

Hall effect مفعول هول

يامن حيدر

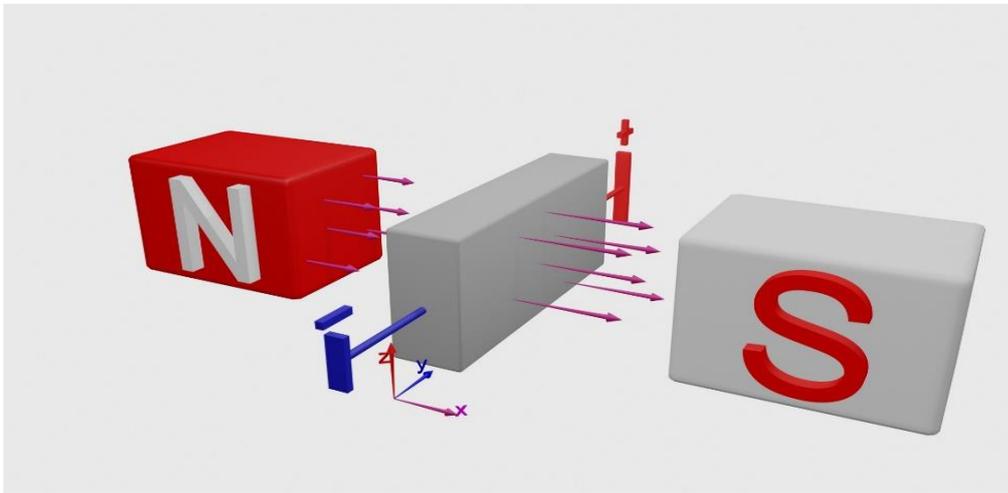
Yamen Haidar
yamen.haidar.39@hotmail.com

مفعول هول: Hall effect

قبل ان ندخل في تعريف مفعول هول لنتطرق اولاً الى شرحه بشكل مبسط ثم نعرفه بشكل علمي حيث ان من اكتشف هذا الأثر هو الفيزيائي الأميركي إدوين هيربرت هول Edwin Herbert Hall عام 1879

لنقوم بهذه التجربة معاً لفهم مفعول هول بشكل أعمق وأدق لنفرض لدينا صفيحة معدنية ناقلة للتيار الكهربائي ووصلنا طرفيها بجهد كهربائي مما يؤدي الى مرور تيار كهربائي من قطبها الموجب الى السالب (انظر الشكل 1)

وضعنا الصفيحة السابقة وبنفس الشروط في حقل مغنطيسي عمودي على حركة الإلكترونات فإن خطوط الحقل ستكون من القطب الشمالي الى الجنوبي (في الاتجاه [OX]) كما في الصورة التالية:



الشكل 1 صفيحة ناقلة للتيار الكهربائي توضح جهة التيار الكهربائي وجهة الحقل المغنطيسي المطبق

(لكن انتبه جيداً هنا انها ستكون حركة الإلكترونات من القطب السالب الى الموجب (الاتجاه [oy]) وهذا ما يهمنا أكثر)

وكما نعلم ان الحقل المغنطيسي سوف يؤثر على الالكترونات المتحركة في الناقل حيث سيؤثر عليها بقوة لورنتز ويحرفها نحو الأعلى في الاتجاه [oz]

