

جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم الدقيقة وعلوم الطبيعة والحياة
قسم علوم المادة



مذكرة ماستر

ميدان علوم المادة
شعبة الفيزياء
تخصص فيزياء المواد
رقم: N°:

إعداد الطالب:

بودرهم سعاد

يوم: 22/06/2019

متعدد الطبقات المغناطيسي والمقاومة المغناطيسية العملاقة

لجنة المناقشة:

رئيس	جامعة محمد خيضر بسكرة	أ. مح أ	بن رماش السعيد
مقرر	جامعة محمد خيضر بسكرة	أ. د.	العافل السعيد
مناقش	جامعة محمد خيضر بسكرة	أ. مح ب	العافل عبد الغني

السنة الجامعية : 2018 - 2019

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

﴿ وَأَنْزَلْنَا الْحَدِيدَ فِيهِ بَأْسٌ شَدِيدٌ وَمَنَافِعُ لِلنَّاسِ ﴾

الحديد: 25

شكر و عرفان

قال رسول الله صلى الله عليه وسلم:

" من لا يشكر الله لا يَشكر النَّاسَ " حديثه صحيح.

الحمد لله الذي بنعمته تم الصالحات وأحمده على نعمه الكثيرة.

و بكل معاني الإحترام و التقدير أتقدم بخالص الشكر و العرفان إلى المشرف
المحترم السيد: العاقل السعيد أستاذ التعليم العالي بجامعة بسكرة الذي كان لي
القدوة الحسنة في المشاورة على العمل والأمانة واحترام الوقت و العلم،
وأتشرف بنيل دعمه وثقته طوال مدة إنجاز المذكرة.

أتقدم كذلك بجزيل الشكر إلى اللجنة الموقرة التي قبلت مناقشة مذكرتي
السيد: بن رماش السعيد و السيد العاقل عبد الغاني لإثرائها بالنقد البناء
والتوجيه السليم.

وفي الأخير أجدد تشكراتي إلى قسم علوم المادة على منحه فرصة تحقيق هذا
البحث بداية من رئيس القسم إلى الموظف العادي ولا أنسى جميع الأساتذة
بدون استثناء لمجهوداتهم في تكوين طلاب العلم وباحثي المستقبل.

فهرس الأشكال:

- 5.....(الشكل I.1): عزم مغناطيسي مكافئ لتيار حلقي والحقل المغناطيسي الناتج عنه
- 7.....(الشكل I.2): العزم الزاوي المداري (a) والسبيني (b)
- 8.....(الشكل I.3): العزم الزاوي المداري والعزم المغناطيسي
- 8.....(الشكل I.4): العزم الزاوي السبيني (مميز باللون الأخضر) وثنائي القطب المغناطيسي المرتبط به
- 9.....(الشكل I.5): الإقتران سبين-مدار في مرجع الإلكترون
- 11.....(الشكل I.6): البنية البلورية والمغناطيسية لـ MnO
- 14.....(الشكل I.7): ترتيب مغناطيسي حديدي
- 15.....(الشكل I.8): ترتيب فيريمغناطيسي
- 15.....(الشكل I.9): ترتيب مغناطيسي حديدي متضاد
- 16.....(الشكل I.10): علاقة درجة الحرارة بالقابلية المغناطيسية χ ومقلوب القابلية المغناطيسية χ^{-1}
- 18.....(الشكل I.11): مناطق Weiss
- 19.....(الشكل I.12): منحنيات المغنطة للحديد Fe، والنيكل Ni، والكوبلت Co، حسب اتجاه الحقل المغناطيسي بالنسبة للمحاور البلورية
- 20.....(الشكل I.13): رسم يوضح تكوّن المناطق المغناطيسية
- 20.....(الشكل I.14): جدار بلوخ Bloch
- 21.....(الشكل I.15): منحنى تمغنط عينة ذات مغناطيسية حديدية
- 22.....(الشكل I.16): حلقة التشنج المغناطيسي
- 24.....(الشكل II.1): مخطط كثافات الحالات لإلكترونات $spin(\uparrow)$ (الأغلبية بالأزرق) وإلكترونات $spin(\downarrow)$ (الأقلية بالأخضر)
- 25.....(الشكل II.2): تصوّر للنقل بواسطة قناتين مستقلتين ذات مقاوميات ρ_{\uparrow} و ρ_{\downarrow} لقناتي $spin(\uparrow)$ و $spin(\downarrow)$ على الترتيب
- 26.....(الشكل II.3): مقاومة قناتي $spin(\uparrow)$ و $spin(\downarrow)$ من أجل النيكل Ni المطعم بـ 1% من شوائب مختلفة

- (الشكل II.4): مخطط كثافات الحالات لإلكترونات لإلكترونات $spin(\uparrow)$ وإلكترونات $spin(\downarrow)$ لمعادن انتقالية معدن مغناطيسي حديدي ومعدن غير مغناطيسي.....28
- (الشكل II.5): المسار الوسطي الحر λ وطول انتشار السبين l_{spin}31
- (الشكل III.1): تجارب على الخلائط الإنتقالية بنفس تصوّر الـ GMR34
- (الشكل III.2): مخطط ميكانيزم الـ GMR35
- (الشكل III.3): رسم تخطيطي لمتعدّد طبقات مغناطيسي.....36
- (الشكل III.4): أولى الملاحظات للمقاومة المغناطيسية العملاقة.....37
- (الشكل III.5): تركيب يوضّح بنية صمام السبين.....38
- (الشكل III.6): (a) تركيب متوازي، (b) تركيب ضد متوازي لصمام السبين.....39
- (الشكل III.7.a): تمثيل التركيب CIP-GMR.....40
- (الشكل III.7.b): نمذجة لتركيب CIP-GMR في حالة الإصطفاف المتوازي وغير المتوازي.....40
- (الشكل III.8.a): تمثيل التركيب CPP-GMR.....41
- (الشكل III.8.b): نمذجة لتركيب CPP-GMR في حالة الإصطفاف المتوازي وير المتوازي.....41
- (الشكل III.9): تمثيل تخطيطي لظاهرة تراكم السبين المرتبطة بمرور التيار من ناقل مغناطيسي حديدي إلى ناقل غير مغناطيسي.....43
- (الشكل III.10): تطوّر كثافة التسجيل على القرص الصلب مع الزمن.....45
- (الشكل III.11): صورة توضيحية لمكونات القرص الصلب.....46
- (الشكل III.12): يوضّح الشكل مقارنة بين أبعاد مكونات القرص (رأس القراءة) وأبعاد الوسط (حبيبة غبار).....47
- (الشكل III.13): رسم توضيحي لرأس الكتابة الحثي ورأس القراءة ذو عنصر مقاومة مغناطيسية GMR على حامل التسجيل المغناطيسي.....48
- (الشكل III.13): رأس القراءة يأخذ أربع قياسات في أزمنة t_1, t_2, t_3, t_4 ، ويلتقط السلسلة 1001.....50

فهرس الجداول:

- (الجدول I.1): خصائص الإلكترون.....7
- (الجدول I.2): درجة حرارة كوري T_C لمواد مغناطيسية حديدية وموادفيريمغناطيسية، ودرجة حرارة نيل T_N لمواد مغناطيسية حديدية متضادة.....17
- (الجدول II.1): تيار الشحنة وتيار السبين، من الأعلى إلى الأسفل: توجه عشوائي لسبين الإلكترونات، تيار مستقطب السبين (\uparrow) $spin$ (استقطاب جزئي، استقطاب تام)، تيار السبين بالمركبتين (\uparrow) $spin$ و (\downarrow) $spin$ معا.....29
- (الجدول II.2): المسار الوسطي الحر λ_h ، λ_d وطول انتشار السبين l_s في بعض المواد في درجة حرارة الغرفة.....31
- (الجدول III.1.a): نسب المقاومة المغناطيسية في مختلف متعدّات الطبقات المغناطيسية من أجل تيار في المستوي CIP.....42
- (الجدول III.1.b): نسب المقاومة المغناطيسية في مختلف متعدّات الطبقات المغناطيسية من أجل تيار عمودي على المستوي CPP.....42
- (الجدول III.2): تطوّرات رؤوس القراءة.....49

فهرس المحتويات

فهرس المحتويات

i.....	فهرس الأشكال
iii.....	فهرس الجداول
vi.....	فهرس المحتويات
1.....	مقدمة عامة

الفصل الأول: المواد المغناطيسية

4.....	I مقدمة الفصل
4.....	I-2 تعريف المقادير الأساسية في المغناطيسية
5.....	I-2-1 العزم المغناطيسي وثنائي القطب المغناطيسي
5.....	I-2-2 المغنطة والقابلية المغناطيسية
6.....	I-2-3 الحث المغناطيسي والنفاذية المغناطيسية
6.....	I-3 مغناطيسية الإلكترونات
8.....	I-3-1 العزم الزاوي المداري
8.....	I-3-2 السبين
9.....	I-3-2 الإقتران سبين-مدار
10.....	I-4 التأثيرات المتبادلة المغناطيسية
10.....	I-4-1 التأثير المتبادل بين ثنائي قطب مغناطيسيين
11.....	I-4-2 التبادل المباشر
11.....	I-4-3 التبادل غير المباشر

فهرس المحتويات

- 11..... (1-3-4-I) التأثير المتبادل الفائق
- 11.....(2-3-4-I) التأثير المتبادل RKKY (Ruderman, Kittel, Kasuya, Yosida)
- 11..... (3-3-4-I) التأثير المتبادل المضاعف
- 12..... 5-I تصنيف المواد المغناطيسية
- 12..... (1-5-I) Diamagnetism المغناطيسية العكسية
- 12..... (2-5-I) Paramagnetism المغناطيسية الطردية
- 14..... (3-5-I) Collective or ordered magnetism المغناطيسية الجماعية أو المرتبة
- 14..... (1-3-5-I) Ferromagnetism المغناطيسية الحديدية
- 14..... (2-3-5-I) Ferrimagnetism الفيريمغناطيسية
- 15..... (3-3-5-I) Antiferromagnetism المغناطيسية الحديدية المتضادة
- 17..... 6-I Ferromagnetic domains المناطق المغناطيسية الحديدية
- 17..... (1-6-I) وجود المناطق المغناطيسية
- 18..... (2-6-I) طاقة التباين
- 19..... (3-6-I) أصل المناطق
- 20..... (4-6-I) جدار بلوخ Bloch
- 20..... (5-6-I) أثر تطبيق حقل مغناطيسي
- 21..... (6-6-I) التشنج المغناطيسي والحقل القسري

الفصل الثاني: إلكترونيك السبين أو السبينترونيك

- 1-II مقدمة الفصل 24
- 2-II ظهور وتطور السبينترونيك 24
- 1-2-II السبينترونيك 24
- 2-2-II فرضية Mott (نموذج التيارين) 25
- 3-2-II النقل الكهربائي في المعادن والخلائط المغناطيسية الحديدية 25
- 4-2-II تطوّر البحث في السبينترونيك 26
- 3-II النقل المتعلق بالسبين 27
- 1-3-II استقطاب السبين 27
- 2-3-II التيارات مستقطبة السبين 28
- 3-3-II طول انتشار السبين-زمن استرخاء السبين 30

الفصل الثالث: المقاومة المغناطيسية العملاقة في متعدد الطبقات المغناطيسي

- III مقدمة الفصل 33
- 1-III المقاومة المغناطيسية العملاقة Giant magnetoresistance GMR 33
- 1-1-III مفهوم المقاومة المغناطيسية العملاقة في تجارب على الخلائط المغناطيسية الإنتقالية 33
- 2-1-III متعدّد الطبقات المغناطيسي 35
- 3-1-III اكتشاف المقاومة المغناطيسية العملاقة 36
- 2-III ظواهر المقاومة المغناطيسية العملاقة 38

فهرس المحتويات

38.....	صمّام السبين (1-2-III)
39.....	التيار في المستوي CIP والتيار العمودي على المستوي CPP (2-2-III)
42.....	حقن وتراكم السبين (3-2-III)
44.....	تطبيقات المقاومة المغناطيسية العملاقة GMR (3-III)
44.....	لواقط الحقل المغناطيسي (1-3-III)
44.....	رؤوس قراءة الأقراص الصلبة (2-3-III)
45.....	تقديم مبسّط للقرص الصلب (1-2-3-III)
47.....	تطور رؤوس القراءة (2-2-3-III)
49.....	قراءة البيانات على القرص الصلب (3-2-3-III)
51.....	خلاصة عامة
52.....	قائمة المراجع

مقدمة

نهاية القرن الـ20، عرف البحث وتطوّر اللواقط المغناطيسية الجديدة تزايدا كبيرا وسريعا في عدّة مجالات: الإلكترونيك، تكنولوجيا المعلوماتية، الطب... الخ والتي أصبح أغلبها يعتمد على صمّام السبين GMR [1] [2].

ظاهرة المقاومة المغناطيسية العملاقة GMR اكتشفت من طرف البروفيسور Albert Fert، والبروفيسور Peter Grunberg، الذين تحصلوا في عملهم هذا على جائزة نوبل للفيزياء 2007. كان لهذا الحدث له أهمية في ميلاد السبينترونيك وتطوّره، كحقل متعدّد الميادين، موضوعه المركزي هو معالجة سبين الإلكترون كدرجة حرية في المادة الصلبة. والهدف منه معرفة التأثير النسبي بين سبين الجسيم ومحيطه. تهتم الدراسات الأساسية في السبينترونيك باستطلاعات نقل السبين في المواد الصلبة مع فهم ديناميكا السبين واسترخاء السبين، للوصول إلى الطرق الفعالة لاستقطاب نظام السبين، ومدى قدرة النظام على تذكّر توجّه السبين، وكيفية التقاطه [1] [2] [3].

لوحظ أثر المقاومة المغناطيسية العملاقة GMR بداية في متعدّد الطبقات المغناطيسي، هذه البنية المغناطيسية الجديدة لمتعدّد الطبقات أثارت اهتمام الباحثين بسبب والخواص المتحصل عليها عند تكرار الواجهات بين الأفلام الرقيقة المغناطيسية وغير المغناطيسية، وهذا نتيجة للخواص المغناطيسية للمواد المستخدمة [4].

في إطار دراسة هذه الجوانب قسمنا موضوع البحث إلى ثلاثة فصول:
في الفصل الأول، ندرس المواد المغناطيسية وخواصها كونها عناصر أساسية في متعدّد الطبقات المغناطيسي وظواهر إلكترونيك السبين عامّة والتي تسمّى أيضا مواد السبينترونيك.
في الفصل الثاني، نتطرق إلى السبينترونيك، والنقل المتعلق بالسبين.
في الفصل الثالث، نتطرق إلى المقاومة المغناطيسية العملاقة، نحاول من خلاله شرح هذه الظاهرة، وفي جانبها التطبيقي نركز على التطبيق البارز الذي حظي أكثر باهتمام وبحث علمي كبير: رؤوس القراءة ذات عنصر مقاومة GMR.

لعلنا نستطيع تقديم عمل يشرح ظاهرة GMR وكيف يتم استغلالها في التطبيقات الحديثة.

الفصل الأول

المواد المغناطيسية

مقدمة

تختلف المواد فيما بينها من حيث خواصها المغناطيسية فبعض المواد تتأثر كثيرا بالحقل المغناطيسي، وأخرى بشكل أقل. لتوضيح الخواص المغناطيسية للمواد ينبغي دراسة المغناطيسية في الجسيمات المكونة للمادة، وهذا ما سأقدمه في هذا الفصل بداية بنظرة موجزة للمقادير الأساسية في المغناطيسية وتوضيح الفرق بين الحقل المغناطيسي داخل المادة وخارجها. ثم أفصل في مغناطيسية الإلكترونات كونها المصدر الأساسي للمغناطيسية في المادة الصلبة وكذلك الإشارة إلى مختلف التأثيرات المتبادلة بين العزوم المغناطيسية في المواد، وفي التالي تصنيف المواد حسب خواصها المغناطيسية وكذلك شرح خاصة المواد المغناطيسية الحديدية المتميزة بحلقة تشنج مغناطيسي.

