الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا للأساتذة–محمد البشير

الابراهيمي–القبة–الجزائر

قسم العلوم الفزيائية

Ministère de l'enseignement Supérieur
Et de la Recherche Scientifique
Ecole Normale Superieure
Vieux kouba – Alger
Département de physique

الرنين المغناطيسي النووي RMN وتطبيقاته

من اعداد : الأستاذة بوكرش

مقدمــة الكتــاب

يشتكي طلاب سنوات التخرج والطلاب المقبلين على اجتياز مسابقة امتحان الماستر والدكتوراه من النقص الكبير في المراجع المتوفرة في وحدة كيمياء التحليل الطيفي باللغة العربية، خاصة التي تعطي أمثله تطبيقية توضح فيها طريقة تحليل أطياف الرنين النووي المغناطيسي التي يحتاجها الطالب والباحث في آن واحد لكي تساعدهم على الفهم الصحيح لمختلف المفاهيم سواء في الجان ب النظري أو التطبيقي.

أرجو أن أكون بذلك قد أسهمت ولو بجزء يسير في تبسيط ما يدور في ذهن الطالب أو الباحث. كما أتمنى بأنني بهذا العمل قد شاركت في اثراء مكتباتنا العلميـة الجـامعية لمساعدة الطلبة والباحثين تخصص كيمياء أو فيزياء ، وحاولت أن أساهم ولو بشكل ضئيل ، في إثراء لغتنا العربية.

وأختم أخيرا بقول المصطفى صلى اللّـه عليه وسلم:" من سلك طريقا يطلب فيه علما سلك اللّه به طريقا من طرق الجنة، وانّ الملائكة لنضع أجنحتها رضا لطالب العلم".

الأستاذة : بوكرش حبيبة.

الفـــــــــــهرس

المحتوى الصفحة

مقدمة 1

الفصل الاول : عموميات حول الرنين المغناطيسي النووي

I-1 مقدمة 3

I-2 لمحة تاريخية 3

I -3 الكهرباء الساكنة 5

I -3-1الحقل الكهربائي 6

I.1.3.1تعريف الحقل الكهربائي (Notion de champ électrique) 6

I.1.3.2 الحقل الكهرو ساكن الناتج عن شحنة نقطية 7

I.1.3.3 الحقل الكهربائي الناتج عن عدة شحنات نقطية 8

I.1.3.4 الحقل الكهربائي الناتج عن توزيع مستمر للشحنة 9

I -3-2 الكمون الكهربائي 11

I.2.3.1 الكمون الكهربائي الناتج عن شحنة نقطة q 11

I.2.3.2 الكمون الكهربائي الناتج عن عدة شحن نقطية متفرقة 12

I.2.3.3 الكمون الكهربائي الناتج عن توزيع مستمر للشحنة 12

I –3–3 التدفق الكهرو ساكن ونظرية غوص 12

I.3.3.1 التدفق الكهربائي 12

I.3.3.2 نظرية غوص 13

I–4 المغناطيسية 13

I.4.1 تعريف الحقل المغناطيسي 14

I.4.2 شدة الحقل المغناطيسي (قانون بيوت سافارت) 14

I.4.3 قانون أمبير 15

I.4.4 شدة التمغنط (المغنطة) 15

I.4.5 تدفق المجال المغناطيسي 16

I.4.6 القابلية المغناطيسية χ_m 17

I.4.7 القوة المغناطسية 19

I.4.8 معامل النفاذية النسبي μ_r 19

I–5 تردد لارمور 20

I–6 معادلات ماكسويل 20

I.6.1 المعادلة التفاضلية لقانون غوص 20

I.6.2 قانون غوص في المغناطيسية 22

I.3.6 المعادلة التفاضلية المشتقة من قانون فرداي..... 24

I.4.6 المعادلة المشتقة من قانون أمبير (تيار الازاحة)..... 25

الفصل الثاني : ظاهرة الرنين المغناطيسي النووي

II-1 مقدمة 28

II-2 نواة الذرة..... 28

II-3 الصفات المغناطيسية لنواة الذرة 29

II-3-1 العزم الزاوي للنواة $\vec{L}$ 30

II-3-2 ا لعزم ا لمغناطيسي للنواة $\vec{\mu}$ 31

II-3-3 سبين النواة (اللّف) 33

II-3-4 كيفية تحديد العدد الكمي للسبين I..... 33

II-4 العزم المغناطيسي 35

II-4-1 العزم المغناطيسي للبروتون 35

II-4-2العزم ا لمغناطيسي لنترون 35

II-4-3 العزم المغناطيسي للإلكترون 36

II-4-3-1 الحركة المدارية للإلكترون 36

II-4-3-2 لف الإلكترون (الحركة المغزلية للإلكترون) 37

II-5 الخواص المغناطيسية للنوى 39

II-6 تصّرف النواة في وجود حقل مغناطيسي خارجي..... 41

II-6-1 التفسير الطّاقوي لسلوك بروتون في حقل مغناطيسي..... 43

II-7 توزيع بولتزمان لحالات السبين لنويات عينة 48

II-8 ظاهرة المغنطة النووية 51

II-9 التحريض بواسطة المجال الراديوي وإشارة الـ NMR 52

II-10 الحساسية النسبية للمادة بالنسبة لظاهرة الرنين المغناطيسي النووي 54

II-11 تفسير ظاهرة الرّنين المغناطيسي النّووي 56

II-12 عملية الإسترخاء Relaxation process 57

II-12-1 الإسترخاءالطولي Longitudinal or spin-lattice relaxation 58

II-12-2 الإسترخاء المستعرضTransverse or spin- spin relaxation 58

II-13 مكونات مطياف الرنين النووي المغناطيسي 58

الفصل الثالث : تطبيقات الرنين المغناطيسي النووي

III-1- الحجب 61

III-2 الإزاحة الكيميائية 63

III-3 العوامل المؤثرة على الانزياح الكيميائي 67

III-3-1 الكثافة الاليكترونية حول البروتون 67

III-3-2 التأثير الناتج عن التباين في الخواص المغناطيسية 68

III-3-3 تأثير الروابط الهيدروجينية 70

III-4 ازدواج الحركات المغزلية للأنوية المتجاورة 71

III-5 تطبيق الرنين النووي المغناطيسي في الطب 73

III-5-1 جهاز التصوير بالرنين المغناطيسيMRI 73

III-5-2 كيف نحصل على الصور باستخدام MRI 77

III-6 تطبيقات الرنين المغناطيسي في الكمياء 81

III -6-1 طيف الرنين النووي المغناطيسي NMR spectrum..... 81

III-6-2 نواة ذرة الهيدروجين (البروتون) 81

III-6-3 تحليل بعض أطياف الرنين المغناطيسي النووي 83

III-7 تطبيقات أخرى 87

III-8 مخاطر تقنية الرنين المغناطيسي النووي 88

الخاتمة 89

قـــائمة الأشكال

الشكل(I−1): منطقة تواجد الحقل الكهربائي.....	6
الشكل(I−2): الحقل الكهربائي الناتج عن شحنة نقطية.....	8
الشكل (I−3): اتجاه الحقل الكهربائي في حالة شحنة موجبة وفي حالة شحنة سالبة.	8
الشكل (I−4): الحقل الناتج عن مجموعة من الشحنات.....	9
الشكل(I−5) : التدفق عبر سطح عنصري.....	13
الشكل(I − 6):تدفق المجال المغناطيسي.....	17
الشكل (I.7): خطوط المجال المغناطيسي لقضيب مغناطيسي تشكل حلقة مغلقة...	23
الشكل(II−1): تشبيه النواة بالمغناطيس.....	29
الشكل(II−2):اتجاه السبين النووي.....	30
الشّكل(II−3): تمثيل العزم المغناطيسي النووي من أجل $\gamma > 0$.....	33
الشكل(II−4): دوران الإلكترون حول نواة الذرة وحول نفسه.....	38
الشكل(II−5): تمثيل العزم المغناطيسي و العزم الحركي.....	38
شكل(II−6): اتجاه العزم الأنوية المغناطيسي عند وضعها في مجال مغناطيسي....	42
الشكل(II−7): الحالات الطاقية لبروتون عند وجوده (أ) خارج تأثير المجال المغناطيسي و (ب) تحت تأثير مجال المغناطيسي شدته B_0.....	45
الشكل(II−8) : دالة توزيع بولتزمان لتأهيل مستويات الطاقة لنظام في حالة توازن..	50
الشكل(II−9) : تأثير تغير شدة الحقل على عدد الأنوية المنزاحة للمستوي الطاقة ..	51
الشكل(II−10) :اتجاه المغنطة لعينة من البروتونات موضوعة في مجال مغناطيسيB_0.....	52
الشكل(II−11) :عند استخدام نبضة الرنين الراديوية المناسبة في السعة والتواتر يمكن تدوير محصلة التمغنط بزاوية θ عن المحور (ZO) .	53
الشكل(II−12): أ−عينة من البروتونات تحت تأثير حقل مغناطيسي $\vec{B_0}$، ب− تعريض العينة إلى إشعاع كهرومغناطيسي $E = \hbar\omega_0$ ، ج− زوال سبب التحريض ورجوع العينة إلى وضعها الأصلي بانبعاث إشعاع طاقته$\Delta E = \hbar\omega_0$	56
شكل(II−13): رسم تخطيطي لمطياف الرنين النووي المغناطيسي	59

الشكل(III−1): الحقل المغناطيسي الناتج عن دوران إلكترونات الرابطة	62
الشكل(III−2): طيف الـــRMNH للإيزوبنتان.....	65
الشكل(III−3): ثنائي مثيل بنتان.....	66
الشكل(III−4): طيف الـ RMNH للبنتان.....	66
شكل (III−**5**): جهاز التصوير بالرنين المغناطيسي.....	74
شكل (III−**6**): مخطط توضيحي لمكونات جهاز التصوير باستخدام الرنين المغناطيسيMRI.....	76
شكل (III−**7**): ذرة الهيدروجينفي حركة دورانية حول المجال المغناطيسي.....	**77**
شكل (III−**8**): صور للدماغ باستخدامجهاز MRI لاعمار مختلفة.....	79
شكل (III−**9**): صورة MRI لدماغ شخص مصاب بالسرطان في الدماغ.....	80
شكل (III−**10**): مطياف الرنين النووي المغناطيسي.....	83
الشكل (III−11): طيف الرنين المغناطيسي النووي ومنحنى تكامل القمة للمركب العضوي $C_5H_{10}O_2$ في.....	84
الشكل(III−12): أطياف الرنين المغناطيسي النووي لسائلين عضويين ايزومريين في $CDCl_3$.....	85
الشكل(III−13): طيف الرنين المغناطيسي النووي لمركب عضوي نقي يحوي على كربون وهيدروجين وأكسيجين فقط.....	86

قـــائمة الجداول

الجدول $(I-1)$: قيم القابلية المغناطيسية لبعض المواد	18
الجدول $(I-2)$: قوانين ماكسويل	27
الجدول $(II-1)$: الخصائص النووية للنظائر الأساسية المستقرة التي لها سبين لا يساوي 0	32
الجدول $(II-2)$: العدد الكمي للسبين(I) لعناصر مختلفة	34
الجدول $(II-3)$: الدوران المغزلي لبعض الأنويـة	41
الجدول $(II-4)$: تردد الرنين لنويات بعض العناصر في حقلين مختلفين	46
الجدول $(II-5)$: بعض الصفات المغناطيسية ذات العلاقة بتقنية الرنين المغناطيسي النووي لبعض العناصر	54
الجدول $(III-1)$: قيم الازاحات الكيميائية لبعض البروتونات الشائعة	67

قـــائمة الجداول

الجدول $(I-1)$: قيم القابلية المغناطيسية لبعض المواد	18
الجدول $(I-2)$: قوانين ماكسويل	27
الجدول $(II-1)$: الخصائص النووية للنظائر الأساسية المستقرة التي لها سبين لا يساوي 0	32
الجدول $(II-2)$: العدد الكمي للسبين(I) لعناصر مختلفة	34
الجدول $(II-3)$: الدوران المغزلي لبعض الأنويـة	41
الجدول $(II-4)$: تردد الرنين لنويات بعض العناصر في حقلين مختلفين	46
الجدول $(II-5)$: بعض الصفات المغناطيسية ذات العلاقة بتقنية الرنين المغناطيسي النووي لبعض العناصر	54
الجدول $(III-1)$: قيم الازاحات الكيميائية لبعض البروتونات الشائعة	67

مـــــقدمة

ظاهرة الرنين المغناطيسي النووي (NMR) المعروفة في الفيزياء منذ اكتشافها عام 1946م في السوائل من قبل الباحث بلوخ **Bloch** في جامعة ستانفورد ، وفي الجوامد من قبل الباحث بيرسل **Purcell** في جامعة هارفورد ونال الباحثان جائزة نوبل للعلوم عن هذا الاكتشاف عام 1951م. جاءت هذه الظاهرة على غرار نظيرتها ظاهرة الرنين المغزلي الالكتروني (ESR المأخوذة من التعبير Electron Spin Résonance) في الفيزياء الحديثة .

تتعلق ظاهرة الرنين المغناطيسي النووي بوجود نواة ذرة معينة في مجال مغناطيسي خارجي ، أما كيفية تصرف النواة تحت هذا المجال فتعتمد على الصفاة المغناطيسية للنواة . وفق هذه الظاهرة أصبح بمقدور الانسان السيطرة والتحكم بتصرف نواة الذرة لصالح التطبيقات العملية المختلفة

لقد غدت ظاهرة الرنين المغناطيسي النووي أساس تقنية ذات أهمية تطبيقية رفيعة وفي مجالات مختلفة . فهذه الظاهرة تتعلق بالكشف عن هوية نواة الذرة وتصرف مكوناتها تحت ظروف معينة ، اذا أصبحت هذه التقنية وسيلة للكشف عن التركيب الجزيئي للكثير من المواد. بما أن هذه التقنية تتعامل مع أدق الصفات الخاصة بالنواة فهي تعد من التقنيات الدقيقة في نتائجها وذات درجة تحليل عالية . واذا ما عرفنا بأن تعامل المادة مع هذه التقنية لا يتضمن اي تأثير على صفات المادة الكيميائية ،أدركنا ما لهذه التقنية من المواصفات العملية المهمة في مجال الخدمات الطبية وخاصة التشخيصية منها، اذ أصبح بالإمكان بعد عام 1978م تصوير الأعضاء المختلفة في الجسم وبمقاطع مختلفة وعرضها على شاشة ملونة ومتابعة تطور نمو نسيج أو عمل عضو معين في الجسم . عّرف هذا التطبيق بالتصوير الرنيني المغناطيسي IRM .

سنتطرق في الفصل الاول الى مفاهيم أساسية في الكهرباء والمغناطيس وشرح المفردات الأساسية لهذه الظاهرة ، أما في الفصل الثاني فعالجنا ظاهرة الرنين المغناطيسي النووي وفي الفصل الثالث تناولنا تطبيقات هذه الظاهرة وهذا كله بشكل مبسط يساعد القارئ على فهم واستيعاب ظاهرة الرنين المغناطيسي النووي ليتمكن من متابعة تطبيقاتها في المجالات المختلفة كما سيتم لاحقا مقارنة هذه الظاهرة مع بعض الظواهر المتطورة الاخرى.

الفصل الأول

عموميات حول الرنين المغناطيسي النووي

I-1 مقدمة :

تعد ظاهرة الرنين النووي المغناطيسي Résonance magnétique nucléaire من أحد الظواهر الفيزيائية التي تعتمد على الخواص المغناطيسية الميكانيكية الكمية لنواة الذرة . ويستخدم الرنين النووي المغناطيسي للدلالة على مجموعة منهجيات وتقنيات علمية. ولدراسة الجزيئات من حيث البنية و التشكيل الفراغي . قبل أن نتطرق بالتفصيل الى ظاهرة الرنين المغناطيسي النووي سنتطرق الى مجموعة من المفاهيم والمصطلحات المستعملة في هذه الظاهرة وإلى نبذة تاريخية .

I-2 لمحة تاريخية :

إن أول من اكتشف ظاهرة الرنين النووي المغناطيسي هو الفيزيائي الأمريكي **Isidore Isaac Rald** عام 1938 م.

قد وضح العالمان **Edouard Purcell** و **Felix Bloch** عام 1946م فكرة تواتر الرنين ، فقام بتفسير ظاهرة الرنين المغناطيسي . حيث كان عملهما على شكل تجربة فيزيائية موجهة لدراسة الخصائص المغناطيسية لأنوية الذرات الى غاية عام 1950م تاريخ اكتشاف الإزاحة الكيميائية .

أصبحت مطيافية الرنين النووي المغناطيسي منذ ذلك اليوم أداة دقيقة للتحاليل الكيميائية ، وأستعمل الرنين المغناطيسي في الكشف على الذرات الخفيفة مثل الهيدروجين الموجودة في الكربوهيدرات ، وبفضل طابعها غير المهدم (غير المجرب) استعملت مطيافية RMN في دراسة جسم الإنسان ، فكان أول تطبيق طبي لهذه التقنية عام 1971م حيث اقترح **Damadion** عام 1969م استعمال الرنين المغناطيسي في الميدان الطبي حيث ألّف سنة 1971م كتابا بيّن فيه أهميته المحتملة في الطب . وبرهن على وجود اختلاف نتائج الرنين المغناطيسي النووي للأنسجة السليمة والأنسجة السرطانية (اختلاف في زمن الاسترخاء) ولكنه لم يتحصل على أيّة صورة تأكد ذلك .

في عام 1973م تحصل لوتر بور (**P.C. Lauterbur**) على أول صورة للرنين المغناطيسي النووي لبصمات إنسان ، وانطلاقا من هذا التاريخ أصبح مجال البحث في تقنية الرنين المغناطيسي النووي سريعا جدا ، ففي سنة 1976م تحصل مانسفيلد(**Mansfield**) بواسطة الرنين المغناطيسي النووي على أول صورة لأنسجة حية تتمثل في أصبع إنسان ، كما تحصل هاوكس (**Hawkes**) في عام 1979م على صورة لرأس إنسان . في العشرينيات الأخيرة تطوّر التطبيق في الميدان الطبي وسمّي بالتصوير بالرنين المغناطيسي النووي (IRMN) اختصارا لـ :

Imagerie par Resonance Magnitic Nuclear

ومازال مجال البحث مفتوح في هذا الميدان .

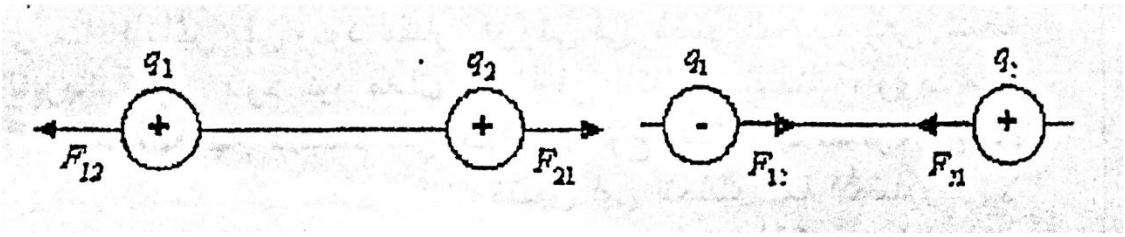
عموميات حول الكهرباء والمغناطيس :

I -3 الكهرباء الساكنة :

نعتبر شحنتين q_1 و q_2 موضوعتان في الفراغ ، حسب مبدأ الفعلين المتبادلين فإن الشحنة q_1 تؤثر على الشحنة q_2 بقوة $\vec{F}_{q/Q}$ فإن الشحنة q_2 تؤثر على الشحنة q_1 لها نفس الحامل ومساوية لها في الشدة ومتعاكستين في الاتجاه حيث :

$$\vec{F}_{q_2/q_1} = -\vec{F}_{q_1/q_2} = \frac{Kq_1q_2}{r^2}\vec{\mu} \qquad (1- I)$$

إذا كانت الشحنتان من نفس الإشارة يحدث تنافر وإذا كانت من إشارتين مختلفتين يحدث تجاذب



حيث : $K = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$

q_1 و q_2 : شحنتان افتراضيتان .

r : البعد بين الشحنتين .

K : ثابت .

$\vec{\mu}$: شعاع الوحدة .

I -3-1الحقل الكهربائي :

I.1.1.3 تعريف الحقل الكهربائي :(Notion de champ électrique):

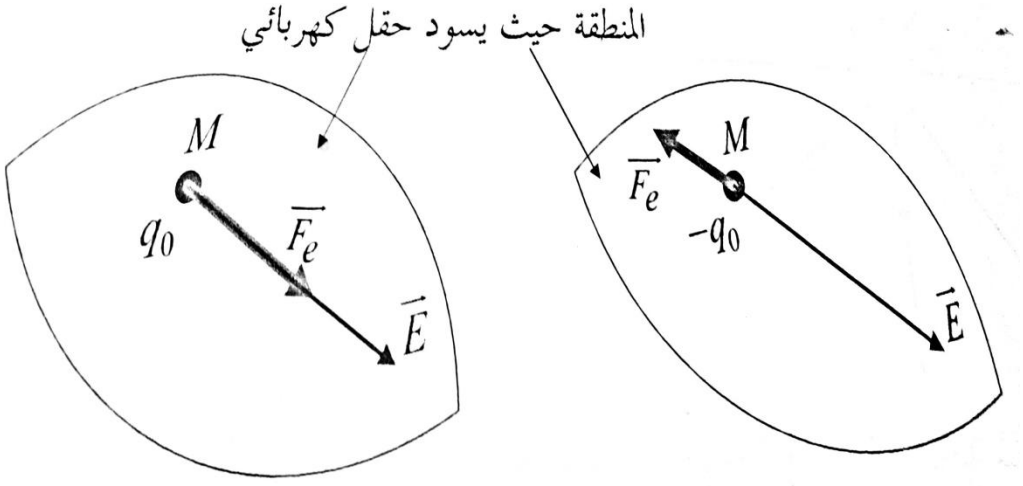
تعريف كيفي : نقول أنه يوجد حقل كهربائي في نقطة معينة من الفضاء اذا أثرت قوة كهرو ساكنة $\vec{F}_e$ على شحنة نقطية q_0 موضوعة في تلك النقطة .

تعريف كمي : نسمي الحقل الكهرو ساكن $\vec{E}$، النسبة بين القوة الكهرو ساكنة $\vec{F}_e$ والشحنة الكهربائية q_0 المتأثرة بالقوة $\vec{F}_e$.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}e}{q_0} \qquad (2 - I)$$

في الجملة الدولية يعبر عن الحقل الكهربائي بالفولط على المتر Vm^{-1}.

بما أن $\vec{E}(M) = \frac{\overrightarrow{F_e}}{q_0}$ فان $\vec{E}(M)$ و $\vec{F}_e$ لهما نفس الحامل . أما الإتجاه في هذه الحالة فيتعلق بإشارة q_0 أي بالشحنة المتأثرة بالقوة $\vec{F}_e$.



الشكل(**I − 1**) : منطقة تواجد الحقل الكهربائي .

I.3.1.2 الحقل الكهرو ساكن الناتج عن شحنة نقطية :

تعريف : اذا وجدت جسيمة شحنتها q في النقطة O فإنها تولد في كل نقطة M من الفضاء المحيط بها حقلا شعاعيا يسمى الحقل الكهروساكن المعبر عنه بالعبارة :

$$\vec{E}(M) = \frac{\vec{Fe}}{q_M} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \vec{u} \qquad (3 - I)$$

q : الشحنة الموجودة في النقطة O.

