

# تأثير هول

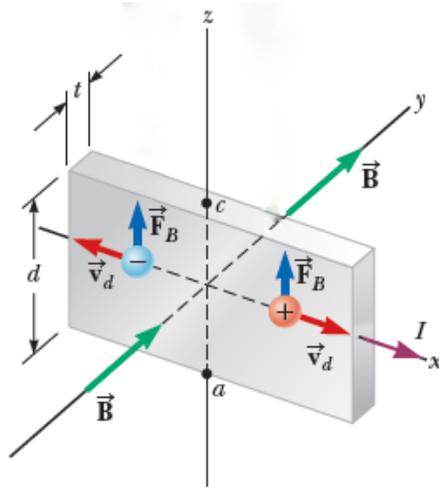
ميرنا إبراهيم يوسف

قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة عين شمس، العباسية، القاهرة، مصر

[merna.ibrahim37@gmail.com](mailto:merna.ibrahim37@gmail.com)

عندما تسمع كلمة "تأثير هول" فعلى الأرجح أن أول ما يخطر بالبال هو وجود موصل يمر به تيار كهربى تحت تأثير مجال مغناطيسى، فبنشأ عن ذلك مجال كهربى عمودى على الاتجاه الرئيسى للتيار الكهربى وأيضاً على اتجاه المجال المغناطيسى ولكن فى الحقيقة، ليس الأمر بهذه البساطة.

تم اكتشاف تأثير هول عام 1879 بواسطة الفيزيائى الأمريكى إدوين هيربرت هول عندما كان يعمل للحصول على درجة الدكتوراة. وجدير بالذكر أن هذا التأثير قد تم اكتشافه قبل اكتشاف الإلكترون بثمانية عشر عاماً وقد تم نشر هذا البحث تحت عنوان "نحو تأثير جديد للمغناطيس على التيارات الكهربائىة" [1].



صورة 1. رسم توضيحي يبين تأثير هول عند تطبيق مجال مغناطيسى على موصل حامل لتيار كهربى. يقاس جهد هول بين النقطتين a و c [2].

لكي نتعرف على تأثير هول، فلنفترض وجود موصل مستو يحمل تيارا كهربيا قيمته  $I$  موضوع في مجال مغناطيسي قيمته  $B$  في الاتجاه الموجب لمحور  $y$  وحاملات الشحنة في هذه الحالة هي إلكترونات تتحرك في الاتجاه السالب لمحور  $x$  بسرعة انجراف مقدارها  $v_d$ . سنجد أنها ستتأثر بقوة مغناطيسية (قوة لورنتس) في الاتجاه الموجب لمحور  $z$  وبالتالي تتحرك الإلكترونات في الاتجاه الموجب لمحور  $z$  وتتراكم على الجزء العلوي للموصل تاركة خلفها فائضا من الشحنات الموجبة في الجزء السفلي. هذا التراكم على طرفي الموصل ينشئ مجالا كهربيا والذي ينمو حتي تتزن القوة الكهربائية مع القوة المغناطيسية. وهنا يمكننا وصف الإلكترونات باستخدام "نموذج الاتزان للجسيمات" وقياس فرق الجهد الناشئ المعروف بجهد هول  $V_H$  بواسطة فولتمتر حساس.

إذا كانت حاملات الشحنة موجبة فإنها ستتحرك في الاتجاه الموجب لمحور  $x$ ، وعليه سنجد أن إشارة جهد هول المقاسة في هذه الحالة عكس إشارة جهد هول التي تم قياسها في حالة الإلكترونات. ومن هنا نجد أنه يمكن تحديد إشارة حاملات الشحنة بواسطة قياس قطبية جهد هول.

إذا أردنا أن نستنتج صيغة رياضية لجهد هول فعلينا أن نساوي القوة الكهربائية بالقوة المغناطيسية، وعليه فإن

$$(1) \quad qv_d B = qE_H ,$$

$$(2) \quad E_H = v_d B ,$$

حيث  $q$  هو مقدار الشحنة و  $v_d$  هو مقدار سرعة انجراف الشحنات الكهربائية (الموجبة أو السالبة) و  $B$  هي شدة المجال المغناطيسي المطبق و  $E_H$  هو مقدار المجال الكهربائي الناشئ (مجال هول).

بفرض أن  $d$  هو عرض الموصل فإن جهد هول هو

$$(3) \quad \Delta V_H = E_H d = v_d B d .$$

ومن هذه العلاقة نجد أن جهد هول يمكننا من معرفة سرعة انجراف الشحنات الكهربائية إذا كنا نعرف قيمة كل من  $d$  و  $B$ . وبمعلومية بعض العلاقات الرياضية البسيطة يمكننا التوصل للعلاقة

$$(4) \quad \Delta V_H = \frac{IB}{nqt} = R_H \frac{IB}{t} ,$$

والتي تستخدم في معرفة قيمة مجال مغناطيسي مجهول حيث  $t$  هي سماكة الموصل و  $n$  هي كثافة الشحنات و  $R_H = \frac{1}{nq}$  هو معامل هول [2].

بعد أن شرحنا آلية إنشاء تأثير هول فإنه يجدر بالذكر أن هذه الظاهرة تحدث في ظروف حالة الاستقرار، بمعنى أننا سنجد فرق جهد حتى وإن كان التيار الكهربائي والمجال المغناطيسي لا يتغيران مع الزمن. وبمزيد من التفصيل فإن فرق جهد ينشأ إذا كان المجال المغناطيسي متغيراً عن طريق تقنية الحث وهي بإيجاز ظهور نبضة جهد تمر عبر لوح إذا قربنا أو أبعدنا عنه المغناطيس. هذه الظاهرة في ذلك العصر لم تدهش العلماء كثيراً على عكس السلوك المتواصل لتأثير هول والذي كان ظاهرة فريدة من نوعها [3].