I-2 تعريف المقادير الأساسية في المغناطيسية:

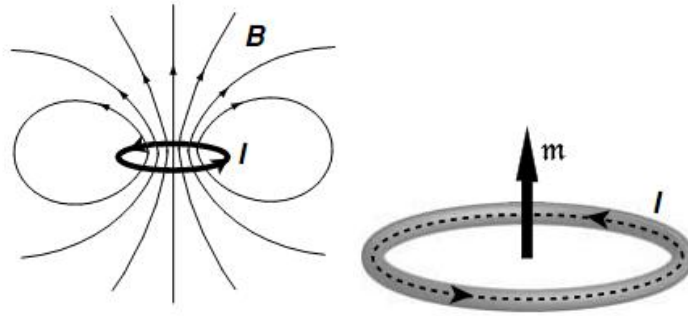
I-2-1 العزم المغناطيسي وثنائي القطب المغناطيسي:

في الكهرومغناطيسية الكلاسيكية يمكن شرح مفهوم العزم المغناطيسي \vec{m} بتصور تيار كهربائي i على مدار حلقة تحيط بمساحة \vec{A} ، ما ينتج عزمًا مغناطيسيًا يعطى بالعلاقة:

$$\vec{m} = i\vec{A} \quad (I.1)$$

\vec{A} : شعاع طويلته تساوي مساحة الحلقة. ومنه وحدة العزم المغناطيسي هي $A \cdot m^2$.

شعاع العزم \vec{m} عمودي على مستوي المدار ويحدد اتجاهه حسب قاعدة اليد اليمنى. ينشئ هذا العزم المغناطيسي حقلًا مغناطيسيًا ثنائي قطب يكافئ ذلك الذي ينشئه قضيب ممغنط (الشكل I.1).^[5]



(الشكل 1.1): عزم مغناطيسي مكافئ لتيار حلقي والحقل المغناطيسي الناتج عنه [6].

2-2-I المغنطة والقابلية المغناطيسية:

تعرف المغنطة \vec{M} لعينة بكثافة العزوم المغناطيسية فيها:

$$\vec{M} = N\vec{m} \quad (I.2)$$

حيث \vec{m} هو متوسط العزم المغناطيسي للذرة أو الجزيء، و N هو عدد الذرات أو الجزيئات في وحدة الحجم، وبالتالي وحدة المغنطة هي $A.m^{-1}$ [7].

في بعض المواد التي يكون فيها توزيع عزوم الذرات والجزيئات لهذه المادة عشوائياً؛ تكون محصلة العزم المغناطيسي الكلي لعينة ما صفراً، بينما إذا وضعت هذه العينة تحت تأثير حقل خارجي \vec{H} ، تتأثر العزوم المغناطيسية وتصطف في اتجاه الحقل المسلط، مما يؤدي إلى نشوء مغنطة \vec{M} للعينة، نعرف القابلية المغناطيسية χ التي تربط المغنطة \vec{M} بالحقل المغناطيسي الخارجي \vec{H} بـ:

$$\vec{M} = \chi\vec{H} \quad (I.3)$$

القابلية المغناطيسية χ هي مقدار سلمي عديم الوحدة [8].

3-2-I الحث المغناطيسي والنفاذية المغناطيسية:

تسمى استجابة المادة عند تطبيق حقل مغناطيسي خارجي \vec{H} بالحث المغناطيسي \vec{B} أو كثافة التدفق المغناطيسي، والعلاقة بينهما خاصية مميزة للمادة وهي خطية في الفراغ:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (I.4)$$

حيث μ_0 هي النفاذية المغناطيسية في الفراغ وقيمتها في النظام الدولي (S.I):

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$$

بينما وحدة \vec{B} هي: T (Tesla).

لكن داخل مادة مغناطيسية، وبسبب المغنطة \vec{M} ، \vec{B} و \vec{H} يختلفان في الجهة والطويلة:

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (I.5)$$

$$\vec{B} = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad \text{ومنه} \quad (I.6)$$

حيث μ_r هي النفاذية المغناطيسية النسبية التي تميز الخصائص المغناطيسية للمادة. بعض قيم النفاذية:

$$\mu_r = 1 \quad \text{في الفراغ:}$$

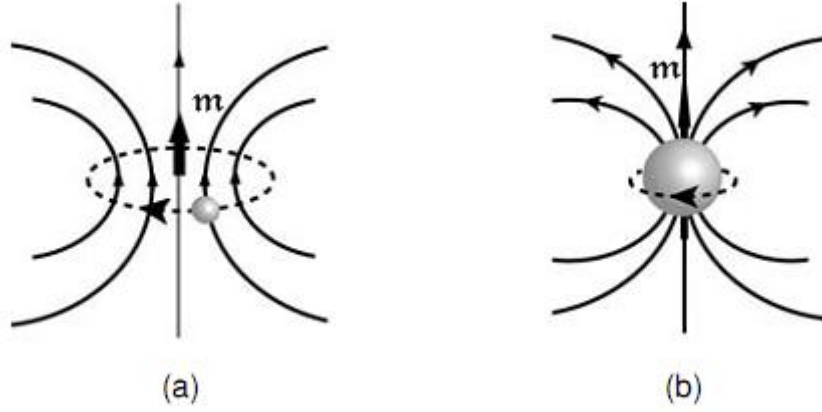
$$\mu_r \geq 1 \quad \text{في المادة عموماً:}$$

$$\mu_r = 100\,000 \quad \text{ويمكن أن تبلغ:} \quad [9] [10]$$

3-I مغناطيسية الإلكترونات:

إن المغناطيسية مرتبطة بالعزم الزاوي للجسيمات العنصرية. تملك البروتونات، النوترونات والإلكترونات عزماً زاوياً جوهرياً ($\frac{1}{2}\hbar$) يعرف بالسبين، \hbar هو ثابت بلانك h مقسوماً على 2π . العزم المغناطيسي الناشئ عن سبين النواة صغير جداً أمام العزم المغناطيسي الإلكتروني وذلك يعود إلى كتلة النواة المعتبرة نسبياً، وبإهماله عملياً تكون الإلكترونات المصدر الأساسي للمغناطيسية في المادة الصلبة^[6].

الإلكترون جسيم عنصري كتلته m_e و شحنته e^- ، يملك مصدرين مميزين للعزم الزاوي: أحدهما مرتبط بحركته المدارية حول النواة (الشكل a.2.I)، والآخر هو السبين (الشكل b.2.I)، وبالتالي مصدرين للعزم المغناطيسي، وهما مقترنان بالتأثير المتبادل سبين-مدار^[6].



(الشكل 2. I): العزم الزاوي المداري (a) والسبيني (b)^[6].

خصائص الإلكترون

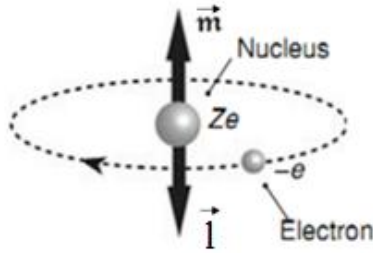
m_e	$9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$	الكتلة
e^-	$1.6022 \times 10^{-19} \text{ C}$	الشحنة
m_s	$1/2$	العدد الكمي السبيني
$\frac{1}{2} \hbar$	$5.273 \times 10^{-34} \text{ J s}$	العزم الزاوي السبيني \vec{S}
m	$-9.285 \times 10^{-24} \text{ A m}^2$	العزم المغناطيسي السبيني
r_e	$2.818 \times 10^{-15} \text{ m}$	نصف القطر الكلاسيكي $\mu_0 e^2 / 4\pi m_e$

(الجدول 1. I): خصائص الإلكترون^[6].

1-3-I العزم الزاوي المداري:

في نموذج بور تدور الإلكترونات حول النواة ذات الشحنة Ze في مسارات دائرية تحت تأثير قوة كولوم، وهذا يكافئ تيارا حلقيا جهته معاكسة لجهة دوران الإلكترون نظرا لشحنته السالبة، ما يؤدي إلى ظهور عزم مغناطيسي \vec{m} معاكس في الجهة للعزم الزاوي المداري \vec{l} (الشكل 3)، حيث^[11]:

$$\vec{m} = -\frac{e}{2m_e} \vec{l} \quad (I.7)$$



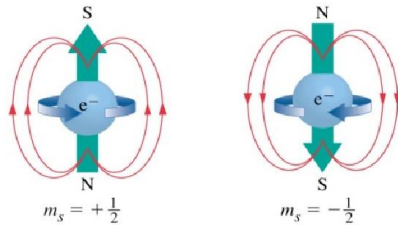
(الشكل 3. I): العزم الزاوي المداري والعزم المغناطيسي^[6].

وفي وجود حقل مغناطيسي \vec{B} ، تكتسب الجملة طاقة مغناطيسية E_m عبارتها^[11]:

$$E_m = -\vec{m} \cdot \vec{B} \quad (I.7)$$

2-3-I السبين:

الإلكترون مثل جميع الفرميونات لديه عزم زاوي سبيني، ينتج عنه عزم مغناطيسي في أحد الجهتين up(↑) أو down(↓) حسب جهة دوران الإلكترون، فهو بمثابة مغناطيس صغير يتأثر بالحقول المغناطيسية (الشكل 4).



(الشكل 4. I): العزم الزاوي السبيني (مميز باللون الأخضر) وثنائي القطب المغناطيسي المرتبط به

علاقة العزم المغناطيسي السبيني \vec{m} بسبين الإلكترون \vec{s} هي^[6]:

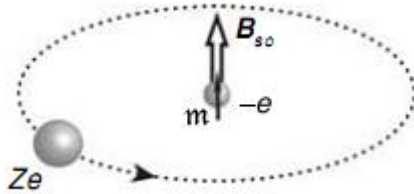
$$\vec{s} = \pm \frac{1}{2} \hbar \quad \text{مع ،} \quad \vec{m} = -\frac{e}{m_e} \vec{s} \quad (\text{I.8})$$

I-3-2) الإقتران سبين-مدار:

يمكن للعزم الزواري المداري \vec{l} والسبيني \vec{s} للإلكترون أن يفترا بواسطة التأثير المتبادل سبين-مدار، لينشأ عزم زاوي كلي \vec{j} مع عزم مغناطيسي \vec{m} :

$$\vec{m} = \gamma \vec{j} \quad (\text{I.9})$$

يصف الإقتران سبين-مدار أثر الحركة المدارية للإلكترون على توجه سبينه. الإلكترون في مرجعه يرى شحنة موجبة في حركة مدارية مثلما تبدو حركة الشمس لملاحظ على سطح الأرض، فهو يقع قريبا من مركز تيار حلقي مما يولد حقلًا مغناطيسيا \vec{B}_{so} يفرض توجّها تفضيليا للعزم المغناطيسي السبيني للإلكترون^[6] [12]. (الشكل I.5)



(الشكل I.5): الإقتران سبين-مدار في مرجع الإلكترون^[6].

من العلاقة (I.7) الطاقة المغناطيسية الموافقة لهذا التفاعل^[6]:

$$\vec{E}_{so} = -\vec{m} \cdot \vec{B}_{so} \quad (\text{I.10})$$

4-I التأثيرات المتبادلة المغناطيسية:

(1-4-I) التأثير المتبادل بين ثنائي قطب مغناطيسيين:

تتعلق طاقة ثنائي قطب مغناطيسيين $\vec{\mu}_1$ و $\vec{\mu}_2$ يفصلهما الشعاع \vec{r} بالمسافة بينهما والتوجه النسبي:

$$E = \frac{\mu_0}{4\pi r^3} (\vec{\mu}_1 \cdot \vec{\mu}_2 - \frac{3}{r^2} (\vec{\mu}_1 \cdot \vec{r})(\vec{\mu}_2 \cdot \vec{r})) \quad (I.11)$$

في حالة إلكترونات ذرات متجاورة تتبادل هذا التأثير تسمى حالة تبادل مباشر حيث أنه لا يحتاج لذرات بسيطة، وخلافا لذلك في حالات أخرى لا يكون التبادل المباشر مسؤولا عن الخصائص المغناطيسية للمادة فهناك تأثير غير مباشر [9].

(2-4-I) التبادل المباشر:

تملك الذرات في جملة مغناطيسية عديدة من الإلكترونات، ولكن في حالة مبسطة لإلكترونين ينتميان إلى ذرتين متجاورتين أعطى هايزنبرغ في نمودجه عبارة هاملتون المتعلقة بالسبين والتي تصف طاقة التأثير المتبادل بينهما: [6].

$$H_{spin} = -2J \vec{S}_1 \vec{S}_2 \quad (I.12)$$

وبصفة عامة:

$$H_{spin} = -\sum_{ij} J \vec{S}_i \vec{S}_j \quad (I.13)$$

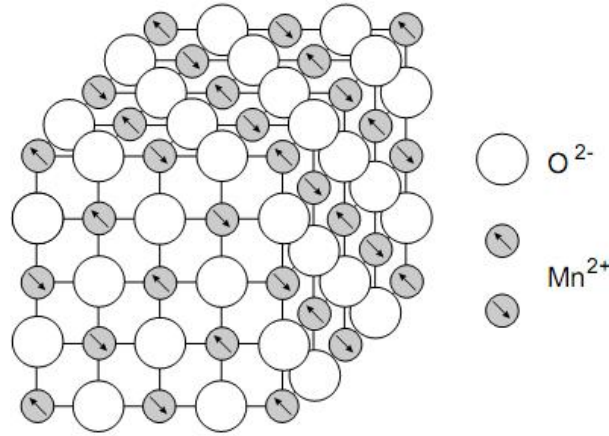
J هو ثابت التبادل بين السبين i والسبين j ، حيث [9] [6]:

(3-4-I) التبادل غير المباشر:

هناك عدة أصناف للتبادل غير المباشر تتعلق بطبيعة المادة المغناطيسية (الفقرة **5-I**):

(1-3-4-I) التأثير المتبادل الفائق :

هذا النوع من التبادل غير المباشر يحدث في المواد الصلبة الشاردية حيث يتوسط التأثير المتبادل بين الذرات المغناطيسية غير المتجاورة ذرات غير مغناطيسية. المسافة بين الشاردين المغناطيسيتين كبيرة كفاية لاتسمح بتبادل مباشر. كمثال مادة MnO المغناطيسية الحديدية المتضادة، حيث تحتوي بلورة MnO (الشكل **6. I**) على شاردة Mn^{2+} ذات المدار d بـ 5 إلكترونات متوازية السبين، وشاردة O^{2-} ذات مدارات p المملوءة بالإلكترونات متضادة السبين^[9].



(الشكل **6. I**): البنية البلورية والمغناطيسية لـ MnO

(2-3-4-I) التأثير المتبادل RKKY (Ruderman, Kittel, Kasuya, Yosida):

يحدث هذا النوع في المعادن ذات عزوم مغناطيسية محلية، التبادل بينها تتوسطه إلكترونات التكافؤ فهو غير مباشر. مثل المعادن الأرضية النادرة ذات إلكترونات $4f$ المحلية.

(3-3-4-I) التأثير المتبادل المضاعف:

في بعض الأكاسيد تملك الشوارد المغناطيسية تكافؤات مختلطة، تحدث حالات أكسدة مختلفة مؤدية إلى اصطفاف فيريمغناطيسي. مثال: المغنتيت $Fe_3O_4 : (FeO - Fe_2O_3)$ الذي يضم شوارد Fe^{2+} إضافة إلى شوارد Fe^{3+} ^[9].

5-I تصنيف المواد المغناطيسية:

تصنف المواد حسب سلوكها وخواصها المغناطيسية إلى نحو 3 أصناف وذلك بالرجوع إلى قابليتها المغناطيسية:

(1-5-I) المغناطيسية العكسية Diamagnetism:

وهي تأثير حثّي بحت، يحرّض الحقل المغناطيسي الخارجي \vec{H} ثنائيات الأقطاب المغناطيسية في المادة فتتوجّه عكسياً بالنسبة للحقل المحرّض (قاعدة لنز). ومنه فالقابلية المغناطيسية العكسية سالبة

$$\chi^{dia} = const < 0 \quad (I.15)$$

وهي خاصة لكافة المواد ومهيمنة فقط في غياب الأصناف الأخرى. أمثلة عن المواد المغناطيسية العكسية:

* تقريبا كل المواد العضوية.

* المعادن مثل الزئبق Hg .

* النواقل الفائقة تحت درجة الحرارة الحرجة، هذه المواد ذات مغناطيسية عكسية مثالية^[16] $\chi^{dia} = -1$

(2-5-I) المغناطيسية الطردية Paramagnetism:

تتميّز قابلية المواد المغناطيسية بـ:

$$\chi^{para} > 0 \quad (I.16)$$

$$\chi^{para} = \chi^{para}(T) \quad (I.17)$$

شروط ظهور المغناطيسية الطردية هو وجود ثنائيات قطب مغناطيسية دائمة تتوجه في اتجاه الحقل المغناطيسي الخارجي \vec{H} ، إن هذا التوجه يمكن أن تعيقه التقلبات الحرارية. العزوم المغناطيسية يمكن أن تكون ذات طبيعة محلية أو متجولة:

* العزوم المحلية: وهي ناتجة عن إلكترونات طبقة داخلية مملوءة جزئياً.

مثل: - إلكترونات $4f$ في المعادن الأرضية النادرة.

