

## مبادئ التحليل الطيفي باستعمال الرنين المغناطيسي النووي (NMR)

خليل قليفط<sup>1</sup>، عبد الحميد زغداوي<sup>2</sup>

<sup>1</sup>مخبر البحث على المواد الفعالة وتثمين الكتلة الحية، المدرسة العليا للأساتذة، القبة

<sup>2</sup>مخبر ن-جسم وبنية المادة، المدرسة العليا للأساتذة، القبة

[khalil.quelifet@g.ens-kouba.dz](mailto:khalil.quelifet@g.ens-kouba.dz)

### 1. مقدمة

تعتبر أطيف الرنين المغناطيسي طريقة فيزيائية وكيميائية حديثة تفيد في تحليل المركبات العضوية وغيرها، كما تفيد في التعرف على الشكل الفراغي للجزيئات. وهي أطيف تخص أنوية الذرات التي تمتلك عددًا مفردًا من البروتونات بشكل عام "مع بعض الشواذ". كان أول من اكتشف الرنين المغناطيسي هو [إيزيدور إسحق رابي](#) Isidor Isaac Rabi، وهو فيزيائي أمريكي ولد في النمسا، وكان هذا الاكتشاف عام 1938.

تمتاز هذه الطريقة عن غيرها بدقة معلوماتها، وتختلف عن أطيف الأشعة تحت الحمراء التي نتائجها ليست دائمًا دقيقة وتحتل أحيانًا عدة تأويلات واحتمالات. بالإضافة إلى ذلك، فإن أطيف الأشعة ما تحت الحمراء نقطية، أي تعطينا فكرة عن تركيب المادة في نقطة سقوط الأشعة الكهرومغناطيسية عليها. أما أطيف الرنين المغناطيسي فتمثل متوسط تركيب المادة، أي أن الطيف يمثل تركيب المادة كاملة وليس نقاطًا منها.

### 2. اللف الذاتي السبيني

يُعتقد 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، وهذا يعني أن عزم السبين يتغير بقيم منفصلة تساوي ثابت بلانك  $h$  أو مضاعفاته.

ظهر هذا العدد، أي السبين، سنة 1925، بعد اقتراحه من [جورج أولنبيك](#) (George Uhlenbeck) و [صمويل جودسميت](#) (Samuel Goudsmit) لتفسير مزدوج الصوديوم وبعض الظواهر الأخرى، مثل تأثير الحقل المغناطيسي الخارجي على الذرات. وهو العدد الكمي الرابع، لم يظهر في النظرية الكمية وإنما ظهر في النظرية التي طورها [ديراك](#) (Dirac) سنة 1928، والذي مزج بين النظرية الكمية والنسبية وخرج بتابع يصف الإلكترون الذي هو عبارة عن جداء التابع الموجي والتابع الذي يصف السبين.

مطيافية الرنين المغناطيسي النووي (NMR) هي صيغة أخرى لمطيافية الامتصاص يمكن مقارنتها بالمطيافية فوق البنفسجية وتحت الحمراء. فتحت شروط ملائمة للحقل المغناطيسي، تستطيع العينة أن تمتص إشعاعات كهرومغناطيسية في مجال تواترات الراديو من 300م إلى 10م وهذه التواترات تتعلق بخصائص العينة. إن البروتونات والنيوترونات، مثل الإلكترونات، لها عزم حركية سبينية (لفية). تتراكم هذه العزوم العنصرية فيما بينها لتشكل المحصلة التي يُعبّر عنها بالعدد الكمي السبيني النووي الكلي I. تكون هذه المحصلة معدومة عندما تكون كل النيكليدات مقرونة، وتأخذ مضاعفات النصف في حالة وجود نيكليدات غير مقرونة. الأنوية الأكثر استخدامًا في مطيافية الرنين المغناطيسي النووي هي  $^1\text{H}$  و  $^{13}\text{C}$ .

إن التأثير المتبادل بين السبين النووي والحقل المغناطيسي، حسب قوانين الكهرومغناطيسية التقليدية الناتجة من دقيقة مشحونة تدور حول محور - كهربائي دائري، يولد عزم ثنائي القطب  $\mu$ ، مرتبط بشحنة الدقيقة وكتلتها ومعامل لاندي (Landé)  $g_I$  الذي يميز الدقيقة ويمكن حسابه.