تحت معظم الظروف يكون تأثير هول صغيراً للغاية وصعب الملاحظة في الموصلات وذلك بسبب الكثافة الكبيرة للشحنات الكهربائية وعليه فإن تأثير هول يظهر بوضوح أكبر مع المادة التي تحتوي على عدد ناقلات أقل، ومن حسن الحظ فإن هذه المادة موجودة في الطبيعة بالفعل وتسمى مادة شبه موصلة.

إن كل ما سبق يندرج تحت مسمى تأثير هول "الكلاسيكي"، ولقد استخدمنا هنا كلمة كلاسيكي للتعبير على وجود ما يسمى بتأثير هول "الكمومي".

تأثير هول الكمومي هو النسخة الكمومية من تأثير هول، ويمكن ملاحظته في نظام إلكترونات ثنائي الأبعاد معرض لدرجة حرارة منخفضة جداً -تقترب من الصفر المطلق- ومجال مغناطيسي قوي جداً، حيث تخضع توصيلية هول الكهربائية  $\sigma$  لانتقالات كمومية محددة متخذة قيماً كمومية ويمكن تعريفها من العلاقة

$$(5) \quad \sigma = \frac{I}{V_H} = v \frac{e^2}{h},$$

حيث  $I$  هو مقدار التيار الكهربائي و  $V_H$  هو مقدار جهد هول و  $e$  هو مقدار شحنة الإلكترون و  $h$  هو ثابت بلانك و  $v$  يسمى عامل التعبئة و الذي يمكن أن يكون رقما صحيحا أو كسرا وعلى أساس قيمته يتم تحديد نوع تأثير هول، إما أن يكون تأثير هول للأعداد الصحيحة أو للأعداد الكسرية.

في عام 1980 قام العالم الألماني فون كليتسينج [4] بتجربته التي اكتشف بها النسخة الكمومية لتأثير هول للأعداد الصحيحة، ولاحظ فيها أن المقاومة النوعية (مقلوب التوصيلية الكهربائية) تتبع سلوكا مثيرا للدهشة باتخاذها شكل هضبة صغيرة لنطاق معين يعتمد على قيمة المجال المغناطيسي ثم تقفز فجأة لهضبة أخرى مع تغير قيمة المجال، والذي يفصل بين هضبة وأخرى هو قيمة عامل التعبئة الذي تم ذكره سابقا. علاوة على ذلك، فإن هذا التأثير يعتبر أساس قياس النسبة بين الثابتين الأساسيين  $h$  و  $e^2$  التي يطلق عليها في بعض الأحيان ثابت كليتسينج، وهذه النسبة لا تعتمد على المادة أو شكلها الهندسي مؤكدة بذلك مدى استقرار هذا التأثير [5].

بعد عامين من اكتشاف كليتسينج، جاء العالمان تسو وستورمر [6] ليثبتان بتجربة أخرى وجود تأثير هول الكسري، حيث تتخذ  $v$  قيمة كسرية مؤثرة على شكل الهضاب. ولتحليل وفهم الحالة الكسرية، فإن التفاعلات بين الإلكترونات الداخلية يجب أخذها بعين الاعتبار وليس فقط التفاعلات بين الإلكترونات الحرة كما في حالة الأعداد الصحيحة.

مما سبق ذكره يمكن القول بأن تأثير هول الكومومي يتميز عن الكلاسيكي بالسلوك المتقطع الذي تتبعه التوصيلية الكهربائية الكومومية ومقدار درجة الحرارة وشدة المجال المغناطيسي المطلوبين لتوليده.

وكما هو حال العلم، يعتبر تأثير هول في تطور دائم وليس ظاهرة عجيبة اكتشفت من قبل الفيزيائيين وتم تدوينها في الكتب فحسب، ولكن لها تطبيقات عديدة مثل مجسات هول التي تستخدم كمجسات للتيار الكهربائي والسرعة وغيرها. أيضاً لم

تقتصر ملاحظة هذا التأثير في أشباه الموصلات، فقد تم ملاحظة سلوك غريب لتأثير هول في مادة الجرافين أثناء اختبار خواصها المغناطيسية [7]، ومن يدري فربما نجد تطورات لهذا التأثير لم ترد يوماً في خيالنا [8].

- 
- [1]Edwin Hall, "On a New Action of the Magnet on Electric Currents", American Journal of Mathematics, 2(3), 287-92 (1879).
- [2]R. A. Serway and J. W. Jewett, "Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics", 9th ed., 890 (2012).
- [3]E. Ramsden, Hall Effect Sensors, 2nd ed., (2006).  
[http://booksite.elsevier.com/9781856175302/errata/002~Hall-Effect\\_Sensors.pdf](http://booksite.elsevier.com/9781856175302/errata/002~Hall-Effect_Sensors.pdf)
- [4]K. Klitzing, "The Quantized Hall Effect, Nobel lecture", (1985).  
[http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1985/klitzing.pdf](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1985/klitzing.pdf)
- [5]D. Tong, "Lectures on the Quantum Hall Effect", TIFR (2016).  
<http://www.damtp.cam.ac.uk/user/tong/qhe/one.pdf>
- [6]H. L. Stormer, "The Fractional Quantum Hall Effect", Nobel lecture, (1988).  
[http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1998/stormer-lecture.pdf](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1998/stormer-lecture.pdf)
- [7]<https://nasainarabic.net/main/articles/view/synopsis-magnetic-graphene>
- [8]"Overview of the Quantum Hall Effects", Harvard University, Fall 2013.  
<http://isites.harvard.edu/fs/docs/icb.topic1333080.files/IQHE-268.pdf>