- إلكترونات $5f$ في الأكتانيدات.

هذا القسم من المواد لديه ما يسمى بالمغناطيسية الطردية لـ Langevin، حيث تتعلق القابلية بدرجة الحرارة، وتتناسب معها عكسيا في درجات الحرارة العالية:

$$\chi^{Langevin}(T) = \frac{C}{T} \quad (I.18)$$

تسمى هذه العلاقة قانون كوري Curie [6].

* العزوم المتجولة: تحمل الإلكترونات الحرة في عصابة التكافؤ عزما مغناطيسيا دائما، يسمى هذا الصنف المغناطيسية الطردية لـ Pauli، حيث لا تتعلق القابلية χ^{Pauli} بدرجة الحرارة.

$$\frac{\partial \chi^{Pauli}}{\partial T} \approx 0 \quad (I.19)$$

إن هذه القابليات مختلفة جدًا في القيمة [9] [6].

$$\chi^{Pauli} \ll \chi^{Langevin} \quad (I.20)$$

3-5-I) المغناطيسية الجماعية أو المرتبة (Collective or ordered magnetism):

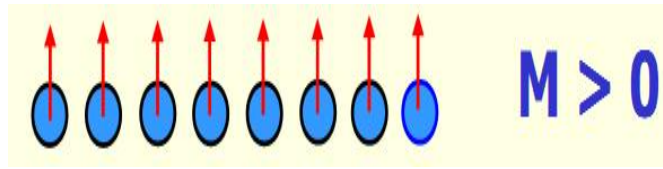
تمثل القابلية المغناطيسية الجماعية دالة أكثر تعقيدا مقارنة بالمغناطيسية العكسية والطرديّة:

$$\chi^{coll} = \chi^{coll}(T, H, "history") \quad (I.21)$$

هذا الصنف ناتج عن التأثير المتبادل بين ثنائيات الأقطاب الدائمة، تملك هذه الأخيرة توجها غير مفروض بحقول مغناطيسية خارجية وهذه ميزة المواد المغناطيسية الجماعية: هناك مغنطة تلقائية للمادة تحت درجة حرارة تسمى درجة الحرارة الحرجة T^* . وتنقسم المغناطيسية الجماعية إلى 3 أصناف:

1-3-5-I) المغناطيسية الحديدية (Ferromagnetism):

تسمى درجة الحرارة الحرجة T^* درجة حرارة كوري T_C ، وعند درجات حرارة عالية يتهدم ترتيب السبين فتختفي المغنطة أعلى درجة حرارة كوري، هذه الأخيرة تفصل بين حالة المغناطيسية الطردية $T > T_C$ ، وحالة المغناطيسية الحديدية $T < T_C$ أين تكون جميع العزوم المغناطيسية مرتبة بالتوازي (الشكل I.7). أمثلة عن المواد المغناطيسية الحديدية (Ni, Co, Fe) [9] [14]:



(الشكل I.7): ترتيب مغناطيسي حديدي

2-3-5-I) الفيريمغناطيسية (Ferrimagnetism):

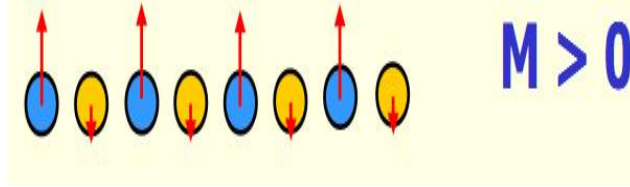
تنقسم الشبكة البلورية للمادة الفيريمغناطيسية إلى شبكتين ثنائيتين A و B كل منهما مغناطيسية حديدية (الشكل I.8). ولكن ذات مغنطة مختلفة الطويلة والجهة من أجل $T < T_C$:

$$\vec{M}_A \neq \vec{M}_B \quad (I.22)$$

مع مغنطة كلية غير معدومة:

$$\vec{M} = \vec{M}_A + \vec{M}_B \neq \vec{0} \quad (I.23)$$

كمثال أكاسيد الحديد: المغنتيت Fe_3O_4 [9] [14]



(الشكل I.8): ترتيب فيريمغناطيسي

I-3-3-5 Antiferromagnetism المغناطيسية الحديدية المتضادة

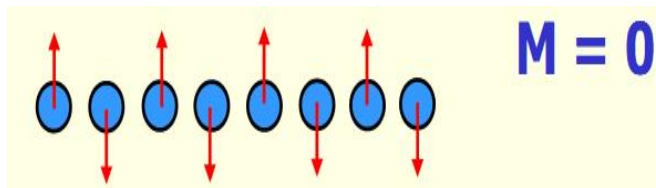
المغناطيسية الحديدية المتضادة هي حالة خاصة من الفيريمغناطيسية، حيث تسمى درجة الحرارة

الدرجة T^* درجة حرارة نيل T_N ، وتتميز بأنه من أجل $T < T_N$:

$$|\vec{M}_A| = |\vec{M}_B| \neq 0 \quad (I.24)$$

مع مغنطة كلية منعدمة

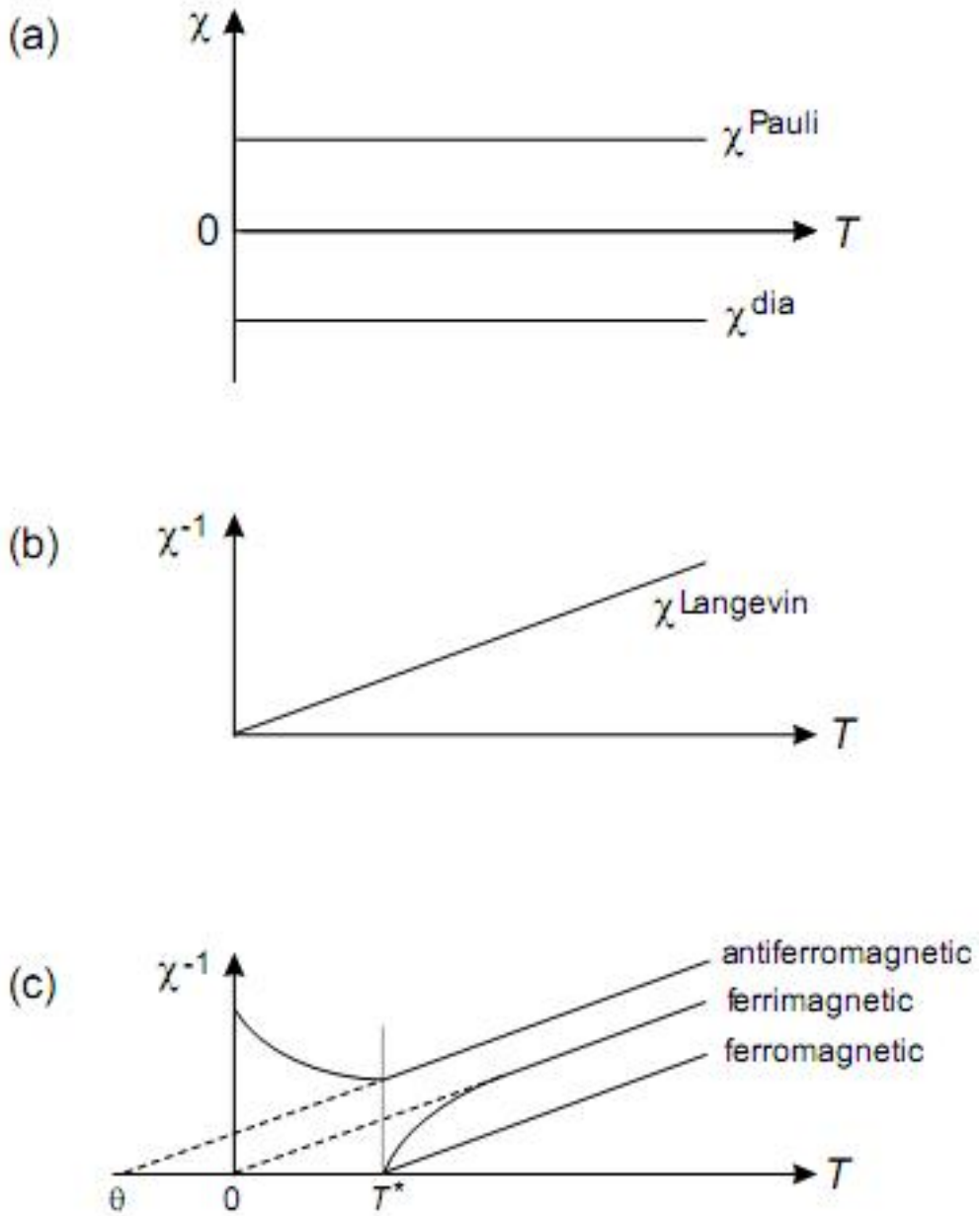
$$M_A = -M_B \Rightarrow \vec{M} = \vec{M}_A + \vec{M}_B = \vec{0} \quad (I.25)$$



(الشكل I.9): ترتيب مغناطيسي حديدي متضاد

تؤول المغناطيسية الجماعية إلى المغناطيسية الطردية أعلى درجة الحرارة الحرجة T^* المبيّنة قيمها

في (الجدول I.2). وهذا ما يظهر في (الشكل I.10) [9] [14].



(الشكل 10. I): علاقة درجة الحرارة بالقابلية المغناطيسية χ ومقلوب القابلية المغناطيسية χ^{-1} في حالة: (a) المغناطيسية العكسية والمغناطيسية الطردية لـ Pauli، (b) المغناطيسية الطردية لـ Langevin، (c) المغناطيسية الحديدية والحديدية المتضادة والفيريمغناطيسية، مع T^* درجة الحرارة الحرجة و θ درجة الحرارة للمغناطيسية الطردية [9].

المادة	$T_C [K]$	$T_N [K]$
Fe	1043	
Co	1388	
Ni	627	
Gd	293	
Dy	88	
EuO	69	
Fe ₃ O ₄	853	
CrO ₂	387	
Cr		311
CoO		293
NiO		525

(الجدول 2.1): درجة حرارة كوري T_C لمواد مغناطيسية حديدية ومواد فيريمغناطيسية، ودرجة حرارة نيل T_N لمواد مغناطيسية حديدية متضادة^[9].

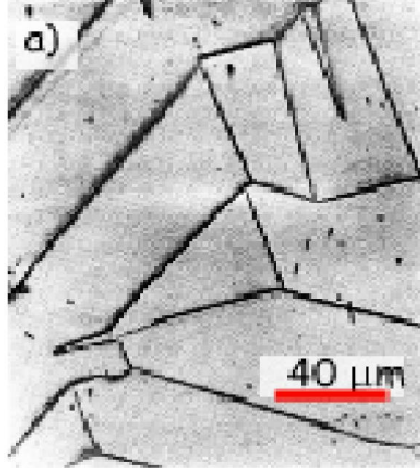
6-I المناطق المغناطيسية الحديدية Ferromagnetic domains

1-6-I وجود المناطق المغناطيسية:

عند درجة حرارة أقل تماما من درجة حرارة كوري، تكون كل العزوم المغناطيسية لجسم حديدي مغناطيسي مصطفة تماما على المستوى الذري. بينما على مستوى العينة يمكن أن يكون العزم المغناطيسي أقل بكثير من عزم التشبع المناسب لهذا الإصطفاف على المستوى المجهرى. فسر P.Weiss هذه الظاهرة بافتراض أن العينات الحقيقية تتكون من عدد كبير من الأماكن الصغيرة تدعى "المناطق" تكون المغنطة بكل منها مشبعة، وهي قيمة العتبة التي تصل إليها المغنطة M_s ، ولكن تعطي للعينة عزما مغناطيسيا منعدما تقريبا^[14].

لقد تم تقديم توضيح تجريبي مباشر لبنية المناطق بواسطة صور الميكروسكوب لحدود المناطق المحصل عليها بواسطة تقنية المسحوق المغناطيسي أو بواسطة تقنيات أخرى. تعود طريقة المسحوق المغناطيسي إلى F.Bitter (1936)، وتتمثل في وضع قطرة من محلول غروي لجسيمات حديدية مغناطيسية صغيرة جدا (مثل المغنتيت وهو الأوكسيد الطبيعي Fe₃O₄)، في منطقة يسودها حقل مغناطيسي تتمغنط هذه الجسيمات وتخضع لقوى تجذبا نحو أماكن الحقل الشديد. هذه الأخيرة هي حدود بين المناطق أين تتركز هناك فترسمها ويمكن رؤيتها عبر الميكروسكوب حيث رتبة أبعادها النموذجية

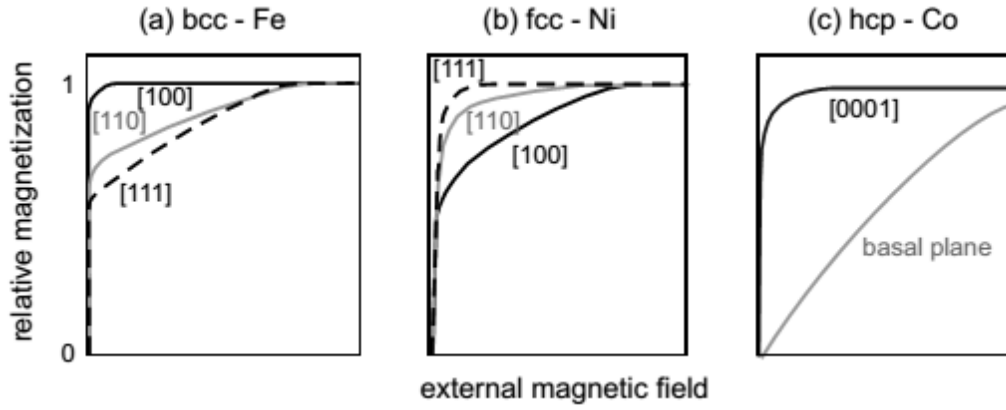
من 10µm إلى 100µm، يمثل (الشكل I.11) صورة مأخوذة بواسطة تقنية F.Bitter لطبقة رقيقة من مادة مغناطيسية [15] [16].



(الشكل I.11): مناطق Weiss [15].

I-6-2) طاقة التباين:

في بلور مغناطيسي حديدي هناك طاقة توجه المغنطة على طول محاور بلورية محددة تعتبر اتجاهات للمغنطة السهلة. تسمى هذه الطاقة "الطاقة البلورية المغناطيسية أو طاقة التباين" نتيجة لذلك تتعلق منحنيات المغنطة باتجاه الحقل المغناطيسي المطبق بالنسبة للاتجاهات البلورية. تبين المنحنيات المبينة في (الشكل I.12) أن الحديد ذو البنية المكعبة يقبل رؤوس الخلية الإصطلاحية المكعبة كاتجاهات المغنطة السهلة [100]. أما النيكل كذلك مكعب البنية يقبل كاتجاهات المغنطة السهلة أقطار المكعب [111]، بينما الكوبلت وهو بلورة سداسية البنية يقبل المحور السداسي كاتجاه المغنطة السهلة في درجة حرارة الغرفة [17].

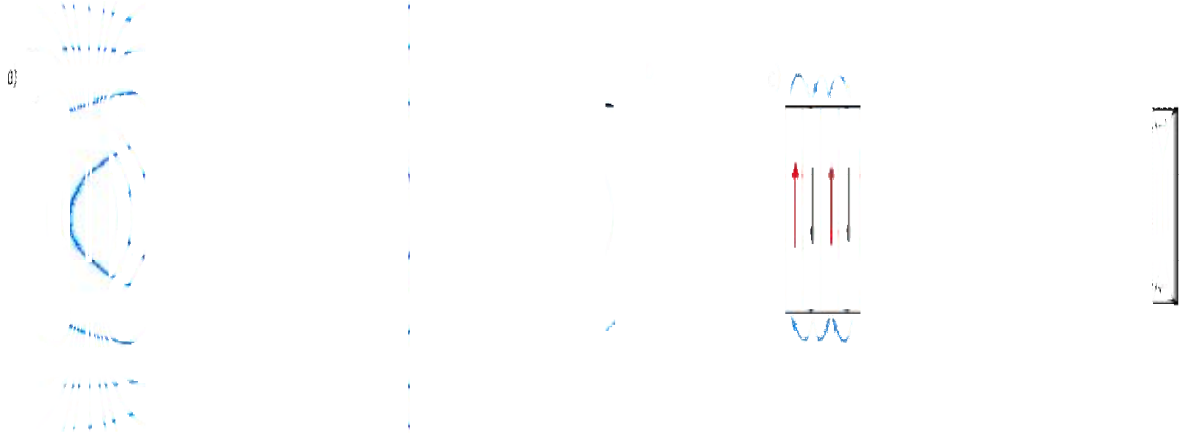


(الشكل 12.1): منحنيات المغنطة للحديد Fe ، والنيكل Ni ، والكوبلت Co ، حسب اتجاه الحقل المغناطيسي بالنسبة للمحاور البلورية^[9].