في غياب الحقل المغناطيسي الخارجي  $H_0$ ، تكون لحالات السبين النووية نفس الطاقة المرتبطة بالأعداد الكمية  $(2I+)$ ،  $(2I-)$ . في وجود حقل مغناطيسي خارجي، تكتسب النواة تكسب طاقة إضافية مقدارها  $E = \mu H_0$  مما يؤدي إلى وجود فرق في الطاقة مقداره:

$$\Delta E = \frac{\gamma h}{2\pi} H_0$$

وهي العلاقة الأساسية للرنين النووي المغناطيسي (NMR).

في وجود الحقل المغناطيسي الخارجي، تحدث إثارة للإلكترونات تؤدي إلى تباعد مستويات الطاقة فتتجه الحقول الخاصة بالنواة إما في نفس الاتجاه أو في اتجاه معاكس لـ  $H_0$ . يمكن للبروتون امتصاص كمية من الطاقة تساوي طاقته، عندئذ نقول إن شروط الرنين قد تحققت. يمكن حساب تواتر الرنين من علاقة الامتصاص  $\Delta E = h\nu$  والعلاقة الأساسية للرنين النووي المغناطيسي وهي موجودة في سلم تواترات الراديو.

### 3. الانزياح الكيميائي

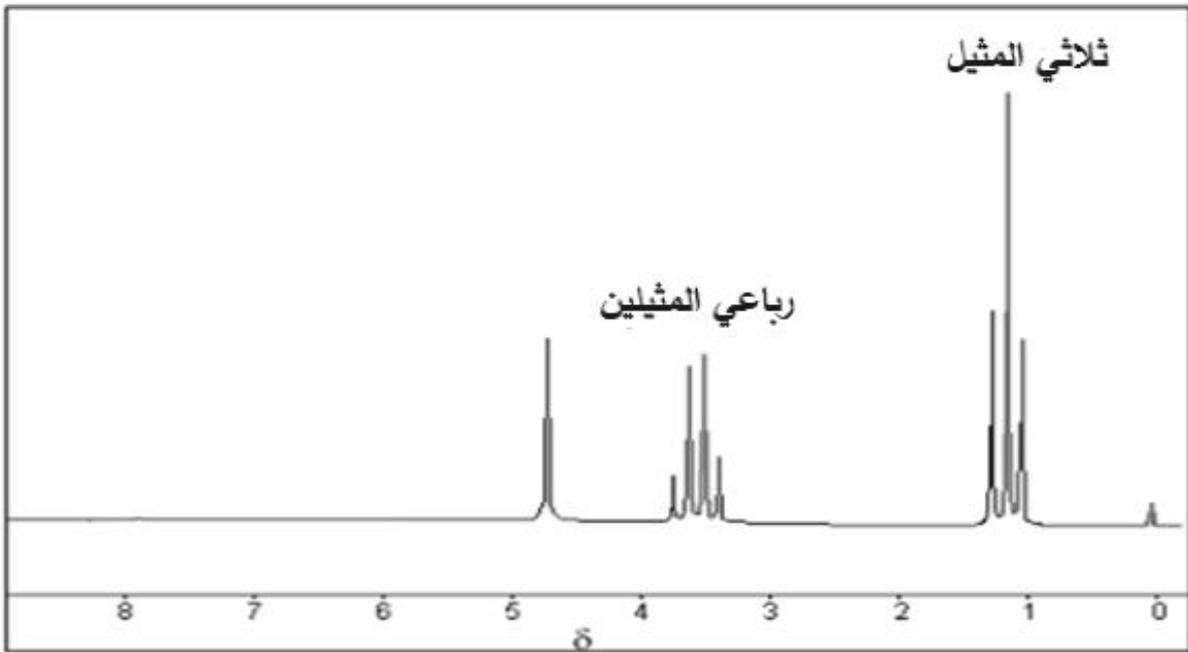
الانزياح الكيميائي هو الفرق في وضعية الامتصاص في مطيافية الرنين المغناطيسي النووي (NMR) الذي سببه المحيط النووي الكيميائي للأنوية، ويُرمز له بـ  $\delta$ ، وهو يُعبر عن تواتر تجاوب الأنوية. حيث هو النسبة بين فرق تواتر تجاوب النواة وتواتر تجاوب أنوية المرجع على تواتر الجهاز. ويعطى بوحدة ppm أي جزء من المليون، ويمكن التعبير عنه بوحدة الهرتز (Hz). تطبيقياً، قيم الانزياح المطلق صعبة التحقيق، ولهذا الغرض تُستعمل حقول مرجعية. بالنسبة للبروتونات، نستخدم رباعي ميثيل سيلان  $\text{Si}(\text{CH}_3)_4$  (TMS) كمرجع، وذلك لكونه يمتاز بعدة مزايا منها: حامل كيميائياً، متطاير بدرجة غليان  $27^\circ\text{C}$ ، ينحل في معظم المحاليل العضوية، يعطي عصابة امتصاص واحدة في الحقول المرتفعة وذلك لأن بروتوناته تمتاز بثابت حجج كبير بسبب الكهروجابية (S). في حالة استخدام الماء أو أكسيد الدوتيريوم كمحلات، فإن (TMS) يُستعمل كمرجع خارجي ويحل محله بروتونات 2،2-، ثنائي ميثيل 2-سيلابنتان 5- سولفونات الصوديوم (DSS) كمرجع. لكن هذا لا يمنع استخدام جزيئات أخرى كمرجع في مكان (TMS) أو (DSS) كالأسيتونتريل والديوكسان.

