشارة وبالتالي لن تتحرض أي إشارة في وشيعية (المرسل - مستقبل) الشكل (11-15) سبب فقدان الإشارة هو أن العزوم المغناطيسية الفردية تكون في أطوار مختلفة على الرغم من أن جميع العزوم الفردية ما تزال مهيجة ولكن بمقادير مختلفة نتيجة هذا

الوضع يخشى إذا أردنا تهييج الجملة من جديد عن طريق الإرسال النبضي
 لأموج ذات تواتر راديوي أن لا نحصل على إشارة التجاوب المغناطيسي
 النووي لصعوبة إعادة تجميع العزوم المغناطيسية الفردية في تواقف واحد مهيج.
 لكي نستطيع قياس زمن الاسترخاء T_1 فليس هناك ثمة طريقة مباشرة؟
 هذا يعني أنه يجب البحث عن طريقة غير مباشرة لإيجاد زمن الاسترخاء من
 خلال عدة تجارب أجريت في هذا المضمار وجدنا أن الطريقة المثلى للقيام بهذا
 العمل هو تهييج جملة النويات عدة مرات بفواصل زمنية ثابتة فإذا كان التهييج
 واقعاً في وقته المناسب كان الفاصل الزمني بين تهييجين متتاليين هو الزمن T_1
 وهو المطلوب أما إذا كان الوقت قصيراً فلا نحصل على إشارة تجاوب (لأننا
 نقوم بتهييج الجملة قبل العودة لحالتها العادية) حالة ثالثة ممكنة وهي التهييج
 بفترات بعيدة والمشكلة في هذه الحالة هو إطالة الوقت لتسجيل طيف مناسب،
 وهذا غير مقبول ووجب علينا تقصير الزمن حتى العودة للحالة الأولى وبذلك
 نكون قد حددنا قيمة زمن الاسترخاء سبين-محيط أو T_1 .

بعد أن درسنا النظرية الأساسية في التجاوب المغناطيسي النووي وأظهرنا
 قياس بعض الثوابت النووية، سنتعرض إلى التعرف على أهم ثابتين يفيدان الفيزيائيين
 والكيميائيين على السواء ألا وهما الانزياح الكيميائي، وثابت التزاوج السلمي.

11. 14. الانزياح الكيميائي () DEPLACEMENT (CHIMIQUE)

لنأخذ جزيئة الكلوروفورم $CHCl_3$ ولنعرضها لظاهرة التجاوب
 المغناطيسي أي لمجال مغناطيسي قيمته H_0 . في الحقيقة عندما نسقط المجال H_0
 على تلك الجزيئة وبالتحديد على ذرة الهيدروجين يكون المجال المغناطيسي

الفعلي المؤثر فيها هو H_{eff} وليس H_0 ، في الحالة العامة تكون شدة الحقل H_{eff} أقل من شدة H_0 ، فما هي يا ترى حقيقة هذا الحقل H_{eff} وما هي علاقته مع الحقل الأساسي H_0 .

لقد وجد أن الالكترونات المحيطة بنواة ما وخاصة السطحية منها المفردة تميل إلى حماية النواة من كل حقل مغناطيسي خارجي، فما إن نسقط الحقل المغناطيسي الخارجي حتى تقوم الالكترونات "بتصفيح" (*blindage*) النواة وحسب قانون لانز تولد حقلاً مغناطيسياً معاكساً لمؤثر وجوده. أي حقلاً مغناطيسياً صغيراً ينقص من قيمة الحقل الخارجي H_0 ، تكون عادة تلك الممانعة متناسبة مع ثابت يدعى "ثابت الحجب" δ (*constante decran*) أما قيمة الحقل H_{eff} فتتناسب مع شدة الحقل الأساسي حسب العلاقة التالية:

$$\begin{aligned} H_{eff} &= H_0 - dH_0 \\ &= H_0(1-d) \end{aligned}$$

أثبتت التجربة أن قيمة الحجب " d "، تتأثر جداً في المحيط الخارجي للنواة التي ندرسها وما أن نغير أي عنصر في الجزيئة حتى وتتغير قيمة d وبالتالي H_{eff} أي أن ثابت البروتون في الجزيئة $CHCl_3$ يختلف عنه في الجزيئة المشابهة CH_3Cl ، ذلك الاختلاف يكون في الحقيقة صغيراً جداً "أجزاء بالمليون" وبالتالي يكون اختلافاً في تواتر التجاوب المغناطيس مما يمكننا من الحصول على طيفين مختلفين للجزيئتين السابقتين، ويعود الفضل في هذه الدقة إلى أجهزة التجاوب المغناطيسي الحديثة التي تستعمل فيها إلكترونيات متطورة قادرة على فعل هذين البعد بينهما هرتز واحد إذا اعتمدنا لذلك جهازاً تواتره الأساس 100 ميغا هرتز.