I-6-3 أصل المناطق:

برهن كل من Landau وLifshitz أن بنية المناطق هي نتيجة طبيعية لمختلف توزيعات الطاقة لجسم حديدي مغناطيسي (طاقة التبادل ، التباين ، المغناطيسية ...). يمكن فهم أصل المناطق باعتبار البنية المبينة في (الشكل 13.1)، تمثل كل منها مقطعا لبلورة أحادية لجسم حديدي مغناطيسي. في الشكل a لدينا منطقة واحدة لكن الأقطاب المتشكلة على سطح البلورة تؤدي إلى قيمة كبيرة للطاقة المغناطيسية. في الشكل b تنخفض هذه الطاقة المغناطيسية إلى النصف بانقسام البلورة إلى منطقتين ممغنطتين في اتجاهين متعاكسين. في الشكل c لدينا N منطقة، يخفض الضعف الناتج في الحقل الطاقة إلى $\frac{1}{N}$ من قيمتها في الشكل a، أما في الشكل d تصبح الطاقة المغناطيسية معدومة وليس هناك حقل مغناطيسي مرتبط بالمغنطة، لأن التدفق ينغلق في البلورة بواسطة مجالات السطح التي دورها هو إعادة إغلاق التدفق.

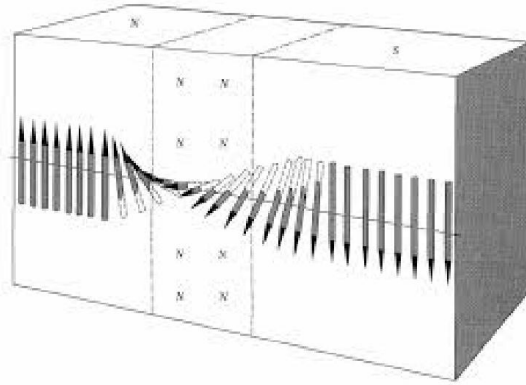
غالبا بنى المناطق معقدة أكثر من أمثلتنا البسيطة، ولكن أصل هذه البنية يتمثل دائما في تخفيض طاقة الجملة بالمرور من تركيب مشبع بطاقة مغناطيسية عالية إلى مجالات أكثر ضعفا في الطاقة^[16].



(الشكل I.13): رسم يوضح تكوّن المناطق المغناطيسية [16]

4-6-I جدار بلوخ Bloch:

جدار Bloch في بلورة هو طبقة انتقالية تفصل منطقتين متجاورتين ممغنطتين في اتجاهين مختلفين. التغيير التام لاتجاه السبين لا يكون بواسطة عصابة واحدة غير مستمرة على مستوى ذري، وإنما على العكس؛ بوجه متدرج على مستوى عدد كبير من المستويات الذرية، الشكل (I.11). تكون طاقة التبادل أضعف عندما يتوزع التغيير على عدد كبير من السبينات. للسبينات المنتمية للجدار إتجاهات مختلفة جداً عن محاور المغنطة السهلة، هناك إذن طاقة تباين مرتبطة بالجدار، متناسبة تقريبا مع سمكه [16].

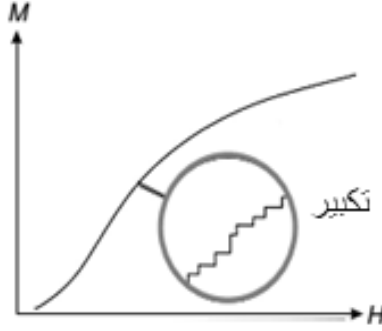


(الشكل I.14): جدار بلوخ Bloch [16]

5-6-I أثر تطبيق حقل مغناطيسي:

عندما نطبق على عينة قابلة للتمغنط تحريضا مغناطيسيا \vec{H} ، تظهر مغنطة متوسطة \vec{M} غير معدومة تتعزز طاقة المناطق التي لها تمغنط في نفس اتجاه \vec{H} ، أو مجاور له، ويزيد حجمها على حساب المناطق الأخرى التي ينقص حجمها. يتم ذلك عن طريق انزياح الجدران الفاصلة بين المناطق. عند الشدات

الضعيفة يكون الإنزياح عكسيا بحيث إذا حذف الحقل فتعود الجدران إلى أماكنها الأولية. أما من أجل تحريض \vec{H} متوسط الشدة تنمو المناطق المفضلة وتأخذ فجأة أماكن المناطق ذات التوجه غير المفضل. وبالتالي يحدث نقص في عدد المناطق وتظهر مغنطة \vec{M} للعينة (الشكل I. 15).^[16]

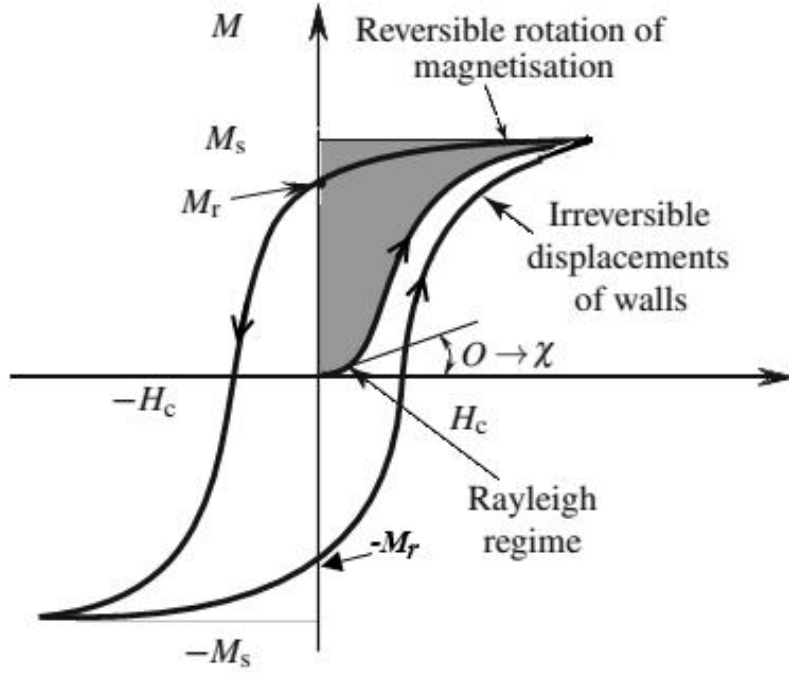


(الشكل I. 15): منحنى تمغنط عينة ذات مغناطيسية حديدية^[16].

I-6-6) التشنج المغناطيسي والحقل القسري:

هناك ميزة للمواد المغناطيسية الحديدية أنها تقدم حلقة تشنج مغناطيسي والتي يمكن وصفها كما يلي: نعتبر مادة ذات مغناطيسية حديدية لها مغنطة منعدمة في حقل مغناطيسي منعدم. عند رفع شدة الحقل الخارجي \vec{H} تصبح مغنطة المادة غير منعدمة وتصل إلى قيمة M_S (المغنطة الأولى). بخفض شدة الحقل تنخفض قيمة المغنطة مع تأخر ملحوظ يسمى التشنج. ومن أجل حقل خارجي \vec{H} معدوم تكون للمادة مغنطة تذكر M_R . للحصول على مغنطة منعدمة يجب مواصلة خفض الحقل الخارجي \vec{H} حتى يصل إلى قيمة سالبة ($-H_C$) تسمى الحقل القسري. بمواصلة خفض الحقل الخارجي تصل المغنطة إلى قيمة تشبع سالبة ($-M_S$). و برفع الحقل من جديد نتحصل على سلوك تناظري: أي مغنطة تذكر سالبة ($-M_R$) عند حقل معدوم، ومغنطة منعدمة عند الحقل القسري H_C . وفي النهاية مغنطة تشبع M_S . فتحقق بالتالي دارة كاملة للتشنج (الشكل I. 15). أثناء رجوع المغنطة تتبدد الطاقة في الوسط على شكل حرارة ؛ هذه الطاقة متناسبة مع مساحة الدارة.

إن هذا التأخر في إزالة المغنطة هو نتيجة لا عكسية انزياح الجدران، وبالتالي فالمادة التي تساعد على صنع مغناط دائمة يجب أن يكون لها مغنطة تشبع عالية و أيضا حقل قسري عالي^{[17][18][19]}.



(الشكل I.16): حلقة التشنج المغناطيسي [17].

وحسب قيمة H_c يمكن تعريف نوعين من المواد المغناطيسية الحديدية:

* **المواد ذات مغناطيسية الحديدية اللينة:** هذا النوع من المواد له دارة تشنج ضيقة (الحقل القسري ضعيف $10 \text{ Oe} \rightarrow 1 \approx$)، يسمح بعودة المغنطة بسهولة. وهو مستعمل خاصة كطبقة حساسة للواقط المغناطيسية (لواقط الـ GMR) والتي يمكن أن تتغير مغنطتها تحت تأثير حقل مغناطيسي ضعيف جداً.

* **المواد ذات المغناطيسية الحديدية الشديدة/العالية:** هذا النوع من المواد له دارة تشنج أكثر اتساعاً ($H_c \gg 10 \text{ Oe}$). فنحصل على مواد لها مغنطة صعبة في العودة، مثلاً: مواد تسجيل الثنائيات الرقمية في القرص صلب، فيجب أن يكون لها مغنطة لا تتغير إلا إذا طبقنا حقلاً مغناطيسياً شديداً كفاية للحفاظ على التسجيل المغناطيسي المعلوماتي [17].

الفصل الثاني

السينترونيك أو إلكترونيك السبين

هذا الفصل يرتكز على تقديم إلكترونيك السبين:

* أولاً ظهور إلكترونيك السبين كفرضية وتطوره من خلال تحسن الوسائل التجريبية.

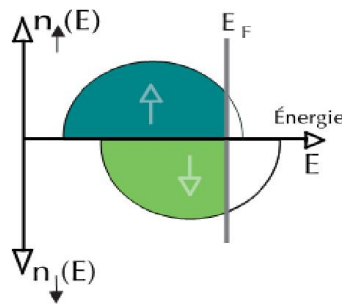
* ثانياً شرح مفهوم النقل المتعلق بالسبين كقاعدة أساسية في مختلف ظواهر السيبنترونك.

1-II ظهور وتطور السيبنترونك:

(1-1-II) السيبنترونك:

يشير السيبنترونك (إلكترونيك السبين) إلى مجموعة من الظواهر المرتبطة باستقطاب السبين في النقل الإلكتروني الملاحظة في البنى المغناطيسية النانومترية، وهي بنى اصطناعية في السلم النانومتري بمواد مغناطيسية حديدية كعناصر أساسية.

إن مصدر النقل الكهربائي مستقطب السبين هو معدن مغناطيسي حديدي مثل الحديد Fe والنيكل Ni والكوبلت Co ، والذي يتميز بانزياح عصابات الطاقة لنوعي السبين والتي نسميها $spin\ up(\uparrow)$ للأغلبية و $spin\ down(\downarrow)$ للأقلية (الشكل II. 1)، هذا الانزياح ناتج عن المغنطة التلقائية للمادة. وبالتالي فالإلكترونات $spin(\uparrow)$ و $spin(\downarrow)$ تقود التيار بالتوازي بحركيات مختلفة وهذا هو الأساس العام للسيبنترونك. إذا أردنا ببساطة تقييم إلكترونيك السبين بالنسبة للإلكترونيك المرتكز على أنصاف النواقل فالتمييز ليس بين الإلكترونات والثقوب بل هو بين إلكترونات $spin(\uparrow)$ والإلكترونات $spin(\downarrow)$ [20] [21].



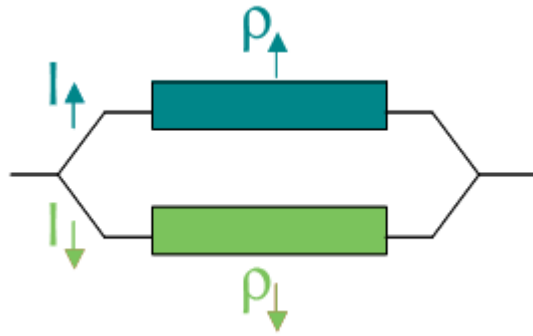
(الشكل II. 1): مخطط كثافات الحالات لإلكترونات $spin(\uparrow)$ (الأغلبية بالأزرق)

وإلكترونات $spin(\downarrow)$ (الأقلية بالأخضر) [22].

إن المبدأ العام للسيبترونك يعتمد على وضع مواد مغناطيسية حديدية في مسار الإلكترونات واستخدام تأثير السبين على حركية الإلكترونات في هذه المواد. هذا التأثير أُقترح بداية من طرف **Mott** في 1936 وتمّ برهانه تجريبيا وصياغته نظريا نهاية سنوات الستينات [22] [23].

II-1-2) فرضية Mott (نموذج التيارين):

افترض **Mott** في 1936 تأثير السبين على النقل الكهربائي لتفسير بعض المفارقات لديه حول مقاومة المعادن. في المخطط (الشكل II. 1) المميّز لمعدن مغناطيسي حديدي هناك تجمّعات مختلفة لإلكترونات $spin(\uparrow)$ و $spin(\downarrow)$ عند مستوى فرمي E_F وبالتالي حركيات مختلفة لنوعي السبين. كون الناقلية الكهربائية مرتبطة بحركية الإلكترونات عند مستوى فرمي E_F يمكن افتراض قناتين للتيار الكهربائي بالتوازي بمقاوميات مختلفة ρ_{\downarrow} و ρ_{\uparrow} (الشكل II. 2). [22] [23].

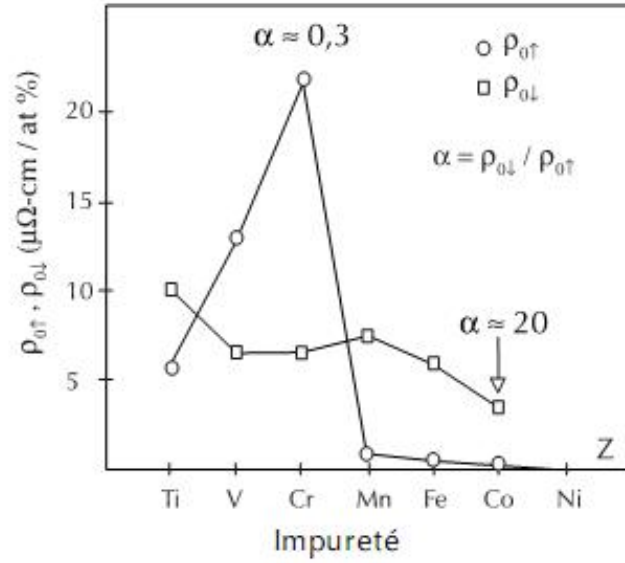


(الشكل II. 2): تصوّر للنقل بواسطة قناتين مستقلتين ذات مقاوميات ρ_{\downarrow} و ρ_{\uparrow} لقناتي $spin(\downarrow)$ و $spin(\uparrow)$ على

الترتيب [23]

II-1-3) النقل الكهربائي في المعادن والخلائط المغناطيسية الحديدية:

في الفترة 1966 قام الباحث **A.Fert** ومجموعته بقياس مقاومة الحديد والنيكل المطعم بشوائب مختلفة. إن دراسة هذه الخلائط سمحت بتأكيد فرضية **Mott** وإثبات أنه من أجل بعض الخلائط تكون حركية إلكترونات $spin(\uparrow)$ و $spin(\downarrow)$ مختلفة. يوضّح (الشكل II. 3) قيم المقاومة $\rho_{0\downarrow}$ و $\rho_{0\uparrow}$ لقناتي $spin(\downarrow)$ و $spin(\uparrow)$ المقاسة في $4.2 K$ للنيكل Ni الذي يحتوي على 1% من شوائب مختلفة [23].



(الشكل II.3): مقاومة قناتي $spin(\uparrow)$ و $spin(\downarrow)$ من أجل النيكل Ni المطعم بـ 1% من شوائب مختلفة [23]

يمكن ملاحظة أن النسبة $\alpha = \frac{\rho_{0\downarrow}}{\rho_{0\uparrow}}$ يمكن أن تتجاوز 20 من أجل شوائب من الكوبلت Co وأقل بكثير

من 1 من أجل شوائب الكروم Cr أو الفاناديوم V .