### 4. العوامل المؤثرة في الانزياح الكيميائي

إن الذرات التي تمتاز بكهروسلبية عالية تسبب انزياحات نحو الحقول الضعيفة، ودرجة هذه الإزاحة تتناسب طردياً مع كهروسلبية الذرات وكذلك المسافة التي تفصلها عنها. تسبب إلكترونات الحلقة البنزينية هي الأخرى انزياحات نحو الحقول المنخفضة للبروتونات الموجودة في جوارها. تعمل إلكترونات الرابطة الإستيلينية على حجج بروتوناتها، وبالتالي يحدث تجاوب عند الحقول العالية.

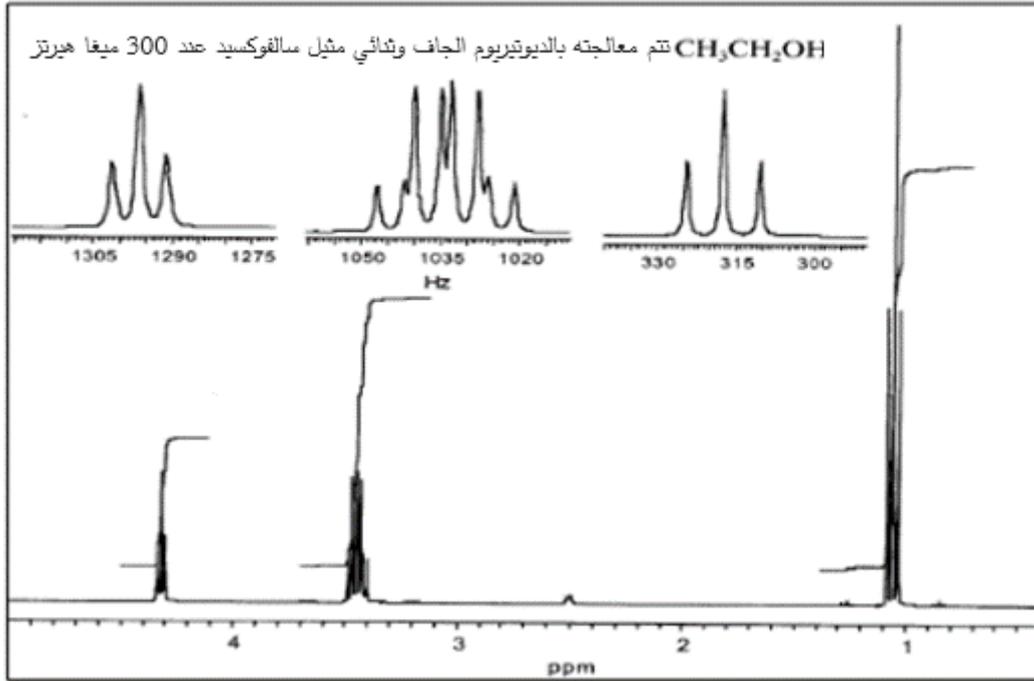
- في حالة الجذور الألكيلية تكون انزياحاتها على الترتيب التالي  $\text{CH} > \text{CH}_2 > \text{R-CH}_3$ .
- الذرات التي تمتاز بكهروجابية عالية مثل السيليكون Si تحجب بروتونات المجموعات الميثيلية ويحدث الرنين عند الحقول المرتفعة.

