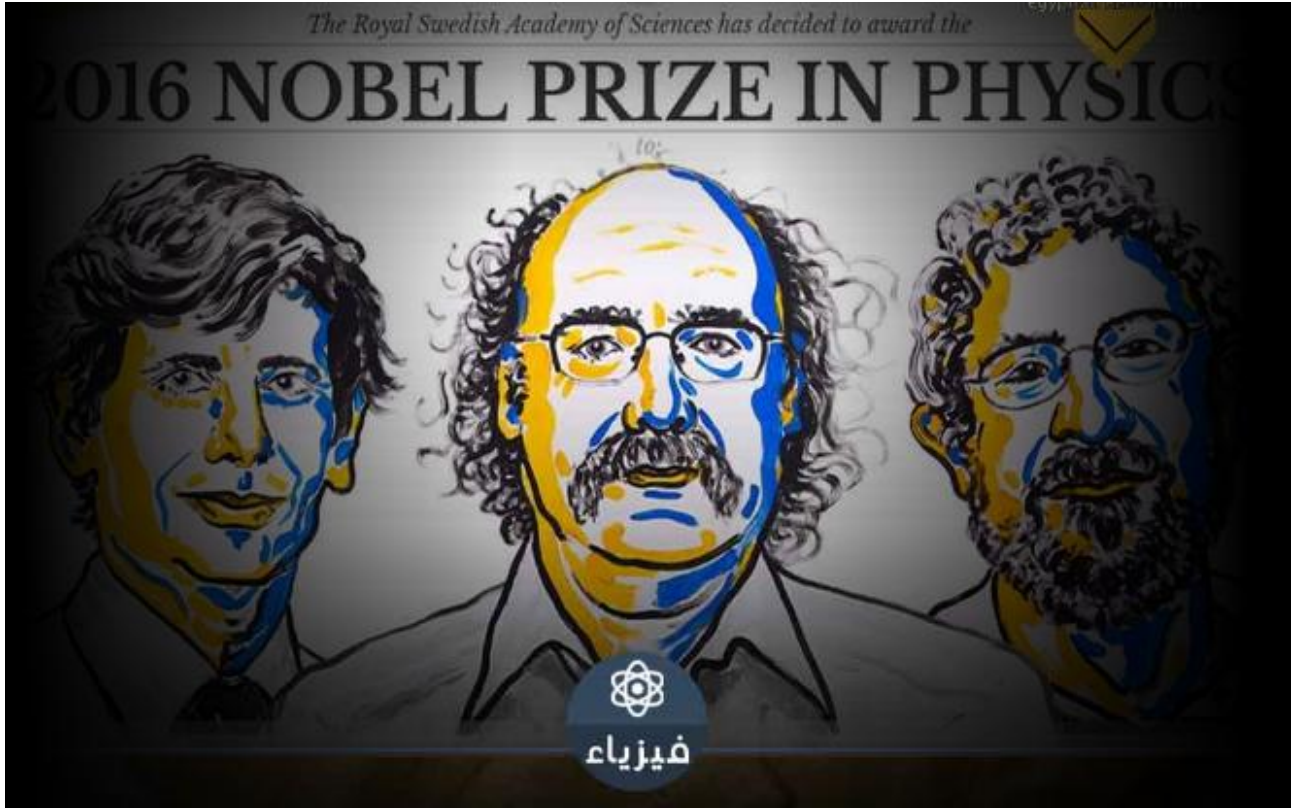


التبولوجيا وحالات المادة
الحصول على جائزة نوبل في الفيزياء عن طريق التبولوجيا (2016)
(أ. م. د. يوسف يعكوب يوسف)
قسم علوم الرياضيات / كلية التربية للعلوم الصرفة (ابن الهيثم) / جامعة بغداد 2019



كانت التوقعات تصب في صالح تجربة LIGO التي اكتشفت موجات الجاذبية قبل عام (فبراير 2016) إلا أن لجنة جائزة نوبل أعلنت أن الجائزة للعام 2016 ستذهب إلى فيزياء المادة المكثفة (Condensed Matter Physics) وبالتحديد إلى ثلاثة علماء قاموا بالدراسة النظرية لحالات المادة التبولوجية، هذا الموضوع غريب وربما لم نسمع به من قبل . لذلك سنحاول تبسيطه وبيان أهميته التي جعلته يستحق الجائزة الأشهر عالمياً.