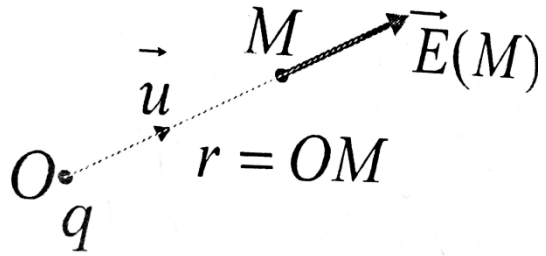
r : هو البعد بين الشحنة q والنقطة M.

q_M : شحنة افتراضية موضوعة في النقطة M (ليس لها أي تأثير في حساب الحقل الكهربائي) وهي متأثرة بالقوة $\vec{Fe}$.

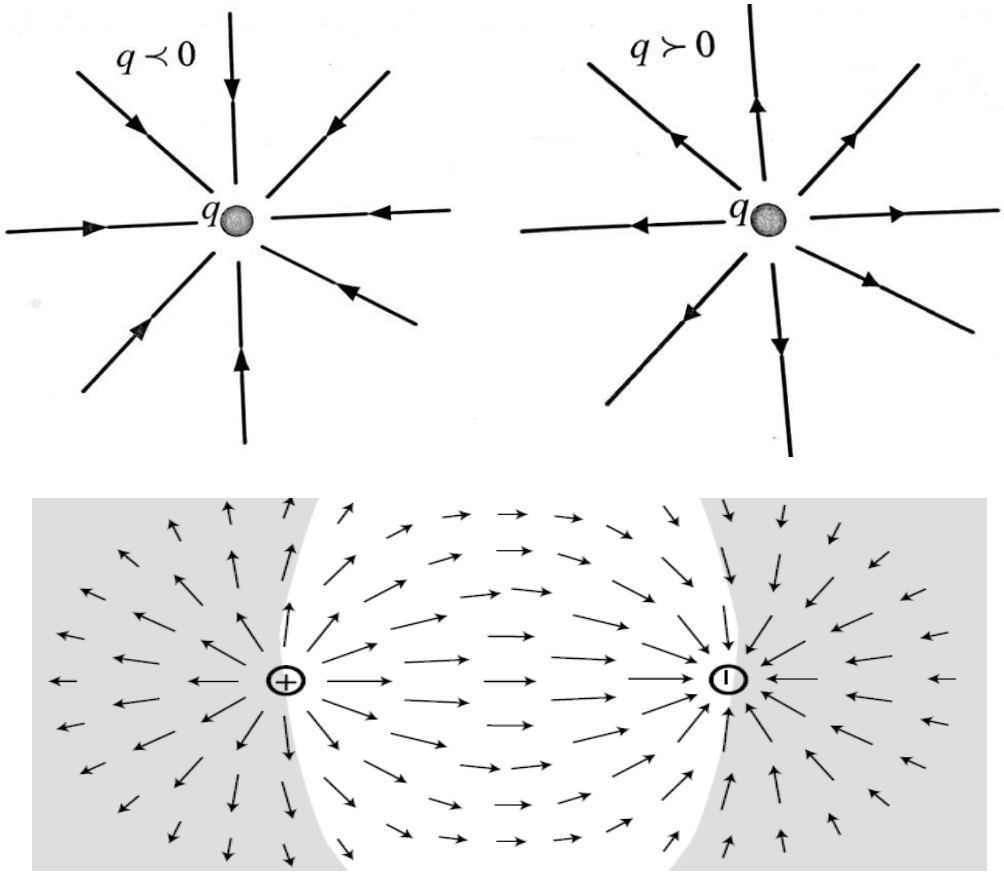
ε_0 : سماحية الفراغ .

وباختصار فان الحقل الكهربائي المتولد عن شحنة نقطية يكون :

- قطريا : حامله يمر من الشحنة
- موجها نحو الخارج اذا كانت $q > 0$
- موجها نحو الداخل اذا كان $q < 0$
- شدته $E(M) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{|q|}{r^2}$



الشكل(I –2):الحقل الكهربائي الناتج عن شحنة نقطية .



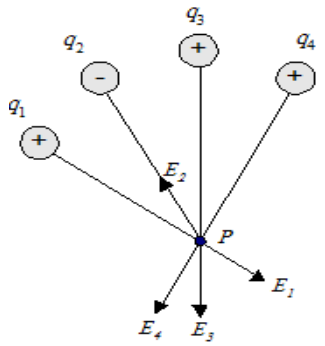
الشكل (I –3):اتجاه الحقل الكهربائي في حالة شحنة موجبة وفي حالة شحنة سالبة.

I .3.1.3 الحقل الكهربائي الناتج عن عدّة شحنات نقطية :

كما هو الشأن بالنسبة للقوى ، فإن مبدأ التراكب صالح كذلك بالنسبة للحقل الكهربائي .

في حالة مجموعة من الشحن النقطية تصبح علاقة الحقل كما يلي :

$$\vec{E}(M) = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{q_i}{r_i^2} \vec{u}_i \qquad (4 - I)$$



الشكل(I – 4): الحقل الناتج عن مجموعة من الشحنات .

4.1.3. I الحقل الكهربائي الناتج عن توزيع مستمر للشحنة :

في حالة عدد كبير من الشحنات ، يمكن لها أن تكون موزعة توزيعا مستمرا على استقامة واحدة ، على سطح مستو أو في حجم .

في مثل هذا التوزيع للشحنة فإن مبدأ التراكب يبقى صالحا . وعليه فيجب تجزئة هذا التوزيع الى عدد لامتناهي من الأحجام أو السطوح أو القطع المستقيمة الصغيرة جدا و المشحونة ، ثم القيام بحساب العناصر الأساسية من الحقل $d\vec{E}$ المتولدة عن كل عنصر من تلك العناصر المشحونة ، ثم القيام بالجمع الشعاعي للحقول العنصرية $d\vec{E}$.

أ- الحقل الناتج عن توزيع طولي للشحنة :

الكثافة الطولية ويرمز لها بالرمز λ وتمثل توزيع الشحنة على سلك مهمل المقطع بالقياس لأبعاده الأخرى .

$$\lambda = \frac{dq}{d\ell} \qquad (5 - I)$$

حيث dq الشحنة الموزعة على الطول $d\ell$ المحيط بالنقطة المراد قياس λ فيها ووحدة قياس الكثافة الطولية C_b / m .

وليكن الحقل العنصري dE المتولد عن الشحنة dq يقع على إمتداد القطعة المستقيمة والتي طولها L

$$d\vec{E}= \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}.\frac{\lambda.\overrightarrow{d\ell}}{r^2} \qquad (6 - I)$$

ب- **الحقل الناتج عن توزيع سطحي للشحنة :**

يرمز لها بالرمز σ وهي تعبّر عن توزيع الشحنة على سطح بحيث يمكن اهمال سمكه بالنسبة للأبعاد الأخرى .

$$\sigma= \frac{dq}{dS} \qquad (7 - I)$$

حيث dq الشحنة الموزعة على السطح dS المحيط بالنقطة المراد تقدير σ فيها ووحدة قياس الكثافة السطحية هي C_b/m^2 .

الحقل العنصري $d\vec{E}$ المتولد عن الشحنة dq يكتب بالعلاقة التالية :

$$\overrightarrow{dE}= \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}.\frac{\sigma.\overrightarrow{dS}}{r^2} \qquad (8 - I)$$

حيث: dS عنصر السطح.

ج-**الحقل الناتج عن توزيع حجمي للشحنة :**

ويرمز لها بالرمز ρ حيث :

$$\rho = \frac{dq}{dV} \qquad (9 - I)$$

حيث dq عنصر الشحنة المحصورة داخل الحجم dV الذي يحيط بالنقطة المراد تقدير ρ فيها ووحدة قياس الكثافة الحجمية هي C_b/m^3 .

الحقل العنصري $d\vec{E}$ المتولد عن الشحنة dq يكتب بالعلاقة التالية :

$$\overrightarrow{dE} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}.\frac{\rho.\overrightarrow{dV}}{r^2} \qquad (10 - I)$$

I -3-2 الكمون الكهربائي :

I 1.2.3. **الكمون الكهربائي الناتج عن شحنة نقطة q :**

عرفنا أن $\vec{E}$ الناتج عن q يكون قطريا (أي يمر من الشحنة q)

$$E(r) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}.\frac{q}{r^2} \qquad (11 - I)$$

لحساب V نحسب تجول $\vec{E}$ على طول نصف قطر ما

$$dV = -E.dr$$

$$V(r) = \int dV = -\frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\int \frac{1}{r^2}dr$$

بعد المكاملة نصل الى :

$$V(r) = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}.\frac{1}{r} \qquad (12 - I)$$

I.2.2.3 الكمون الكهربائي الناتج عن عدة شحن نقطية متفرقة :

بما أن V مقدار سّلمي فإن الكمون V(M) في النقطة M الناتجة عن عدة شحن يعطى بالعبارة السلمية :

$$V(M)=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\sum_i \frac{q_i}{r_i} \qquad (13-I)$$

حيث r_i هي المسافة بين q_i و النقطة M علما أن q_i يمكن أن تكون موجبة أو سالبة لذا لابد أخذها بإشارتها (+ أو −) .

I.3.2.3 الكمون الكهربائي الناتج عن توزيع مستمر للشحنة :

في هذه الحالة يكفي القيام بعملية تكاملية بعد تعيين شحنة عنصرية مناسبة dq ، مثلما قمنا به في حالة الحقل الكهربائي :

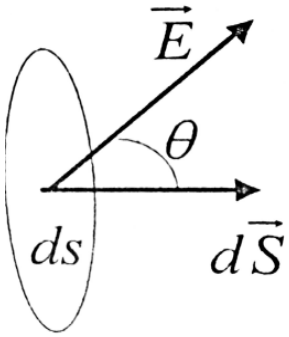
$$V=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int \frac{dq}{r} \qquad (14-I)$$

I −3−3 التدفق الكهرو ساكن ونظرية غوص :

I.1.3.3 التدفق الكهربائي : نسمي تدفق الحقل الكهربائي عبر سطح المقدار

$$\Phi=\int \vec{E}.d\vec{S} \qquad (15-I)$$

$d\vec{S}$: شعاع السطح العنصري وهو دائما عمودي على السطح وموجهً الى خارج الحجم المحدود بالسطح .



الشكل(I − 4):التدفق عبر سطح عنصري .

وحدة التدفق الكهربائي هي الويبر .

I.2.3.3 نظرية غوص :

تعبر نظرية غوص عن العلاقة بين التدفق الكهربائي عبر سطح مغلق وعدد الشحنات المتواجدة داخل الحجم المحاط بهذا السطح . وتنص على أن تدفق الحقل الكهربائي عبر سطح مغلق يساوي المجموع الجبري للشحنات التي يحتويها هذا السطح .

وتعطى علاقتها بالشكل التالي :

$$\Phi = \oint_S \vec{E}.\,d\vec{S} = \frac{1}{\varepsilon_0}\oint_V \rho dV = \frac{Q}{\varepsilon_0} \qquad (16 - I)$$

I-4 المغناطيسية :

لاحظ الإغريق في القرن الخامس قبل الميلاد إمتلاك بعض الصخور الطبيعية لخاصية الجذب لقطع صغيرة من الحديد ، ونظرا لمكان تواجد هذه الصخور بالقرب من منطقة مغنيسيا في الجزء الشرقي لتركيا جاءت تسمية المغناطيس نسبة إليها. إن المعدن الفعال أو النشط في هذه الصخور يدعى بالماكنيتيت ورمزه الكيميائي هو : Fe_3O_4.

كما عرّف الصينيون الخواص الاتجاهية لقطع المغناطيس ، إذ وجدوا بأنه يتجه بإتجاه الجنوب والشمال الجغرافيين بشكل تقريبي.

حيث تعرف بعصرنا الحالي ثلاث أنواع للمغانط وهي: المغانط الدائمة، الكهربائية وفائقة التوصيل سنتعرض لها بالتفصيل في الفصل الأخير.

I.1.4 تعريف الحقل المغناطيسي :

يوجد حقل مغناطيسي في منطقة متواجدة بجوار :

- ✓ مغناطيس طبيعي أو اصطناعي
- ✓ الأرض التي نعتبرها مغناطيس ضخم
- ✓ ناقل يجتازه تيار كهربائي

بالمقارنة مع الحقل الكهربائي فإن شحنة أو مجموعة شحنات ، في حركة تولد في المنطقة المجاورة بها حقلا مغناطيسيا . هذا الحقل المغناطيسي يؤثر على الشحنة الكهربائية الخارجية q في حركة بقوة $\vec{F}_B$. وكذلك الأمر بالنسبة لتيار، ما دام التيار الكهربائي هو حركة الشحنات .

الحقل المغناطيسي هو أيضا حقل شعاعي يرمز له بالحرف $\vec{B}$ واسمه الكامل هو : الحقل التحريض المغناطيسي.

I.2.4 شدة الحقل المغناطيسي (قانون بيوت سافارت):

بعد فترة قصيرة من اكتشاف أورستد 1819 انحراف ابرة البوصلة بواسطة موصل يحمل تيار كهربائي قام كل من(بيوت سافارت) بإنجاز تجارب مكنت من صياغة علاقة رياضية تحسب شدة المجال المغناطيسي الناتج عن تيار الكهربائي عند أي نقطة على الشكل :

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{\overrightarrow{ds} \times \vec{r}}{r^2} \qquad (17 - I)$$

حيث:

$\overrightarrow{ds}$:هو شعاع السطح العنصري.

$\vec{r}$:هو شعاع الموضع .

μ_0: ثابت النفاذية .

I : شدة التيار .

ويعطى عبارة المجال المغناطيسي بدلالة كثافة التيار $J(\vec{r})$ بالشكل :

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi}\int_V \frac{j(\vec{r})\times\vec{r}}{r^2} dV \qquad (18 - I)$$

I.3.4 قانون أمبير :

إن قانون أمبير يعبّر عن خاصية مهمة للمجالات المغناطسية ويمكن استخدامه لحساب هذه المجالات الناشئة عن التيارات المارة في تلك الأسلاك التي يتوفر فيها تناظر هندسي معيّن وينص على ما يلي :

" إن التكامل الخطي لشدة مجال مغناطيسي B حول أي مسار مغلق يساوي ثابت النفوذية مضروبا في مقدار التيار الكلي داخل هذا المسار " أي أن :

$$\oint \vec{B} \times \overrightarrow{d\ell} = \mu_0 I \qquad (19 - I)$$

I.4.4 شدة التمغنط (المغنطة) :

هي عبارة عن العزم المغناطيسي الحاث في وحدة الحجم ويرمز لها بالرمز $(\overrightarrow{M})$، وعلى هذا الأساس لو اعتبرنا أن العزم المغناطيسي لكل ذرة أو جزيئة من جزيئات الوسط المادي هو $\overrightarrow{m}$ ، وأن عدد الذرات أو الجزيئات لوحدة الحجم هو n فان التمغنط يعطى بالعلاقة التالية :

$$\vec{M}=n\vec{m} \qquad (20-I)$$

ترتبط المغنطة مع شدة المجال المؤثر (H) بالعلاقة:

$$\vec{B}=\mu_0(\vec{H}+\vec{M}) \qquad (21-I)$$

حيث :

μ_0 : النفاذية المغناطسية الناتجة عن المجال المؤثر في الفراغ ووحدتها :

$\mu_0= 4\pi 10^{-7}$ Tm/A (تسلا متر/ أمبير)

$\vec{B}$: الحث المغناطيسي وحدته (T) أو (Wb/m^2)

$\vec{M}$: المغنطة ويعبر عنها بالعلاقة :

$$\vec{M} = (\mu_r - 1)\vec{H} \qquad (22-I)$$

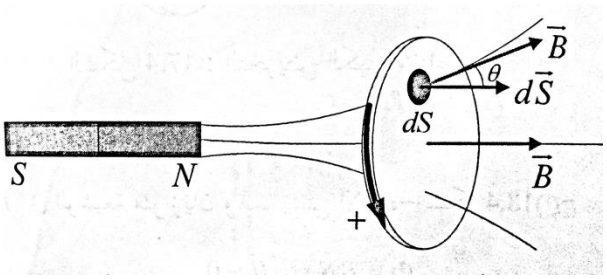
μ_r : النفاذية المغناطيسية النسبية وتساوي الواحد في الفراغ .

I.5.4 تدفق المجال المغناطيسي :

تدفق المجال المغناطيسي هو العدد الكلي لخطوط القوة الذي ينحرف على سطح ما يرمز له بالرمز φ تصور عنصرا مساحته ds على سطح عشوائي .

اذا كان المجال المغناطيسي عند هذا العنصر هو B فان التدفق المغناطيسي خلال العنصر يكون :

$$\vec{B}.\vec{ds} = d\varphi$$



الشكل(I – 5):تدفق المجال المغناطيسي.

θ : هي الزاوية المحصورة بين العمود على السطح والحقل المغناطيسي

$\overrightarrow{ds}$: متجه يكون عمودي على السطح ومقداره هو المساحة ds

اذن التدفق المغناطيسي الكلي خلال السطح يكون :

$$\varphi = \int \vec{B}.\overrightarrow{ds} \qquad (23 - I)$$

يقاس التدفق المغناطيسي في النظام الدولي للوحدات بالويبر (weber) الذي يرتبط مع التسلا والمتر بالعلاقة : $1wb = 1\ Tm^2$.

نظرا لعدم وجود أقطاب مغناطيسية مفردة فان التدفق المغناطيسي لأي سطح مغلق يساوي دائما صفرا اذ يستحيل وضع قطب مغناطيسي داخل سطح مغلق ، لذلك يكتب قانون غوص على النحو الاتي :

$$\varphi = \oint \vec{B}\,.\,\overrightarrow{ds} = 0 \qquad (24 - I)$$

I.6.4. القابلية المغناطيسية χ_m:

تعرف على أنها النسبة بين شّدة تمغنط المادة (M) وشّدة المجال المغناطيسي الخارجي المسلط عليها ، وتعطى بالعلاقة التالية :

$$M = \chi m\ .B$$

$$\chi_m = \frac{M}{B} \qquad (25 - I)$$

حيث يتضح بأن القابلية المغناطيسية كمية بدون وحدة ، لأن وحدة التمغنط هي نفسها وحدة المجال المغناطيسي الخارجي المسلط (تسلا) ، وهي غالبا ما تستخدم للتعبير عن الصفات المغناطيسية للمواد ، كما تعبّر عن مدى استجابة الوسط للمجال المغناطيسي الخارجي اذ تختلف قيمتها من مادة الى أخرى ، حيث تكون موجبة بالنسبة للمواد البارامغناطيسية وسالبة بالنسبة للمواد الدايامغناطيسية . الجدول التالي يبين القيم القابلية المغناطيسية لبعض المواد عند درجة الحرارة (300 K).

الجدول$(I - 1)$: قيم القابلية المغناطيسية لبعض المواد.

المواد البارامغناطيسية	χ_m	المواد الدايامغناطيسية	χ_m
الألمنيوم Al	2.3×10^{-5}	البزموث Bi	-1.6×10^{-5}
الكالسيوم Ca	1.9×10^{-5}	الكوبر Co	-9.8×10^{-6}
الكروم Ch	2.7×10^{-5}	الماسDi	-2.2×10^{-5}
الليثيوم Li	2.1×10^{-5}	الذهب Au	-3.6×10^{-5}
المغنيزيوم Mg	1.2×10^{-5}	النيتروجين Ni	-5.0×10^{-9}
الأكسجين O	2.1×10^{-6}	الزئبقHg	-3.2×10^{-5}
البلاتنيوم Pt	2.9×10^{-4}	النحاس Cu	-1.0×10^{-5}

التنغيستنTu	6.8×10^{-5}	الصوديوم Na	-0.2×10^{-5}
تنكسونTn	2.3×10^{-5}	الهيدروجين H	-2.1×10^{-9}

I.7.4 القوة المغناطسية :

إذا كان لدينا ناقل طوله ℓ ومستقيم يمر فيه تيار كهربائي I مغمور في مجال مغناطيسي $\vec{B}$ فإنه سيتأثر بقوة كهرومغناطسية $\vec{F}_B$ تدعى بقوة لابلاس (Laplace) وتعطى بالعلاقة التالية :

$$\overrightarrow{dF_B} = Id\overrightarrow{\ell} \times \overrightarrow{dB}$$

ومنه تصبح العلاقة على الشكل الموالي :

$$F_B = I\ell B \sin\theta \qquad (26 - I)$$

I.8.4 معامل النفاذية النسبي μ_r :

يستخدم للتعبير عن الصفات المغناطيسية للمادة ، يقابل معامل السماحية النسبي في الكهرباء الذي يميز المواد العازلة ، كما يطلق علية المعامل المغناطيسي ويساوي النسبة بين نفاذية المادة μ ونفاذية الفراغ μ_0، وهو بدون وحدة .

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \qquad (27 - I)$$

I-5 تردد لارمور :

تردد لارمور له مفهوم مهم جدا ، وهو أساس أو قلب عملية التصوير بالرنين المغناطيسي وهو التردد الذي يتذبذب عنده البروتون عند وضعه في مجال مغناطيسي ، وهو يتناسب طرديا مع شدة المجال المغناطيسي B_0 ويعطى بالمعادلة :

$$\omega_0 = \gamma B_0 \qquad (28 - I)$$

حيث :

ω_0 : تردد لارمور وحدته (MHz).

γ : هي ثابت خاص لكل نواة ويسمى النسبة الجيرومغناطيسية .

B_0 : شدة المجال المغناطيسي ووحدته التيسلا (T) .

I-6 معادلات ماكسويل :

عبارة عن أربعة معادلات تفاضلية جزئية تصف سلوك وتغيرات المجالين الكهربائي والمغناطيسي ، وتأثراتهما مع المادة وتحولاتهما إلى أشكال أخرى من الطاقة. وقد نشر الفيزيائي جيمس كلارك ماكسويل هذه المعادلات بين عامي 1862-1961 م .

I.6.1 المعادلة التفاضلية لقانون غوص :

في حالة التوزيع الحجمي للشحنة يمكن تطبيق نظرية غوص على الحجم الغير متناهي في الصغر في حيز معين ، ثم الحصول على العلاقة بين التفاضل الجزئي للمركبات E بالنسبة للإحداثيات لنقطة تقع في ذلك الحجم وبين الكثافة الحجمية لشحنة q عند النقطة نفسها مع ملاحظة أن مركبات E يمكن أن تتغير مع المحاور الثلاثة .