يُفسر الجسر الهيدروجيني، على سبيل المثال، لماذا يتعلق الانزياح الكيميائي للبروتون الكحولي بالتركيز، درجة الحرارة، والمحل. يخفف الجسر الهيدروجيني من الكثافة الإلكترونية حول البروتون، وبالتالي ينزاح امتصاصه نحو الحقول المنخفضة. تأثير هذا الجسر الهيدروجيني البيئي يقل مع التخفيف، باستخدام محل غير قطبي، وبازدياد درجة الحرارة. أما التخفيف بمحلات قطبية فيجعل الأمر أكثر تعقيداً بسبب تشكيل جسور هيدروجينية بين المحل والبروتون. تعتبر مطيافية الرنين المغناطيسي النووي أداة هامة لدراسة الجسور الهيدروجينية. يؤثر التبادل السريع للبروتون على التزاوج. فعلى سبيل المثال، تظهر إشارة بروتون الإيثانول  $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$  على شكل إشارة أحادية كما يوضح الشكل 1. يعود سبب ذلك إلى التبادل السريع الذي ينتج عن وجود شوائب حمضية تحفز هذا التبادل في البروتونات المجاورة له، وبالتالي لا يحدث تزاوج. يمكننا تقليل سرعة هذا التفاعل بإضافة كمية قليلة من بلا ماءات كربونات الصوديوم أو الألومين، إلخ.



الشكل 1. تأثير التبادل السريع للبروتون على التزاوج

فاستعمال الأسيتون أو DMSO كمحلات يقلل بشكل معتبر من هذا التبادل، وبالتالي تظهر البروتونات الهيدروكسيلية للكحولات الأولية على شكل ثلاثية، والثانوية على شكل ثنائية، وأحادية بالنسبة للكحولات الثالثية، كما يوضح الشكل 2.



الشكل 2. تأثير المذيب على الانزياح

تؤثر قوى فان دير فالس (van der Waals) على الانزياح الكيميائي، حيث تظهر تأثيرات فراغية قوية بين البروتون والذرة المجاورة له (والتي يمكن أن تكون بروتونات أيضاً) عندما تكون هذه الذرة قريبة في موضعها الفراغي بسبب هندسة الجزيء. وتنتج هذه التأثيرات الفراغية من تداخلات وتأثيرات أنصاف أقطار فان دير فالس. يُحدث وجود ذرة ما في الموضع  $\gamma$  بالنسبة للبروتون اختلافاً فراغياً في الكثافة الإلكترونية (نتيجة التنافر بين الذرة والبروتون) فتستقطب الرابطة ويدفع بالشحنة نحو ذرة الكربون، مما يقلل من التناظر السطحي الكروي للكثافة الإلكترونية، والذي بدوره يسبب مساهمة مغناطيسية طردية في ثابت الحجب، ويصبح البروتون معرّياً ويتجاوب عند حقل منخفض غير اعتيادي. في حين يتحرك الانزياح الكيميائي للكربون نحو الحقل المرتفع بسبب زيادة الكثافة الإلكترونية حول ذرة الكربون، فيؤدي إلى حجها. ويُدعى هذا التأثير بالتأثير جاما ( $\gamma$ -effect) لأن البروتون المتأثر يكون في الموضع  $\gamma$  بالنسبة للبروتون (أو الذرة) المؤثرة عليه. وتوجد أمثلة كثيرة على هذه الحالة في الدوريات المختصة المختلفة. تُظهر الدراسات بأن التدافع الناشئ عن قوى فان دير فالس يمكن أن يسبب انزياحاً ضئيلاً نحو الحقل المنخفض بمقدار 1 ppm كحدٍ أعظمي.