سنسمي تلك التغيرات في التواتر المطابقة لبروتونات مختلفة بجزيئة كيميائية واحدة بالانزياح الكيميائي" وما قلناه بالنسبة لبروتونات الهيدروجين

يمكن تطبيقه على عنصر الدوتريوم (D) وذلك لتطابق قيمة علاقة الجيرومغنيتيك بالنسبة لهذين العنصرين الهيدروجين (H) والدوتريوم (D) وبالتالي لقيمة تواتري التجاوب.

نستعمل عادة بالنسبة للهيدروجين والدوتريوم سلم قياس مدرّج بين الصفر و30 جزء من المليون أي (ppm) - سلم الكربون ^{13}C المعتمد مدرّج عادة بين الصفر و400 (ppm) أما من أجل الفلور ^{31}F فيصل مدرّج الترقيم في سلم القياس إلى 1000 (ppm).

11. 15. سلم قياس الانزياح الكيميائي

لكي نقيس الانزياح الكيميائي للهيدروجين في جزيئة ماء، يتوجب علينا تحديد الفرق بين تواتر تجاوب هذا الهيدروجين u وتواتر الحقل المغناطيسي H_0 الأساسي بالنسبة لنواة خالية التصفيح تماماً من أي إلكترون ولنسمي هذا التواتر V_0 . وبما أن هذا القياس ليس بالسهل القيام بتحقيقه لصعوبة الوصول إلى نتيجة دقيقة لذلك السبب، فقد اعتمدت طريقة أخرى للقياس وذلك بمقارنة تواتر التجاوب للنواة المدروسة مع تواتر تجاوب نواة خاصة متخذة باعتبارها مرجع قياس للانزياح الكيميائي.

تلك المادة الكيميائية المحتوية للنواة الخاصة يمكن أن تضاف في أنبوب شعري ندخله في أنبوب قياس التجاوب المغناطيسي النووي ونسمي في هذه الحالة المرجع (خارجي لقياس الانزياح الكيميائي). أو بطريقة أخرى وهي إضافة بضعة نقاط من تلك المادة المرجع في أنبوب يحتوي المادة المراد دراستها بالتجاوب المغناطيسي ونصف المرجع في هذه الحالة بأنه داخلي. يجب أن تكون مادة المرجع للانزياح الكيميائي سهلة التركيب، تتحلل في

أكثر المركبات الكيميائية، متناظرة وجميع ذرات الهيدروجين فيها متكافئة لكي يتكون طيفها من هذب واحد فقط، لذلك فقد وجد أن هذه الشروط يمكن توافرها بجزيئه رباعي ميثيل سيلان أو سيليسوم $(CH_3)_4Si$ كما أنه يمكن استعمال جزيئات أخرى كالنيوبنتان $C(CH_3)_4$ ، سيكلوهكسان C_6H_{12} ، وفي أطيف الكربون نستخدم كبريت الكربون CS_2 أو كربون الكوبونيل $O=C(OCH_3)_2$ وبالنسبة لأطيف الفلور نستخدم المرجع التالي $CFCl_2$: أو الفريون CF_3Cl_2 هذا يعني أن قياس الانزياح الكيميائي يعود إلى قياس فرق التواتر بين هذب عنصر الهيدروجين من الجزيئة المدروسة وهذب عنصر الهيدروجين في جزيئه المرجع كرباعي ميثيل سيلان.