لنفرض وجود شحنة موزعة في منطقة (حيز) بكثافة حجمية قدرها ρ على الاحداثيات X،Y،Z

لدينا متوازي المستطيلات الذي أطوال جوانبه متناهية في الصغر dx،dy، dz وأوجهه توازي سطوح الاحداثيات فيكون حجمه مساوي dx.dy.dz

بتطبيق قانون غوص يكون :

$$\oint \vec{E}.\overrightarrow{ds} = \int \frac{1}{\varepsilon_0} \rho.dx.dy.dz \qquad (29-I)$$

ويمكن تقدير التكامل $\oint E.ds$ على dx dy dz باخذ المركبات $E_x E_y E_z$ للمجال E على السطوح الجانبية الستة للحجم ونحسب بذلك التدفق من خلال هذه السطوح تكون كثافة الشحنة للوجهين الموازيين للمستوي YZ ، تشبه هذه الحالة حالة المهبط والمصعد في الصمامات المفرغة دالة ل X فان مقدار الزيادة في المجال عند قطع المسافة dx هو:

$$dE_X = \frac{\partial E_x}{\partial X} dx$$

فإذا كانت شدة المجال على جميع نقط الوجه الأيسر فإن شدة المجال عند الوجه الأيمن :

$$E_X + dE_X = E_X + \frac{\partial E_x}{\partial X} dx$$

ويكون التدفق من خلال الوجه الأيسر باعتبار مساحة سطحه dy.dz تساوي :

$$(E_X + \frac{\partial E_x}{\partial X} dx).dydz$$

ومن خلال الوجه الأيمن يساوي $-E_x dydz$ والسبب في الاشارة السالبة هو أن E تتجه الى الداخل بالنسبة له السطح وهكذا يكون مجموع التدفق العمودي على الوجهين يساوي :

$$((E_X + \frac{\partial E_x}{\partial X} dx) - E_x)dydz = \frac{\partial E_x}{\partial X} dxdydz$$

إذا اجريت العملية نفسها على الوجوه الأخرى لمتوازي مستطيلات لإيجاد التدفق الكلي على أوجهه يساوي :

$$\oint \vec{E}.\overrightarrow{ds} = \int (\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z}) dxdydz \qquad (30 - I)$$

بموازنة المعادلة (I − 30) بالمعادلة (I − 29) نحصل على :

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = \frac{1}{\varepsilon_0}\rho$$

وتساوي هذه المعادلة الصفر اذا كانت المنطقة خالية من الشحنة ومنه فان :

$$\text{div}\,\vec{E} = \vec{\nabla}.\vec{E} = \frac{1}{\varepsilon_0}\rho \qquad (31 - I)$$

وكذلك اذا كانت الشحنة موزعة بانتظام فان مركبات المجال E_x،E_y،E_z تكون ثابتة

وبذلك فإن تفاضلها يساوي الصفر .

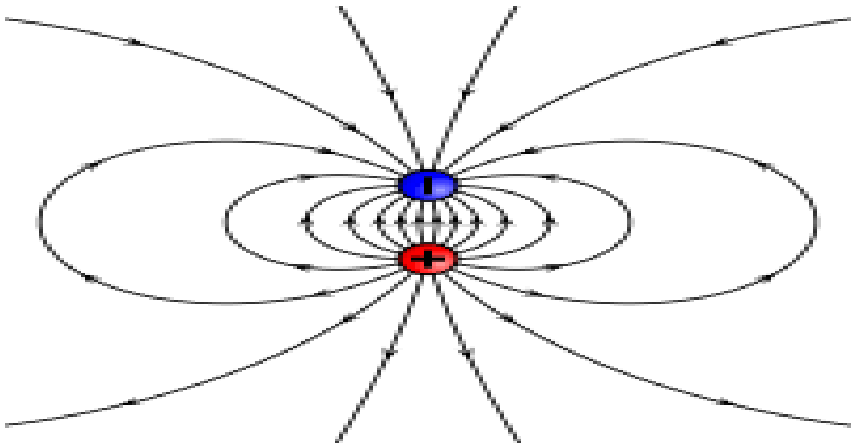
وتمثل المعادلة التفاضلية (I − 31) شكلا للمعادلة الأولى من معادلات ماكسويل المشهورة للإشعاع الكهرومغناطيسي .

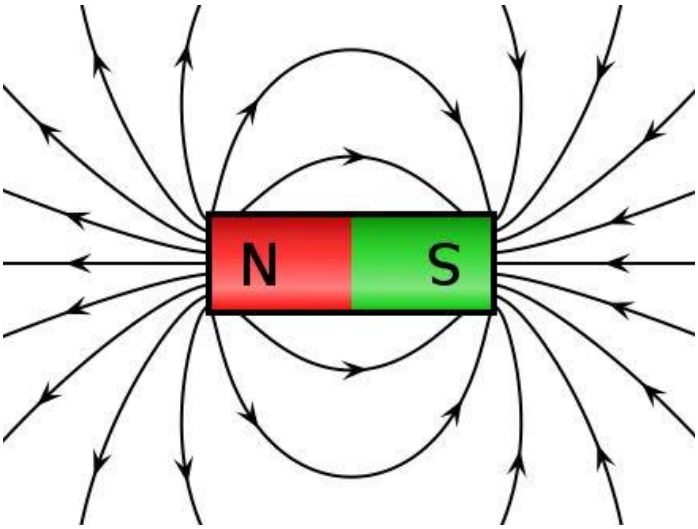
I .2.6 قانون غوص في المغناطيسية :

وجدنا أن الفيض الكهربائي خلال سطح مغلق يحيط بمحصلة شحنة يتناسب مع الشحنة (قانون غوص) بعبارة أخرى أن عدد خطوط المجال الكهربائي التي تغادر السطح تعتمد على محصلة الشحنة في ضمه فقط .

ان هذه الحقيقة أثبتت على أن خطوط المجال الكهربائي قد بدأت وانتهت على الشحنات الكهربائية .

خطوط المجال الكهربائي تضبط بثنائي قطب كهربائي تبدأ من الشحنة الموجبة وتنتهي على الشحنة السالبة. الفيض الكهربائي خلال سطح مغلق يحيط بأحد الشحنات لا يكون يساوي الصفر .





الشكل (I.6)خطوط المجال المغناطيسي لقضيب مغناطيسي تشكل حلقة مغلقة.

إن هذه الحالة تختلف عن المجالات المغناطيسية التي تكون مستمرة وتشكل حلقات مغلقة وبعبارة أخرى لا تبدأ خطوط المجال المغناطيسي أو تنتهي عند أي نقطة كما تم توضيح ذلك بواسطة خطوط المجال المغناطيسي لقضيب مغناطيسي في الشكل السابق لاحظ أنه لكل سطح مغلق مثل ذلك الذي تم توضيحه بواسطة خط متقطع في الشكل السابق .

فإن عدد الخطوط الداخلة للسطح تساوي عدد التي تغادر السطح لذلك فإن محصلة المجال المغناطيسي تكون صفرا على عكس ذلك ، فبالنسبة لسطح مغلق يحيط بشحنة واحدة من ثنائي قطب كهربائي فإن محصلة الفيض الكهربائي ليست صفرا .

إن قانون غوص في المغناطيسية ينص على أن محصلة الفيض المغناطيسي خلال أي سطح مغلق يكون دائما صفرا .

$$\vec{\nabla}.\vec{\mathrm{B}} = 0 \qquad (32 - \mathrm{I})$$

تمثل المعادلة $(32 - \mathrm{I})$ شكلا للمعادلة الثانية من معادلات ماكسويل المشهورة .

I.3.6 المعادلة التفاضلية المشتقة من قانون فرداي :

لدينا حسب قاعدة ستوكس :

$$\oint_{\mathrm{C}} \vec{\mathrm{E}}.\overrightarrow{\mathrm{d}\ell} = \oint_{\mathrm{S}} \vec{\nabla} \times \vec{\mathrm{E}}.\overrightarrow{\mathrm{ds}}$$

حيث S سطح مقفل محاط بمسار مقفل C وبمساوات المعادلة الأخيرة مع المعادلة السابقة :

$$\int \left(\vec{\nabla} \times \vec{\mathrm{E}}\right).\overrightarrow{\mathrm{ds}} = -\int \frac{\overrightarrow{\partial B}}{\partial \mathrm{t}}.\overrightarrow{\mathrm{ds}}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{\mathrm{E}} = -\frac{\overrightarrow{\partial B}}{\partial \mathrm{t}} \qquad (33 - \mathrm{I})$$

وتعرف هذه المعادلة بمعادلة ماكسويل التفاضلية المشتقة من قانون فارداي وهي المعادلة الثالثة .

I.4.6. المعادلة المشتقة من قانون أمبير (تيار الازاحة):

ينتج عن حركة الشحنات الحرة في أي موصل مجال مغناطيسي يظهر أثر في المنطقة المحيطة بالموصل تسمى الشحنات المتحركة بإلكترونات التوصيل (conduction Electrons) والتيار الذي يظهر نتيجة للحركة يسمى تيار التوصيل ويرمز له بالرمز I_c ويحسب الحث المغناطيسي بمعرفة تيار التوصيل باستعمال قانون أمبير الدوائري وهو :

$$\oint \vec{B}.\overrightarrow{d\ell} = \mu_0 I_c = \mu_0 \int_s \overrightarrow{J_c}.\overrightarrow{ds}$$

حيث أن التكامل الخطي مأخوذ حول مسار مغلق وأن التكامل السطحي مأخوذ على أي سطح محاط بمسار التكامل الخطي والتكامل السطحي لكثافة التيار J هو عبارة عن مجموع التيار المار خلال المسار للتكامل الخطي فاذا اختير المسار فانه قيمة الحث الكهرومغناطيسي B يكون ثابت ويتجه موازي للمسار.

أي أن السطح محاط بمسار مغلق للتكامل الخطي يعطي النتيجة نفسها حيث ان المستوي السطحي S أو النصف الكروي S' محاط بالمسار المغلق نفسه.

التيار المار خلال المكثف المستوي سعته C مساحته كل من لوحيه S هي :

$$i = \frac{dq}{dt}$$

$$E = \frac{\sigma}{dt}$$

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1}{\varepsilon_0}\frac{d\sigma}{dt}$$

$$i = S\varepsilon_0 \frac{\mathrm{dE}}{\mathrm{dt}}$$

$$q = S\sigma$$

هذا المقدار هو الذي يمكن إضافته للمعادلة ويسمى تيار الإزاحة يرمز له برمز $\mathbf{I_d}$ وبذلك فإن كثافة تيار الإزاحة هو :

$$\mathrm{J_d} = \varepsilon_0 \frac{\mathrm{dE}}{\mathrm{dt}}$$

وكثافة التيار الكلية هي :

$$\mathrm{J} = \mathrm{J_d} + \mathrm{J_c}$$

$$\oint \overrightarrow{\mathrm{B}}.\overrightarrow{\mathrm{dl}} = \mu_0 \int (\overrightarrow{\mathrm{J_d}} + \overrightarrow{\mathrm{J_c}}).\overrightarrow{\mathrm{ds}}$$

$$= \mu_0 \int \overrightarrow{\mathrm{J_d}}.\overrightarrow{\mathrm{ds}} + \mu_0 \int \overrightarrow{\mathrm{J_c}}.\overrightarrow{\mathrm{ds}}$$

$$\oint \overrightarrow{\mathrm{B}}.\overrightarrow{\mathrm{dl}} = \mu_0\varepsilon_0 \int \frac{\overrightarrow{\partial \mathrm{E}}}{\partial \mathrm{t}}\overrightarrow{\mathrm{ds}} + \mu_0 \int \overrightarrow{\mathrm{J_c}}.\overrightarrow{\mathrm{ds}}$$

قيمة إزاحة D تساوي :

$$D = \varepsilon_0 \mathrm{E}$$

$$\oint \overrightarrow{\mathrm{B}}.\overrightarrow{\mathrm{dl}} = \mu_0 \int \frac{\overrightarrow{\partial \mathrm{D}}}{\partial \mathrm{t}}\overrightarrow{\mathrm{ds}} + \mu_0 \int \overrightarrow{\mathrm{J_0}}.\overrightarrow{\mathrm{ds}}$$

وحسب المعادلة :

$$\vec{\nabla} \times \vec{\mathrm{B}} = \mu_0\varepsilon_0 \frac{\overrightarrow{\partial \mathrm{E}}}{\partial \mathrm{t}} + \mu_0\vec{\mathrm{J}} \qquad (34 - \mathrm{I})$$

وهي المعادلة الرابعة من معادلات ماكسويل .

الجدول(I − 2) : قوانين ماكسويل :

الشكل التكاملي	الشكل المحلي	
$\oint \vec{E}.\overrightarrow{ds} = \int_v \frac{1}{\varepsilon_0}\rho dv$	$\vec{\nabla}.\vec{E} = \frac{1}{\varepsilon_0}\rho$	نظرية غوص للحقل الكهربائي $\vec{E}$ أو معادلة ماكسويل غوص
$\oint_s \vec{B}.\overrightarrow{ds} = 0$	$\vec{\nabla}.\vec{B} = 0$	معادلة التدفق المغناطيسي أو معادلة ماكسويل طومسون
$\oint_C \vec{E}.\overrightarrow{dl} = \oint_S \vec{\nabla} \times \vec{E}.\overrightarrow{ds}$	$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\overrightarrow{\partial B}}{\partial t}$	معادلة ماكسويل فرداي
$\oint \overrightarrow{B}.\overrightarrow{dl} = \mu_0\varepsilon_0 \int \frac{\overrightarrow{\partial E}}{\partial t}\overrightarrow{ds} + \mu_0 \int \overrightarrow{J_c}.\overrightarrow{ds}$	$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0\varepsilon_0 \frac{\overrightarrow{\partial E}}{\partial t} + \mu_0\vec{J}$	معادلة ماكسويل أمبير

الفصل الثاني

ظاهرة الرنين المغناطيسي النووي

II-1مقدمة:

تتعلق ظاهرة الرنين المغناطيسي النووي بوجود نواة ذرة معينة في مجال مغناطيسي خارجي، أما كيفية تصرّف النواة تحت تأثير هذا المجال فتعتمد على الصفات المغناطيسية للنواة. وفق هذه الظاهرة أصبح بمقدور الإنسان السيطرة والتحكم بتصرف نواة الذرة لصالح تطبيقات العملية المختلفة.

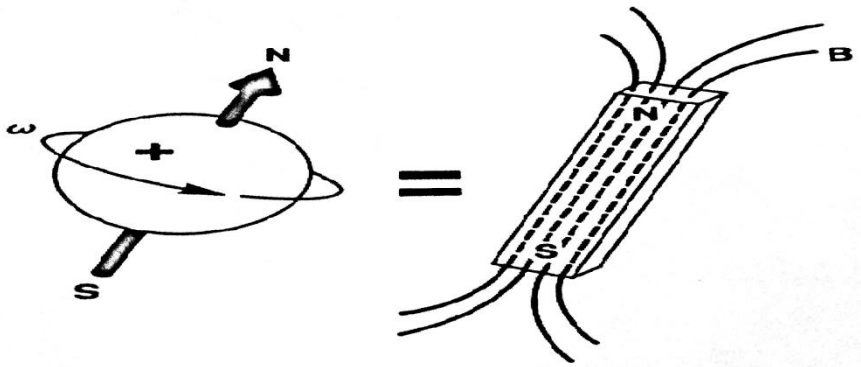
وتعتمد الظاهرة أساسا على أن جميع الأنوية الذرية التي تملك عددا فرديا من البروتونات أو النيوترونات يكون لها عزم مغناطيسي ذاتي وعزم زاوي وأكثر الأنوية التي تستخدم في هذه التقنية هي نواة ذرة الهيدروجين H^1 وهي أكثر نظائر الهيدروجين وفرة في الطبيعة، وكذلك نواة ذرة نظير الكربون-13. وهناك نظائر عناصر أخرى يمكن أن تستخدم ولكن استخداماتها تبقى أقل.

نتطرق في هذا الفصل إلى توضيح آلية الرنين المغناطيسي النووي وذلك بمعرفة تصرف بعض الأنوية عند وضعها ضمن مجال مغناطيسي خارجي وبتأثير ترددات خاصة من المجال الكهرومغناطيسي والتي تدعى بترددات الراديوية.

II-2 نواة الذرة :

نّواة الذرة هي الجزء المركزي منها، حيث تشمل كل كتلة الذرة تقريبا، كما تحتوي النواة على بروتونات موجبة الشحنة ونيوترونات عديمة الشحنة، لتكون بذلك النواة موجبة الشحنة. عدديا شحنة البروتونات الموجبة تساوي شحنة الالكترونات السالبة لذلك تكون الذرة متعادلة كهربائيا. وهذا يعود إلى النتائج التجريبية التي توصّل إليها رذرفورد عام 1911م والتي مفادها أن نواة الذرة موجبة الشحنة تدور حولها الكترونات سالبة الشحنة، وهو التفسير الذي هدّم التصّور السابق لبنية الذرة على أنها توزيع متوازن نسبيا للكتلة .

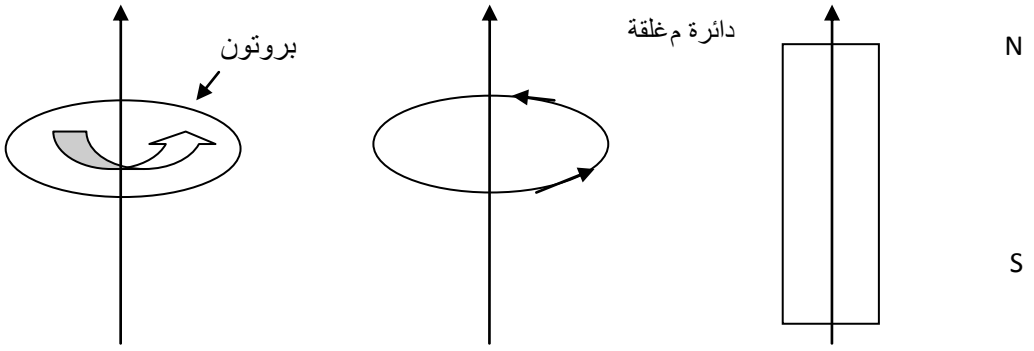
لمكونات النواة طاقة كبيرة جدا نتيجة لقوى الترابط بين الجسيمات الأولية ولكن مدى تأثيرها يكون على مسافة صغيرة جدا في حدود قطر النواة. كما يمكن اعتبار نواة الذرة مغناطيسا صغيرا له قطب شمالي وقطب جنوبي بفعل دورانها الذاتي حول محورها كما هو موضح في الشكل التالي:



الشكل($II-1$): تشبيه النواة بالمغناطيس.

II-3 الصفات المغناطيسية لنواة الذرة :

تظهر الخصائص المغناطيسية لنواة الذرة نتيجة حركتها حول محورها والمعروفة بالحركة المغزلية، حيث تمتلك النواة بالإضافة إلى عزمها الزاوي الذاتي $\vec{L}$ عزما مغناطيسيا $\vec{\mu}$ يتعلق بشحنة النواة و كتلتها واتجاه حركتها . يعبّر عن هذا الأخير في م يكانيك الكم بمقدار كمي يسمى السبين (البرم)، حيث تعتبر مكانيك الكم النموذج الأنسب لوصف حركة الجسيمات ذات الأبعاد الصغيرة كالنواة، عند دوران النواة في عكس اتجاه عقارب الساعة (المسار دائري و الشحنة موجبة) يكون لها سبين (برم) نحو الأعلى وأما في حالة الدوران في اتجاه عقارب الساعة يكون لها سبين نحو الأسفل. كما في الشكل(II-2) :



الشكل $(II-2)$:اتجاه السبين النووي.

II-3-1 العزم الزاوي للنواة $\vec{L}$:

حسب مبدأ م يكانيك الكم تمتلك كل نواة ذرة تدور حول نفسها بعزما زاويا (مغزليا)، حيث أنها تتكون من بروتونات و نيوترونات التي هي مصدر هذا العزم، ويتعين بالعدد الكمي المغزلي I، يعطى هذا العدد بمضاعفات عددية أو نصف عددية للمقدار ħ، أي أن العزم الزاوي للنواة يعطى بالمقدار:

$$\vec{L} = \frac{h\vec{I}}{2\pi} = \hbar\vec{I} \qquad (1-II)$$

$\vec{L}$: العزم الزاوي للنواة.

h: ثابت بلانك .

ħ: ثابت بلانك المكمم.

I: يدعى بالعدد الكمي المغزلي أو اللفي، أو العدد الكمي للعزم الزاوي لنواة أو اختصار السبين النووي ، ويمكن أن يأخذ أعدادا صحيحة أو قيم نصف عددية:

$$I=0،1/2 ،1،3/2 ، 2...$$

يكون لنواة ذرة معينة قيمة واحدة لـ I ويمثل بشعاع $\vec{I}$ يكون باتجاه العزم الزاوي $\vec{L}$.

II-3-2 العزم ا لمغناطيسي للنواة :

تعتبر نواة الذرة كتقدير تقريبي على أنها جسيم كروي مشحون يتكون من A نكليون (Z بروتون مشحون و N نيوترون عديم الشحنة لهما نفس الكتلة m)، تتوزع بانتظام على سطحها شحنة موجبة، إن دوران النواة حول نفسها يولد حقلا مغناطيسيا صغيرا يدعى العزم المغناطيسي و يرمز له بـ .

وبناء على ذلك فكل عزم مغزلي للنواة يكون مقترنا بعزم مغناطيسي معطى بالعلاقة:

$$\vec{\mu} = \frac{ge\hbar\vec{I}}{2m} \qquad (2\text{-II})$$

حيث:

$\frac{e\hbar}{2m}$: كمية نووية ثابتة تدعى بوحدة الماغنتون أو الماغنتون النووي على غرار ماغنتون بور للإلكترون الدائر حول نفسه في مداره حول نواة الذرة .

g : معامل خاص بنواة الذرة مقداره حوالي 1.

و بهذا تكون وحدة و قيمة الماغنتون النووي الواحد (جول /التسلا) وتكون مساوية لـ :

$$\frac{e\hbar}{2m} = 5.05 \times 10^{-27} \text{J/T}$$

m : كتلة البروتون.

$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,054 .10^{-34} \text{J.S.rad}^{-1}$: يمثل ثابت بلانك المكمم .

يمكن أن تكتب المعادلة السابقة بصورة عامة على الشكل:

$$\vec{\mu} = \gamma\hbar\vec{I} \qquad (3\text{-II})$$

γ: نسبة الجيرومغناطيسية ، هذه النسبة تحدد الصفات المغناطيسية لنواة الذرة.

تتعلق بـ m وبالمعامل النووي g للذرة وذلك وفق المعادلة (II −2) حيث يصبح لدينا:

$$\gamma = \frac{ge}{2m} \qquad (4-II)$$

يبين الجدول القيم المميزة للنسبة الجيرومغناطيسية لبعض النويات الأساسية المستعملة بشكل خاص في الرنين المغناطيسي النووي RMN.

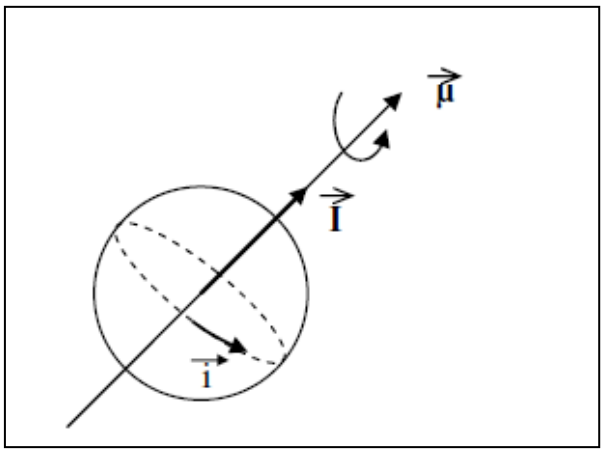
الجدول(II−1): الخصائص النووية للنظائر الأساسية المستقرة التي لها سبين لا يساوي الصفر.