## 5. التزاوج السبيني

إن ظاهرة التزاوج سبين-سبين تحدث بين البروتونات وتتم بوساطة من الإلكترونات (تزاوج غير مباشر)، حيث يتأثر سبين الإلكترون بسبين البروتون القريب منه، وهذا الإلكترون يؤثر بدوره على سبين الإلكترون الثاني المكون للرابطة المشتركة وبالتالي على البروتون المحمول على الذرة المجاورة. وبصفة عامة، فإن هذه الظاهرة لا يتعدى مفعولها ثلاث روابط إلا في شروط استثنائية مثل وجود ضغط حلقي في الحلقات الصغيرة (الضيقة) أو الأنظمة المجسرة، وكذلك فعل الميزوميرية في الحلقات الأروماتية أو الأنظمة المترافقة الأخرى.

تعطى ثوابت التزاوج سبين-سبين بين البروتونات دائمة بالهرتز، وتعطينا هذه الثوابت معلومات مفيدة جداً حول البنية الكيميائية. قبل الحديث عن العوامل المؤثرة في ثوابت التزاوج، يجب توضيح طبيعة المعلومات التي يمكن جمعها بعد القياس الدقيق لثوابت التزاوج.

على سبيل المثال، يمكن أن يكون للرابطة المضاعفة C=C ثنائية الاستبدال ثلاث مماكبات مختلفة: cis و trans و geminal، حيث انطلاقاً من حساب ثابت التزاوج بين البروتونات المرتبطة بالرابطة المضاعفة C=C أن نحدد بدقة مكان هذه المتبادلات. حلقة بنزن أيضاً لها أكثر من متبادل (حيث يعتمد عدد المماكبات على عدد المتبادلات)، ويمكننا تحديد المكان الدقيق لهذه المتبادلات بسهولة بحساب ثوابت التزاوج بين البروتونات المرتبطة بحلقة البنزن. تشكل خلال التفاعل الكيميائي مماكبات بنيوية مثل المماكبين exo/endo أو المماكبين syn/anti، ويمكننا التمييز بين هذه المماكبات المتشكلة في معظم الحالات بواسطة ثوابت التزاوج.

إضافة لذلك، يمكن دراسة العمليات الحركية الموجودة في مركب ما بمساعدة ثوابت التزاوج، وحتى يمكننا دراسة الزوايا الثنائية المتشكلة بين النوى المتزاوجة والتحديد التقريبي لأطوال الروابط بواسطة ثوابت التزاوج. وفي الخلاصة، تزودنا ثوابت التزاوج بمعلومات مفيدة حول بنية الجزيئات وتشكيلها وامثالها.