نأخذ المثال التالي: إن بروتون الكلوروفورم $CHCl_2$ يقوم بالتجاوب على تواتر قدره 436 هرتز وذلك بالنسبة إلى تواتر تجاوب ر.م.س (رباعي ميثيل سيليسيوم) في حال استعمال جهاز تواتره الأساسي 60 ميغا هرتز. إذا استعملنا جهاز تجاوب آخر تواتره الأساسي 100 ميغا هرتز فإن تواتر تجاوب الكلوروفورم سيتغير من 436 هرتز إلى التواتر:

$$u = \frac{436 \times 100 \times 10^6}{60 \times 10^6} = 725 Hz$$

هذا يعني أن تواتر التجاوب يختلف باختلاف الجهاز المستعمل ولكي نثبت واحدة قياس الانزياح الكيميائي بالنسبة لجميع الأجهزة باختلاف تواتراتها الأساسية لهذا الهدف اعتمدنا واحدة الجزء بالمليون جزء (ppm) وتكون العلاقة المستعملة للتحويل بين الهرتز.

$$d(ppm) = \frac{\Delta u(H_2) \times 10^6}{\text{تواتر الجهة}} \text{ هي } ppm$$

إن هذه العلاقة تعطينا قيمة واحدة للانزياح الكيميائي حتى في حالة

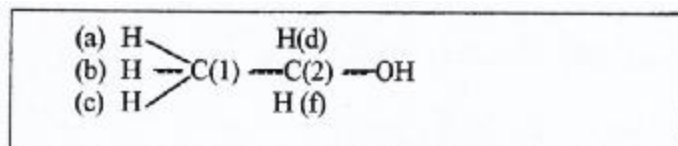
تغيير الجهاز (أي بتغيير التواتر الأساسي)

$$d(ppm) = \frac{436 \times 10^6}{60 \times 100} = 7.25 ppm \quad , \quad d(ppm) = \frac{725 \times 10^6}{100 \times 10^6} = 7.25 ppm$$

هذا الحساب البسيط يبين أننا نحصل على نفس الانزياح الكيميائي بالنسبة للجهازين المختلفين المستعملين.

11. 16. ثابتة التزاوج غير المباشر

إن ثابتة التزاوج غير المباشر ذات تأثير كبير في شكل خطوط الطيف إذ أن الانزياح الكيميائي يحدد خطأ واحداً لجميع البروتونات المتكافئة كيميائية مثل بروتونات الجذر CH_3 أو CH_2 مثلاً تتمتع بروتونات كل جذر بخط واحد (أي هنالك خط واحد لـ CH_3 وكذلك خط آخر كيميائي لـ $-CH_3$) أما انشطار هذا الخط فالذي يتحكم به هو ثابتة التزاوج غير المباشر. ولفهم تأثيرها نأخذ جزيئه الكحول الإيثيلي لننظر إلى الجزيئة:



إن ذرات الهيدروجين الثلاث المرتبطة بذرة الكربون-1- متكافئة ولها خط انزياح واحد قيمته حوالي الواحد (ppm) وارتفاعه ثلاث وحدات بحسب عدد ذرات الهيدروجين التي يمثلها - ولكن ذرات الهيدروجين المرتبطة بذرة الكربون C_2 يكون لها تأثير على ذلك الانزياح بحيث أنها بحسب دورانها تعطي حقولاً جديدة داعمة أو منقصة لقيمة الحقل الأساسي H_0 المؤثر في ذرات الهيدروجين لـ C_1 - ويكون التأثير هو احتمالات دوران لنويات ذرات الهيدروجين فمثلاً يمكن أن يكون دوران النواتين (d) و (f) مع الحقل فنقول أن

نويات الهيدروجين (c,b,a) تخضع لـ H_0 وأيضاً إلى حقل النواة D والنواة f حسب الشكل:

$$1- H_0 + 1/2 + 1/2 = H_0 + 1$$

- الاحتمال الثاني هو دوران النواة (D) مع H_0 و f عكسه فنكتب الاحتمال على الشكل:

$$2- H_0 + 1/2 - 1/2 = H_0$$

- الاحتمال الثالث للنواة (D) عكس والنواة (f) مع الحقل H_0 ، فنكتب:

$$3- H_0 - 1/2 + 1/2 = H_0$$

- الاحتمال الأخير هو أن النواتين (D) و (f) هما عكس H_0 على الشكل:

$$4- H_0 - 1/2 - 1/2 = H_0 - 1$$

وبذلك يصبح لدينا أربع حالات جديدة اثنان منها متطابقتان أما الطيف النهائي لـ CH_3 فيصبح على شكل ثلاثية (TRIPLET) خطها النصفى منها مضاعف الارتفاع يمثل حالتين طاقيتين.