البداية ستكون بترجمة البيان الصحفي الذي أصدرته لجنة جائزة نوبل:

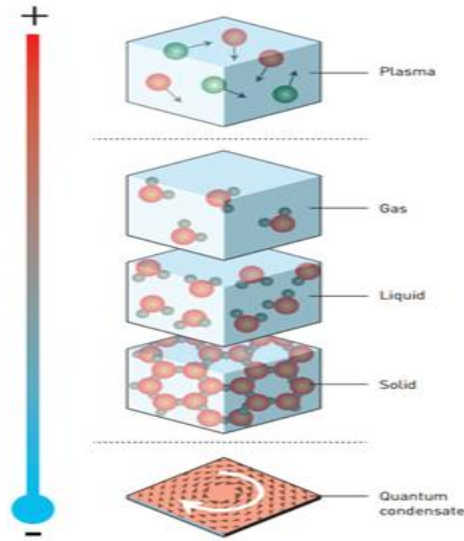
تُمنح نصف جائزة نوبل في الفيزياء 2016 إلى ديفيد ثاولز (David Thouless) من جامعة واشنطن، والنصف الثاني إلى فريدريك دانكن هالدين (Frederick Duncan Haldane) من جامعة برينستون وجون مايكل كوسترليتز (John M. Kosterlitz) من جامعة براون.

الفائزون هذه المرة فتحوا الباب لعالم مجهول تكون فيه المادة في حالات غريبة، فقد استخدموا أدوات رياضية متقدمة لدراسة حالات غير عادية للمادة كالموصلات الفائقة والموائع الفائقة والأغشية المغناطيسية . وبفضلهم يسعى العلماء في يومنا هذا إلى اكتشاف حالات أغرب من المادة، يأمل الكثير من الناس أن تكون لها تطبيقات مستقبلية في علوم المواد والإلكترونيات. استخدام الفائزون لمبادئ التبولوجيا في اكتشافاتهم كان حاسماً . فالنولوجي (Topology) هو فرع الرياضيات الذي يصف الخواص التي تتغير فقط بخطوات محددة، وباستخدامهم الت بولوجي قاموا بإبهار الخبراء؛ ففي أوائل السبعينات أثبت مايكل كوسترليتز وديفيد ثاولز أن التوصيلية الفائقة والميوعة الفائقة يُمكن أن تحدث في الطبقات الرقيقة، على عكس ما كان سائداً في ذلك الوقت. فقد بينوا أنها يُمكن أن تصبح موصلًا فائقًا، وأيضًا وضخوا الآلية التي تخفي بها خاصية التوصيل الفائق عند رفع درجة الحرارة.

وفي الثمانينات قام ثاولز بتفسير تجربة سابقة تمت على طبقات رقيقة من مادة موصلية عُيّن فيها التغير في التوصيلية الكهربائية بخطوات من أعداد صحيحة، وبين ثاولز أن هذه الخطوات هي خطوات تبولوجية. وفي الفترة نفسها كان دانكن هالدين قد اكتشف كيفية استخدام الطوبولوجي في دراسة خواص السلاسل المغناطيسية التي توجد في بعض المواد. نحن الآن نعرف العديد من الحالات التبولوجية للمادة؛ بل أيضاً في المواد العادية ثلاثية الأبعاد . وفي العقد السابق دفعت المواد التبولوجية البحث في فيزياء المادة المكثفة . وليس السبب أنها قد تُستخدم فقط في صنع جيل جديد من

الإلكترونيات أو الموصلات الفائقة أو حتى في صنع الحاسوب الكمي، ولكن البحث الحالي الذي يكشف أسرار حالات المادة الغريبة هو بفضل جهود هؤلاء العلماء.