النواة	السبين	نسبة التواجد	$\gamma(*)(\times 10^8 rad.S^{-1}T^{-1})$
$^{1}_{1}H$	1/2	99,99	2,675
$^{2}_{1}H$	1	0,016	0,411
$^{7}_{3}Li$	3/2	92,57	1,040
$^{10}_{5}B$	3	19,58	0,287
$^{13}_{6}C$	1/2	1,108	0,673
$^{14}_{7}N$	1	99,63	0,193
$^{15}_{7}N$	1/2	0,37	-0,271
$^{17}_{8}O$	5/2	0,037	-0,363
$^{19}_{9}F$	1/2	100,0	2,517
$^{31}_{15}P$	1/2	100,0	1,083

II-3-3سبين النواة (اللّف) :

يمثل السبين حجر الأساس في تقنية الرنين المغناطيسي النووي، حيث أن مقدار السبين $\vec{I}$ لنواة ذرة ما يحدّد العزم المغناطيسي (μ) لها، فإذا كانت قيمة السبين تساوي الصفر فالنواة لا تملك عزما مغناطيسيا (أي أنّ μ يساوي الصفر)، أمّا إذا كان اللّف يختلف عن الصّفر فيكون للنّواة عزما مغناطيسيا μ باتجاه يوازي اتجاه العزم الزّاوي للسبين.

أنظر الشّكل:



الشّكل(II-3): تمثيل العزم المغناطيسي النووي من أجل $\gamma > 0$

II-3-4 كيفية تحديد العدد الكمي للسبين I:

يمكن تحديد قيمة I لأي نواة بعد معرفة محتوياتها من بروتونات و نترونات بإتباع القواعد الثلاث التالية:

1- إذا كان العدد الكتلي A عددا فرديا فإن العدد الكمي للسبين يأخذ قيما نصف عددية أي أن:

$$I = \frac{1}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{5}{2} \ldots\ldots$$

مثلا: يكون لكل من ذرة الهيدروجين H^1، ذرة الكربون C^{13} و ذرة النتروجين N^{15} العدد الكمي للسبين مساويا إلى النصف(1/2) .

2- إذا كان كل من العدد الكتلي A والعدد الذري الشحني Z زوجيان فسيكون العدد الكمي للسبين مساويا إلى الصفر. مثال ذلك كل من ذرة الكربون C_6^{12} و الأكسجين O_8^{16} .

3- إذا كان العدد الكتلي A عددا زوجيا و العدد الذري الشحني Z فرديا فإن العدد الكمي للسبين يكون مساويا إلى عدد صحيح أي: $I = 1.2.3.4 \ldots..$

مثلا : عنصر النتروجين N^{14}(7=Z،14=A) يكون العدد الكمي له يساوي 1 .

نلخص ما سبق في الجدول التالي:

الجدول(II-2) : العدد الكمي للسبين(I) لأنوية مختلفة

A	فردي	زوجي	زوجي
Z	زوجي - فردي	فـــردي	زوجي
I	نصـف عــددي	عددي	صفر
أمثلــة	$I=\frac{1}{2}$ { $^{1}_{1}H$ $^{19}_{9}F$ $^{31}_{15}P$ $^{13}_{6}C$ $^{15}_{7}N$ $I=\frac{3}{2}$ { $^{7}_{3}Li$ $^{35}_{17}Cl$ $I=\frac{5}{2}$ { $^{17}_{8}O$	$I=1$ { $^{2}_{1}H$ $^{14}_{7}N$ $I=2$ { $^{36}_{17}Cl$ $I=3$ { $^{10}_{5}B$	$I=0$ { $^{12}_{6}C$ إذن لا يعطي إشارة الرنين النووي المغناطيسي RMN

II -4 العزم المغناطيسي :

II-4-1العزم المغناطيسي للبروتون :

تحمل البروتونات شحنة كهربائية موجبة، فعند دورانها حول نفسها تولّد حقلا مغناطيسيا يدعى بالعزم المغناطيسي للبروتون، نرمز له بالرمز $\overrightarrow{\mu_p}$ ويعطى بالعلاقة الموالية

$$\overrightarrow{\mu_p} = g_p \frac{e}{2m_p} \vec{L}_{sp} \qquad (5-II)$$

حيث :

$\vec{L}_{sp}$: الدفع الزاوي الذاتي للبروتون .

g_p: معامل لاندي للبروتون، وقيمته: $g_p = 5.586$

m_p: كتلة البروتون .

e: شحنة الإلكترون.

II-4-2 العزم المغناطيسي للنترون :

رغم أن للنترونات شحنة معدومة إلا أنها تملك عزما مغناطيسيا لدى دورانها حول نفسها (مثل ما هو الحال مع البروتونات)، ينتج هذا العزم عن دوران البنية التحتية للنترون المتمثلة في توزيع شحني للكواركات، (كواركين سفليين down ذو الشحنة $q_d = -\frac{1}{3}e$، وكوارك علوي up ذو الشحنة $q_{up} = \frac{2}{3}e$). يعطى العزم المغناطيسي للنترون بـ :

$$\mu_n = g_n \frac{e\hbar}{4m_p} = -0.966\ J.T^{-1} \qquad (6-II)$$

حيث:

g_n: معامل لاندي للنترون، وقيمته $g_n = -3.826$

لدينا من العلاقات السابقة(II-5) و(II-6) :

$$\overrightarrow{\mu_n} = -\frac{2}{3}\overrightarrow{\mu_P} \qquad (7-II)$$

II-4-3 العزم المغناطيسي للإلكترون:

إلى جانب الرنين المغناطيسي في نواة الذرة نجد أيضا رنينا مغناطيسيا للإلكترون في الذرة يستعمل لدراسة خواص مواد في ذرتها إلكترون منفرد، حيث أن للإلكترون أيضا عزما مغزليا مصحوبا بعزم مغناطيسي، اكتشف هذا الأخير في عام 1925 ، وعن طريقه أمكن تفسير بعض الظواهر التي لم تكن مفهومة آنذاك الخاصة بانفصال خطوط طيف الهيدروجين. ثم اتضح بعد ذلك أن جميع الجسيمات الأولية لها لف مغزلي.

ويوجد عدد قليل من الجزيئات التي تحوي إلكترونا منفردا (غير مقترن بإلكترون آخر في مداره). فمعظم الجزيئات المستقرة تكون الإلكترونات فيها موزعة زوجيا، لذلكفطريقة التحليل بالرنين المغناطيسي الإلكتروني أقل شيوعا من طريقة الرنين النووي المغناطيسي.

II-4-3-1الحركة المدارية للإلكترون :

تدور الالكترونات حول نواة الذرة في مدارات محددة، و تكافئ حركتها مرور تيار كهربائي في حلقة مغلقة من ناقل أومي،وقد بيّن أورستد أنّ هذه الحركة تنشئ عزما مغناطيسيا ،نسميه العزم المغناطيسي المداري ويرمز لهبـ $\overrightarrow{?_{oe}}$ ويعطى بالعلاقة:

$$\overrightarrow{\mu_{oe}} = \gamma_{oe}\vec{L} \qquad (8-II)$$

$$\gamma_{oe} = \frac{e}{2m_e} \qquad (9-II)$$

حيث:

γ_{oe} : نسبة الجيرومغناطيسية .

m_e :كتلة الإلكترون.

e : شحنة الإلكترون .

$\vec{L}$:العزم الزاوي ويدعى الدفع الزاوي المداري الذي يتحرك به الإلكترون في مداره.

II-4-3-2 لف الإلكترون (الحركة المغزلية للإلكترون) :

بالإضافة إلى الحركة المدارية للإلكترون حول النواة يلتف الإلكترون حول نفسه أيضا و تدعى حركته هذه بالسبين (Spin) أو الحركة المغزلية للإلكترون، تشبه هذه الحركة حركة تيار كهربائي في ملف حيث يكون هذا الملف على هيئة مغناطيس (ثنائي قطب) و يكون له عزم مغناطيسي ، يرمز له بـ$\overrightarrow{\mu_{se}}$و يعطى بالعلاقة:

$$\overrightarrow{\mu_{se}} = \gamma_{se}\vec{L}es = g_{se}\gamma_{oe}\vec{L}es \qquad (10-II)$$

حيث:

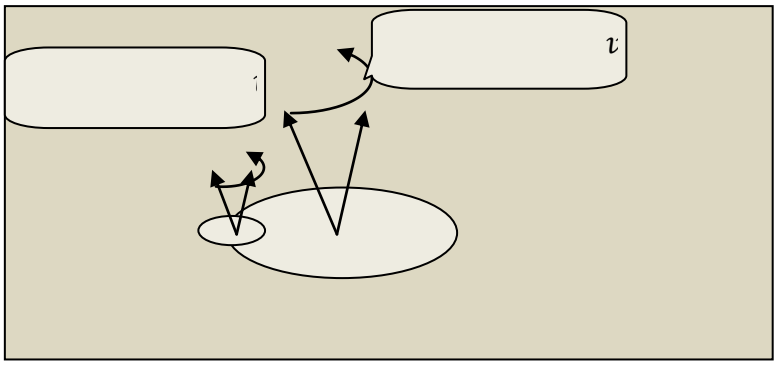
$\vec{L}es$: الدفع الزاوي الذاتي للإلكترونالناتج عن دوران الإلكترون حول نفسه.

g: معامل لاندي (Facteur de Landi) يميّز كل جسيمة.

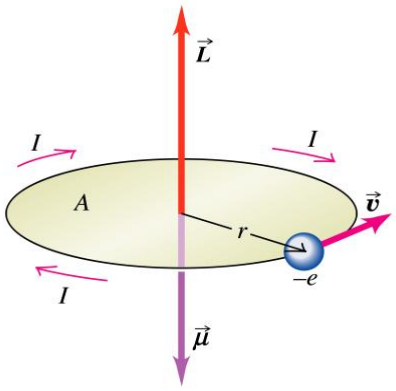
g_{es} : معامل لاندي للإلكترون ويساوي القيمة 2.

γ_{oe}: نسبة الجيرومغناطيسية .

يمكن أن يتشابك العزم المغناطيسي المداري للإلكترون مع عزمه المغزلي المغناطيسي ـ مثل تشابك مغناطيسين ـ وتنشأ لهما محصلة مغناطيسية $\vec{e}$، ونمثل هذه الحركة بالشكل الموالي:



الشكل $(4-II)$: دوران الإلكترون حول نواة الذرة وحول نفسه.



الشكل $(5-II)$: تمثيل العزم المغناطيسي و العزم الحركي.

$\vec{L}$: الدفع الزاوي الذاتي للإلكترون الناتج عن دوران الإلكترون حول نفسه.

$\vec{e}$: العزم المغناطيسي.

I: التيار الكهربائي.

$\vec{\vartheta}$: سرعة دوران الإلكترون.

II-5الخواص المغناطيسية للنوى :

يوجد عدد محدود من العناصر التى تحتوى على أنوية ذات خواص مغناطيسية قوية تتيح التطبيق العملي لإمكانية تحليلها بواسطة مطياف NMR – كما ذكرنا – مثل: الهيدروجين ^{1}H ، والكربون ^{13}C بالاضافة الى بعض العناصر الأخرى ، مثل: البورون ^{11}B، والفلور ^{19}F ، والفوسفور ^{31}P. وهذه العناصر تتميز أيضاً بأن ذراتها تحتوي على عدد فرديnomber impair من البروتونات أو النيترونات ، لها عدد كمي مغزلى (Spin nombre quantique) يساوي½ . وعلى ذلك يكون العدد الكمي المغناطيسي (nombre quantique magnétique) لها يساوي±½

ويكون عدد الاتجاهات المحتملة للعزم المغناطيسي = **2**

ويمكن حساب طاقة المستويات الناتجة عن الإتجاهات المختلفة للعزم المغناطيسي بواسطة المعادلة التالية:

$$E = \frac{m\mu}{I} B_0 \qquad (11-II)$$

E: هى طاقة المستوي .

B_o: شدة المجال المغناطيسي الخارجي .

m: العدد الكمي المغناطيسي .

I:العدد الكمي المغزلي.

μ :العزم المغناطيسي النووي.

وعلى ذلك فإن طاقة المستويات فى حالة الأنوية التي لها كوانتم مغزلي يساوي ½ تكون :

• $E_1 = -\mu B_o$ من أجل (m= + ½) $E_1= -½\ \mu B_o/\ ½$

• $E_2 =+\ \mu B_o$ (من أجل m= − ½) $E_2= ½\ \mu B_o/\ ½$

$$\Delta E = E_2 - E_1 = +\mu B_o - (- \mu B_o)$$

$$\Delta E = +\mu B_o + \mu B_o$$

$$\Delta E = 2\mu B_o \qquad (12-II)$$

ويوضح الجدول التالي حالة البروتونات والنيوترونات، وكذا الدوران المغزلي لبعض الأنوية . ويتضح من الجدول أن الدوران المغزلي لكل من الهيروجين−1، الفوسفور−31 ، الفلور− 19 و الكربون−13 يساوي ½ .

عدد البروتونات	عدد النترونات	العدد السبيني	أمثلة
زوجي	زوجي	0	$^{12}C, ^{32}S, ^{16}O$
فردي	زوجي	½	$^{1}H, ^{31}P, ^{15}N, ^{19}F$
زوجي	فردي	½	^{13}C
فردي	فردي	1	$^{1}H, ^{15}N$

^{11}B, ^{79}Br	3/2	زوجي	فردي
^{127}I	5/2	فردي	زوجي

جدول ($II-3$) : الدوران المغزلي لبعض الأنوية.

في حالة الأنوية التي يكون فيها عدد البروتونات والنترونات زوجي، تكون حركتها مغزلية في اتجاه واحد، وبذلك يكون رقم الكوانتم المغزلي لها يساوي صفرا.

في حالة الأنوية التي يكون فيها عدد البروتونات أو النترونات فردي، فتكون حركتها المغزلية في اتجاهين، ويكون رقم الكوانتم المغزلي لها يساوي ½.

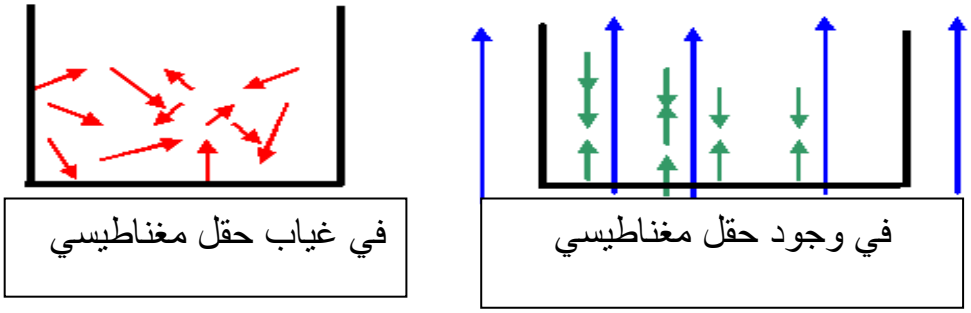
أما فى غياب المجال المغناطيسي الخارجي، فإن العزم المغناطيسي لهذه الأنوية يمكن أن يوجد في أي إتجاه، وتكون طاقة هذه الاتجاهات متساوية، و عدد الأنوية (البروتونات) الموجودة فى هذه المستويات متساوية أيضاً.

II-6 تصّرف النواة في وجود حقل مغناطيسي خارجي:

في حالة وجود مجال مغناطيسي خارجي، فإن طاقة الحركة المغزلية تنفصل الى مستويين، أحدهما عالي والآخر منخفض في الطاقة، ولذلك نجد أن هذه الأنوية تحت هذه الظروف توجّه نفسها بحيث يكون إتجاه العزم المغناطيسي لها فى إتجاه المجال المغناطيسي الخارجي، لتكون عند مستوي طاقي منخفض وتظل بعض الأنوية عكس

اتجاه المجال المغناطيسي الخارجي وتتناوب هذه الأنوية بحيث تغيّر اتجاهها لتصبح كل منها مرّة في اتجاه المجال ومرّة عكس اتجاه المجال ويوضّح ذلك في الشكل التالي.

ودائما يكون المستوي المنخفض في الطاقة (m=½) مشغول بعدد أكبر من البروتونات عن المستوي المرتفع فى الطاقة (m= −½) لأن كل نظام يميل الى التواجد في المستوي الطاقي المنخفض.



شكل $(6-II)$: **اتجاه العزم الأنوية المغناطيسي عند وضعها في مجال مغناطيسي.**

قيمة العزم المغناطيسي ثابتة بالنسبة للنوع الواحد من الأنوية، وقد وجد أنه عند وضع تلك الأنوية ذات الخواص المغناطيسية في مجال مغناطيسي خارجي شدته 14.000 جاوس وفي درجة حرارة (300 K) يكون 1.000010 نواة فى مستوي الطاقة المنخفض، بينما نجد 1.000000 نواة فقط فى مستوي الطاقة العالي وبذلك يكون الفرق فى عدد الأنوية بين المستويين هو عشرة أنوية وهي التي تكون مسؤولة عن عملية الإمتصاص للطاقة في الرنين المغناطيسي النووي.وبزيادة شدة المجال المغناطيسي، يزداد الفرق في الطاقة بين المستويين، وبالتالي يؤدي إلى زيادة عدد الأنوية الموجودة في مستوي الطاقة المنخفض بالنسبة لعدد الأنوية الموجودة في مستوي الطاقة المرتفع.

تختلف أجهزة NMR عن بعضها فى شدة المجال المغناطيسي المستخدم، وبزيادة شدة المجال المغناطيسي نحصل على فصل جيد للامتصاصات الناتجة من الأنوية المختلفة في الجزيئات.

II-6-1 التفسير الطّاقوي لسلوك بروتون في حقل مغناطيسي:

في غياب حقل مغناطيسي خارجي تكون طاقة الأنوية في كل اتجاهات السبين متساوية، و عددها في هذه المستويات متساوية أيضاً، وعند وضع هذه الأنوية تحت تأثير حقل مغناطيسي خارجي، يتفاعل هذا الأخير مع العزم المغناطيسي للنواة، حيث تعطى طاقة هذا التفاعل بالعلاقة:

$$E_m = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}_0 \qquad (13-II)$$

هذه الطاقة تتعلق إذن باتجاه العزم المغناطيسي النووي $\vec{\mu}$ بالنسبة للحقل المغناطيسي المطبق $\vec{B}_0$ و بالتالي:

$$E_m = -m_i \gamma \hbar B_0 \qquad (14-II)$$

حيث: $\hbar = \frac{h}{2\pi}$

نضع $\nu_0 = \frac{\gamma}{2\pi} B_0$ ومنه تكتب العبارة السابقة كما يلي:

$$E_m = -m_i h \nu_0 \qquad (15-II)$$

حسب العلاقة السابقة فإنه بتطبيق حقل مغناطيسي خارجي يحدث تأثير على مستويات الطاقة الخاصة بالحركة المغزلية (السبين) لهذه الأنوية، مما يؤدي الى انفصال طاقة

الحركة المغزلية إلى $(2I+1)$ مستوى حيث يعطى الفرق الطاقوي بين مستويين متعاقبين بالعلاقة :

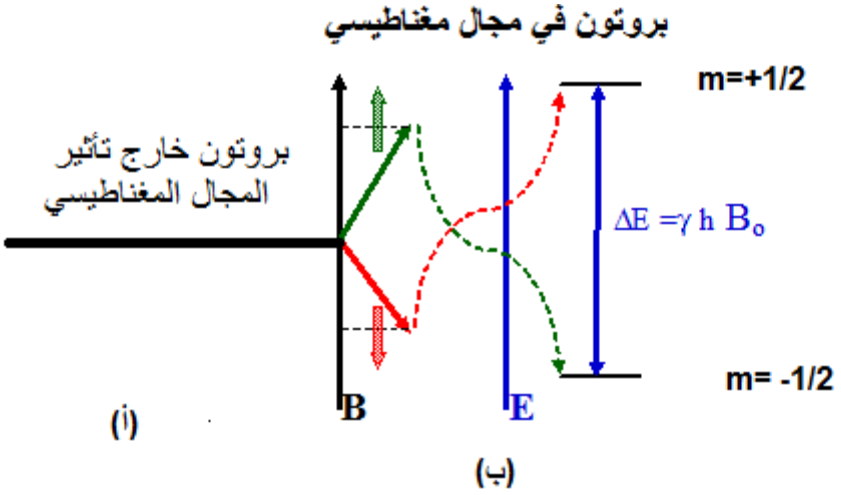
$$\Delta E_m = \Delta m_i h\nu_0 \qquad (16-II)$$

ونظرا لكون ($\Delta m_i = 1$) بين الحالتين، يكون فرق الطاقة بينها:

$$\Delta E_m = h\nu_0 \qquad (17-II)$$

يوضّح الشكل التالي الحالات الطاقية لبروتون (H^1) عند وجوده (أ) خارج تأثير الحقل المغناطيسي و (ب) تحت تأثير الحقل المغناطيسي شدته B0 . نعلم أن للبروتون سبين $(I=1/2)$ وبالتالي تنفصل طاقة الحركة المغزلية إلى مستويين للطاقة مختلفين وهما:

- من أجل$(m_i=+1/2)$ توافق مستوى طاقي منخفض $E_{1/2} = -\frac{1}{2}h\nu_0$ وهنا يكون العزم المغناطيسي في اتجاه الحقل المغناطيسي الخارجي.
- من أجل$(m_i=-1/2)$ توافق مستوى طاقي مرتفع $E_{-1/2} = \frac{1}{2}h\nu_0$ وهنا يكون العزم المغناطيسي في اتجاه معاكس للحقل المغناطيسي الخارجي.



الشكل $(7-II)$: الحالات الطاقية لبروتون عند وجوده (أ) خارج تأثير المجال المغناطيسي و (ب) تحت تأثير مجال المغناطيسي شدته B_0.

فرق الطاقة (ΔE) بين حالتي بروتونات العينة هذه يكون كالتالي:

$$\Delta E = \gamma\hbar B_0 = h\nu_0 \qquad (18-II)$$

إن الانتقال بين هاتين الحالتين من الطاقة الشكل$(2-9)$ يعني إمكانية عكس اتجاه السبين للنّواة من الاتجاه الخارجي إلى الاتجاه الدّاخلي أو بالعكس و يكون هذا على التّوالي مصحوبا بامتصاص طاقة أو انبعاث طاقة على شكل إشعاع كهرومغناطيسي و في كلتا الحالتين يمكن حساب مقدار هذه الطاقة وفق معادلة بور حيث يكون: $\Delta E = h\nu_0$

يمثل (ν_0) تردد الإشعاع الكهرومغناطيسي الممتص أو المنبعث و يمكن التعبير عنه بدلالة التردد الزاوي(ω_0) ، لذا تكون :

$$\Delta E = \hbar\omega_0 \qquad (19-II)$$

حيث أن $(\omega_0 = 2\pi\upsilon_0)$ و بالاستعانة بالمعادلة (II-19) يكون لدينا:

$$\omega_0 = \gamma B_0 \qquad (20-II)$$

و تدعى ω_0 بالتردد الرنيني، أو تردد لارمور.