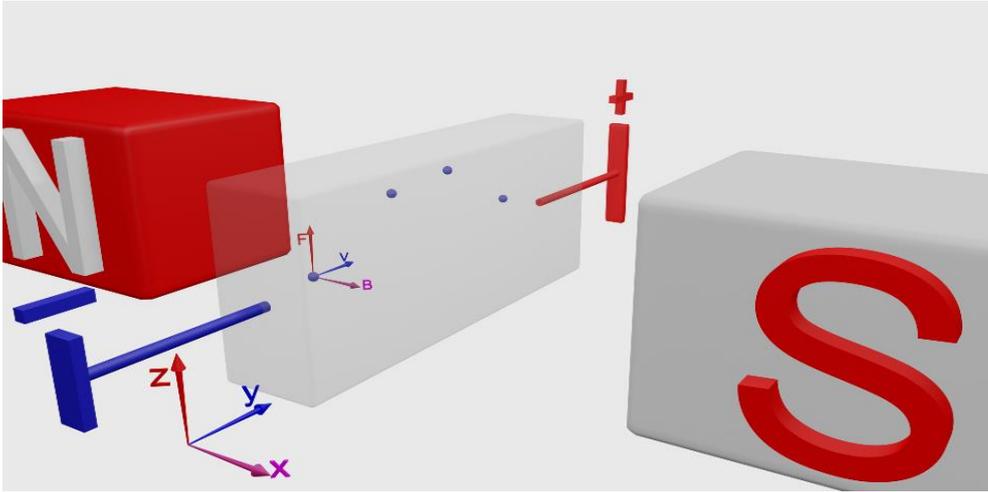
$$\vec{F}_L = q(\vec{v} \times \vec{B})$$

حيث أن:

F_L : قوة لورنتز Lorentz Force التي تؤثر على الالكترون الذي يملك سرعة v داخل الصفيحة

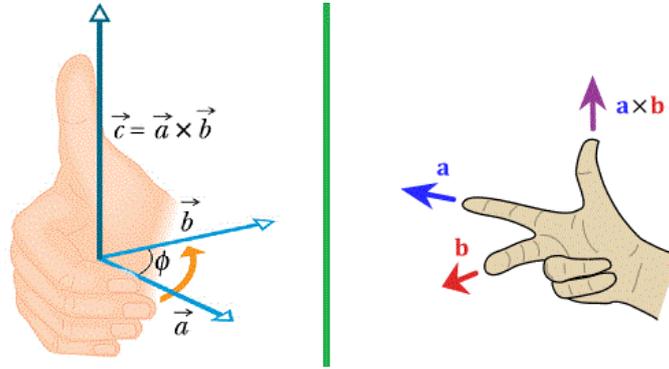
q : شحنة الإلكترون وهي -e

B : الحقل المغنطيسي Magnetic field



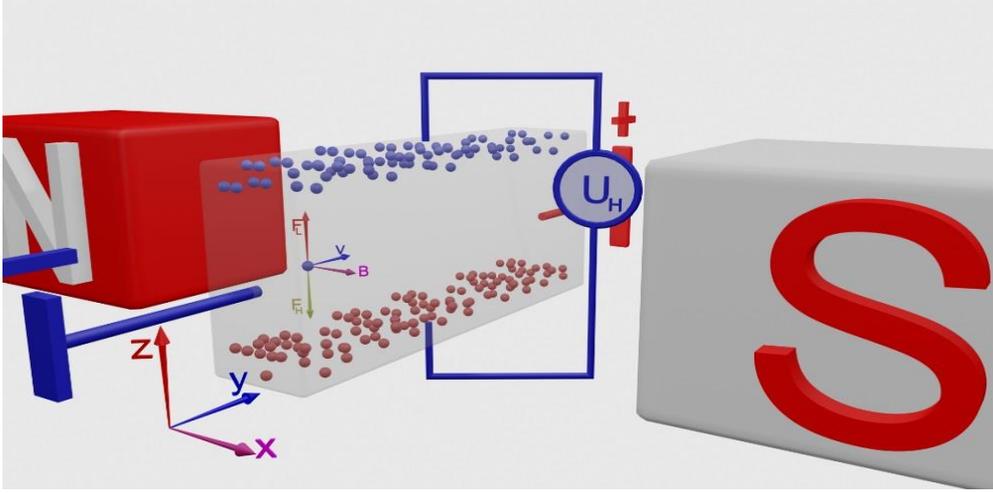
الشكل 2 يوضح انحراف الإلكترونات الى الأعلى بسبب تطبيق حقل مغناطيسي عمودي على جهة حركة الإلكترونات

يمكنك تحديد جهة قوة لورنتز بتطبيق قاعدة اليد اليمنى كما هو موضح في الصورة التالية لكن انتبه ان شحنة الإلكترون سالبة لذلك تعكس جهة القوة:



الشكل 3 قاعدة اليد اليمنى لتحديد جهة الجداء الخارجي وفي مثالنا تحديد جهة قوة لورنتز حيث تمثل السبابة جهة السرعة والوسطى للحقل المغناطيسي فتكون القوة بجهة الابهام

يؤدي انحراف الإلكترونات إلى أن تتوضع "بصورة وسطية" في الوجه العلوي للصفحة وبالتالي تتوضع الشحنة الموجبة في الطرف المقابل للصفحة وبذلك تتولد عن توزع الشحنات في الطرفين قوة كهربائية بالاتجاه [-OZ] معاكسة لقوة لورنتز وفي الحالة المستقرة تتساوى هاتين القوتين وتكونان متعاكستان بالاتجاه.



الشكل 4 نلاحظ تساوي القوتين وتشكل فرق كمون هول بين الوجه العلوي والسفلي للمعدن بسبب توزع الشحن

لقد وجد ان كمون هول الناتج يعطى بعلاقة بسيطة تربط بين التيار المار في الصفيحة والحقل المغنطيسي المطبق:

$$U_H = -\frac{IB}{enl} = R_H \frac{IB}{l}$$

حيث R_H معامل هول Hall coefficient او ثابتة هول Hall constant:

$$R_H = -\frac{1}{en}$$

حيث:

U_H : فرق كمون هول Hall Voltage

E_H : حقل هول الكهربائي Hall electric field

n : تركيز الإلكترونات Concentration of electrons

I : التيار Current

أي تولد لدينا كمون بين طرفي المعدن العمودي على جهة الحقل والسرعة يسمى كمون هول U_H ونلاحظ ان كمون هول يزداد بزيادة التيار المار في الناقل ويزداد بزيادة الحقل المغنطيسي المطبق ويوجد تطبيقات كثيرة لهذا المفعول منها مقياس غاوص **Gaussmeter** لقياس شدة الحقل المغنطيسي وقارئ البطاقات المغنطيسية **Magnetic Card Readers** ورأس قارئ الأشرطة المغنطيسية والكثير من التطبيقات المحيطة بنا



الشكل 5 مقياس غاوص Gaussmeter



الشكل 6 قارئ البطاقات المغنطيسية

ولكن كانت المفاجئة أنه قد وجد من خلال التجربة أن المعدن تقل ناقلية مع وجود الحقل المغنطيسي وهذا لأنه بحسب نموذج لورنتز الذي يفترض انه يوجد توزيع لسرعات الإلكترونات (أي ليس لكل الإلكترون السرعة الحرارية نفسها) وبالتالي لا يحدث التوازن بين قوة لورنتز المؤثرة على الإلكترون وقوة حقل هول إلا من اجل بعض الإلكترونات التي تملك السرعة الوسطية المناسبة وبالتالي إي إلكترون له سرعة اكبر او اصغر من هذه السرعة سوف ينحرف ويتبع مسار منحنياً بين طرفي المعدن (وبالتالي مسار أطول) وبسبب هذا الانحناء للعديد من الإلكترونات تقل الناقلية الكهربائية وسميت بالمقاومة المغنطيسية وتكون عظمى عندما يكون الحقل المغنطيسي عمودي على منحى التيار.

إذا يصبح لدينا تعريف علمي لمفعول هول بعد فهمه بشكل دقيق ومجهرى:

"هو نشوء حقل كهربائي عرضاني في ناقل يسري فيه تيار كهربائي موضوع في حقل مغنطيسي متعامد مع جريان التيار"