بعد قراءة البيان الصحفي لنوضح بعض المفاهيم:

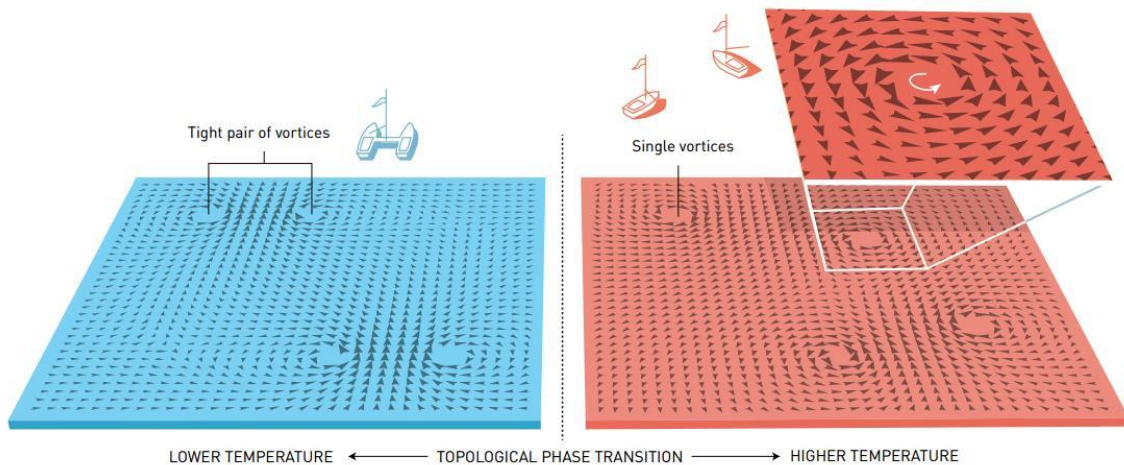


نحن نعرف ان حالات المادة العادية هي: صلبة، سائلة، غازية. والمادة يُمكن أن تكون في أكثر من حالة؛ فمثلاً الماء يكون سائلاً أو غازاً أو صلباً، والتغير في حالات المادة أو الـ **Phase Transition** شغل بال علماء الفيزياء لسنوات طويلة، فِيمَكُنْكَ تحويل حالة المادة بتغيير درجة الحرارة. فعلى سبيل المثال؛ لتحويل الماء السائل إلى غاز عليك تسخين السائل لدرجة حرارة معينة، بعدها يتحول إلى بخار. ولتُعِيدَ البخار إلى الحالة السائلة يجب تكثيفه بتقليل درجة الحرارة.

حسناً، هذا ربما نكون قد درسناه في المدرسة أو الجامعة. ولكن ما لم ندرسه هو أنه إذا قُمْنَا بتبريد المواد إلى درجات حرارة منخفضة للغاية سنحصل على حالة غريبة من المادة. فعلى سبيل المثال؛ بعض المواد عند تبريدها لدرجات منخفضة تقترب من - 273 سيلزيوس تختفي منها المقاومة الكهربائية وتصبح موصلات فائقة. وأيضاً عند تبريد الهيليوم إلى - 271 سيلزيوس يُصبح مائعاً فائقاً تختفي منه اللزوجة.

نعود الان لموضوع جائزة نوبل:

أحد أسباب منح جائزة نوبل لليوم لثاولز وكوسترليتز هو دراستهم لعملية تحوُّل المادة أو تحول الطور (Phase Transition) في الطبقات الرقيقة. ففي السابق كان العلماء يعتقدون أن نتيجة الاضطرابات الحرارية ستدمر النظام المتراسف في الطبقات الرقيقة، حتى عند الصفر المطلق، وإذا غاب النظام فلا يوجد تحول في الطور. ولكن ثاولز وكوسترليتز قاما بدراسة هذا الموضوع ووجدوا باستخدام التبولوجي أنه يوجد تحول في الطور، ولكنه ليس تحولاً عادياً كالذي يحدث في المواد العادية، ولكن شكل مختلف من أشكال التحول.



إنتقال الطور التوبولوجي عند زيادة درجة الحرارة

في المواد المسطحة (ثنائية الأبعاد) توجد دوامات صغيرة. عند الدرجات المنخفضة تكون هذه الدوامات أزواجاً مترابطة، وإذا

رُفعت درجة الحرارة لتفصل هذه الأزواج بعضها عن بعض، وهذا هو التحول في الطور. ولنعود ونتذكر البيان الصحفي «فالتبولوجي (Topology) هو فرع الرياضيات الذي يصف الخواص التي تتغير فقط بخطوات محددة»، هذا هو التحول الطوبولوجي في الطور.