بعد القياسات الأولى هذه، تم إثبات بواسطة مجموعات أخرى نموذج النقل بتيارين في المعادن والخلائط المغناطيسية الحديدية في حالة خلائط الكوبلت. وفي هذا السياق نذكر بأن السببترونك لم يحقق سوى صياغة مبسطة لنموذج التيارين مع إهمال كل آثار اختلاط السبين، أي تبادل كميات الحركة، وانقلاب السبين الناتجة عن تصادمات الإلكترونات. [23]

4-1-II تطوّر البحث في السببترونك:

البداية الفعلية للسببترونك كانت مع اكتشاف المقاومة المغناطيسية العملاقة GMR في متعدد طبقات مغناطيسي معدني في 1988، والذي تركّز عليه البحوث حتى بداية 1990، ثم توسّعت إلى بنى جديدة مختلفة مثل: الأسلاك النانومترية، الوصلات النفقية TMJ أو البنى اللامتجانسة (معدن مغناطيسي حديدي/نصف ناقل)، سمحت باكتشاف ظواهر واتجاهات جديدة للسببترونك اليوم: المقاومة المغناطيسية النفقية TMR ، ظواهر تحويل السبين، السببترونك وأنصاف النواقل، السببترونك الجزيئي... الخ [22]

[23]

التطبيقات الحالية الأكثر أهمية لإلكترونيك السبين هي في مجال تكنولوجيا المعلوماتية، حيث أحدثت رؤوس القراءة *GMR* تطورا ملحوظا في الكثافة المعلوماتية المخزنة في الأقراص الصلبة المغناطيسية. كذلك الوصلات المغناطيسية النفقية لها أهمية كبيرة في تحقيق ذاكرة مغناطيسية دائمة *MRAM* عالية الكثافة. فضلا عن التطبيقات الأخرى لمجال اللواقط المغناطيسية ذات الإستخدامات الواسعة [24] [25].

II-2 النقل المتعلق بالسبين:

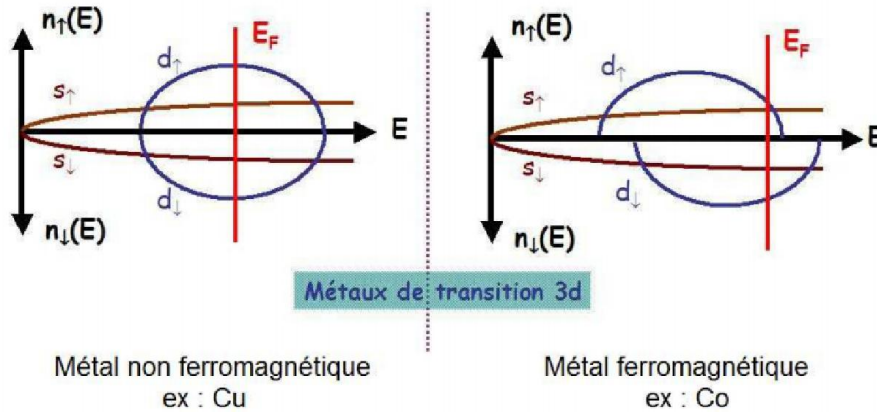
II-2-1 استقطاب السبين:

تشغل الإلكترونات في الذرة الحرة حالات كمية توافق مستويات طاقة غير مستمرة حسب قواعد ميكانيك الكم. وفي جسم صلب؛ تشارك هذه المستويات بعضها مشكلة عصابة طاقة توصف بكثافة الحالات (Density Of States DOS)، حيث طاقة أعلى مستوى مشغول عند $T = 0 K$ هي طاقة فرمي (Fermi Energy).

يمكن حساب كثافة الحالات الإلكترونية $D(E)$ ذات طاقة بين E و $E + dE$. بتطبيق هذه العملية على نحو منفصل من أجل إلكترونات $spin(\uparrow)$ و $spin(\downarrow)$ نحصل على تعريف استقطاب السبين عند طاقة معينة:

$$P(E) = \frac{D_{\uparrow}(E) - D_{\downarrow}(E)}{D_{\uparrow}(E) + D_{\downarrow}(E)} \quad (II.1)$$

كثافة الحالات الإلكترونية $D(E)$ لعناصر الترتيب الدوري هي نفسها عموما بالنسبة لإلكترونات $spin(\downarrow)$ و $spin(\uparrow)$. ولكن بالنسبة للعناصر المغناطيسية مثل الكوبلت *Co*، الحديد *Fe* والنيكل *Ni* و التي هي معادن مغناطيسية حديدية، تكون طاقة إلكترونات $spin(\uparrow)$ أقل من طاقة إلكترونات السبين $spin(\downarrow)$ ، والنتيجة هي أنه عند مستوى فرمي لهذه المواد يوجد فرق في كثافة الحالات الإلكترونية $D_{\uparrow}(E)$ و $D_{\downarrow}(E)$ ، (الشكل II.4). [25] [26].



(الشكل II. 4): مخطط كثافات الحالات لإلكترونات لإلكترونات $spin(\uparrow)$ وإلكترونات $spin(\downarrow)$ لمعادن انتقالية:

معدن مغناطيسي حديدي ومعدن غير مغناطيسي [26].

إن استقطاب السبين في أجهزة السبينترونيك عند طاقة فرمي E_F يعين خصائصه الإلكترونية المغناطيسية و في هذه الحالة:

$$P(E_F) = \frac{D_{\uparrow}(E_F) - D_{\downarrow}(E_F)}{D_{\uparrow}(E_F) + D_{\downarrow}(E_F)} \quad (II.2)$$

نلاحظ أن $P(E_F)$ يمكن أن تأخذ قيما محصورة بين -1 و +1، القيم الحدية ± 1 هي ميزة لقسم من المواد تسمى أنصاف المعادن وقد زادت الأهمية التكنولوجية لهذا القسم من المواد من خلال تطبيقاتها الهامة في السبينترونيك [26].

II-2-2) التيارات مستقطبة السبين:

إن المجهود الحالي للسبينترونيك يأخذ مسعين أساسيين، الأول: تكنولوجيا المقاومة المغناطيسية العملاقة GMR والنفقية TMR التي تقدمت من خلال البحث عن الأداء الأحسن للمواد والأجهزة مثل: مواد التخزين المعلوماتي، شرائح الذاكرة، رؤوس قراءة الأقراص الصلبة... الخ. المسعى الثاني: توليد ونقل وكشف التيارات مستقطبة السبين ومراقبة حركات الإلكترونات بنوعي السبين.

بداية (الجدول II. 1) يوضح الفرق بين التيار الكهربائي، التيار مستقطب السبين و تيار السبين. في الإلكترونيك الكلاسيكي يتعلق التيار الكهربائي بتيار الإلكترونات ذات سبينات موجّهة عشوائيا. أما التيار

مستقطب السبين فيتميز بحركة إلكترونات مفروضة بواسطة حقل مطبق للحصول على عدم توازن اتجاهات السبين. في هذه الحالة يكون التيار إما مستقطب $spin(\uparrow)$ أو مستقطب $spin(\downarrow)$. كما يمكن فرض حركتين متعاكستين الإتجاه لإلكترونات $spin(\uparrow)$ و $spin(\downarrow)$ في نفس الناقل وذلك بتوليد تيارين مستقطبي السبين يتدفقان في اتجاهين متعاكسين. بافتراض أن شدتي التيارين متماثلتان، نجد أن الشحنة الصافية تؤوول إلى الصفر لنحصل على تيار صافي للسبين). [26] [27].

تيار السبين	تيار الشحنة الكهربائية	نوع التيار
0		Unpolarized current
		Spin polarized current
		Fully spin polarized current
	0	Pure spin current

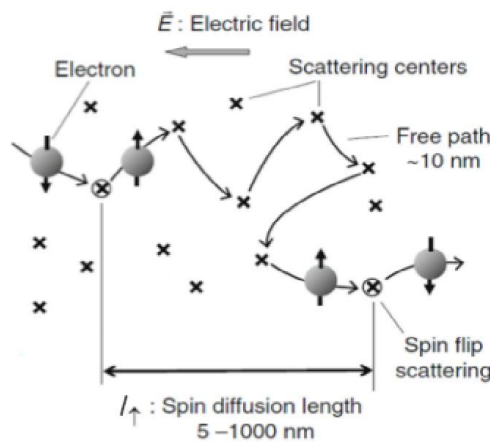
(الجدول II. 1): تيار الشحنة وتيار السبين، من الأعلى إلى الأسفل: توجه عشوائي لسبين الإلكترونات، تيار مستقطب السبين $spin(\uparrow)$ (استقطاب جزئي، استقطاب تام)، تيار السبين بالمركبتين $spin(\uparrow)$ و $spin(\downarrow)$ معا [26].

يمكن توليد التيارات مستقطبة السبين في المعادن غير المغناطيسية باستخدام طرق فيزيائية مختلفة منها: حقن السبين من معدن مغناطيسي حديدي، حقل مغناطيسي، حقل كهربائي، أمواج كهرومغناطيسية... الخ. أحد أغلب الطرق المشهورة حقن السبين من معدن مغناطيسي حديدي مثل في معدن غير مغناطيسي أو نصف ناقل عبر ناقل أومي ظاهرة GMR أو حاجز نفقي ظاهرة TMR . أما تيار السبين الصافي فله أهمية كبيرة في نقل المعلومات الكمية عبر أجهزة أنصاف النواقل دون انتقال للشحنة الكهربائية مما يفتح مجالاً لتخفيض الطاقة في الأجهزة المنطقية). [27] [28].

II-2-3 طول انتشار السبين-زمن استرخاء السبين:

إن تفاعل الإلكترون مع المحيط في جسم صلب يؤثر على اتجاه سبينه، يمكن أن يرفع المحيط من الحقل المغناطيسي الفعال الذي يتفاعل مع السبين. قد ينشأ هذا الحقل من عدة مصادر: سبينات الإلكترونات الأخرى، الثقوب أو الفراغات في الجسم الصلب، سبين النواة، الفونونات (اهتزازت الذرات)، التي ترفع من التغير الزمني للحقل المغناطيسي في ظروف معينة، والأكثر أهمية الإقتران سبين-مدار في جسم صلب الذي يتصرف كحقل مغناطيسي فعال كما رأينا سابقاً [6] [29].

إذا افترضنا أن هذا الحقل موجّه في اتجاه معين فإن السبينات المستقطبة المستقرة (التي لا تتغير مع الزمن) هي فقط تلك الموازية أو ضد الموازية للحقل المغناطيسي. وفي أغلب الحالات السبين الابتدائي للإلكترون لا يكون موازاً أو ضد موازاً للحقل المغناطيسي الفعال الجديد، فلا يكون مستقرًا ويبدأ في التغير تدريجياً في زمن يدعى زمن استرخاء السبين τ_s ، والمسافة التي يعبرها الإلكترون مع الحفاظ على اتجاه سبينه تسمى طول انتشار السبين l_{spin} (الشكل II.5). بالإضافة إلى ذلك يعاني الإلكترون كونه جسماً كروياً تصادمات مرنة قبل التصادمات غير المرنة المتسببة في تبعثر انقلاب السبين، أي هناك مسافة أصغر يعبرها الإلكترون بين تصادمين متتاليين تسمى المسار الوسطي الحر λ وهي غالباً مختلفة بالنسبة لنوعي السبين في المعادن المغناطيسية (الجدول II.2). للحصول على تيار مستقطب السبين في معدن غير مغناطيسي يجب أن يكون سمك المعدن أقل من l_{spin} [6] [29].



(الشكل II.5): المسار الوسطي الحر λ وطول انتشار السبين l_{spin} [6]

	Al	Fe	Co	Ni	Fe ₂₀ Ni ₈₀	Cu
λ_{\uparrow} (nm)	12	8	20	5	15	20
λ_{\downarrow} (nm)	12	8	1	1	1	20
l_s (nm)	350	50	40	10	3	200

(الجدول II. 2): المسار الوسطي الحر λ_{\uparrow} ، λ_{\downarrow} وطول انتشار السبين l_s في بعض المواد في درجة حرارة الغرفة. [6]

الفصل الثالث

المقاومة المغناطيسية العملاقة GMR في متعدد الطبقات المغناطيسي

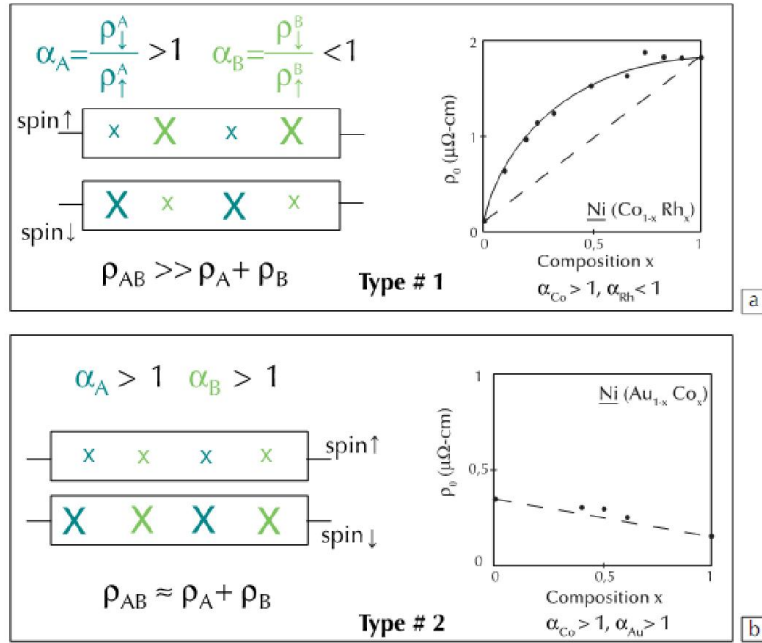
في هذا الفصل نتطرق إلى المقاومة المغناطيسية العملاقة في متعدد الطبقات المغناطيسي وظواهرها: صمّام السبين، التيار في المستوي CIP والتيار العمودي على المستوي CPP، و النتائج التجريبية لنسبة المقاومة GMR المتحصل عليها خلال البحث في هذا الميدان، وفي الأخير الوقوف على الأهمية التكنولوجية لتطبيقات المقاومة GMR مع شرح التطبيق على رؤوس قراءة الأقراص الصلبة.

1-III المقاومة المغناطيسية العملاقة Giant magnetoresistance GMR:

1-1-III مفهوم المقاومة المغناطيسية العملاقة في تجارب على الخلائط المغناطيسية الإنتقالية:

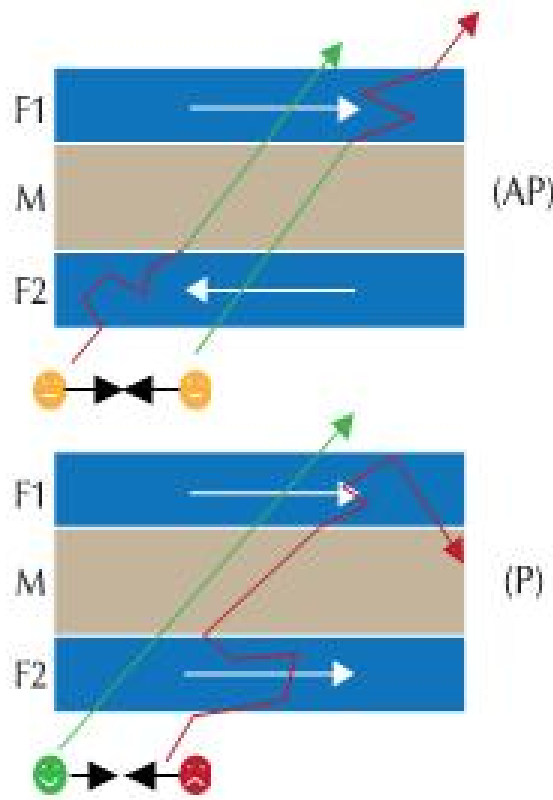
قبل اكتشاف المقاومة المغناطيسية العملاقة، سبق التنبؤ بهذه الظاهرة في تجارب أجريت على الخلائط المغناطيسية الإنتقالية حول نموذج التياراتين (2-1-II فرضية Mott) كما هو موضّح في (الشكل 1.III). نفرض أننا نطعم النيكل Ni بواسطة الكوبلت Co الذي يعيق الإلكترونات في قناة $spin(\downarrow)$ ولكن يترك قناة $spin(\uparrow)$ مفتوحة. في نفس الوقت يحدث العكس بإضافة شوائب الروديوم Rh في خليط $Ni(Co + Rh)$ والذي نسمّيه من نوع 1، تفرمل الإلكترونات بشدة سواء بواسطة شوائب الكوبلت Co في قناة $spin(\uparrow)$ أو بواسطة شوائب الروديوم Rh في قناة $spin(\downarrow)$ ، فليست هناك قناة مفتوحة والمقاومية ترتفع كثيرا مقارنة بالخليط الذي يحتوي إحدى الشائبتين فقط.