عندما تأخذ شدّة المجال المغناطيسي الخارجي (B_0) القيم العملية، يكون الإشعاع الكهرومغناطيسي المناظر واقعا في مدى الأشعة الميكروية و يعتمد تردده على مقدار (B_0). حيث يوضع جدول لقيم الترددات الرنينية لبعض العناصر ذات النويّات الفعالة مغناطيسيا، عند وضعها في مجالات مغناطيسية خارجية ذات قيم تطبيقية مختلفة، من أجل الانتقال من حالة طاقية إلى حالة أخرى يجب أن تكون القاعدة التالية محققة :

$\Delta m_i=+1$ مثلا بين المستويات التالية :

$m_i=+ ½$ و $m_i=- ½$ الانتقال ممكن.

$m_i=+ 1$ إلى $m_i=0$ الانتقال ممكن.

بينما الانتقال من المستويات $m_i=+ 1$ و $m_i=- 1$ هي انتقالات غير ممكنة .

الجدول التالي يوضح ترددات الرّنينين لأهم الأنوية المستعملة في المجال التّطبيقي لتقنية الرنين النووي المغناطيسي عند وضع هذه الأنوية في مجال مغناطيسي ثابت الشدة :

الجدول (II-4): تردد الرنين لنويات بعض العناصر في حقلين مختلفين .

النّـــــــواة	**شدة الحقل المغناطيسي الثّابت (T)**	**تردد الرّنين (ZH.GM)**
الهيدروجين: ^1H	1.41 4.7	60 200
الديتريوم: ^2D	1.87 4.7	12.21 30.7

البـورون : ^{11}B	1.87 4.7	25.52 64.185
الكـاربون : ^{13}C	1.87 4.7	20 50.3
الـنتروجين : ^{14}N	1.87 4.7	5.75 14.45
النتروجين :^{15}N	1.87 4.7	8.06 20.27
الأكسوجين : ^{16}O	1.87 4.7	10.87 27.12
الفلــور : ^{19}F	1.87 4.7	74.8 188.2
الصوديوم : ^{23}Na	1.87 4.7	21.04 52.92
الفسـفور: ^{31}P	1.87 4.7	74.8 188.2
الكـلور : $^{35}C\ell$	1.87	7.79

	4.7	16.32
البوتاسيوم : ^{39}k	1.87	3.71
	4.7	9.34
المنغانيز : ^{55}Mg	1.87	9.34
	4.7	19.62 أو 49.34
اليــود : I^{127}	1.87	15.95
	4.7	40.03

II-7توزيع بولتزمان لحالات السبين لنويات عينة :

لإيجاد عدد أفراد عينة مكوّنة من مجموعة من الذّرات أو الجزيئات أو النّويات عند حالة طاقة معينة ، تشير الدّراسة أنّ هناك احتمالية محددة تعرف بدالة رياضية .

إنّ حالة الطّاقة في عينة من النّويات تتميز عن بعضها بالعدد الكمي m_i الذي يتسبب في وجوده حقل مغناطيسي خارجي ثابت الشّدة و الاتجاه، مسلّط على العينة محل الدراسة .

إذن في وجود حقل مغناطيسي فإنّ النّويات تتوزع على مستويات محددة للطّاقة حسب مقدار السبين،فإذا فرضنا بأن العينة هي مجموعة (N) من البروتونات يكون لدينا حالتان من الطاقة أو مستويين طاقيين، فمجموعة (N_1) من البروتونات يكون لها سبين نحو الأعلى($m_i = +\frac{1}{2}$) موافقة للمستوى الطاقي المنخفض (E_1)، ويكون للمجموعة الأخرى (N_2) من البروتونات سبين ($m_i = -\frac{1}{2}$)نحو الأسفل وتكون موافقة للمستوي الطّاقي

المرتفع (E_2)، كما أنّ عدد البروتونات ذات الطاقة المنخفضة (N_1) تكون أكبر من عدد البروتونات ذات الطاقة المرتفعة (N_2).

تعطى نسبة التأهيل $\frac{N_2}{N_1}$ بين هذين المستويين من الطاقة في حالة التوازن بدالة أسية تعرف بدالة التوزيع لبولتزمان أي :

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-(E_2-E_1)/KT} \qquad (21-II)$$

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-(\Delta E)/KT} \qquad (22-II)$$

حيث:

K : ثابت بولتزمان.

T : درجة الحرارة المطلقة للعينة في حالة التوازن .

ΔE : فرق الطاقة بين حالتي السبين لنويات العينة .

من الواضح إذن من خلال معادلة بولتزمان أنه كلما زاد فرق الطاقة ΔE بين حالتي السبين كلما زاد فرق التأهيل بينهما، يمكن كتابة معادلة بولتزمان بدلالة تردد لارمور من خلال العلاقات :

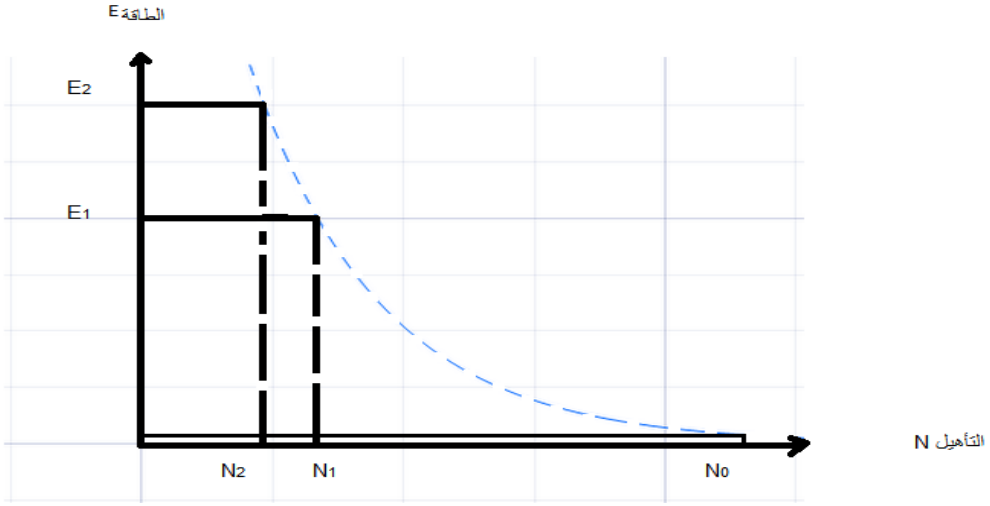
[(18-II)،(19-II) و(22-II)] كما يلي :

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\hbar\gamma B_0/KT}$$

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{h\nu_0}{KT}}$$

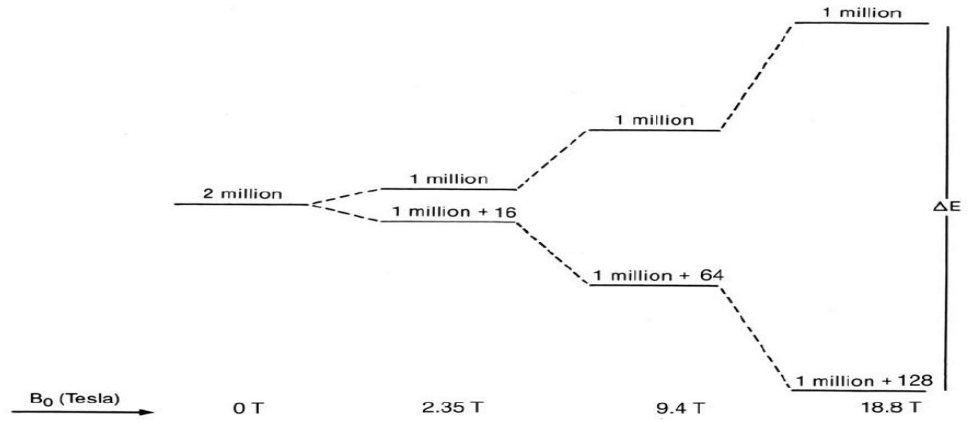
$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\hbar\omega_0/KT} \qquad (23-II)$$

إنّ شدّة الإشارة في ظاهرة الرنين المغناطيسي النووي تعتمد على شدة الانبعاث أو فرق التأهيل لمستوى الطاقة،لهذا تزداد شدة الإشارة بازدياد شدة المجال المغناطيسي، فبوجود عينة مثلا بدرجة حرارة الغرفة و باستعمال مجال مغناطيسي شدته 1 تسلا، يكون عدد الأنوية ذات سبين باتجاه الموازي للمجال أكبر من عدد الأنوية المعاكسة له بما يعادل ثلاث نويات لكل مليون ،أنظر الشكل :



الشكل $(8-II)$: دالة توزيع بولتزمان لتأهيل مستويات الطاقة لنظام في حالة توازن حراري.

من أجل توضيح تأثير تغير الحقل المغناطيسي الخارجي على عدد الأنوية المنحازة إلى المستوي الطاقي المنخفض أو المرتفع نرفق هذا العمل بالشكل التالي :



الشكل $(II-9)$: تأثير تغير شدة الحقل على عدد الأنوية المنزاحة للمستوي الطاقة الأعلى أو المنخفض.

II-8 ظاهرة المغنطة النووية:

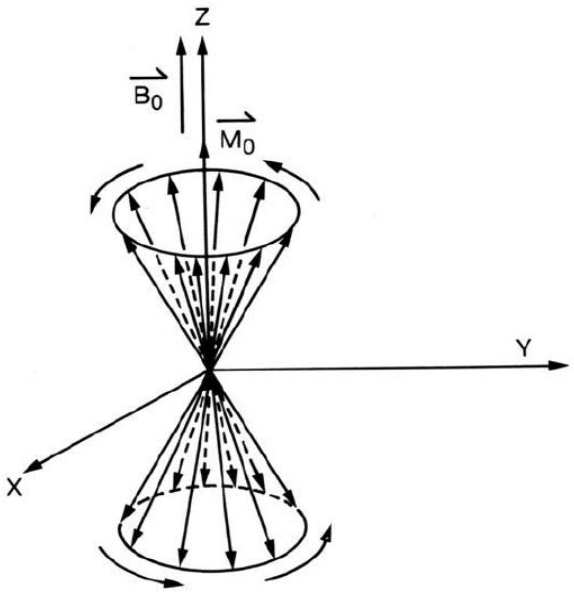
عند تعريض عينة من المادة لحقل مغناطيسي B_0 فإن العزوم المغناطيسية لجزء من نويات هذه العينة تكون موازية لاتجاه الحقل المغناطيسي المطبق، بينما جزء أقل بقليل من نوّيات العينة يكون في الاتجاه المعاكس للحقل المغناطيسي، هذا الفرق البسيط في الاتجاهين هو ما ينتج المغنطة الكلية $\vec{M}$ و التي تمثل المحصلة الشّعاعية لكل العزوم المغناطيسية لنوّيات هذه العيّنة حيث يكون لها نفس اتجاه الحقل المغناطيسي، هذه المحصلة تسمى المغنطة النووية (مغنطة طولية) و يرمز لها بـ $\vec{M}$.

تعطى طويلة شعاع المغنطة بالعلاقة التالية :

$$M = N \cdot \frac{\gamma^2 \hbar^2 B_0}{KT} \qquad (29-II)$$

بما أن الفرق بين الإتجاهين لنوّيات العينة يعتمد على شدة الحقل المغناطيسي الخارجي، فإن المغنطة الكلية M_z (إذ افترضنا أنّ الحقل المغناطيسي المطبق باتجاه $\overrightarrow{OZ}$) ستزداد

بزيادة شدة هذا الحقل المغناطيسي، هذه المغنطة الكلية هي التي تعتمد كأساس للدراسة و القياس في تقنية الرنين المغناطيسي النووي.



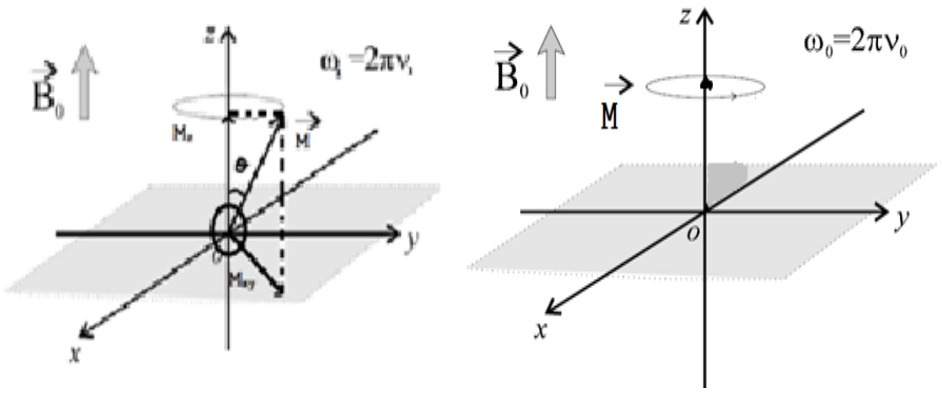
الشكل $(II-10)$:اتجاه المغنطة لعينة من البروتونات موضوعة في مجال مغناطيسيB_0.

إن هذه النوّيات المحرّضة عند رجوعها إلى وضع الاستقرار (حالة الطاقةالمنخفضة) ينبعث منها إشعاعا كهرومغناطيسيا بهذا المدى، لو تعرضت هذه العينة من البروتونات لإشعاع كهرومغناطيسي خارجي ذي طاقة تعادل فرق الطاقة بين حالتيهما لأصبح بالإمكان العمل على مساواة عدد البروتونات لهاتين الحالتين،إن هذا الإشعاع يجب أن يقع في المستوى الراديوي.

II-9 التحريض بواسطة المجال الراديوي وإشارة الـ NMR :

لأجل إثارة النويات ذات الخواص المغناطيسية و هي تحت تأثير الحقل المغناطيسي الخارجي$\vec{B}_0$، نستخدم حقل كهرومغناطيسي راديوي، ذو تردد لارمور ω_0 موافق للنواة المدروسة و الطريقة المستخدمة هي استعمال موجات راديوية (R F) العالية الشّدة والقصيرة

المدى (الإثارة النبضية) . كما قلنا سابقا المغنطة الكلية هي المقدار الأساسي المقاس في تقنية الرنين المغناطيسي النووي، و هي متناسبة مع عدد نوّيات العيّنة و شّدة الحقل المغناطيسي المطبق. هندسيا ليكون بالإمكان قياس المغنطة الكلية يجب إمالة وتغيير جهتها بزاوية θ عن اتجاه المجال المغناطيسي الخارجي وتدعى بزاوية الميل، لأجل ذلك يطبق حقل مغناطيسي $\vec{B}_1$(حقل كهرومغناطيسي راديوي) عمودي على $\vec{B}_0$، كما تسبب للنظام هذه الإثارة حركة مدارية حول $\vec{B}_1$ و بتردد لارمور ذاته . وبالتالي فإن اتجاه المغنطة الكلية تصبح موازي لـ $\vec{B}_1$ و يمكن قياسها تطبيقيا.



أ–في عدم وجود الموجة الراديوية. ب–في وجود موجة راديوية .

الشكل $(II-11)$:عند استخدام نبضة الرنين الراديوية المناسبة في السعة والتواتر يمكن تدوير محصلة التمغنط بزاوية θ عن المحور (ZO) .

يمكن حساب زاوية ميل النظام θ من معادلة لارمور أيضا و لكن هنا نأخذ تردد الموجة المستعملة،فإذا فرضنا بأن شّدة المجال المغناطيسي لهذه الموجة يساوي B_1 و أن ω_1 سرعة الزاوية التي تدور بها $\overrightarrow{M_0}$ حول B_0 فإن العلاقة بينهما تكون :

$$\omega_1 = \gamma B_1 \qquad (25 - II)$$

فإذا كان أمد النبضة الراديوية المستخدمة هو t_p فإن عدد الدورات التي يمكن أن تصنعه $\overrightarrow{M_0}$في هذا الزّمن هو (n)، و يصبح لدينا معادلة من الشكل التالـي :

$$n = \gamma B_1 t_p \qquad (26 - II)$$

II-10الحساسية النسبية للمادة بالنسبة لظاهرة الرنين المغناطيسي النووي :

من أجل مقارنة الفعالية المغناطيسية لمختلف العناصر تجاه تقنية الرّنين المغناطيسي النّووي، نتخذ ذرة الهيدروجين ^{1}H أو ذرة الكربون ^{13}C كأساس مرجعي في حقل مغناطيسي ثابت الشدة، ونقوم بحساب نسبة فعالية مختلف العناصر الأخرى بالنسبة للذرة المرجعية لنفس عدد الذّرات،تعرف هذه النّسبة بالحساسية النّسبية للمادة بالنسبة لظاهرة الرنين المغناطيسي النووي، وسنقدم جدولا يظهر هذه الحساسية النّسبية بالإضافة إلى بعض الخصائص المغناطيسية لهذه المواد .

الجدول($(5 - II)$: بعض الصفات المغناطيسية ذات العلاقة بتقنية الرنين المغناطيسي النووي لبعض العناصر.

بعض الصفات المغناطيسية ذات العلاقة بتقنية الرنين المغناطيسي النووي لبعض العناصر							
النواة	الرمز	العدد الكمي للسبين i	نسبة تواجدها في الطبيعة	العزم المغناطيسي μ 10^{-27} $\frac{J}{T}$	النسبة الجيرومغناطيسية $\frac{MHZ}{T}$	الحساسية نسبة لذرة الهيدروجين	الحساسية نسبة لذرة الكاربون

				%			
62.91	1	42.58	2.793	99.98	1/2	$_{1}H^{1}$	الهيدروجين
1	0.016	10.71	0.702	1.108	1/2	$_{6}C^{13}$	الكربون-13
0.063		3.08	0.404	99.635	1	$_{7}N^{14}$	النتروجين
52.283	0.830	40.05	2.627	100.00	1/2	$_{8}F^{19}$	الفلور
5.822	0.093	11.26		100.00	2/3	$_{11}Na^{23}$	الصوديوم
4.173	6.6×10^{-2}	17.23	1.131	100.00	1/2	$_{15}P^{31}$	الفوسفور
0.296			0.821	75.40	3/2	$_{17}Cl^{35}$	الكلور
0.032	5.08×10^{-4}	1.99		93.08	3/2	$_{19}K^{39}$	البوتاسيوم
11.013				100.00	5/2	$_{25}Mn^{55}$	المنغانيز
5.879			2.794	100.00	5/2	$_{53}I^{127}$	اليود

نلاحظ من خلال هذا الجدول غياب بعض العناصر الأكثر وفرة في الطبيعة وهي : الكربونC^{12}،الأكسجين O^{16} والكبريت S^{32} ....الخ .

و ذلك لأنّ فعاليتهاالمغناطسية تساوي الصفر بسبب أن عددها الكمي للسبين يساوي الصفر $(I = 0)$.

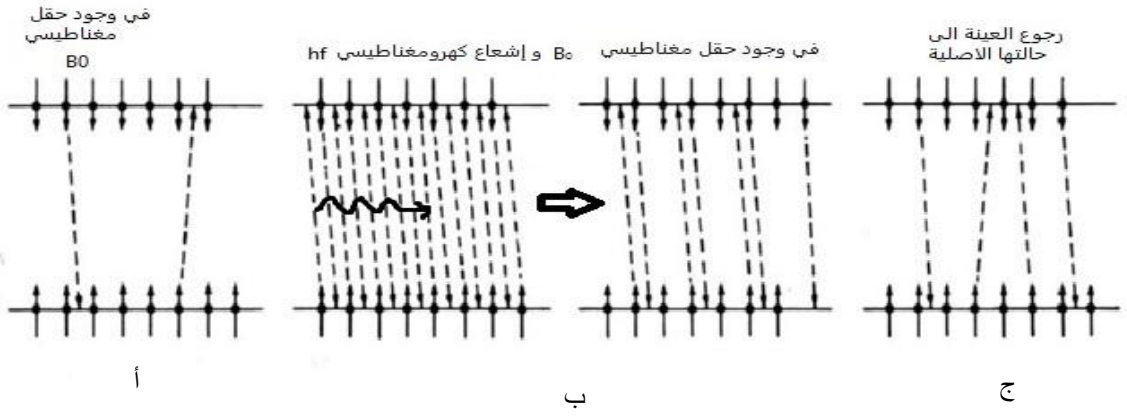
II-11تفسير ظاهرة الرّنين المغناطيسي النّووي :

من أجل معرفة المفهوم الطّاقوي لظاهرة الرنين المغناطيسي نأخذ كمثال عينة من البروتونات (غاز الهيدروجين المؤين) وهي أبسط حالة من حيث الدّراسة،وقد علمنا سابقا أنه عند تسليط حقل مغناطيسي خارجي ثابت الشّدة و الاتجاه فإنه تكون لدينا الخصائص التالية : $I = \frac{1}{2}$ و $m_i = \frac{+1}{-2}$

فرق الطاقة بين الحالتين يعطى بالعلاقة $(18-II)$.

إن إمكانية تحريض البروتونات من مستوى طاقة أدنى إلى مستوى طاقة أعلى عن طريق تعريض عينة البروتونات هذه إلى إشعاع كهرومغناطيسي ذي طاقة فوتون يناسب فرق الطاقة بين حالتي العينة و الذّي بدوره يعتمد على شدة الحقل الخارجي وهذا حسب العلاقة $(18-II)$. فإذا ما امتصت النّواة هذا القدر من الطاقة فإن ذلك يكفي لعكس اتجاه السبين لها (أي من الاتجاه $m_i = -\frac{1}{2}$ إلى الإتجاه المعاكس . $m_i = +\frac{1}{2}$)

تدعى الطاقة الموافقة لهذا التغير بطاقة الرنين أنظر الشكل التالي:



الشكل$(II-12)$: أ-عينة من البروتونات تحت تأثير حقل مغناطيسي $\vec{B_0}$، ب-تعريض العينة إلى إشعاع كهرومغناطيسي $E = \hbar\omega_0$ ، ج- زوال سبب التحريض ورجوع العينة إلى وضعها الأصلي بانبعاث إشعاع طاقته $\Delta E = \hbar\omega_0$

إن الإشعاع الكهرومغناطيسي اللازم لهذه العملية يقع كما ذكرنا في مدى الأشعة الراديوية، و مقدار الأشعة الممتصة أو المنبعثة من قبل هذه الأنوية تمثل إشارة الـ NMR التي يتمّ تسجيلها و تعرف بطيف الرنين المغناطيسي النّووي. إن طيف الامتصاص لظاهرة الرنين المغناطيسي النووي لنويات عينة (يتم تسجيله بمطياف خاص) يزودنا بمعلومات مهمة حول التركيب الكيميائي للعيّنة المدروسة، حيث يقدم دلالة على كيفية تواجد البروتون في محيطه(وهذا ما سنتطرق اليه في الفصل الثالث)، و من جهة أخرى قد تفقد النّواة طاقتها دون أن تشع و عبر عمليات الإزدواج مع محيطها (عملية الإسترخاء) وهذه العملية مهمة في ديمومة الرنين و في تطبيقاتها أيضا كما سنتعرض إليه لاحقا .