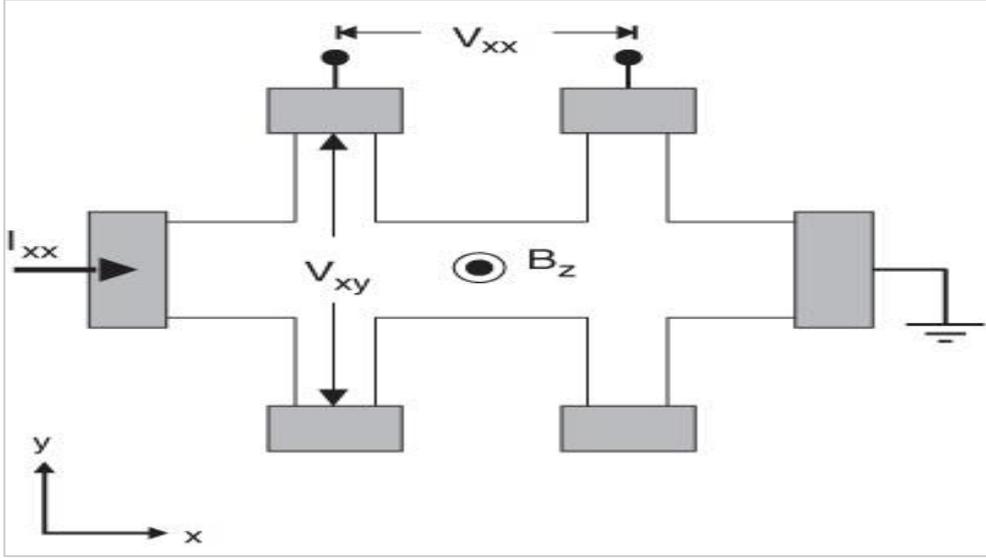
مفعول هول الكمي Quantum Hall effect:

والان لندرس أثر هول ضمن شروط مختلفة قليلاً وذلك ضمن نفس الشروط التي طبقها كلاوس فون كليتسنغ Klaus von Klitzing عام 1980 حيث طبق تجربته على غاز الكتروني ثنائي البعد

(شريحة ناقلية او نصف ناقلية رقيقة جداً) حيث تتواجد هذه الشريحة ضمن درجة حرارة منخفضة جداً وتخضع لحقل مغناطيسي B قوي جداً

لا بد من التعرف على بعض المصطلحات قبل الخوض فيما كان متوقع من هذه التجربة وما هي النتائج التي حصل عليها فون كليتسنغ

لتكن لدينا العينة التالية:



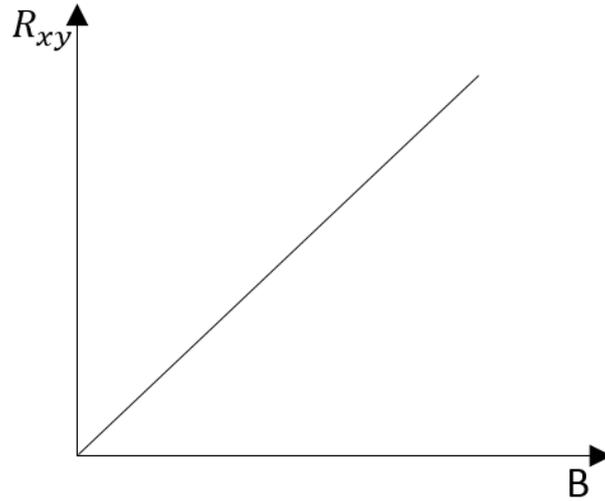
عينة يجري فيها التيار من اليسار لليمين وتخضع لحقل مغناطيسي B نقيس فيها كمون هول (العرضي) V_{xy} والكمون الطولي V_{xx}

بالتالي نعرف المقاومة العادية والتي هي ناتج قسمة الكمون المطبق على التيار: $R_{xx} = \frac{V_{xx}}{I_{xx}}$

وهي المقاومة الاعتيادية التي نقيسها في كل العناصر الكهربائية، أما مقاومة هول فهي ناتج قسمة كمون