وبالمعكس ليس هناك ارتفاع في المقاومة من أجل الخلائط من النوع 2 (المطعم بواسطة الكوبلت Co و Au)، لأنهما يعيقان إلكترونات نفس القناة ويترك قناة الأخرى مفتوحة [23] [30].



(الشكل 1.111): تجارب على الخلائط الإنتقالية بنفس تصوّر الـ GMR [23].

فكرة الـ GMR تكمن في تعويض الشوائب A و B للخلائط بواسطة طبقتين F_1 و F_2 من نفس المعدن المغناطيسي الحديدي مفصولتان بواسطة طبقة غير مغناطيسية (الشكل 2.III). إذا كانت مغنطة كل طبقة معاكسة في الجهة للأخرى (تركيب يسمى ضد متوازي Antiparrallal) فإن القناة F_1 تعيق إلكترونات $spin(\downarrow)$ و F_2 تعيق إلكترونات $spin(\uparrow)$ فنحصل على المقاومة المرتفعة للخلائط من النوع 1. والعكس إذا كانت المغنطة في نفس الجهة (تركيب يسمى متوازي Parrallal) وهذا يوافق المقاومة المنخفضة للخلائط من النوع 2. الميزة الإضافية هنا هي إمكانية المرور من المقاومة المنخفضة إلى المقاومة المرتفعة والعكس وهذا بتطبيق حقل مغناطيسي يرتب مغنطة الطبقتين التي هي ضد متوازية في الحالة الطبيعية [23] [30].



(الشكل 2.III): مخطط ميكانيزم الـ GMR [23].

إن معادلات النقل تبين أن الإلكترونات لا تتأثر بالتوجه النسبي لمغطة الطبقتين إلا إذا كانت المسافة بينهما أقل من طول انتشار السبين l_{spin} ، يعني في شرائح معدنية رقيقة من رتبة النانومتر. في 1970 لم يكن ذلك ممكناً تقنياً تصنيع متعدد طبقات بهذه الأبعاد إلى غاية سنوات 80 [23].

III-1-2) متعدد الطبقات المغناطيسي:

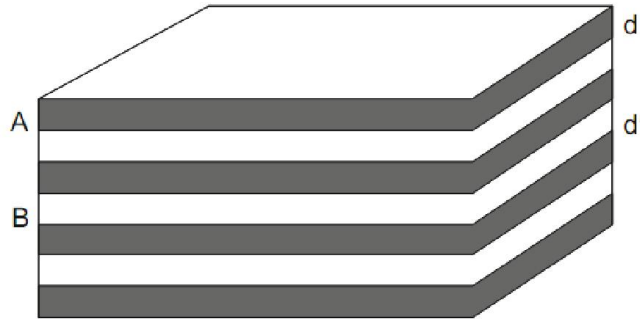
يتكون متعدد الطبقات المغناطيسي من تكديس لطبقات رقيقة مغناطيسية وغير مغناطيسية بالتناوب، سمك كل منها هو بضع النانومترات. بعض متعددات الطبقات المغناطيسية تبدي مقاومة عالية عندما تكون الطبقة غير المغناطيسية معدنية تسمى هذه المقاومة عملاقة GMR ، وعندما تكون الطبقة البينية عازلة فتسمى مقاومة مغناطيسية نفقية TMR [29] [31].

لمتعدد الطبقات المغناطيسي الميزات التالية:

(1) يمكن لمغطة الطبقات المغناطيسية أن يتحكم فيها بواسطة تطبيق حقل مغناطيسي خارجي.

(2) كل طبقة رقيقة كفاية ليتحسس الإلكترون التوجّه النسبي لمغطة الطبقات المغناطيسية.

البنية الأساسية لمتعدد الطبقات *GMR* تحتوي على معدن *A* مغناطيسي حديدي *FM* ومعدن *B* غير مغناطيسي *NM* (الشكل 3.III). سمك كل طبقة من 1nm إلى 10nm ، وعدد الطبقات يتراوح ما بين 3 إلى 100 طبقة. من أجل الطبقات *A* تستخدم بكثرة المعادن المغناطيسية الحديد *Fe* والنيكل *Ni* والكوبلت *Co*، وخالئها، بينما من أجل الطبقات *B* تستخدم المعادن الإنتقالية غير المغناطيسية الكروم *Cr* و الروثنيوم *Ru* والنحاس *Cu* أو المعادن النبيلة مثل الفضة *Ag* والذهب *Au* [29] [31].



III-1-3) اكتشاف المقاومة المغناطيسية العملاقة:

في أواسط الـ 80 ومع تطور تقنيات الترسيب في الفراغ مثل تقنية التنضيد الجزيئي

(Molecular Beam Epitaxy MBE) مكنت صناعة متعدد طبقات بشرائح جد رقيقة من التوسّع من التجارب حول الخلائط الإنتقالية إلى متعدد طبقات مغناطيسي. من جهة كان يعمل P.Grunberg ومجموعته على تجارب الهدف منها توضيح دور الطبقة غير المغناطيسية (طبقة من الكروم) وأثرها على الطبقات المغناطيسية (طبقة من الحديد)، وملاحظة الإقتران المتبادل المتضاد في متعدد الطبقات والسلوك الذي تحدته [31] [32].

هذه الأعمال سمحت باكتشاف ظاهرة GMR في 1988 من طرف فريقين مستقلين:

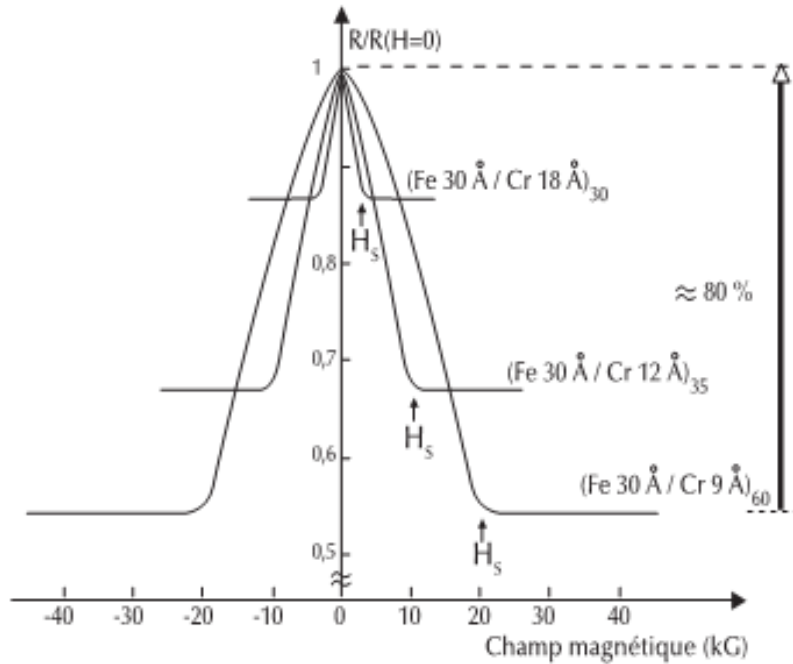
Albert Fert, de l'Université de Paris-Sud-Orsay en France

Peter Grünberg au Centre de recherche de Jülich en Allemagne

أنجزت التطبيقات الأولى لمفعول GMR من طرف فريق البحث لشركة IBM بقيادة S.Parkin، على الطبقات متعددة البلورات في 1989، فاتحة المجال إلى تطبيقات اقتصادية. من بين ما تم تحقيقه لاقط حساس للحقل المغناطيسي، و كذلك اقتراح نوع جديد من رؤوس القراءة في الأقراص الصلبة للحواسيب. أول جهاز مستعمل لظاهرة GMR تم تسويقه من قبل IBM في ديسمبر 1997.

إن الإستعمالات العديدة لظاهرة GMR في الأجهزة التقنية والتي بدورها مكّنت العلماء من فهم العديد من الظواهر الأخرى المتعلقة بمفعول GMR، سمح للعالمين Albert Fert و Peter Grünberg بالحصول على جائزة نوبل للفيزياء في 2007م.

يوضح (الشكل 4.III) أولى الملاحظات التجريبية لظاهرة GMR على متعدد الطبقات (Fe/Cr) من أجل سمك معين للكروم. بالنسبة لمتعدد الطبقات (Fe 3nm /Cr 0.9nm) حيث سمك طبقة الكروم 0.9nm يساوي 3 مستويات ذرية للكروم، تصل نسبة المقاومة إلى 80% [29] [31].

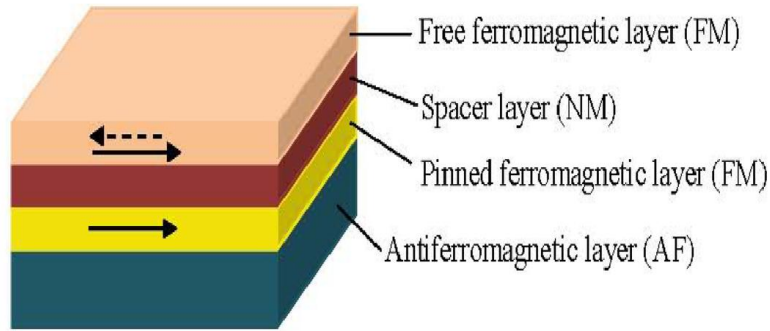


(الشكل 4.III): أولى الملاحظات للمقاومة المغناطيسية العملاقة [23].

III-2 ظواهر المقاومة المغناطيسية العملاقة:

III-2-1 صمام السبين:

إن التطبيقات التكنولوجية لمفعول GMR تتطلب أجهزة تحسّس تكون فيها الإستجابة حادة للحقل المغناطيسي الخارجي. لتحقيق هذه الاستجابة يستعمل صمام السبين للمقاومة المغناطيسية العملاقة. صمام السبين له بنية نانومترية، حيث يتركب من طبقتين مغناطيسيتين حديديتين تفصل بينهما طبقة غير مغناطيسية. السمك النموذجي للطبقات يكون من رتبة 10 إلى 100nm. أغلب المواد المعروفة المستعملة في الطبقات المغناطيسية الحديدية هي الكوبلت وخليط من النيكل والحديد. يبقى اتجاه مغنطة إحدى الطبقتين المغناطيسيتين الحديديتين ثابتاً، نتيجة للتفاعل المتبادل مع مادة مغناطيسية حديدية متضادة مجاورة لها. أما اتجاه مغنطة الطبقة المغناطيسية الأخرى فتكون حرة ويمكنها الدوران [31] [32].

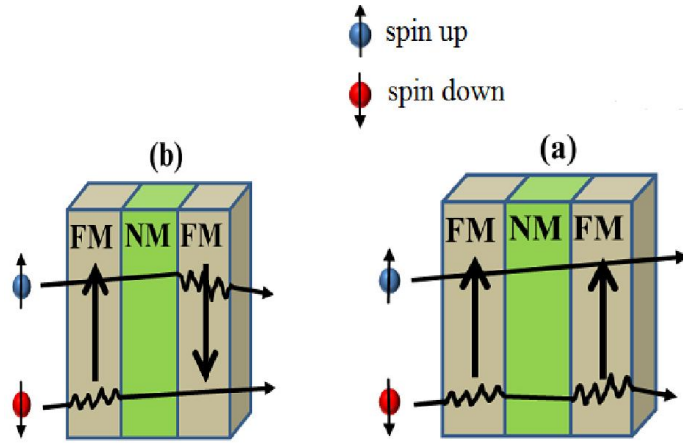


(الشكل III.5): تركيب يوضّح بنية صمام السبين [32].

يمكن للحقل المغناطيسي الخارجي أن يغير اتجاه مغنطة الطبقة المغناطيسية الحرة، وهذا بدون أن يغير اتجاه مغنطة الطبقة المغناطيسية المثبتة.

إن قيمة المقاومة تتوقف على الإتجاه النسبي لمغنطة الطبقتين المغناطيسيتين الحديديتين، فتكون نسبة المقاومة منخفضة (أو مرتفعة) في حالة اصطاف الطبقتين متوازي (أو ضد متوازي) (الشكل III.6) [32]

[33]



(الشكل III.6): (a) تركيب متوازي، (b) تركيب ضد متوازي لصمام السبين [32].

يعرف مقدار GMR بالتغير النسبي بين حالتين الإصطفاف المتوازي أو ضد المتوازي [32].

$$GMR = \frac{R_{Ap} - R_p}{R_p} \quad (III.1)$$

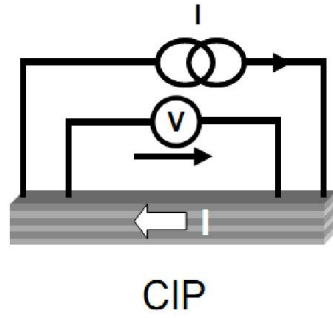
$$GMR = \frac{R_{Ap} - R_p}{R_{Ap}} \quad (III.2) \quad \text{أو}$$

قيمة هذه النسبة في القياسات الأولى حوالي 15 %، أما الآن فقد وصلت النسبة إلى 100% [32].

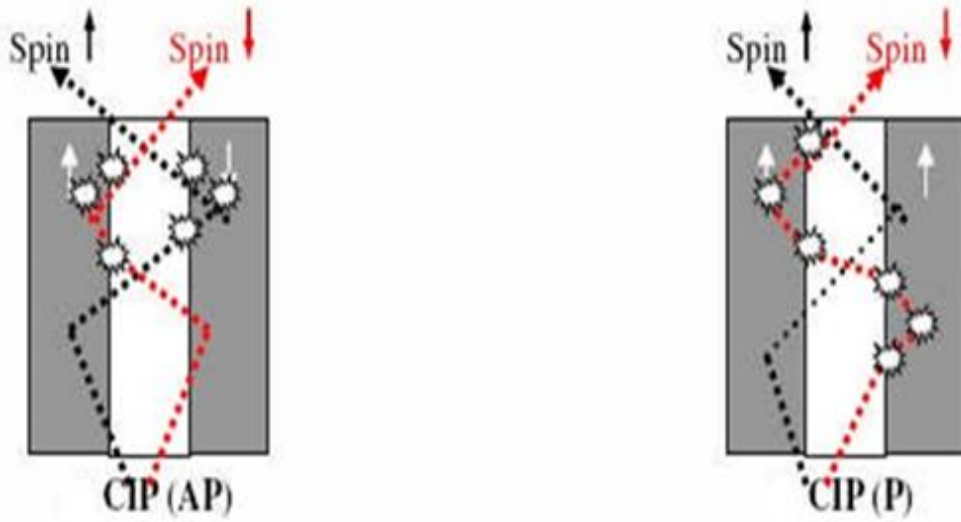
III-2-2) التيار في المستوي CIP والتيار العمودي على المستوي CPP:

كانت التجارب خلال السنوات الأولى للبحث حول GMR، تنجز بتمرير التيار على طول مستويات الطبقات، أي جهة التيار توازي مستوي توضع الطبقات، وهي الهندسة المعروفة بـ CIP (الشكل III.7) [32]

[35]



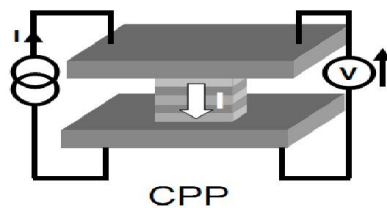
(الشكل III.7.a): تمثيل التركيب CIP-GMR [35]



(الشكل III.7.b): نمذجة لتركيب CIP-GMR في حالة الإصطفاف المتوازي وغير المتوازي [35]

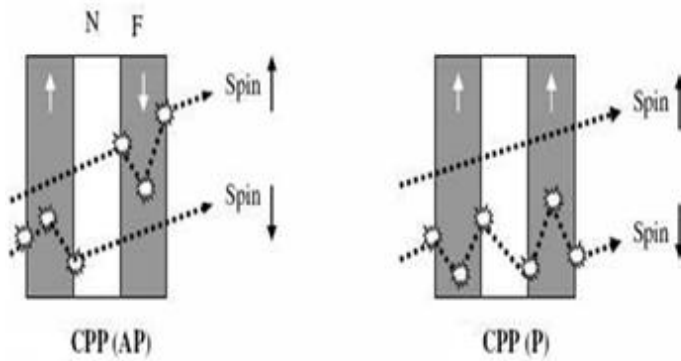
العامل متحكم في قيمة المقاومة في هذا التركيب هو المسار الوسطي الحر للإلكترون، وليس طول انتشار السبين مثل حالة التركيب CPP.

في 1993 بدأت تتحسن التجارب على CPP-GMR، وهي تركيب للمقاومة المغناطيسية العملاقة مع تيار عمودي على مستوي الطبقات (الشكل III.8) [31] [35].