## 6. الجهاز المستعمل

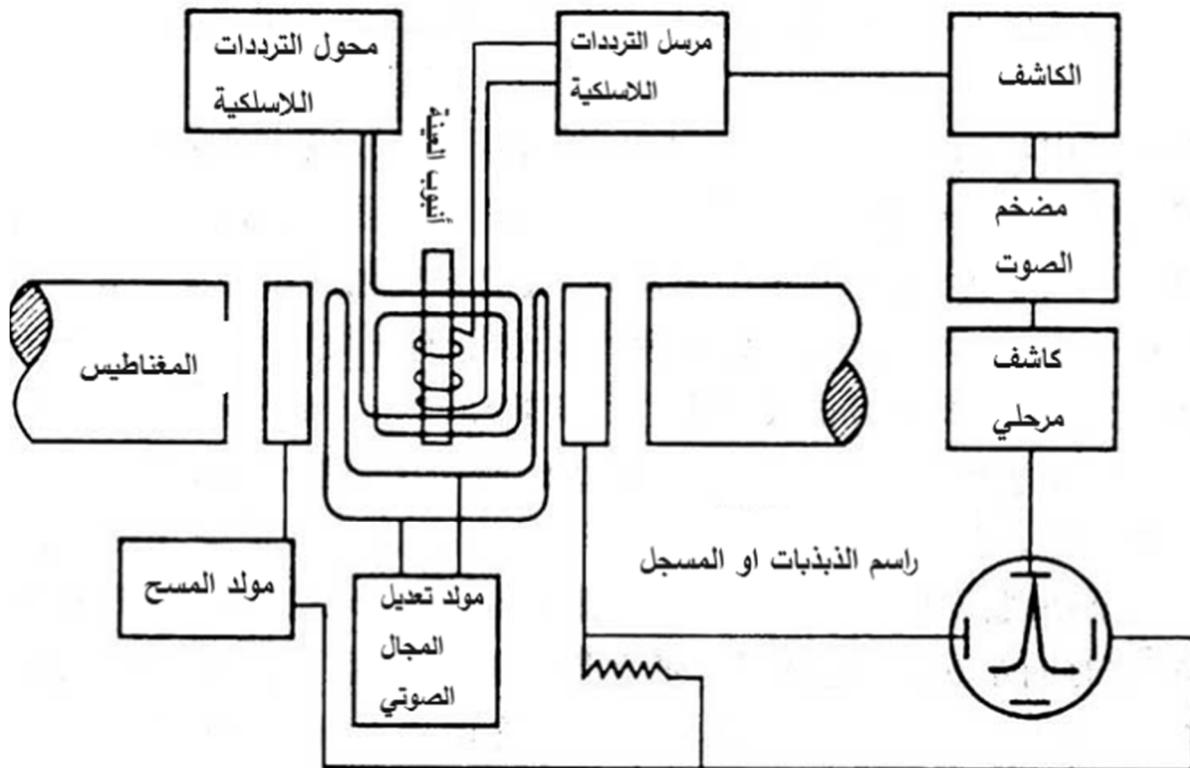
أهم جزء في جهاز NMR هو المغناطيس، كما يوضح الشكل 3، لأن حساسية ودقة مقياس الطيف يعتمدان على جودته. تزداد حساسية ودقة جهاز اختبار NMR مع زيادة قوة المجال المغناطيسي. يجب أن يخلق المجال المغناطيسي المستحث، الذي تم إنشاؤه، بيئة متجانسة ومستقرة وقابلة للتكرار للعينة، ولهذا يُستخدم كل من المغناطيس الدائم والمغانط الكهربائية في هذا الجهاز بشكل واسع، وعادة تكون هذه المغانط على شكل سلك ملتف.

يرتبط الجزء الأكبر من جهاز NMR بالخزان الذي لديه مهمة تبريد الأسلاك فائقة التوصيل، وهذا المبرد مملوء بسائلين شديدي البرودة هما الهليوم والنيوتروجين، حيث تصل درجة حرارتهما إلى 269- درجة مئوية.

يحتوي الجهاز كذلك على ماسح للمجال المغناطيسي، حيث يوضع زوج من اللفات يجعل المجال المطبق يتغير بمقدار صغير من خلال تغيير التيار المباشر بين هذه اللفات. تتحقق بذلك القدرة على تغيير المجال الفعال دون فقدان التجانس، ويصل مدى هذه التغييرات إلى عدة مئات من الملي. عادةً، بالنسبة لجهاز 60 ميغاهرتز، يكون نطاق المسح الميداني حوالي 1000 هرتز، حيث يتم توفير مصدر الطاقة المطلوب لتغيير اتجاه دوران البروتونات أو النوى غير البروتونية بواسطة مصدر تردد الراديو. هذا التردد هو نتيجة المصدر ونقله إلى زوج من اللفات المتعامدة مع مسار المجال، مما يسبب الاستقطاب. يجب أن يُصدر المصدر دائماً تردداً ثابتاً وأن يكون قابلاً للاستخدام في التحليل عالي الدقة.

الخلية هي المكان الذي توضع فيه العينة لاختبار NMR، وهي أنبوب زجاجي بقطر 5 مم. يمكن أيضاً استخدام الأنابيب الأصغر حجماً للعينات ذات الحجم الأصغر. عندما تدخل العينة إلى الجهاز، يقوم تيار سريع من الهواء بتدوير حجرة العينة لإعداد عينة أكثر اتساقاً للفحص.

يُنْتِج إعادة توجيه الدورات إشارة تردد لاسلكي حينما تمتص العينة الطاقة، حيث يتم الكشف عن الإشارات الناتجة عن صدى النوى بواسطة ملف يحيط بحاوية العينة ويكون عمودياً على ملف المصدر. تكون الإشارات الكهربائية المنتجة صغيرة ويجب تضخيمها بمعامل 105 أو أكثر ليتم تسجيلها.