II-12عملية الإسترخاء Relaxation process:

عندما يحدث امتصاص لطاقة موجات أشعة الراديو ، تنتقل الأنوية من مستوى الطاقة المنخفض إلى مستوى الطاقة الأعلى ، وينتج عن ذلك إنحراف النظام عن الإتزان الحرارى وإذا لم يتم رجوع الأنوية من المستوى العالى فى الطاقة إلى المستوى المنخفض مرة أخرى فإن عملية الإمتصاص لا يمكن أن تستمر وهذا ما يطلق عليه التشبع saturation ويكون الامتصاص فى هذه الحالة صغير جداً وقد لا يمكن الكشف عنه عمليا ، ولكن الذى يحدث فى الأنظمة الكيميائية أن الطاقة الممتصة عادة ما تفقد بسرعة وبذلك تستمر عملية الأمتصاص ويمكن الكشف عنها ، وعملية فقد الطاقة المكتسبة فى هذه الحالة تسمى عملية الإسترخاء relaxation process أما الوقت الذي يستغرق لفقد هذه الطاقة يسمى relaxation time وتتم عملية الإسترخاءrelaxation process بطريقتين هما:

II-12-1 الإسترخاءالطولي Longitudinal or spin-lattice relaxation :

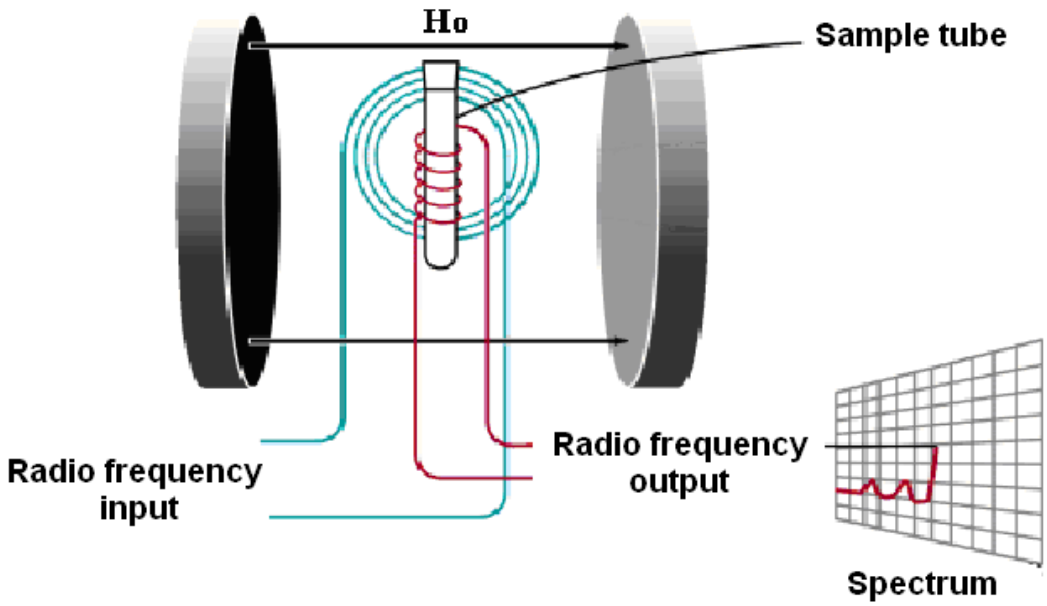
يتم الإسترخاء عن طريق فقد الطاقة من النواة إلى بقية الجزئ . وكفاءة هذه الطريقة يعبر عنها بالزمن الذى يستغرق فى عملية نقل الطاقة من النواة وهى فى مستوى الطاقة العالى إلى مستوىالطاقة المنخفض ، وكلما كان هذا الزمن صغير يدل على كفاءة نقل الطاقة وينتج عن ذلك إتساع منحنى الإمتصاص broadening ، وتحدث هذه العملية فى حالة السوائل والمحاليل والغازات.

II-12-2 الإسترخاء المستعرض Transverse or spin- spin relaxation :

يتم الإسترخاء عن طريق تأثير الحركات المغزلية للأنوية المجاورة ،وتحدث هذه العملية بإنتقال الطاقة من النواة وهى فى مستوى الطاقة العالى إلى نواة أخرى مجاورة توجد فى مستوى الطاقة المنخفض ، وهذه الطريقة ذات أهمية فى حالة المواد الصلبة.

II-13مكونات مطياف الرنين النووي المغناطيسي:

تتكون أجهزة الرنين النووي المغناطيسي من خمسة أجزاء رئيسية كما هو موضح لاحقا بشكل (*II*-13).



شكل (*II*−13): رسم تخطيطي لمطياف الرنين النووي المغناطيسي

(1) المغناطيس Magnet:

يستخدم المغناطيس لفصل مستويات الطاقة المغناطيسية للأنوية المختلفة ، ويمكن إستخدام مغناطيس دائم permanent mangnet أو مغناطيس كهربى electromangnet ، وتوضع العينة في الجهاز بين قطبى المغناطيس الذى يشترط فيه أن يعطى مجالاً مغناطيسياً متجانسا Homogeneous field وأن يكون ثابتاً بدرجة مناسبة.

(2) وحدة تغيير شدة المجال Magnetic Field Sweep Generator :

يتم تغيير شدة المجال المغناطيسي بواسطة ملف coil فى مواجهة قطبى المغناطيس وهذا الملف متصل بمولد كهربى متغير sweep generator فعند تغيير شدة التيار الكهربى المستمر DC فى الملف يتغير شدة المجال المغناطيسى فى منطقة العينة فى حدود طفيفة وهذا التغيير يكون فى حدود 1000 هرتز فى مطياف الرنين النووي المغناطيسي الذي يستخدم أشعة ترددها 60 MHz والذي يسمي NMR.

(3) مصدر إنتاج موجات أشعة الراديو Radiofrequency Transmitter:

تنتج أشعة الراديو من متذبذب أشعة الراديو radiofrequency oscillator حيث تغذى فى سلك مزدوج coil ملفوف حول العينة والذى يسمى ملف الأرسال transmitter coil ويكون محوره عمودياً على اتجاه المجال المغناطيسي.

ويتم اختيار وحدة إنتاج أشعة الراديو على حسب تردد الأشعة المطلوب والتى تتوقف بالتالى على شدة المجال المغناطيسى المستخدم فى الجهاز ، على سبيل المثال فى حالة إستخدام مغناطيسى 14 كيلو جاوس يكون تردد الأشعة المطلوب 60 MHz.

(4) وحدة وضع العينة Sample Holder and Probe:

تستخدم أنابيب من الزجاج قطرها الداخلى 5mm لوضع العينات وهذه الأنبوبة تكون متصلة بتربين turbine يدار بالهواء ، يمكن بواسطته دوران الأنبوبة حول محورها الرأسى عدة مئات من الدورات فى الدقيقة x cycle / min، وهذا الدوران يقلل من التأثير الناتج عن عدم التجانس فى المجال المغناطيسى الخارجى.

(5) وحدةالكشاف Radiofrequency Receiver or Detector:

يمكن الكشف عن إمتصاص أشعة الراديو بواسطة ملف آخر من السلك يحيط بالعينة أيضاً ويكون عمودياً على كل من ملف الإرسال والمجال المغناطيسي ويطلق عليه ملف الإستقبال receiver coil ويتولد فيه فيض كهربى ينتقل إلى المستقبل receiver حيث يتم تكبيره وتسجيله.

(6) وحدة التكامل الأيكترونية Electronic Integrator:

تحتوى جميع أجهزة الرنين النووي المغناطيسي على وحدة لقياس المساحة تحت كل منحنى إمتصاص وتسمى وحدة تكامل أليكترونية Electronic Integrator وهذه المساحة تتناسب طردياً مع عدد البروتونات المسؤولة عن هذا الامتصاص.

وكما ذكرنا سابقاً تختلف أجهزة NMR عن بعضها فى شدة المجال المستخدم وبالتالى فى تردد أشعة الراديو المستخدمة ، وتميز الأجهزة المختلفة بناء على تردد الأشعة المستخدمة فى الجهاز.

الفصل الثالث

تطبيقات الرنين المغناطيسي النووي

مقـدمة:

تقنية الرنين المغناطيسي النووي أصبحت ذات أهمية رفيعة ، فهي وسيلة للكشف عن التركيب الجزيئي لكثير من المواد وكذلك استعملت في مجال الطب وفي مجالات أخرى ونتطرق في هذا الفصل الى تطبيقات هذه التقنية.

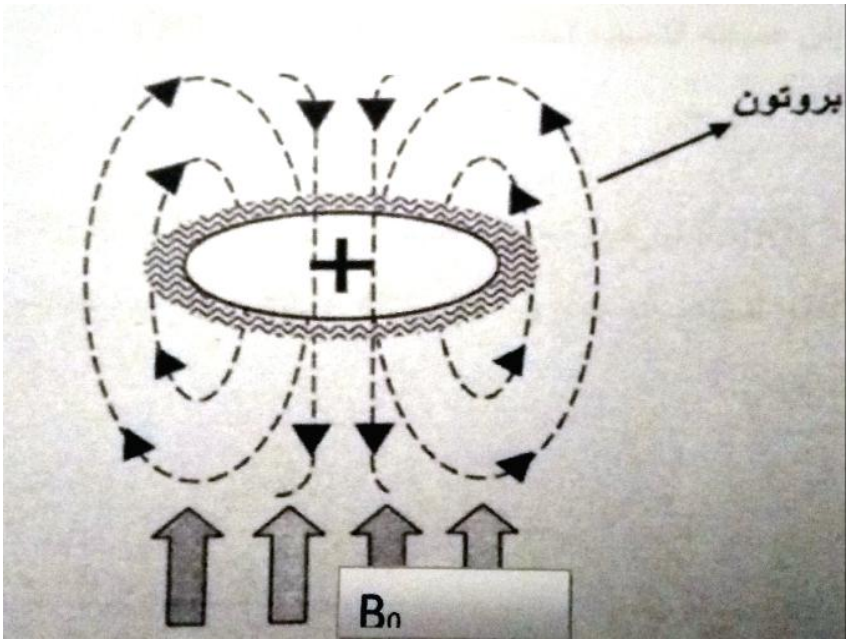
III-1- الحجب:

عادة ما تكون البروتونات المتكافئة كيميائيا متكافئة مغناطيسيا، وبذلك يكون تأثيرها بالحقل المغناطيسي خارجي B_0 بنفس الدرجة، أما البروتونات غير المتكافئة كيميائيا فتكون غير متكافئة مغناطيسيا هذا ما يجعل تأثرها بالحقل الخارجي B_0 مختلف سبب هذا الاختلاف يرجع الى اختلاف البيئة التركيبية التي توجد فيها البروتونات، وما ينتج عن هذه البيئة من حجب للبروتونات عن المجال الخارجي B_0 .

عند وجود بروتون في جزيء ما، فإن الإلكترونات الرابطة التي تربطه بالذرة المتصلة به تدور حوله، وهذا الدوران ينتج عنه مجال مغناطيسي صغير σ يسمى الحجب، اتجاهه معاكس لاتجاه الحقل الخارجي، هذا ما يجعل شدة الحقل المؤثر على البروتون هي $(B_0 - \sigma)$ إذن حدث حجب للبروتون عن المجال B_0.

لكن درجة الحجب تتأثر بالكثافة الإلكترونية، حيث كلما زادت الأخيرة حول البروتون زادت درجة حجب البروتون عن الحقل الخارجي B_0، كما تتأثر درجة الحجب كذلك بالكهروسلبية لذرة العنصر المرتبط بالبروتون.

تأخذ البروتونات الغير المتكافئة كيميائيا عموما درجات حجب مختلفة، هذا ما ينتج عنه الاختلاف في تأثرها بمجال مغناطيسي خارجي إذا وضعت فيه.



الشكل(III-1): الحقل المغناطيسي الناتج عن دوران إلكترونات الرابطة

مثال1:

أوضح طيف RMNH لمركب مجهول الصيغة المفصلةوصيغته المجملة C_2H_6O إشارة واحدة، نستنتج أن بروتوناته الستة متكافئة ولها نفس الإحاطة الإلكترونية.

إذن صيغته النصف المفصلة هي: $CH_3\text{-}O\text{-}CH_3$

مثال2:

أوضح طيف RMNH لمركب مجهول صيغته $C_9H_{10}O$ ثلاثة إشارات عند ترددات مختلفة، نستنتج أنه يحتوي على ثلاثة أصناف من البروتونات، إذن صيغته المفصلة هي:

تظهر هذه الأمثلة فوائد استخدام مطيافية رنين البروتون المغناطيسي، وهي أن عدد الترددات التي يحدث عندها امتصاص أشعة الراديو تقابل عدد أصناف البروتونات في الجزيء المدروس.

III-2الإزاحة الكيميائية:

تعرف الفروقات في التردد بين التردد الرنيني للنويات الموجودة في ظروف تركيبية مختلفة نسبة الى خط الامتصاص الذي يمثل المرجع بالإزاحة الكيمائية (δ) فإذا كان خط الإمتصاص للمرجع يعود الى بروتين وحده مثلا فإن الإزاحة الكيميائية تصبح مساوية الى ثابت الحجب (α) الذي هو مقياس للفرق بين المجال المسلط والمجال الذي تشعر به النواة

تقدر الإزاحة الكيميائية (δ) بوحدة جزء لكل مليون (ppm).

نظرا لصعوبة تحديد ترددات امتصاص أشعة الراديو بدقة، نلجأ إلى طريقة أخرى هي قياس القيمة المطلقة للتردد اللازم لإحداث الرنين المغناطيسي، وذلك بقياس الفرق بين التردد المقابل لرنين البروتون المدروس و التردد المقابل لإحداث رنين بروتون في مركب مرجعي وهو تيترا ميثيل سيلان. ويرمز له بـTMS.

تم اختيار هذا المركب كمرجع لاحتوائه على جملة من الخصائص أهمها أن الإثناعشر بروتون التي يحتويها تكتسب درجة حجب أكبر من أي درجة حجب لأي بروتون آخر. كذلك كون درجة غليانه منخفضة ($26.5C°$) وهو ما يسمح بإزالته من العينة بعد تسجيل طيفها كما أنه مركب خامل لا يتفاعل مع المركبات العضوية.

وتعطي علاقة الإزاحة الكيميائية :

حيث:

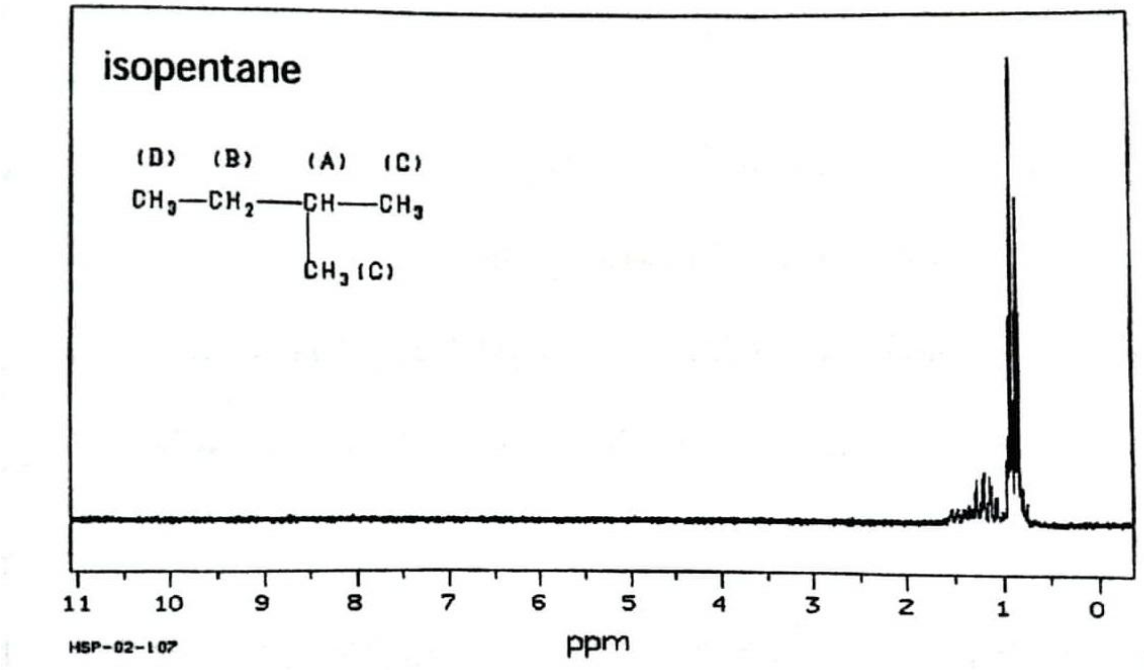
υ_{ech}: التردد الرنيني للعينة.

υ_{TMS}: تردد الرنيني لمكعب التيترا ميثيل سيلان.

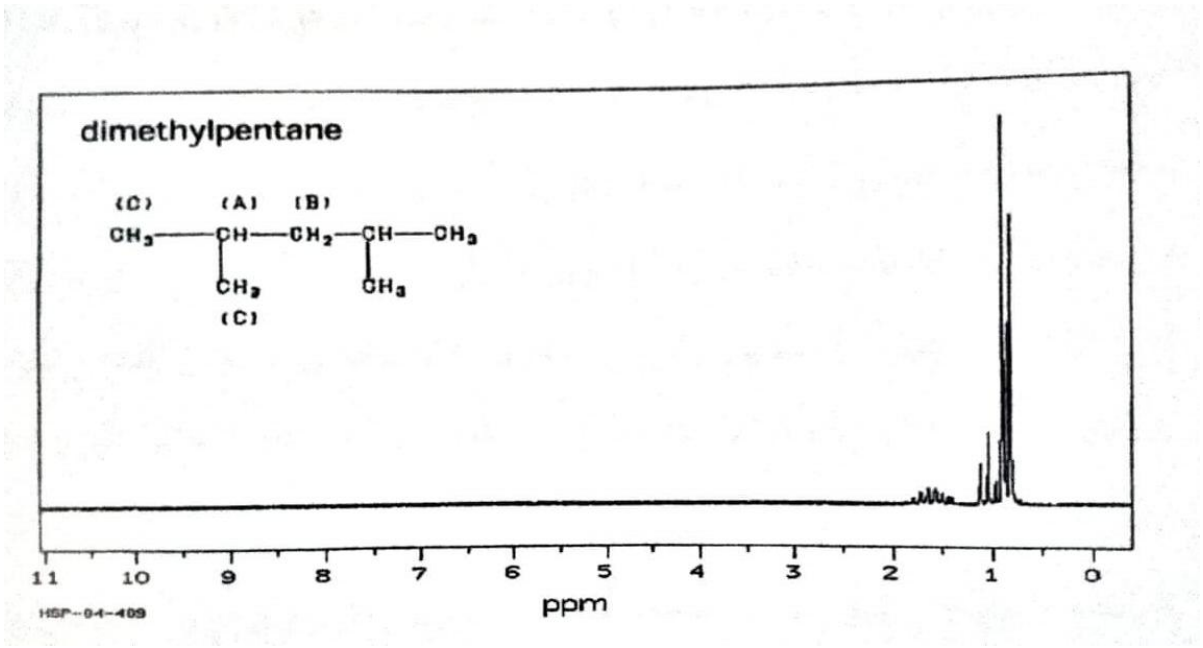
υ_0: التردد الناتج عن الحقل المطبق B_0.

إذا كانت درجة الحجب للبروتون 1 أكبر من درجة حجب للبروتون2، فإن الإزاحة الكيميائية للبروتون الأول أقل من الثاني. إن درجة حجب بروتون ما و الازاحة الكيميائية تتوقف على البيئة البنيوية له.

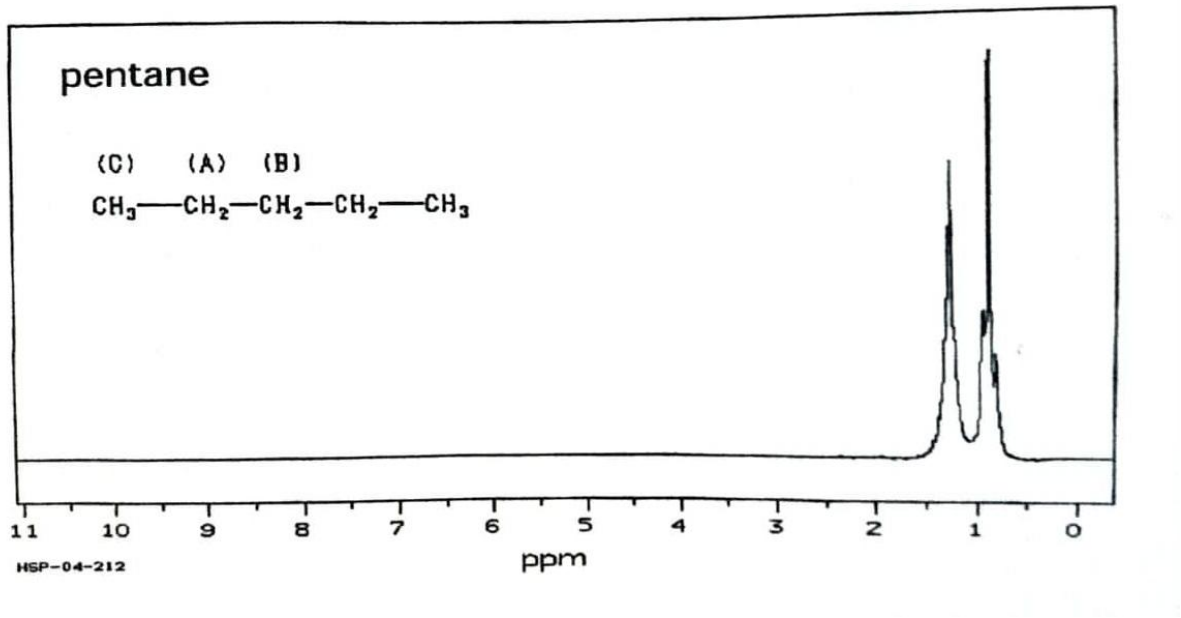
ملاحظة : إن دراسة الأطياف الذرية لمختلف المركبات الكيميائية تقدم لنا عدة معلومات عن صيغها الجزيئية وطبيعتها الكيميائية، كما قد وسعوا هذه الدراسة وقاموا بالاستغلال الأمثل لهذه التقنية الفيزيائية، من بعض ما قاموا به تصنيف قيم الإزاحات الكيميائية لمختلف المركبات الكيميائية في جداول مرتبة. فعند دراستنا لجزيء ما نقوم فقط بمقارنة أطياف العينة المدروسة مع النتائج المدونة في الجداول من أ جل الحصول على المعلومات الكافية لمعرفة هذه الجزيئات مهما كانت درجة تعقدها ومهما كان حجمها سنقدم فيما يلي واحدا من هذه الجداول و الأطياف:



الشكل(III-2): طيف الـــRMNH للإيزوبنتان.



الشكل(III-**3**): ثنائي مثيل بنتان.



الشكل(III-**4**): طيف الـــ RMNH للبنتان.

الجدول $(III-1)$ **: قيم الإزاحات الكيميائية لبعض البروتونات الشائعة.**

δ(ppm)		δ(ppm)	
1.5 1.1		1.2 08	
2.9 2.5		1.9	
2.9		2.5 2.2	
3.5 3.2		2.4 2.1	
4.3		2.2 1.9	

III-3العوامل المؤثرة على الانزياح الكيميائي :

III-3-1 الكثافة الالكترونية حول البروتون :

تؤثر المجاميع أو الذرات المجاورة لذرة الهيدروجين على الانزياح الكيميائي لها ، فالمجموعات الساحبة للإلكترونات تقلل من الكثافة الالكترونية حول البروتون اي تعمل تعرية للنواة وهذا ما يسمى deshielding وتزداد بذلك شدة المجال المغناطيسي الخارجي المؤثر عند النواة، وتمتص الأنوية الأشعة على تردد مرتفع بالنسبة للمادة القياسية ، أي تكون قيمة الانزياح الكيميائي لهذه البروتونات كبيرة بالمقارنة بالبروتونات المرتبطة بذرة اقل في الكهروسلبية .