(الشكل III.8.a): تمثيل التركيب CPP-GMR^[35].

تعمل كل طبقة مغناطيسية كمرشح للإلكترونات، حسب اتجاه السبين بالنسبة لاتجاه مغنطة الطبقة. عندما يتم وضع الطبقتين المغناطيسيتين باصطفاف ضد متواز، تمر إلكترونات $spin(\uparrow)$ وإلكترونات $spin(\downarrow)$ في كل طبقة بالتناوب من النوع الأغلبية أو الأقلية حسب جهة المغنطة بالنسبة لجهة السبين. أما في حالة اصطفاف متواز، فالإلكترونات في جهة سبين معينة هي من النوع الأغلبية في جميع الطبقات المغناطيسية لدينا إذن أثر الدارة القصيرة^[31] ^[32].



(الشكل III.8.b): نمذجة لتركيب CPP-GMR في حالة الإصطفاف المتوازي وغير المتوازي. تمثل عملية تصادم السبين باستعمال النجوم^[35].

وتجدر الإشارة إلى أن نسبة المقاومة المغناطيسية في التركيب CPP-GMR أكبر من حالة التركيب CIP-GMR (الجدول III.1.a)، (الجدول III.1.b)^[29].

Multilayer	$\Delta\rho/\rho_P$ (%)	$\Delta\rho/\rho_{AP}$ (%)
Fe/Cr	108	52
Co/Cu	115	53
NiFe/Cu/Co	50	33
FeCo/Cu	80	44
NiFeCo/Cu	35	26
Ni/Ag	26	21
Co/Au	18	15
Fe/Mn	0.8	
Fe/Mo	2	
Co/Ru	7	
Co/Cr	2.6	
Fe/Cu	12	

(الجدول a.1.III): نسب المقاومة المغناطيسية في مختلف متعدّات الطبقات المغناطيسية من أجل تيار في المستوى CIP [29]

Multilayer	$\Delta\rho/\rho_P$ (%)	$\Delta\rho/\rho_{AP}$ (%)
Ag/Fe	42	30
Fe/Cr	108	52
Co/Cu	170	63

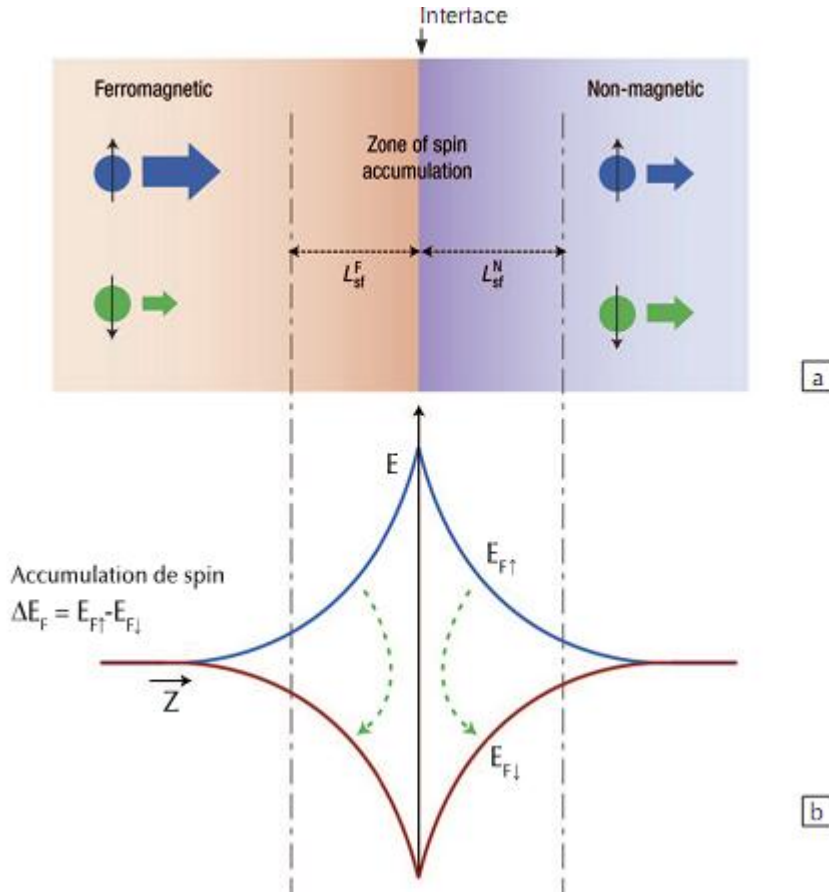
(الجدول b.1.III): نسب المقاومة المغناطيسية في مختلف متعدّات الطبقات المغناطيسية من أجل تيار عمودي على المستوى CPP [29]

III-2-3) حقن وتراكم السبين:

سمحت هندسة CPP-GMR بشرح عدة ظواهر في السبينترونيك أهمها: تراكم السبين.

تحدث ظاهرة تراكم السبين عندما يحقن التيار المستقطب عموديا على متعدد الطبقات، التيار الناتج عن تراكم السبين يسمح لتيار مستقطب السبين أن ينتشر بعيدا عن الواجهة حيث يمر من خلال الطبقة البينية بين الطبقات المغناطيسية الحديدية إلى الطبقة غير المغناطيسية. عدد إلكترونات ذات سبين $spin(\uparrow)$ و $spin(\downarrow)$ في المواد المغناطيسية الحديدية مختلف، بينما يكون متساوي العدد في المواد غير

المغناطيسية، لهذا يجب على النظام الانتقال من حالة عدم التوازن إلى حالة التوازن في السبين، وهذا الذي يدفع إلى ظهور منطقة انتقالية (منطقة تراكم السبين) لتقليل تباين السبين تدريجياً [23].



(الشكل 9.III): تمثيل تخطيطي لظاهرة تراكم السبين المرتبطة بمرور التيار من ناقل مغناطيسي حديدي إلى ناقل غير مغناطيسي [23].

حيث : السهم الأزرق يمثل إلكترونات $spin(\uparrow)$

السهم الأخضر يمثل إلكترونات $spin(\downarrow)$

L_{sf}^F طول انتشار السبين في المادة المغناطيسية الحديدية

L_{sf}^N طول انتشار السبين في المادة غير المغناطيسية

النتيجة الأكثر أهمية لتكوين CPP-GMR، هي أنه يجب أن يكون طول تراكم السبين أكبر من سمك الطبقة [23].

III-3 تطبيقات المقاومة المغناطيسية العملاقة GMR:

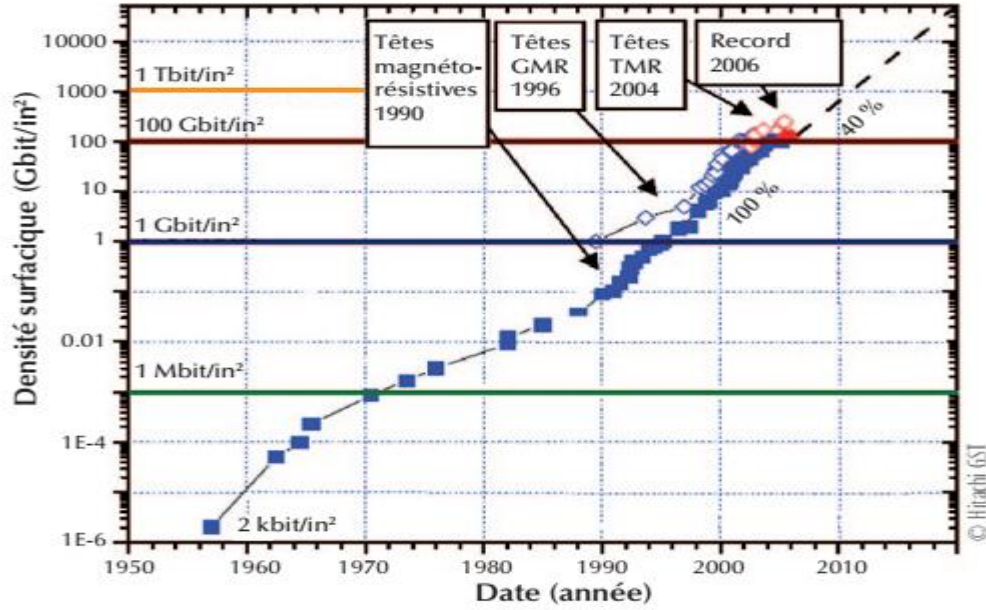
III-3-1) لواقط الحقل المغناطيسي:

تمثل صمّامات السبين (GMR) لواقط جد فعالة كونها ذات حساسية كبيرة للحقل المغناطيسي، وقد أدمجت حديثاً في تطبيقات عديدة مثل: تحديد ومراقبة وكشف الموضع والسرعة والزاوية في الفضاء أو تشفيرها، في مجالات عديدة مثل الروبوتيك، الآليات والسيارات... لواقط الإجهاد، وكذلك شبكات اللواقط في التكنولوجيا الحية والطبية (biosensors)، من أجل معرفة الأنواع البيولوجية في التصوير الإشعاعي الطبي. هذه اللواقط تعطي إمكانية كبيرة للحساسية للحقل المغناطيسي على مستوى فضائي صغير وقد استعملت في عدد كبير من مجالات التكنولوجيا المحيطة بنا، فمثلاً سيارة حديثة تحتوي أكثر من 30 لاقط مغناطيسي^{[1][31]}.

III-3-2) رؤوس قراءة الأقراص الصلبة:

استعملت ظاهرة صمّام السبين شركة IBM بداية من 1990 في رؤوس قراءة الأقراص الصلبة. حيث تقدم تغييراً ملحوظاً في المقاومة (عدة أعشار من المائة) في الحقول المغناطيسية الضعيفة (بضع المT التي تناسب الحقول على مساحة القرص الصلب للحاسوب). وبعد 8 سنوات، استعملت صمّامات السبين في الأقراص الصلبة التجارية.

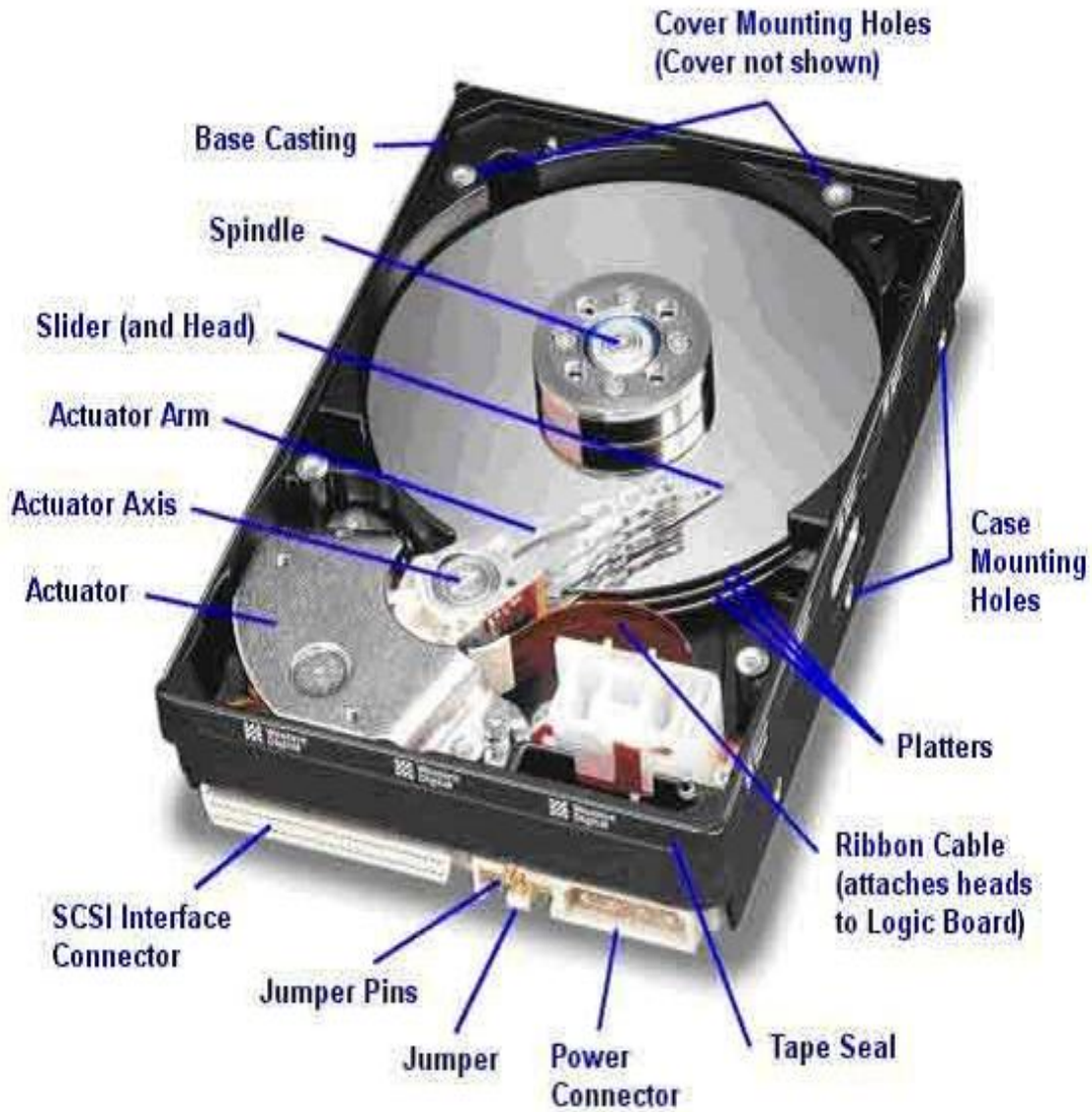
قبل صمّامات السبين اعتمدت أولى رؤوس القراءة ذات عنصر مقاومة مغناطيسي على ظاهرة المقاومة المغناطيسية المتباينة AMR، لكن هذه الأخيرة من رتبة 1 إلى 2% فقط. نظراً للحساسية المرتفعة لصمام السبين، استطاعت قدرة التخزين للقرص الصلب بمعدل 60% منذ 1991. يوضح (الشكل III.10) تطور كثافة التخزين على القرص الصلب تزامناً مع تطور رؤوس القراءة.^[29]



(الشكل 10.III): تطوّر كثافة التسجيل على القرص الصلب مع الزمن

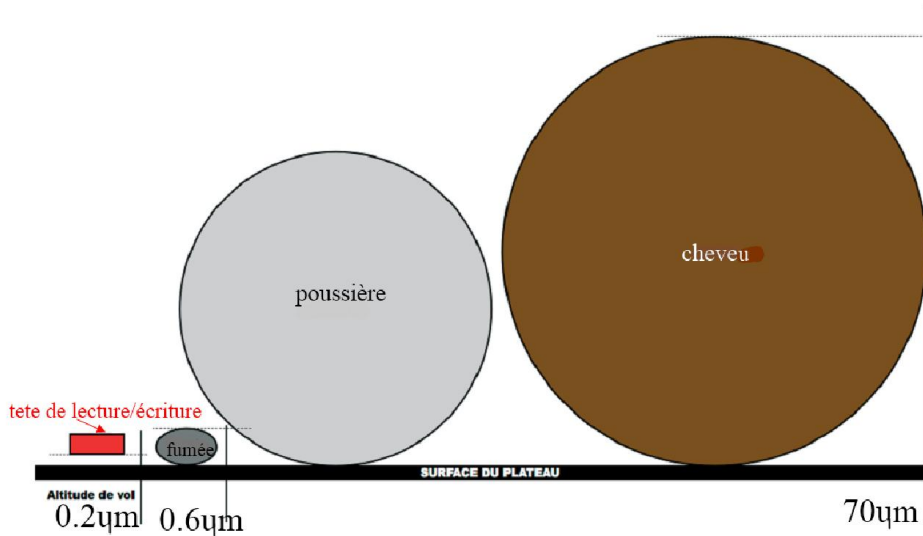
III-3-2-1) تقديم مبسّط للقرص الصلب:

في الحاسوب، القرص الصلب هو العنصر المكوّن للذاكرة المميّنة أي التي لا تحتاج في الحفاظ عليها إلى تغذية كهربائية. وهو الداعم الفيزيائي الذي يسمح بتسجيل المعطيات أو البيانات. يتكون من واحد أو عدة أقراص معدنية غير مغناطيسية مثل الألمنيوم أو من مواد زجاجية أو كذلك من السيراميك، توضع على كل منها طبقة رقيقة مغناطيسية مثل أكسيد الحديد سمكها من بضعة ميكرونات (μm)، وتكون كلها مغطاة بفلم رقيق من مادة للحماية. وهي مزدوجة الأوجه (لمضاعفة سعة التخزين)، ومرفوعة على محور على مسافات صغيرة جداً، في سلسلة بالتناوب مع رؤوس قراءة، هذه الأخيرة محمولة بواسطة ذراع متحرك يتحكم في سرعة انتقالها العرضي على مساحة الأقراص. كما في (الشكل 11.III). [24].