الشكل 3. رسم تخطيطي لجهاز مطيافية الرنين المغناطيسي النووي

### 7. العينات المستعملة

يجب أن تكون العينات قابلة للذوبان لإجراء مطيافية NMR، ومن الأفضل استخدام مذيبات خاصة لا تحتوي على بروتونات. المذيب الأكثر شيوعاً هو "الكلوروفورم"، حيث يحتوي على "الديتيريوم" بدلاً من الهيدروجين، ويُستخدم هذا المذيب عادة للمركبات غير القطبية. تُستخدم مذيبات أخرى مثل الأسيتون، ثنائي ميثيل سلفوكسيد، والماء لتحليل المزيد من المركبات القطبية. وعادة ما يُستخدم رباعي ميثيل سيلان (TMS) كمركب مرجعي. يتم تدوير محلول العينة في أنبوب خاص في المركز المغناطيسي. ويتم وضع جميع أجزاء المحلول تحت مجال مغناطيسي موحد نسبياً من خلال تدوير العينة حول محورها.

لمطيافية NMR عدة أنواع نذكر منها الموجة المستمرة (Continuous Wave (CW)). هذه المطيافيات هي الأقدم، وتعمل بشكل مشابه لطرق الامتصاص؛ أي تسجل إشارة الامتصاص للعينة من مصدر يتم تحليله في نطاق الترددات الراديوية. قد يكون في بعض أجهزة CW تردد المصدر مستقرًا، لكن شدة المجال قد تكون متغيرة. الأطياف المسجلة بهذا النوع من مطيافية تحليل NMR هي أطياف مجال التردد، لأن التغيير في موضع القمم يُحسب من اختلاف التردد مع المعيار المرجعي TMS.

### 8. تحويل فورييه

معظم أجهزة الطيف الكهرومغناطيسي اليوم تعتمد على تحويل فورييه. وقد تم تجهيز هذه الأجهزة المطيافية بمغناطيسات فائقة التوصيل. في هذه الطريقة، تُستخدم طاقة قوية ولكنها قصيرة المدة تسمى النبضة التي تثير كل النوى

في الجزئي في نفس الوقت . يتم تشغيل وإيقاف مصدر مولد تحليل NMR عالي الطاقة بسرعة لتوليد النبض، مما ينتج عنه نبضة تمتد على نطاق من الترددات المتمركزة على نطاق التردد الأصلي. نظرًا لأن الجزئي يحتوي على العديد من النوى المختلفة، يتم إصدار ترددات مختلفة من الإشعاع الكهرومغناطيسي في نفس الوقت. يسمى هذا الإشعاع موت الحث الحر (free induction decay). الأطياف المسجلة بهذا النوع من مقياس الطيف هي أطياف المجال الزمني (time domain). إن جميع النوى تفقد في النهاية طاقة الإثارة، وتقل شدة FID بمرور الوقت. في الواقع، FID عبارة عن مزيج متكيف من جميع ترددات الإشعاع ويمكن أن يكون شديد التعقيد. لتحويل إشارة FID المعقدة والحصول على الترددات الفردية المتعلقة بنوى مختلفة وأخيرًا توفير الطيف، يتم عادة استخدام الطريقة الرياضية لتحليل تحويل فورييه (FT).

### 9. فوائد استعمال الرنين المغناطيسي النووي

تكمّن فائدة مطيافية الرنين المغناطيسي النووي في:

- شدة تواتر رنين البروتون تتغير من نواة إلى أخرى، مثلاً رنين البروتون لذرة الهيدروجين عند 42,576 ميجاهرتز والكربون عند 10,705 ميجاهرتز، عند حقل شدته (1T).
- تواتر رنين أنوية النوع الواحد يتغير حسب المحيط الكيميائي لهذه الأنوية حيث الحقل الفعال الذي تخضع له النواة ليس بالضرورة نفسه بالنسبة لكل الأنوية وخاصة أنه يختلف مع الحقل الخارجي المطبق من طرف المعجب،