فمثلاً معروف أن الفلور يسحب الألكترونات بدرجة أعلى من الكلور يليه البروم يليه اليود:

الجزيء	CH_3Br	CH_3Cl	CH_3F
درجة سحب الإلكترونات	2.8	3	4
الإنزياح الكيميائي δ	2.6	3	4.6

وكلما زادت عدد المجموعات الساحبة للإلكترونات تنخفض الكثافة الإلكترونية أكثر :

CH_4	CH_3Br	CH_2Br_2	$CHBr_3$
0.2	2.6	4.9	6.8

وعلى العكس من ذلك نجد أن المجاميع الدافعة للإلكترونات تزيد من الكثافة الالكترونية حول البروتون أي تعمل تغطية للنواة ، وتقل بذلك شدة المجال المغناطيسي الخارجي عند النواة وتمتص الأنوية الأشعة على تردد منخفض بالنسبة للمادة القياسية أي تكون قيمة الانزياح الكيميائي لهذه البروتونات صغيرة بالمقارنة بالبروتونات المرتبطة بالمجاميع أقل في الدفع الإلكتروني.

III-3-2 التأثير الناتج عن التباين في الخواص المغناطيسية :

في المركبات التي تحتوي على الكترونات في الروابط الزوجية أو الثلاثية أن هذه الالكترونات تكون أقل ارتباط عن الإلكتروناتالتي توجد في الرابطة $sigma$ (الروابط الفردية)، ويقل الارتباط بصورة أكبر في المركبات التي تحتوي على روابط زوجية أو ثلاثية متبادلة ، فعند وجود هذه الالكترونات تحت تأثير المجال المغناطيسي الخارجي عند الأنوية، وقد يكون هذا المجال المغناطيسي الثانوي في اتجاه المجال المغناطيسي الخارجي

مؤديا الى زيادة شدة المجال عند النواة أو قد يكون عكس اتجاه المجال المغناطيسي الخارجي مؤديا الى خفض شدة المجال عند النواة .

وقد وجد أن قيمة الإ نزياح الكيميائي للبروتون في مجموعة الألدهيد H–C=O هي 9.97 وهذه القيمة أكبر بكثير مما هو متوقع بناء على السحب الألكترونية المتوفرة بواسطة ذرة الأكسجين ، ويرجع ذلك الى حركة الألكترونات فى الرابطة C=O حيث وجد أن مجموعة الكربونيل تعمل تغطية shielding للبروتونات الواقعة فى الفراغ المخروطي cone أعلى وأسفل مجموعة الكربونيل ولكنها تعمل تعرية deshielding للبروتونات التى تقع خارج الفراغ المخروطي وهذا ما يسمى بـ anisotroic effect .

وتستخدم قيمة الإنزياح الكيميائي chemical shift فى التعرف على المجموعات الكيميائية فى الجزيء وعلى ذلك يمكن إستخدام البيانات الخاصة بالإنزياح الكيميائي فى التعرف على المجموعات الكيميائية فى جزىء غير معروف التركيب.

فمثلاً وجد أن:

قيمة الإنزياح الكيميائي للهيدروجين فى جزىء البنزين $\delta=7.23$

قيمة الإنزياح الكيميائي للهيدروجين فى مجموعة الألدهيد CHO هى $\delta=9.97$

قيمة الإنزياح الكيميائي للهيدروجين في الكلوروفورم عند $\delta=7.25$

قيمة الإنزياح الكيميائي للهيدروجين في الأسيتون عند $\delta=2.09$

قيمة الإنزياح الكيميائي للهيدروجين في المركبات الأليفاتية فى المجموعة C–H يزداد فى الاتجاه $CH > CH_2 > CH_3$

قيمة الإنزياح الكيميائي للهيدروجين في الأوليفينات مثلا فى المجموعة =CH يقع فى المدى من $\delta = 4 - 6.5$ ، أما في المركبات العطرية يقع المدى بين $\delta = 7 - 9$

III-3-3 تأثير الروابط الهيدروجينية:

وجود روابط هيدروجينية بين الجزيئات وبعضها يؤثر على قيمة الانزياح الكيميائي للبروتون حيث يظهر حقل منخفض بالمقارنة بمكان الامتصاص قبل تكوين تلك الروابط، وينتج كذلك عن تأثير تكوين الروابط الهيدروجينية أن يكون الامتصاص عريضا وقد يكون من الصعب في بعض الأحيان الكشف عن هذا الامتصاص .

ويتوقف تكوين الروابط الهيدروجينية على طبيعة المذيب المستخدم ودرجة الحرارة وكذلك على تركيز المركب الكيميائي.

ومن أهم المجاميع التي يكون لبروتونها القابلية العالية لتكوين روابط الهيدروجينية هي :

$$-COOH - NH_2 - NH - OH$$

وقد وجد على سبيل المثال أن تكوين الروابط الهيدروجينية فى كل من الفينولات والأحماض الكربوكسيلية يجعل الإنزياح الكيميائي يظهر عند قيمة أكبر من 10 ppm

ويمكن كسر الرابطة الهيدروجينية عن طريق رفع درجة الحرارة أو بعمل تخفيف بواسطة مذيب قطبي.

وتبيّن أن مجموعة OH– فى كحول الإيثانول ظهرت upfield عند زيادة درجة الحرارة أو عند تخفيف الإيثانول بواسطة رابع فلوريد الكربون والذى أدى إلى كسر الرابطة الهيدروجينية.

ولذلك نجد أن معظم أجهزة NMR مزودة بوحدة تبريد ووحدة تسخين للعينة تسمح بإجراء القياس على درجات حرارة مختلفة تتراوح بين : 150°C– °C 200 ويستخدم لذلك نتروجين سائل فى عملية التبريد، كما تستخدم وحدة تسخين كهربية.

III-4ازدواج الحركات المغزلية للأنوية المتجاورة:

إذا كانت الكثافة الالكترونية حول نواة الهيدروجين ، وكذلك التوزيع الفراغي لهذه الذرات في الجزيء هما العاملان الوحيدان المسؤولان عن تحديد شكل طيف الرنين المغناطيسي فإنه من المتوقع في هذه الحالة الحصول على طيف الامتصاص للجزيء يحتوي على عدة إمتصاصات فردية ، يعبّر كل امتصاص منها عن نوع واحد من البروتونات المتماثلة ، كما أن كثافة كل امتصاص تعبّر عن العدد النسبي لذرات الهيدروجين . إن ازدواج سبين–سبين يحدث لأن هناك بعض الميل للإلكترون تأصري لإزواج برمة مع برم اقرب بروتون وبتالي يتأثر سبين الالكترون التأصري ويؤثر في برم الكترون تأصري آخر وهكذا من خلاله الى البروتون التالي . ليس للازدواج تلك الاهمية بعد ثلاث اواصر ما لم يوجد توتر حلقي كالذي يوجد في الحلقات المشبعة . إن اعتماد الازاحة الكيمائية على المجال المغناطيسي المسلط وعدم اعتماد ازدواج سبين–سبين عليه ، يقدم طريقة للتمييز بينهما . إن الازاحة الكيمائية تعتمد على المذيب ايضا ، ولكن قيمة J تتأثر عادة بدرجة اقل مما تتأثر الازاحات الكيمائية بتغير المذيب .

تعرف أنماط الانشطار البسيط الناتجة عن ازدواج البروتونات التي لها ازاحات كيميائية مختلفة جدا بأنماط انشطار من المرتبة الأولى ويمكن تفسيرها باستخدام قاعدتين:

- يحدث انشطار امتصاص البروتون من قبل البروتونات المجاورة ، وتتعيّن تعددية هذا الانشطار بعدد هذه البروتونات ، وهكذا البروتون الواحد يعطي ثنائية ، والبروتونان المتجاوران اللذان بازدواج متساوي يعطيان ثلاثية ، فالتعددية اذن هي $n + 1$ حيث n عدد البروتونات المتجاورة متساوية الازدواج والصيغة العامة $2nI + 1$ حيث I عدد البرم يشمل جميع النوى .

- إن الشّدا ت النسبية لقمم المتعددة تعتمد على n . فقد رأينا ان القمم الثنائية $doublet(n=1)$ هي بنسبة 1:1 ، والقمم الثلاثية $triplet$ هي بنسبة 1:2:1 ، أما القمم الرباعية $quartets$ فهي بنسبة1:3:3:1 والصيغة العامة هي $(a+b)^n$

التي عند فكها إلى قيمة n المطلوبة ، فإن معاملاتها تعطي الشدة النسبية ويمكن الحصول بسهولة على التعددية والشدات النسبية من مثلث باسكال الذي تمثل فيه n عدد البروتونات المزدوجة المكافئة كما في الشكل التالي :

تعدد الاسم الشدات النسبية	التعددية
أحادي	1 1 0
ثنائي	1 : 1 2 1
ثلاثي	1 : 2 : 1 3 2
رباعي	1 : 3 : 3 : 1 4 3
خماسي	1 : 4 : 6 : 4 : 1 5 4
سداسي	1 : 5 : 10 : 10 : 5 : 1 6 5
سباعي	1 : 6 : 15 : 20 : 15 : 6 : 1 7 6
ثماني	1 : 7 : 21 : 35 : 35 : 21 : 7 : 1 8 7
تساعي	1 : 8 : 28 : 56 : 70 : 56 : 28 : 8 : 1 9 8

III-5 تطبيق الرنين النووي المغناطيسي في الطب:

أفضل الاستخدامات المعروفة للرنين النووي المغناطيسي هي استخدامه ا في التشخيص الطبي، حيث يمكن عن طريقه إجراء فحص للجسم البشري بدون جراحة. وفيالمجال الطبي عادة ما يطلق عليه اسم التصوير بالرنين المغنطيسي، حيث أن معظم الجسم هو ماء، فإن هناك العديد من أنوية الهيدروجين المنتشرة به . وأجهزة الرنين النووي المغناطيسي الطبية كبيرة الحجم بحيث يدخل فيها الإنسان. أما أجهزة الرنين النووي المغناطيسي المستخدمة في حقول البترول فهي أصغر كثيرا لأنها يجب أن تدخل في حفرة بئرقطرها حوالي 20سم . ويختلف كذلك توزيع المغناطيسات، حيث أن الجسم المطلوب فحصه يكون خارج الأداة وليس بداخلها.

III-5-1 جهاز التصوير بالرنين المغناطيسيMRI :

جهاز التصوير بالرنين المغناطيسي هو جهاز تصوير مثل جهاز الأشعة السينية X-ray أو جهاز الأشعة المقطعية Computerized Topography (CT) أو ما يطلق أحيانا عليه Computerized Analogues Topography (CAT scanninig) وفيها تستخدم الأشعة السينية في الفحص والتصوير ، ولكن هنا في جهاز التصوير بالرنين المغناطيسي يستخدم المجال المغناطيسي وأمواج الراديو للحصول على صور دقيقة وتفصيلية وثلاثية الأبعاد تمكن الطبيب من رؤية الأجزاء الداخلية لجسم الانسان من عظام ومفاصل والدم وخصوصا الأنسجة الرقيقة مثل المخ والغضاريف بدون استخدام للأشعة السينية أو الحقن بالأصباغ الذي يستخدم لتوضيح الصور وتوضيح الفرق بين الأنسجة المختلفة وخاصة عند عمل X-ray لمنطقة البطن ، ومن خلال التصوير بالرنين المغناطيسي يمكن اكتشاف التغيرات التي قد تطرأ على بعض أعضاء وأنسجة الجسم نتيجة لمرض ما وذلك بالمقارنة مع الأعضاء السليمة.

وقد جاء اكتشاف هذا الجهاز في عام 1977 ، حيث اعتبر حدثا مذهلا في عالم الطب الحديث ، حيث تم إجراء أول فحص باستخدام التصوير بالرنين المغناطيسي في ذلك الوقت وقد استغرقت عمليةالتصوير أكثر من 5 ساعات ولم تكن تلك الصورة واضحة في ذلك الوقت بالمقارنة بتلك التي نحصل عليها الآن وبعد التطور الهائل الذي حدث في ذلك المجال.

ويعتبر التصوير بالرنين المغناطيسيتكنولوجيا معقدة وهي تعتمد على ظاهرة االرنين المغناطيسي النووي.

ويبلغطول جهاز التصوير بالرنين المغناطيسي (MRI) ثلاثة أمتار وعرضه متران وارتفاعه متران، كما يحتوي على أنبوبة أفقية تمتد خلال مغناطيس ، يستلقي المريض على ظهره على سريرخاص يمر ببطء من خلال الأنبوبة داخل المغناطيس شكل (III-5)



شكل (III-5): جهاز التصوير بالرنين المغناطيسي.

وليس بالضروري أن يتم ادخال جسمالمريض بالكامل داخل التجويف المغناطيسي وانما يعتمد ذلك على نوع الفحص المطلوب.

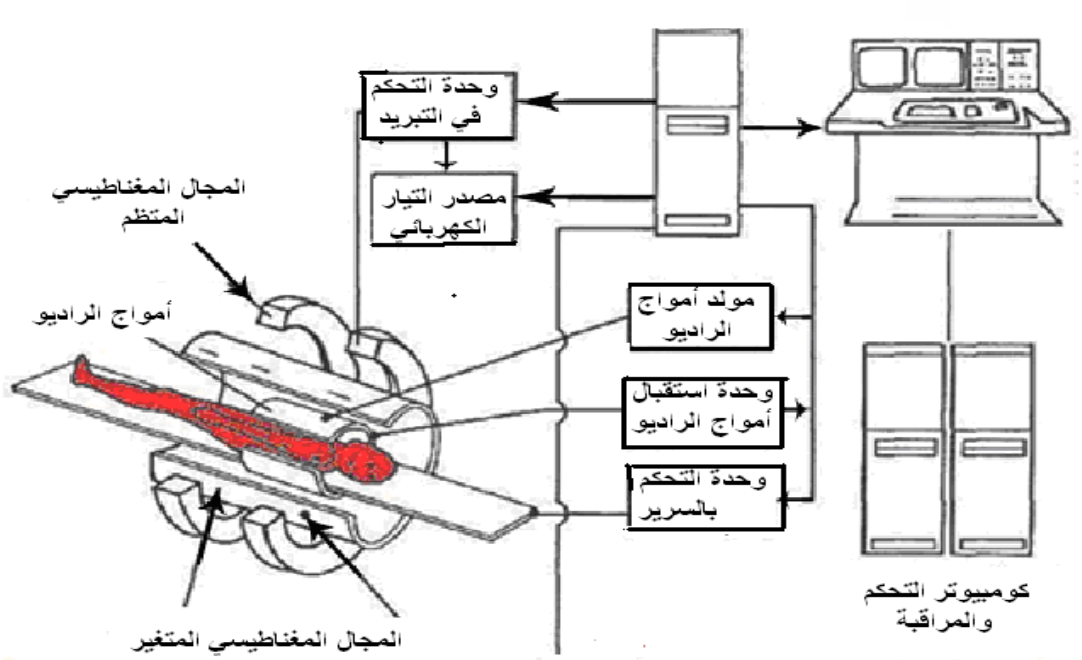
وتختلف أجهزة MRI في الحجم والشكل حسب الجزء من الجسم المراد فحصه وتصويره حيث يتطلبوجود ذلك الجزء من الجسم في مركز التجويف المغناطيسي .

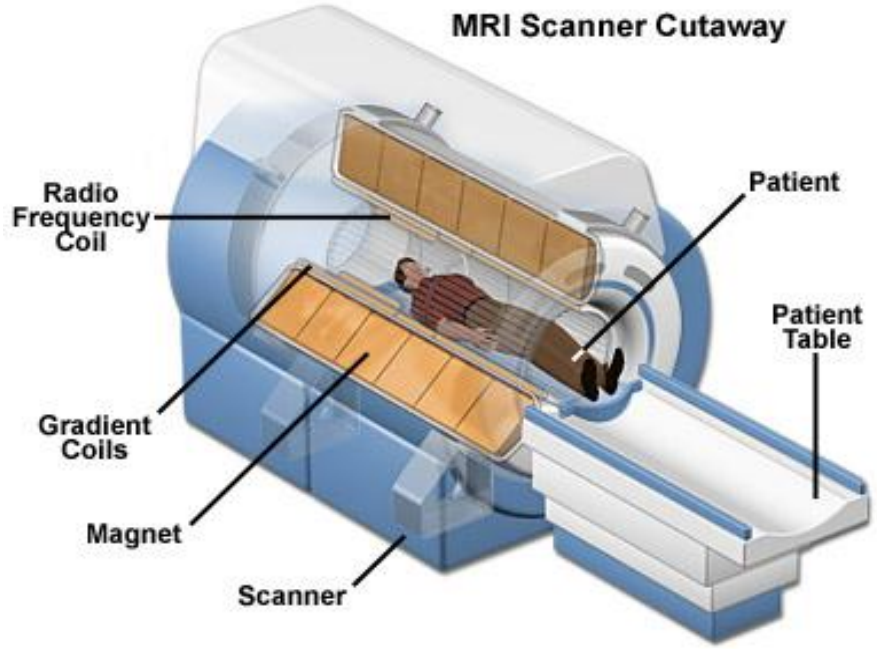
وكذلك يتصل الجهاز بمصدرا لتوليد أشعة الراديوالتي تستخدم كمصدر لتوليد نبضات من الطاقة.

يقوم جهاز MRI بتصوير أدق التفاصيل في داخلجسم المريض بدقة نصف مليمتر ليكون صور ثنائية الأبعاد أو ثلاثية الأبعاد جهاز MRI يمّكن الطبيب من مشاهدة وفحص داخل جسم الانسان بدقة عالية بالمقارنة بأجهزة التصويرالطبية المعروفة الأخرى ، حيث أنه يوفر كافة التفاصيل التي يحتاجها الطبيب وبالتالي لا حاجة لاستخدام أجهزة تصوير أخرى اذا حصلنا على صورة بجهاز MRI . كما أنه بتعديل بعض العوامل أثناء الفحص فإن جهاز MRIيسبب تغير في جلد الانسان مما ينتج عنه صور مختلفة تمكن الطبيب من استنتاج ما إذا كان ذلك طبيعيا أو غير ذلك.

ويمكن أيضا أن يتم تصوير تدفق الدم في كل جسم الانسان حتى في أدق الشعيرات الدموية مما يسمح بانجازالدراسات على أنظمة وأجهزة الانسان الرئيسية.

وهنا ليس بالضرورة حقن المريض بمادة التباين (الصبغات) التي تستخدم في أجهزة التصوير الأخرى. ويوضح شكل (III-**6**) مكونات جهاز التصوير بالرنين المغناطيسي.

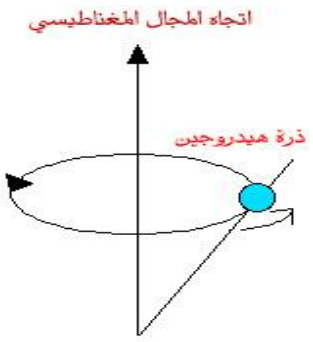




شكل (III-**6**): مخطط توضيحي لمكونات جهاز التصوير باستخدام الرنين المغناطيسي MRI

III-5-2 كيف نحصل على الصور باستخدام MRI:

نعلم أن أي مادة ومنها جسم الانسان يتكون من بلايين الذرات المختلفة ، ونواة هذه الذرات تتحرك حركة دورانية حول محورها حيث تشكل هذه الحركة مخروط حول محور الدوران شكل (III-7) .



شكل (III-7): ذرة الهيدروجين في حركة دورانية حول المجال المغناطيسي

ولنتخيل أن هذه البلايين من الأنوية عشوائية في حركتها حيث أن كل نواة تتحرك حول محورها بصورة مستقلة عن النواة الأخرى ، وكما نعلم أن الجسم مكون من مواد مختلفة وبالتالي من ذرات مختلفة ولكن جهاز MRI سيركز فقط على ذرة الهيدروجين حيث أنها الذرة المثالية لأن النواة تحتوي على بروتون واحد وله عزم مغناطيسي كبير نسبياً وهذا يعني أنه عندما تتعرض ذرة الهيدروجين إلى مجال مغناطيسي خارجي فإنها سوف تتأثر به بحيث يصبح اتجاه العزم المغناطيسي في اتجاه المجال المغناطيسي الخارجي أو في عكسه كما شرحنا سابقا. كما يحدث للابرة المغناطيسية في مجال مغناطيسي حيث تدور حول محورها وتستقر في النهاية في اتجاه المجال المغناطيسي كما يمكن اجبارها على ان تستقر في عكس اتجاه المجال المغناطيسي.

كل بروتونات ذرة الهيدروجين تترتب في اتجاه المجال أو في عكس اتجاه المجال ولا يمكن أن يكون هناك ترتيب آخر ، العدد الأعظم من تلك البوترونات عزومها المغناطيسية تلغي

بعضها البعض ولا يبقى إلا القليل ، فلا يوجد بروتون آخر بعكس اتجاهه ليلاشي عزمه المغناطيسي.

من الممكن أن يتم تطوير أجهزة MRI لتصبح أصغر حجماً ومخصصة لوظيفة محددة مثل أن نجد أجهزة رنين مغناطيسي مخصصة لتصوير بعض أعضاء الجسم مثل تصوير الذراع أو العمود الفقري أو الركبة أو الرقبة أو التجويف البطني أو القفص الصدري أو الدماغ. كذلك يعمل العلماء على استخدام أجهزة الرنين المغناطيسي على تصوير دماغ الانسان أثناء قيامه بأداء بعض المهام مثل الضغط على كرة أو النظر إلى صورة لمعرفة كيف يعمل الدماغ. وبالتالي فإن مستقبل أجهزة الرنين المغناطيسي موجهة إلى الأبحاث العلمية التي يمكن أن تتم باستخدامه لفهم العديد من أسرار جسم الانسان.

يتم توجيه أمواج الراديو على شكل نبضات على الجزء المراد فحصه من جسم الانسان بتردد مناسب لذرة الهيدروجين فقط وتستجيب له فقط البروتونات المفردة التي ذكرناها من قبل وهذا الجزء يسمى الرنين resonance حيث تجعل نبضات أمواج الراديو تلك البروتونات تأخذ اتجاه محدد وتدور بتردد يسمى تردد لارمور Larmour frequency وهو تردد الرنين لأن تردد أمواج الراديو تم اختيارها في مدى استجابة بروتونات ذرة الهيدروجين ، ويتم توليد أمواج الراديو باستخدام ملفات مشكلة بأشكال خاصة حسب العضو المراد فحصه.

والآن يأتي دور المجال المغناطيسي المتغير وهو يقوم باختيار الجزء المراد تصويره بدقة عن طريق تشريحه الى مقاطع رقيقة لتكوين الصور المجسمة وذلك دون الحاجة الى تحريك الجهاز لتصوير الجسم من مختلف الاتجاهات كما يحدث في جهاز الأشعة المقطعية CT.