(الشكل 11.III): صورة توضيحية لمكونات القرص الصلب

عند الإشتغال يدور القرص بسرعة عالية من 3600 إلى 150000 دورة/الدقيقة عكس عقارب الساعة بفضل محرك كهربائي، وهذا ما يجعل رأس القراءة يخلق نتيجة لأثر ديناميكي هوائي على بعد 10nm من مساحة القرص. في المتوسط وعلى سبيل المقارنة سمك شعرة إنسان يتراوح ما بين 40µm إلى 100µm. أنظر (الشكل 12.III). [24] [25].



(الشكل 12.III): يوضح الشكل مقارنة بين أبعاد مكونات القرص (رأس القراءة) وأبعاد الوسط (حببية غبار).

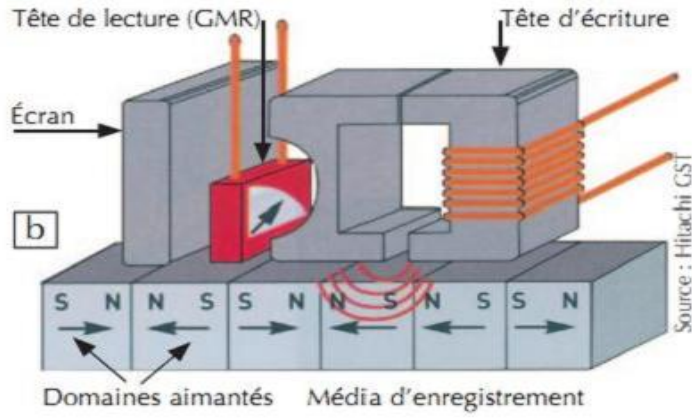
هذه المجموعة الدقيقة ميكانيكيا مترابطة بشكل محكم إذا تصورنا التسارع والتباطؤ لمكونات القرص، فإن الإهتزاز الأدنى للرؤوس سيكسرهما على سطح القرص وتتحطم بلا رجعة. كذلك إذا لمس رأس القراءة الطبقة ما يسمى بالهبوط فإن القرص لا يعود صالحا للإستعمال. تكون المجموعة في وسط محكم الإغلاق (علبة) لا تتأثر كلية بالوسط الخارجي. إذا حدث وأن تعرضت لوسط مفتوح يمكن لحبيبة غبار أن تتلفها فهي قاتلة (أكبر ب 20 إلى 60 مرة من المسافة بين الرأس والقرص).^[36]

III-2-3-2) تطور رؤوس القراءة:

رأس القراءة أو رأس الكتابة هو الجزء الأكثر تعقيدا وحساسية في القرص الصلب ويعتمد (حسب تطوره الزمني) على 3 آثار أو ظواهر فيزيائية: الحث (التحريض) الكهرومغناطيسي، المقاومة المغناطيسية والأكثر حداثة المقاومة المغناطيسية العملاقة تحديدا صمام السبين GMR. ومع التطور الرقمي والحاجة المتزايدة لقدرة التخزين، وصلت الرؤوس الحثية حدودها التكنولوجية بسرعة، أولا : إذا كانت أبعاد وحدة التخزين صغيرة جدا، فإن كمية التدفق الناتج عن دعامة التسجيل المغناطيسي ضعيف جدا وهذا ما يؤدي إلى عدم التقاطه بفعالية بواسطة الوشيعية أو رأس القراءة الحثي. ثانيا: كونها استهلاكية للطاقة ولا تتطور بشكل مرضي مع الحجم المتناقص للأجهزة التكنولوجية.

منذ ظهور أولى الأقراص الصلبة في منتصف سنوات الخمسينات، بقيت تكنولوجيا القراءة/الكتابة مستندة إلى مبدأ المغناطيس الكهربائي (Electromagnet)، وفي التكنولوجيات الحديثة للأقراص الصلبة بقيت رؤوس الكتابة نفسها دائما (حثية)، بينما رؤوس القراءة هي التي تطورت أكثر في الأقراص الصلبة (الشكل 13.III). إن تكنولوجيا القراءة المستعملة حاليا هي تكنولوجيا المقاومة المغناطيسية، ولكن بدأت تقل

أهميتها شيئاً فشيئاً بسبب تفوق رؤوس القراءة GMR، التي أتبع اكتشافها (GMR) في 1988 بسرعة بوضع صمامات سيبن مستعملة في درجة حرارة الغرفة والتي تقدم استجابة خطية لحقل ضعيف.^[29]



(الشكل 13.III): رسم توضيحي لرأس الكتابة الحثي ورأس القراءة ذو عنصر مقاومة مغناطيسية GMR، على حامل

التسجيل المغناطيسي.^[26]

يلخص (الجدول 2.III) أهم تطورات رؤوس القراءة.

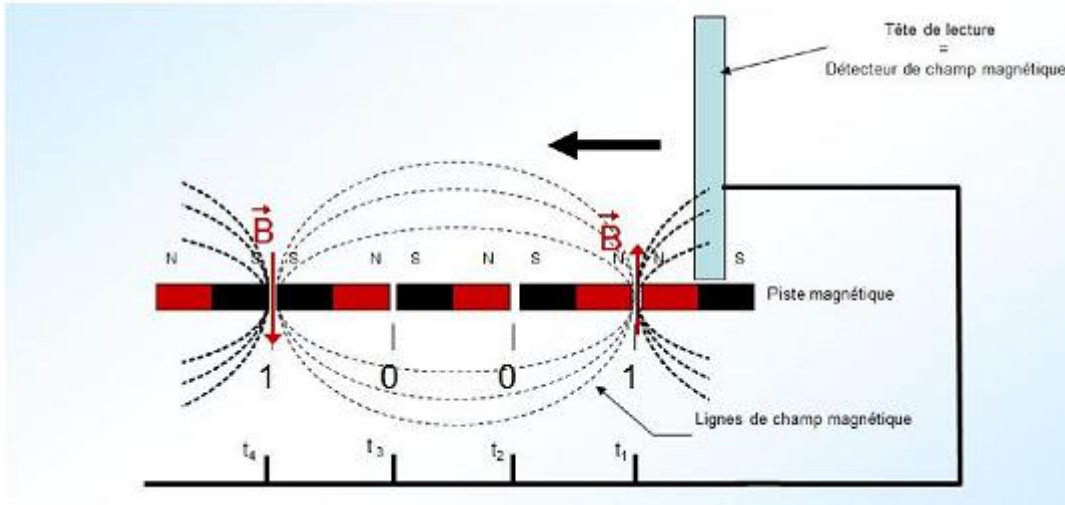
رأس القراءة	وصفه
الفيريت	هي قديمة كلية، تتمثل في مغناطيس على شكل حرف U
MIG	وهي اختصار لـ Metal In Gap (معدن ذو فجوات). وهي أيضا قديمة وقريبة من نموذج الفيريت. تتكون من خليط أكثر حساسية
TF	Thin-Film الفلم الرقيق: وهو النموذج الأكثر استعمالا حتى 1997، مبدؤه يتمثل في كشف التيار المتحرض الناتج عن وشيعة خاضعة لحقل مغناطيسي.
MR	عنصر مقاومة مغناطيسية، و هنا يستعمل رأسين، إذا كانت القراءة تستخدم MR رأس فإن الكتابة تتم دائما بواسطة رأس TF
	رأس القراءة يحتوي على لاقط ذو قاعدة من Ni و Fe والذي مقاومته تتغير بدلالة الحقل المغناطيسي الناتج عن القرص الصلب. اللاقط يقرأ هذا التغير و يرسله. هذه العملية تسمح بالحصول على رؤوس أكثر حساسية و أقل سمكا. وبالتالي كثافة أكثر أهمية. وهذا بفضل الأقراص التي سترتفع قدرة تخزينها بشكل معتبر.
GMR	وهي تطوير للعنصر السابق، في هذه الحالة طبقتان من NiFe تفصلهما طبقة ناقلة معدنية جد رقيقة. تعتمد على مبدأ أن الإلكترون يملك من وجهة نظر كوانتية حالتين سبين. عندما يكون السبين مواز لاتجاه الحقل الناتج عن القرص الصلب، تنتج مقاومة ضعيفة، والعكس. الهدف هو رفع حساسية رؤوس القراءة.

(الجدول 2.III): تطورات رؤوس القراءة. [31].

III-3-2-3) قراءة البيانات على القرص الصلب:

إن الوحدة العنصرية لتخزين المعلومات في الإعلام الآلي هي الثنائية الرقمية (bit) لا تأخذ إلا قيمتين مختلفتين 0 و 1، والتي تتوافق في حالة نظام كهربائي مع مرور التيار 1 أو عدم مروره 0. البرنامج أو قاعدة البيانات في الإعلام الآلي ليست إلا تسلسلا لعدة ثنائيات رقمية (معطيات رقمية)، ممثلة أفقيا على مسار القراءة (مسارات متمركزة في القرص الصلب) بواسطة التسجيل المغناطيسي وكأنها

مغناط صغيرة، أبعادها الحالية من رتبة $25 \times 100 \text{nm}^2$. يحدّد اتجاهها المغناطيسي حالة الثنائية الرقمية 0 أو 1. كما هو موضح في (الشكل III.13).



(الشكل III.13): رأس القراءة يأخذ أربع قياسات في أزمنة t_1, t_2, t_3, t_4 ، ويلتقط السلسلة 1001.

يمسح رأس القراءة هذه الثنائيات الموجهة مغناطيسياً، فيلتقط العنصر المقاوم لرأس القراءة التدفق المغناطيسي المنبعث منها. نظراً لحساسية هذا اللاقط المرتفعة جداً ينشأ اصطفاً موازي أو ضد موازي للمغطة في الصمام، ما يحدث تغييراً في مقاومته (عالية 0 أو منخفضة 1) حسب التوجه المغناطيسي لكل ثنائية (معطيات رقمية). [36].

خلاصة عامة:

في هذا العمل قمنا بشرح ظاهرة المقاومة المغناطيسية العملاقة GMR في متعدد الطبقات المغناطيسي، مع التركيز على الجوانب الهامة التي يتعلق بها موضوع البحث: المواد المغناطيسية والسبينترونيك، إضافة إلى شرح التطبيق الحالي والواسع لهذه الظاهرة على رؤوس قراءة الأقراص الصلبة ذات قاعدة صمام السبين GMR.

وجدنا في هذه الدراسة أن اختلاف المواد من حيث خواصها المغناطيسية مثل مدى الإستجابة للحقل المغناطيسي المحرّض، وجود ونوع التأثيرات المغناطيسية المتبادلة في المادة، واختلاف كثافة الحالات الإلكترونية لنوعي السبين $spin(\uparrow)$ و $spin(\downarrow)$ في بعض المواد يعطيها ميزات هامة لا بد من استغلالها في النقل الإلكتروني.

ومن خلال تقديمنا لأساسيات السبينترونيك نجد أن سبين الإلكترون يساهم بشكل ملحوظ في الحصول على ظواهر جديدة في النقل الإلكتروني أي "النقل الكهربائي المتعلق بالسبين" واستخدامه في التكنولوجيا متعددة الميادين بدلا من الإلكترونيك الكلاسيكي المعتمد على شحنه الإلكترون فقط.

ومع تطوّر الصناعة النانومترية سمح متعدد الطبقات المغناطيسي من إثبات الفرضيات السابقة للسبينترونيك تطبيقيا من خلال تحقيق عنصر المقاومة المغناطيسية العملاقة GMR في متعدد الطبقات $(Fe/Cr)_n$ وبصفة عامة متعدد الطبقات $(FM/NM)_n$.

- [1] Conception et realisation de d'un biocapteur à GMR pour la caractérisation de milieux biologiques, thèse de doctora, Hamidreza shirzadfar, université de Lorraine, juin 2014.
- [2] Origin ,Development and future of spintronics, Albert Fert , Université Paris – Sud , Orsay , france .
- [3] Spintronics Fundamentals and applications, Igor zutic, S.Das Sarma, university of Maryland at college park USA, Jaroslav fabian, Karl-franzens university Austria, May 2004.
- [4] Magnetic multilayers: spin configurations, excitations, and giant magnetoresistance, R E Camly and R L Stamps, University of Colorado springs USA, February 1993.
- [5] فيزياء الجوامد ، الجزء 3، د؛ عبد الفتاح أحمد الشاذلي ، كلية التربية جامعة عين الشمس ص 25.
- [6] Magnetism and Magnetic materials , J,M,D,Coey Trinity college ,Dublin , 1st Edition 2010.
- [7] Quntum Teory of Solids , Eoin P.Reilly , Editted by David S.Betts
- [8] مقدمة في فيزياء الجسم الصلب، الدكتور عزيز عقيل داخل ص 203.
- [9] Fundamentals of Magnetism , Mathias Getzlaff , 2008.
- [10] كتاب مترجم من طرف عيسى طاشووعة الفيزياء الذرية. Pysique Atomique ,Tome 2.
- [11] فيزياء الجوامد ، الجزء 3، د؛ عبد الفتاح أحمد الشاذلي ، كلية التربية جامعة عين الشمس ص 25.
- [12] Cours d'introduction au Magnétisme , Mehdi Amara ,Institut Néel ,Grenoble,France.
- [13] Fundamentals of the Physics of Solids, Volume 1 , Jenó Sólyom , Springer.
- [14] Introduction to the Physics of Electrons in solids , Henri Aloul.
Solid State physics ,Philp Hofmann,2008.
- [15] Physique du Solid , Max Brousseau , Masson, Paris 1992
- [16] Introduction à la Physique de l'état Solide ,Charles Kittel ,chap :15-16.

[17] Classical Electrodynamics , John David Jakson , p:151.

[18] الكهرباء والمغناطيسية ، الدكتور :غازي ياسين القبسي ، جامعة ريدينك ، دار الميسر ، الطبعة الثانية 2006.

[19] Physique De la Matière Condensée , Hung T.Dieb , professeur à l'Université de Cergy-Pantaise ,Duod, 2003.

[20] Plein Sud, magazine d'information de l'université Paris-Sud, Ian Campbell Janvier-février 2008 n° 69.

[21] Spintronique 2 , J,Carry,Labo ,Laboratoire de Physique et Chimie des Nano-Objets , INSA Toulouse.

[22] Magnétisme et propriétés de Transport de couches d'agrégats cœur-coquille Co/CoO , thèse de doctorat , Robert Morel,université de Grenobl ,P16

[23] Dossier Spintronique,Albert Fert,roflots de la physique,2012.

[24] Theory of spintronics in nanostructures , Doctoral Theses Nyuk Leong chung , University of Singapore. 2012

[25] Spintronics , R.A.Duine , lecture notes taught at Utrecht University, Spring 2009

[26] Structural, magnetic and electronic properties of Rebased double perovskites, doctoral theses, D.Jan Marek Michalik, University of Zaragoza, December 2008.

[27] Spin Current, Piter Fischer, Lawrence Berkley, Naional laboratory United States, March 2018

[28] Magnetic coupled spin-torque Device, Doctoral Theses, Larkhoon leem ,Stanford University, 2010

[29] Nanomagnetism and Spintronics , Teruya Shinjo ,Elsevier, Januaru 2009, chapter 2.

[30] Pannaux GMR : la magntoresistance gante ,André Thiaville, Université Paris – Sud 11,juin 2008.

[31] les Nanosciences au Cœur des Technologies Convergentes

Albert Fert, UMR CNRS/Thales et Université Paris-Sud,28 septembre 2005

- [31] Introduction to spintronics ,Supriyo Bandyopadhyay and Marc Cahay, CRC Prss, 2008
- [32] Elaboration et étude de vannes de spin Organiques : vers le transport de spin à température ambiante, Mathieu Palosse ,Thèse de doctorat, université Toulouse, 2013.
- [33] New directions in spintronics, C.H.Marrows and B.J.Hickey,University of Leeds,UK,Royal Society, 2011
- [34] "Giant magnetoresistance of Fe(001) / (001) Cr magnetic superlattices." M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. N. Van Dau, F. Petroff, P. Eitenne, G. Creuzet, A. Friederich, and J. Chazelas. Phys. Rev. Lett.(1988)
- [35] Transport de spin dans les nanomatériaux : Application à Spintronique ,Thèse de Magistère , Djelloul-Berkane Lalia , l'université Hassiba Ben Bouali , chlef , 17-12-2008.
- [36] Spin detection and magnetic recording , J,M,D,Coey Trinity college ,Dublin , 2010.