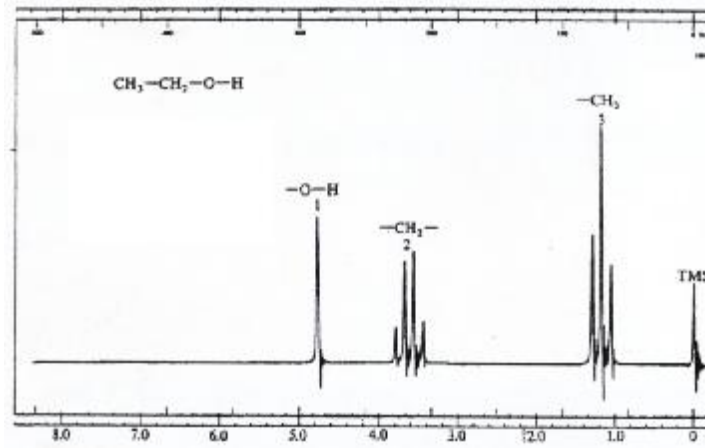
- طيف التجاوب للجذر CH_2 ونستطيع أن نكتب احتمالاته كما فعلنا من أجل CH_3 على الشكل التالي:

$$\left. \begin{array}{l} 1- H_0 + 1/2 + 1/2 + 1/2 = H_0 + 3/2 \\ 2- H_0 - 1/2 + 1/2 + 1/2 = H_0 + 1/2 \\ 3- H_0 + 1/2 - 1/2 + 1/2 = H_0 + 1/2 \\ 4- H_0 + 1/2 + 1/2 - 1/2 = H_0 + 1/2 \end{array} \right\} \text{حالة طاقة واحدة}$$

$$\left. \begin{array}{l} 5- H_0 - 1/2 - 1/2 + 1/2 = H_0 - 1/2 \\ 6- H_0 - 1/2 + 1/2 - 1/2 = H_0 - 1/2 \\ 7- H_0 + 1/2 - 1/2 - 1/2 = H_0 - 1/2 \\ 8- H_0 - 1/2 - 1/2 - 1/2 = H_0 - 3/2 \end{array} \right\} \text{حالة طاقة واحدة}$$

أي يتمتع الجذر CH_2 بأربعة خطوط الاثنان منهما في المنتصف لهما وزن إحصائي يساوي (3).

أما طيف هيدروجين الوظيفة الغولية فهو خط واحد لأنه لا يؤثر ولا يتأثر بالجذور ($-CH_2$) و($-CH_3$) وذلك لوجود عنصر الأوكسجين. بينما في الشكل (18-11) الطيف الكامل لجزيئة الايتانول.



الشكل (18-11). طيف جزيئة الايتانول $CH_3-CH_2=OH$

11. 17. تصوير الدماغ بطريقة الرنين المغناطيسي النووي

يعتبر المرنان هو الجهاز الأحدث تقنية لتصوير الدماغ وبيان وظائفه العضوية. وبما أن تقانة المرنان تعمل على كشف المركبات التي يدخل الهيدروجين بتركيبها مثال ذلك الماء الذي يكون 70% من جسم الإنسان. إذن يمكن الاعتماد على هذه الجزيئة في كشف المادة السنجابية والمادة البيضاء اللتين تدخلان في تركيب الدماغ والمادة الأولى أكثر تميهاً من الأخرى، ونظراً تبدل المحتوى المائي لهذه الأنسجة عند موت الخلايا أو عند اصابتها بأورام

مختلفة الورمية فإنها تبدو بمظهر مختلف عن الأنسجة السليمة أما العظم الكثيف فيظهر طيفه على نحو مغاير وذلك لقلّة كمية الماء التي يحتويها. أما بالنسبة لزمن التراخي T_1 فهو أكثر ملائمة لإظهار الفروق بين المادتين البيضاء والسجابية. أما T_2 فهو أكثر فائدة في إظهار السائل الدماغي الشوكي في الصور.