تعتبر مطيافية الرنين المغناطيسي النووي للبروتون من أقوى الأدوات التي يستعملها الكيميائي العضوي في تحديد بنية الجزيئات. فبالرغم من المعلومات المتواضعة التي كانت تقدمها لنا أولى المغناط التي تعود نشأتها إلى بداية الخمسينيات، إلا أنها ساهمت بدعم كبير لحل كثير من المشاكل التي يتعرض لها الكيميائي. وبالتقدم الملحوظ في يومنا هذا، أصبحت المغناط الموجهة لهذه التقنية ذات تردد عالٍ جدًا والتي هي اللبنة الأساسية لمكونات جهاز مطيافية الرنين النووي المغناطيسي، حيث أصبحت معرفة بنية الجزيئات أكثر دقة ووضوحًا. في جهاز الـ NMR، يتم وضع عينة من 5 إلى 20 ملغ في 0,4 مل من المحلول داخل أنبوب زجاجي قطره 5 ملم محاط بوشية يمر فيها تيار كهربائي في وسط حقل مغناطيسي، وتغير شدة اللف بالتدريج حتى نصل إلى قيمة محددة لشدة الحقل التي تتجاوب معه العينة.

وفي الأخير، نتحصل على طيف يعبر عن تغيرات الامتصاص بدلالة قوة الحقل المغناطيسي. على سبيل المثال، نلاحظ أن طيف كلورور الإيثيل في  $CDCl_3$  عند 60 ميجاهرتز مفصل كفاية بحيث نستطيع تفسيره. يتكون الطيف من عصابتين، تحتوي الأولى على ثلاث قمم والثانية على أربع قمم، تعبر عن عدد ذرات الهيدروجين وتموضعها في الجزيئة، وهذا يسهل معرفة بنيتها الكيميائية. يمكن أن تكون أطياف الرنين المغناطيسي النووي بسيطة للغاية، وفي بعض الأحيان تكون معقدة جدًا بحيث يصبح من الضروري اللجوء إلى طرق أخرى لتحليلها، مثل الاستعانة بتقنية الرنين ثنائي البعد. للتغلب على هذه التعقيدات، لابد من إتقان الدراسة النظرية للرنين المغناطيسي النووي، مثل فهم الانزياحات الكيميائية.

### 10. مزايا طيف NMR

في الأخير، رغم التطور الهائل لمطيافية الرنين النووي المغناطيسي في مجال التحليل الكمي والنوعي للمواد الكيميائية، إلا أننا نجد أنها تحتوي على مزايا وعيوب كغيرها من تقنيات التحليل. من بين مزاياها:

- إنها تقنية قوية للغاية في التحليل النوعي للمواد.
- لا تحتوي طريقة التحليل هذه على إشعاعات ضارة.
- تتمتع بمرونة عالية في دراسة مجموعة واسعة من المواد البيولوجية.
- أما عيوبها فنستطيع أن نذكر منها:
- لا تعمل مع العينات ذات التركيزات المنخفضة.
- التقنية باهظة الثمن وتتطلب مهارات خاصة للعمل بها.
- تكاليف باهظة لصيانة الجهاز وإصلاحها، وتتطلب بنية تحتية خاصة.

### المراجع

- [1] إزمري، صالح بن طاهر، وآخرون، أسس الكيمياء العضوية المعاصرة، الجزء الأول، دار زهران، جدة، 1993.
- [2] زغداوي، عبد الحميد، وقصار، وليد، الجامع في التحليل الطيفي، ديوان المطبوعات الجامعية، الجزائر، 2020.
- [3] صدقة، محمد وليد محمد، مدخل إلى مطيافية التجاوب النووي المغناطيسي، نور للنشر، موريشيوس، 2020.
- [4] فيسيلوفسكايا، ت.، ماتشينسكايا، أي، برجبالغوفسكايا، ن.، مسائل في الكيمياء العضوية، ترجمة عيسى مسموح، دار مير للطباعة والنشر، 1983.
- [5] Canet, D., LA RMN : concepts et méthodes, interEditions, Paris, 1991.
- [6] Juhg, A., Chimie Quantique Structurale et éléments de spectroscopie théorique, OPU, Alger, 1978.
- [7] Silverstein, R., Basler, G., & Morill, T., Identification spectrométrique de composés organique, De Boeck Université, 1998.

\*\*\*\*\*