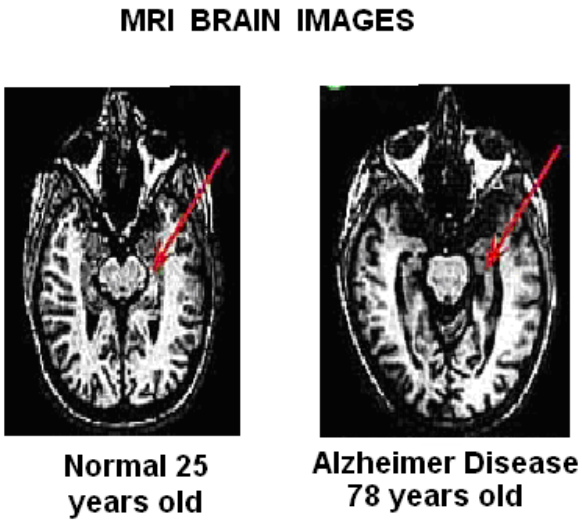
وعندما تتوقف أمواج الراديو فان بروتونات ذرات الهيدروجين التي تأثرت بأمواج الراديو تعود الى وضعها الأصلي قبل تشغيل نبضات أمواج الراديو محررة الطاقة التي اكتسبتها ،

يتم التقاط هذه الطاقة بواسطة ملف توليد أمواج الراديو وترسل الى الكومبيوتر الذي يقوم بتحليلها باستخدام معادلات رياضية تعرف باسم تحويلات فورير Fourier transform وهكذا تتم ترجمتها الى صورة.إذا نستنتج من ذلك مايلي:

1. المجال المغناطيسي المنتظم يعمل على ترتيب العزوم المغناطيسية لبروتونات ذرات الهيدروجين.
2. أمواج الراديو تعمل على التأثير على عزوم بروتونات ذرات الهيدروجين المفردة.
3. المجال المغناطيسي المتغير يعمل على تقسيم الجزء المحدد من الجسم الى شرائح رقيقة ليتمكن الطبيب من دراسة وفحص وتصوير المقطع الذي يريد من جسم الانسان.

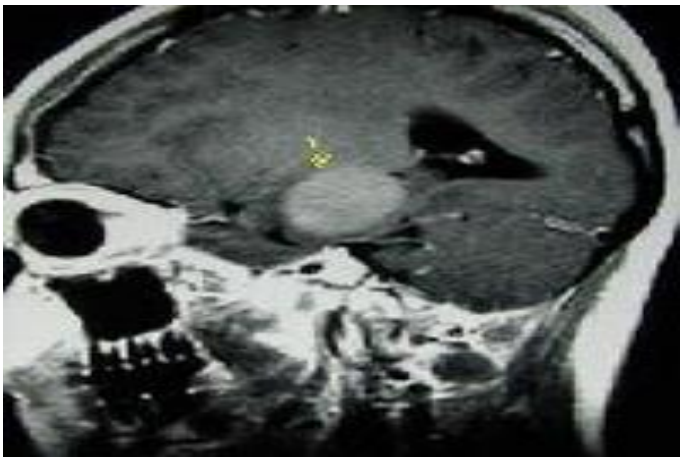
وحديثا تستخدم مواد لزيادة التباين في الرنين المغناطيسي حيث تعمل على تغير المجال المغناطيسي الموضعي للأنسجة التي تفحص ، وتصبحاستجابة الأنسجة الطبيعية مختلف عن الأنسجة المريضة ونحصل على نتائجمختلفة تميز النسيج السليم والمصاب.

وتوضح الصور التالية نماذج لحالات مرضية مختلفة (شكل (III-**8**)، شكل (III-**9**)).



شكل (III-**8**): صور للدماغ باستخدام جهاز MRI لاعمار مختلفة .

حيث على اليسار لعمر 25 عام وعلى اليمين شخص عمره 78 عام ومصاب بمرض Alzheimer



شكل (III-**9**): صورة MRI لدماغ شخص مصاب بالسرطان في الدماغ

يستخدم هذا الجهاز في تشخيص الاصابة بالسرطان وكذلك الاصابة في الدماغ وفي المفاصل وفي العمود الفقري ، كما يستخدم لاكتشاف الاصابة في الكتفين وفي الرسغ وفي الركبة والكوع ويمكن أن يتم حساب وتقدير كتلة الأنسجة في الجسم . كما أنه لايعتمد على أشعة مؤينة مما يعطي المريض الشعور بالاطمئنان ، ويتميز جهاز MRI عن جهاز CT في امكانية تصوير أي مستوى أو مقطع من جسم الانسان وبأي اتجاه بدون حركة الجسم وبدون حركة الجهاز أيضا بينما جهاز CT يقوم بتصوير مقاطع الجسم في اتجاه واحد حسب موضع الجسم بالنسبة للجهاز.

وبالرغم من كل هذه المميزات يصعب هنا تصوير الشخص الضخم وكذلك اذا وجد في الجسم مرابط معدنية ، ويجب على المريض أن يظل ساكنا طوال مدة التصوير والتي تستغرق حوالي 20 دقيقة وقد تصل الى 90 دقيقة وأي حركة قد تسبب تشويه للصورة الناتجة كما أن هذه الأجهزة باهظة الثمن والفحص مكلف جدا.

III-6 تطبيقات الرنين المغناطيسي في الكيمياء :

لم يكن أحد ليتصور بأن ظاهرة الرنين المغناطيسي النووي الفزيائية بطبيعتها والتي ظهرت نتيجة دراسة نظرية ستجد لها هذا التطبيق الواسع في المجلات العلمية المختلفة ولعل أوسعها تطبيق في علم الكيمياء ولفروعه المتعددة النظرية منها والفزيائية ، العضوية منها واللاعضوية ، التحليلية منها وحياتية ولعل اقرب باب نطرقة ذي علاقة بموضوع الطب هو تطبيق هذه التقنية في فرع الكيمياء الحياتية

III -6-1طيف الرنين النووي المغناطيسيNMR spectrum:

يتم تسجيل طيف امتصاص الرنين النووى المغناطيسى لأنوية نوع واحد من العناصر التى لها خواص مغناطيسية داخل نفس الجزئ الواحد. وذلك لأن كل نوع من أنوية ذرات العناصر يمتص طاقة الأشعة على تردد مختلف ، كما أن جهاز NMR يتميز

بقدرته على تمييز نوع واحد من أنوية العناصر بالنسبة للظروف المحيطة بهذه الأنوية فى الجزئ.

III-6-2نواة ذرة الهيدروجين (البروتون):

عند حدوث إمتصاص واحد لأنوية ذرات الهيدروجين ، فإنه لن نتحصل على أى معلومات مفيدة بالنسبة لتركيب الجزيئات ولكن وجود أنوية ذرات الهيدروجين فى الجزئ يؤدى إلى وجود هذه الأنوية فى ظروف الكترونية مختلفة بالنسبة لتوزيع الا لكترونات فى الرابطة بين نواة الهيدروجين والذرة الأخرى. وهذا التباين فى التوزيع الالكترونى حول أنوية الهيدروجين فى الجزئ يؤدى إلى إمتصاص هذه الأنوية على ترددات مختلفة وعلى ذلك فإن عدد الإمتصاصات يُعبّر عن الأنواع المختلفة من ذرات الهيدروجين فى الجزئ.

فنجد أن الهيدروجين فى كلا من OH – وCH_2– وCH_3– يختلف من ناحية الظروف الإلكترونية المحيطة، وبذلك يحدث إمتصاص لكل نوع من البروتونات على تردد مختلف ، كما أن كثافة الإمتصاص فى كل مجموعة ، يتناسب مع عدد البروتونات فى هذه المجموعة وبذلك نحصل على معلومات مفيدة بالنسبة للتركيب الجزيئى.

وتختلف أجهزة الرنين النووي المغناطيسي شكل (**III-10**) عن أجهزة التحليل الطيفى الأخرى حيث يعتمد وجود مستويات الطاقة المغناطيسية التى تحدث بينها عملية الانتقال على وجود مجال مغناطيسي خارج ي قو ي ، بينما فى طرق التحليل الطيف ي الأخرى يعتبر وجود مستويات الطاقة الخاصة بها (مستويات الطاقة الألكترونية والإهتزازية) خاصية ذاتية قائمة فى الجزيئات. الأشعة الكهرومغناطيسية EMR المستخدمة فى أجهزة NMR ذات طول موج ي كبير جداً radiowave . وعلى ذلك فإن الوحدات المستخدمة فى إنتاج هذه الأشعة والكشف عنها تختلف عن أجهزة التحليل الطيفي الأخرى.

فى أجهزة التحليل الطيفـي – السابق ذكرها – UV – VL & IR يمكن إحداث إمتصاص بتغيير طاقة الأشعة (الطول الموج ي أو التردد) ويحدث الإمتصاص عند الطول الموج ي

الذى تكون فيه طاقة الأشعة مساوياً للفرق فى الطاقة بين مستويات الطاقة، ولكن وجد أنه من الصعب التحكم فى تغيير الطول الموج ي فى منطقة radiowave المستخدمة فى أجهزة NMR بدقة كافية وعلى ذلك فإن أجهزة NMR تستخدم حزمة ثابتة من أشعة الراديو ، بينما يغير من شدة المجال المغناطيسي وبذلك يحدث الإمتصاص للشعاع عندما تتساوى مع طاقة الأشعة.

وحيث أن كل بروتون (نواة ذرة الهيدروجين) فى الجزىء له طاقة خاصة به فتحدث الامتصاصات للبروتونات المختلفة فى الجزىء وذلك بتغيير شدة المجال المغناطيس ي فى وجود حزمة ثابتة ذات تردد مناسب من أشعة الراديو.



شكل (III-**10**): مطياف الرنين النووي المغناطيسي.

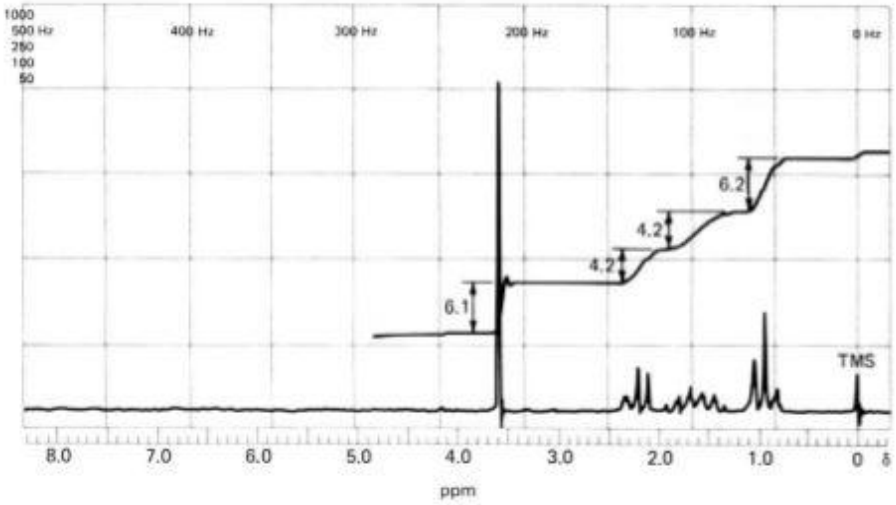
III-6-3 تحليل بعض أطياف الرنين المغناطيسي النووي:

نادرا ما تكفي أطياف الرنين النووي المغناطيسي النووي وحدها، كما ما هو الحال في أطياف الأشعة تحت الحمراء، للتعرف على مركب عضوي. لكن بالتعاون مع المشاهدات الأخرى مثل تحليل العناصر، وكذلك أطياف الأشعة فوق البنفسجية وأطياف الكتلة، فإن الرنين المغناطيسي النووي يكون هو الأداة الرئيسية لوصف المركبات النقية.

تعطي الأمثلة البسيطة التالية بعض الأفكار لأنواع المعلومات التي يمكن استخلاصها من اطياف الرنين المغناطيسي النووي.

مثال1:

طيف الرنين المغناطيسي النووي المبين في الشكل هو لمركب عضوي له الصيغة الكيمائية $C_5H_{10}O_2$. تعرف على هذا المركب؟



الشكل ($III-11$): طيف الرنين المغناطيسي النووي ومنحنى تكامل القمة للمركب العضوي $C_5H_{10}O_2$ في CCl_4.

يقترح فحص الطيف وجود أربعة أنواع من البروتونات. من الرسم التكاملي و الصيغة الكيمائية نستنتج أن هذه الأنواع تكون مؤهلة بواسطة 3،2،2 و3 بروتونات على الترتيب.

تكون قمة الإشارة $\delta = 3.6$ ناتجة عن مجموعة مثيل معزولة.

يمكن اقتراح المجموعة الوظيفية $CH_3OC(=O)-$ تدل الصيغة الكيمائية وتوزيع 3:2:2 للبروتونات المتبقية كذلك على وجود مجموعة (n−propyl).

يتفق التركيب $CH_3OC(=O)CH_2CH_2CH_3$ مع كل هذه المشاهدات.

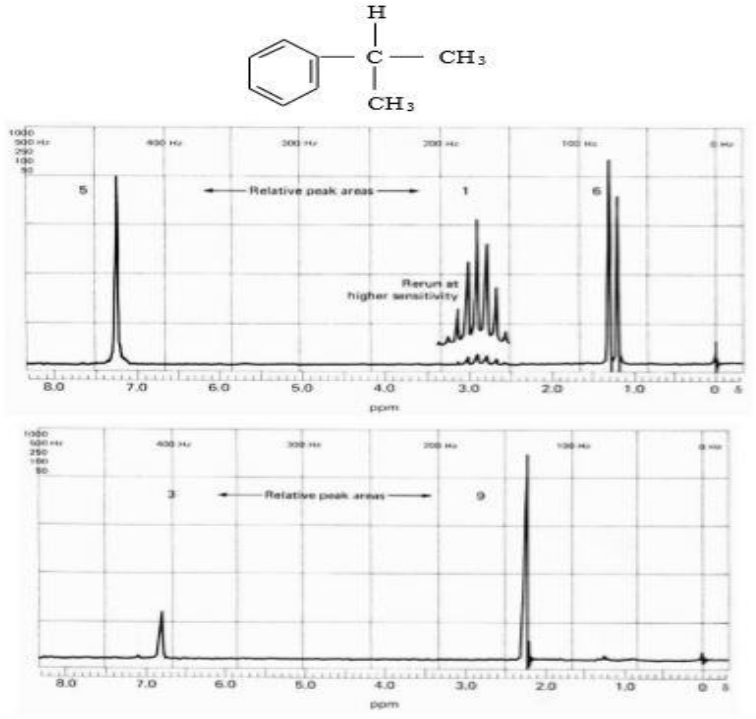
تكون الثلاثية الموجودة عند $\delta = 0.9$ نموذجية لمجموعة ميثيل مجاورة لميثيلين.

يجب أن ينتج بروتونين الميثيلين المجاورين لقمة كربوكسلات القمة الثلاثية عند $\delta = 2.2$. من المتوقع أن تنتج مجموعة الميثيلين نموذج من 12 قمة عند $\delta = 1.7$ تقريبا.

نشاهد فقط 6 قمم ربما ذلك بسب قوّة الفصل غير الكافية للآلة.

مثال 2 :

تكون الأطياف المبينة في الشكل لسوائل شفافة أيزومرية تحتوي فقط على الكربون والهيدروجين. تعرّف على المركبين؟



الشكل (*III* – 12) :أطياف الرنين المغناطيسي النووي لسائلين عضويين ايزومريين في $CDCl_3$.

القمة المنفردة عند $\delta = 7.2$ في الشكل العلوي تقترح وجود تركيب أروماتي تقابل المساحة النسبية لهذه القمة 5 بروتونات، ومن ذلك نستنتج أنه ربما يكون لدينا مشتق بنزين أحادي.

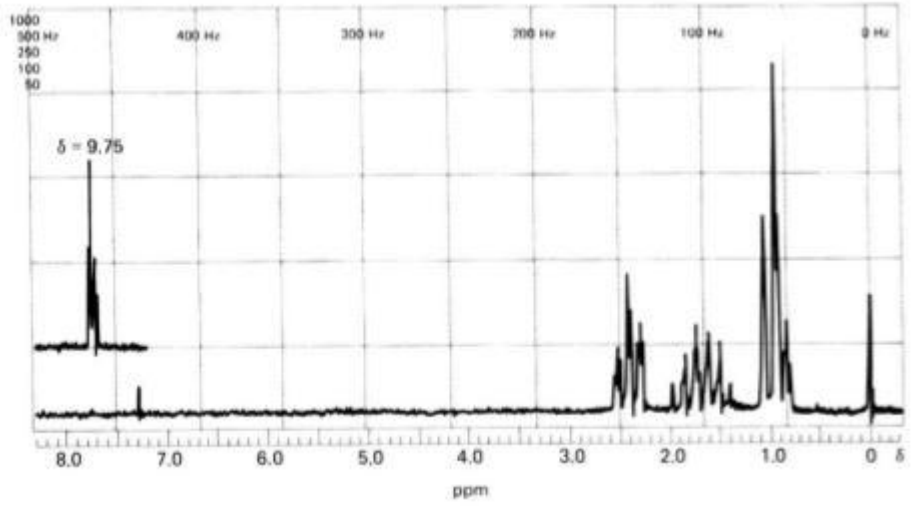
يمكن تفسير القمم السبعة للبروتون المنفرد التي تظهر عند $\delta = 2.9$ وثنائيات البروتون الستة عند $\delta = 1.2$ فقط بواسطة التركيب البنائي. وهكذا يمكننا استنتاج أن هذا المركب الكومين.

للمركب الآيسومري له قمة أروماتية عند $\delta = 6.8$، ومن مساحتها النسبية يمكن اقتراح بنزين ثلاثي وهذا يعني فقط أن المركب يكون $C_6H_3(CH_3)_3$.

من المساحات النسبية للقمم يكون المركب المجهول هو 1،3،5-مثيل البنزين الثلاثي.

مثال3 :

الطيف المبين في الشكل لمركب عضوي له وزن جزيئي مقداره 72 ويحتوي على الكربون و الأكسجين و الهيدروجين فقط.تعرف على المركب ؟



الشكل (*III*−13) :طيف الرنين المغناطيسي النووي لمركب عضوي نقي يحوي على كربون وهيدروجين وأكسيجين فقط.

القمة الثلاثية التي تظهر عند $\delta = 9.8$ تكون لألدهيدأليفاتي RCHO. إذا كان هذا الافتراض صحيحا فإن R لها وزن جزيئي 43، والذي يقابل الجزء C_3H_7.

تتطلب الطبيعة الثلاثية للقمة الموجودة عند $\delta = 9.8$ أن يوجد مجموعة ميثيلين مجاورة للكربونيل. وبالتالي يظهر المركب كما لو كان (n−butyraldehyde)، $CH_3CH_2CH_2CHO$.

تبدو القمة الثلاثية الموجودة عند $\delta = 0.97$ كما لو كانت لميثيل طرفي.

من المتوقع أن تظهر البروتونات المجاورة للميثيلين نموذج يتكون من 12 قمة.

تتوافق تجمعات القمم حول $\delta = 1.7$ مع هذا التنبؤ.

أخيرا يجب أن تظهر قمة البروتونات في مجموعة الميثيلين المجاورة للكربونيل عند السداسية الموجودة عن مجال أقل من قمم بروتون الميثيلين الأخر.

تكون المجموعة الموجودة عند $\delta = 2.4$ متفقة مع هذا الاستنتاج.

III−7 تطبيقات أخرى:

لما كانت تقنية الرنين المغناطيسي النووي تعتمد في تشخيصها للأمراض المختلفة وللأعضاء متعددة في الجسم على التركيب الذري أو الجزيئي في مختلف أنواع الانسجة والمعقدة منها فلابد إذن أن تشغل البحوث والدراسات الخاصة في تشخيص المواد الكيميائية حيزا كبيرا من نشاط الباحثين ضمن مجال العلوم الصرفة . إن هذا المجال واسع وتطبيقاته أوسع ولا يمكن لمجال ضيق متخصص كهذا أن يعبّر عن جوانبه المتعددة . لذا تم إختيار بعض الأمثلة وبإيجاز لكي تساعد القارئ على التعرف على مجالات التطبيق لهذه التقنية

في الحقول الأخرى واهميتها في الحياة العملية ويمكن العودة الى المصادر والمراجع العديدة الخاصة لكل من هذه الحقول للحصول على مزيد من المعلومات ومن أهم هذه المجالات :

1-التطبيقات الصناعية

2-التطبيقات الزراعية

3- التطبيقات الصيدلانية

4- التطبيقات في الكيمياء الحياتية

III-8 مخاطر تقنية الرنين المغناطيسي النووي:

إن بعضًا من المخاطر الممكنة لتقنية الرنين المغناطيسي النووي الطيفية والتصويرية هي مخاطر خاصة بالتقنية في حد ذاتها، أما البعض الآخر فهي مشتركة بين هذه التقنية والكثير من التقنيات الأخرى عند التطبيق للأغراض التشخصية. فكما هو متوقع أن مصدر هذه المخاطر المفردات الأساسية لهذه التقنية وهي المجالات المستخدمة – المجال المغناطيسي الثابت والمجالات المغناطيسية المتغيرة في الزمان والمكان وأخيرا مجالات الأشعة الراديويةة- فقد يكون لهذه المفردا ت تأثير على المريض والطبيب المعالج والمساعدين الموجودين ضمن حدود تأثير المجال الثابت. وقد تصنف هذه المخاطر الى نوعين : المخاطر الحادة و المخاطر العرضية أو غير الحادة.

خـــاتمة

الخاتمة:

سعينا من خلال بحثنا الى تسليط الضوء على أحد أهم الظواهر الفيزيائية في العصر الحديث، ألا وهي ظاهرة الرنين المغناطيسي النووي، فدراسة هذه الأخيرة مكنت العلماء من قيام بأبحاث دقيقة على الكائنات الحية وكذا على الجوامد دون اللجوء للمس هذين الأخرين، ويعتبر المجال الطبي الأكثر استفادة من ظاهرة الرنين المغناطيسي النووي نظرا لأهمية وخصوصية الكائن المدروس وهو الإنسان، إذ نعلم أن جسم الإنسان غنيّ بالماء وبالتّالي بذرات الهيدروجين التي تعد من أفضل الذرات التي تتجاوب مع الرنين المغناطيسي النووي. كما مكنت هذه الظاهرة الكيميائيين من دراسة الكثير من المركبات الكيميائية باستعمال التحليل الطيفي.

غاية منّا في إثراء وتعزيز رصيدنا المعرفي والتعريف بهذه الظاهرة بطريقة بسيطة حاولنا أن نقدم دراسة نظرية سهلة لتقنية الرنين المغناطيسي النووي، كما وضّحنا بأسلوب بسيط كيفية الحصول على صورة للجزء المراد فحصه من جسم الإنسان باستعمال جهاز التصوير بالرنين المغناطيسي النووي.

وفي الأخير نرجو أن نكون قد وفقنا الله الى حد ما في تقديم فكرة مبسطة عن تقنية الرنين المغناطيسي النووي ومجالات تطبيقه، وإعطاء دفعة ولو بصفة صغيرة لأبحاث جديدة تثري مكتبتنا العربية.

وآخر دعوانا أن الحمد لله رب العالمين.