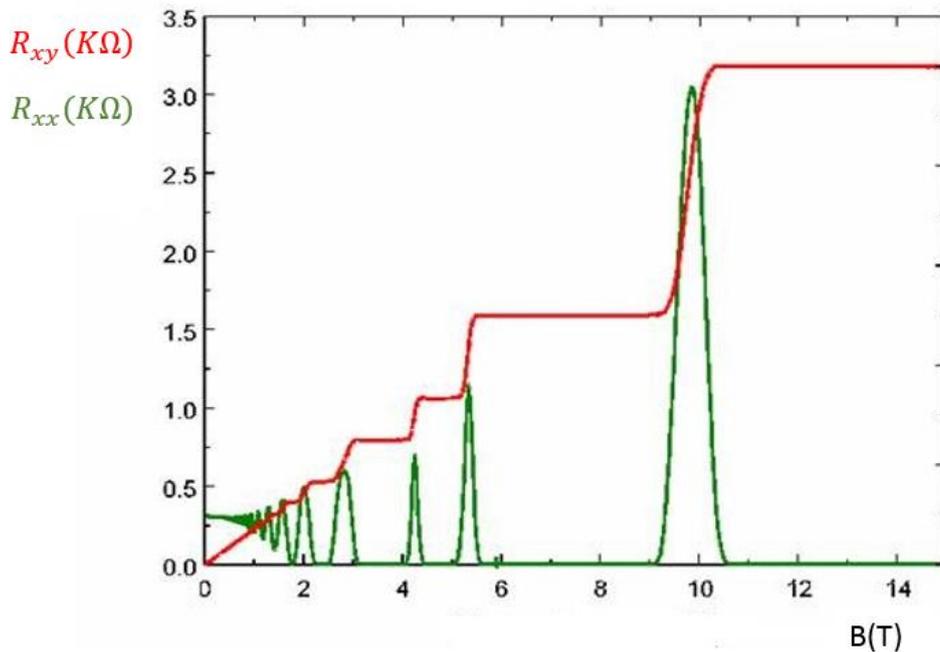
$$R_{xy} = \frac{V_{xy}}{I_{xx}}: \text{هول } V_{xy} \text{ على التيار المار في العينة } I_{xx}$$

كلاسيكياً إذا درسنا تغير مقاومة هول مع زيادة الحقل المغناطيسي المطبق نتوقع ان نحصل على مستقيم كما في الشكل التالي:



الشكل 7 المنحني المتوقع كلاسيكياً لتغير مقاومة هول مع الحقل المغنطيسي B

لكن عندما أجرى كلينتنغ هذه الدراسة على انصاف النواقل في درجات حرارة منخفضة وضمن حقل مغنطيسي قوي لم يحصل على المنحني المتوقع كلاسيكياً ولكن عوضاً عن ذلك حصل على اكتشاف غير متوقع حيث وجد ان مقاومة هول مكتمه وقد حصل كلينتنغ على جائزة نوبل عام 1985 من اجل هذا الاكتشاف



الشكل 8 المنحني التجريبي الذي حصل عليه كلينتنغ لتغير مقاومة هول والمقاومة الطولية (الاعتيادية) بدلالة الحقل المغنطيسي المطبق

ونلاحظ ان كل من المقاومتين R_{xy} و R_{xx} تُبديان تصرفاً مدهشاً وخاصة مقاومة هول التي تبقى ثابتة ضمن مجال للحقل المطبق B قبل ان تقفز فجأة الى مستوي آخر وتثبت فيه ثم تكرر نفس العملية وهذا عبارة عن تكميم للمقاومة أي حصلنا على تكميم على المستوى الجهري أي تكميم في كمية جهرية كلاسيكية، وجد كلينتنغ ان المقاومة تأخذ في هذا المنحني القيم:

$$R_{xy} = \frac{h}{ve^2}$$

حيث ν عدد صحيح و h ثابت بلانك e شحنة الالكترن النوعية
كان في هذا الاكتشاف أمرين مثيرين جداً:

1. اننا لأول مرة حصلنا على تكميم (ظاهرة كمومية) على المستوى الجهري وهو تكميم المقاومة وسُمي المقدار $\frac{h}{e^2}$ كم المقاومة resistance quant او يسميه البعض بثابت فون كليتسنغ.

2. رغم ان ظروف التجربة لم تكن مثالية والتجربة عملياً تجري على عينة جهرية أي عينة تحوي على عدد كبير من الجسيمات والشوائب والعيوب إلا اننا حصلنا على علاقة تحوي على ثابتين عالميين أساسيين (علاقة لا تحوي الا على ثوابت عالمية) هما ثابت بلانك والشحنة النوعية بالإضافة للحصول على تكميم في مثل هذه العينة الجهرية وهذا بحد ذاته كان مفاجأة كبيرة.

جرت بعد ذلك عدة أبحاث للحصول على مفعول هول الكمي عند درجات حرارة مرتفعة أي الحصول على هذا التكميم عند درجات حرارة مرتفعة وبالفعل فقد تم ملاحظة مفعول هول الكمي عام 2007 عند درجة حرارة الغرفة وذلك في مادة الغرافين والتي هي عبارة عن طبقة واحدة من ذرات الكربون المعبئة بشكل محكم في شبكة خلية العسل البلورية (بلورة سداسية)

يوجد جزء اخر لهذا الأثر لم نتكلم عنه حيث ان هذا المفعول يتألف من قسمين:

1. مفعول هول الكمي الصحيح the integer quantum hall effect وهو الذي تكلمنا عنه.

2. مفعول هول الكمي الكسري the fractional quantum hall effect: حيث يأخذ فيه العدد ν قيماً كسرية بدلاً من قيم صحيحة وهذا المفعول أكثر تعقيداً واعتمد في تفسيره على ما يعرف بسويات لانداو landau levels بشكل رئيسي، وقد تم اكتشاف هذا المفعول تجريبياً أيضاً عام 1982.

في الواقع مع أن إدوين هول توصل الى اكتشاف المفعول الذي سُمي باسمه منذ القرن التاسع عشر الا ان القصة لم تنتهي مع هذا الاكتشاف بل تبين الآن أنها كانت مجرد بداية لقصة طويلة حيث بعد ان توصل كليتسنغ في أواخر القرن العشرين لاكتشاف مفعول هول الكمي الصحيح والكسري ظهر بعدها في عام 1988 ما سُمي بمفعول هول الشاذ the quantum anomalous Hall وظهر أيضاً مفعول هول السبيني الكمي the quantum spin hall effect والذي يختلف عن مفعول هول الكمي بانه هنا ندرس التيار السبيني الناجم عن السبين بدلاً من التيار الناجم عن الشحنات وجرى في عام 2014 نشر نتائج بحث بهدف الاستفادة من هذا المفعول في صناعة ترانزستورات من مواد تملك هذه الخاصية بهدف صناعة حواسيب كمومية، وتبين لاحقاً ان مفعول هول السبيني الكمي هو خاصة أساسية للضوء أي ان الضوء يمكن ان يعاني من مفعول هول السبيني الكمي.

ولا تزال الأبحاث والاكتشافات جارية في هذا المفعول الذي وسع فهمنا وأدراكنا للعالم المجهرى وأعطانا صورة دقيقة لهذا العالم الذي لا يزال يحوي الكثير والكثير من الأمور التي نجهلها حتى الآن.

المراجع:

1 - كتاب فيزياء الجسم الصلب - د. فخري كتوت و د. بسام معصراني جامعة دمشق الصفحة 214-211

[للتحميل](#)

2- كتاب الفيزياء العملية 7 (فيزياء الجسم الصلب) لمجموعة من الدكاترة في جامعة دمشق الصفحة 89-96

[للتحميل](#)

3- كتاب التحليل المتجهي للدكتور وسام طلب الصفحة 49

[للتحميل](#)

4- المصطلحات والتعاريف من معجم مصطلحات الفيزياء 2015 مطبوعات مجمع اللغة العربية بدمشق (حرف H)
للتحميل

5-Room-Temperature Quantum Hall Effect in Graphene

K.S. Novoselov¹, Z. Jiang^{2, 3}, Y. Zhang², S.V. Morozov¹, H.L. Stormer², U. Zeitler⁴, J.C. Maan⁴, G.S. Boebinger³, P. Kim^{2*} & A.K. Geim

[للتحميل](#)

6-The Quantum Hall Effect

TIFR Infosys Lectures by David Tong January 2016

[للتحميل](#)

7-THE QUANTIZED HALL EFFECT

Nobel lecture, December 9, 1985

by

KLAUS von KLITZING,

Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, D-7000 Stuttgart 80

[للتحميل](#)

8-ناسا بالعربي مقال بعنوان: تجسيد حالات غريبة في الحواسيب الفائقة

[رابط المقال](#)

9-ناسا بالعربي مقال بعنوان: اكتشاف خاصية كمومية أساسية للضوء

[رابط المقال](#)