فالتبولوجي هو العلم الذي يدرس الخواص التي تظل ثابتة حتى ولو مُطَّ الجسم أو شَوَّه، ولكن تت غير إذا قُسم. فمثلا الكرة والمكعب متكافئان طوبولوجيًا، والطوق وكوب القهوة متكافئان طوبولوجيًا أيضًا، فيمكن تحويل الطوق إلى كوب قهوة والحفاظ على عدد الثقوب ثابتًا.



تكافئ الطوق وكوب القهوة طوبولوجيًا

هذا ليس كل ما في الموضوع، ففي الثمانينيات قام ثاولز أيضًا بتفسير تجربة أجراها العالم الألماني كلاوس فون كليتزنج (Klaus von Klitzing) - الحائز أيضًا على جائزة نوبل. هذه التجربة أدت لظهور ما يعرف بتأثير هول الكمي (Quantum Hall Effect).

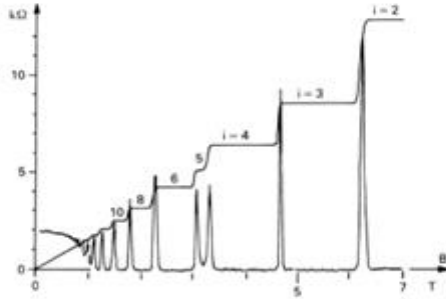
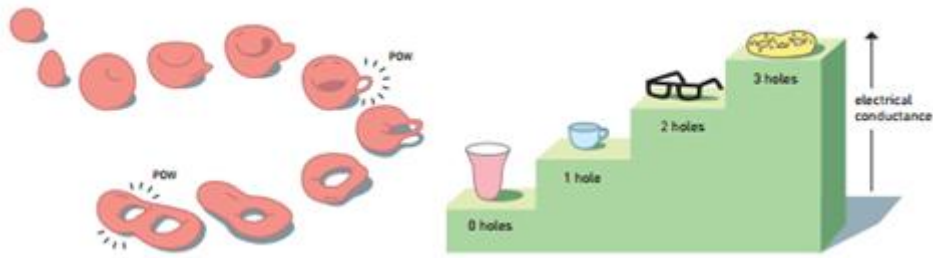


Figure 12: Integer quantum Hall effect

التغير في التوصيلية على هيئة درجات

حين وضع كليتزنج طبقة رقيقة من مادة موصلة بين شريحتين من مادة شبه موصلة وتم تبريدها لدرجات حرارة منخفضة جدًا وتعرضها أيضًا لمجال مغناطيسي قوي، وجد كليتزنج أن توصيلية المادة الرقيقة تتغير بقيم محددة، وهذا غير عادي في الفيزياء. ولوحظت النتيجة نفسها أيضًا حتى مع تغير شدة المجال المغناطيسي ودرجة الحرارة وكمية الشوائب في المادة شبه الموصلة، فعند تغيير المجال المغناطيسي بقدر معين تتغير التوصيلية، ولكن بخطوات ثابتة.



التوصيلية كحالة طوبولوجية

هذه الظاهرة كانت غريبة ولا يمكن تفسيرها بالفيزياء المعروفة في ذلك الوقت، لذا جاء ثالوز بعصاه السحرية المسماة بالتبولوجي وقدم الحل.

الإلكترونات تتحرك بحرية في الطبقة الموصلة الموجودة بين المادة شبه الموصلة، وهي تكون ما يُطلق عليه المائع التبولوجي الكمي (Topological Quantum Fluid). هذا المائع أو الغاز يمتلك خواصًا غريبة على المستوى الكمي. هذه الخواص لا يمكن التأكد من أنها تبولوجية إلا إذا نظرنا إلى المائع ككل، والطريقة الوحيدة للتأكد من ذلك هو قياس التوصيلية. وإنجاز آخر قام به دانكن هالدين؛ أنه بيّن أن الموائع التبولوجية تتواجد أيضًا في الطبقات الرقيقة من المواد شبه الموصلة، حتى في غياب المجال المغناطيسي.

أدت هذه الأبحاث ودمج التبولوجي بفيزياء المادة المكثفة إلى ظهور أبحاث أخ رى عن أنواع جديدة من المواد التبولوجية؛ منها :
العوازل التبولوجية والموصلات الفائقة التبولوجية والعديد من المواد الغريبة التي ستساهم بالتأكيد في تقدم البشرية.

مصادر:

- [1] موقع الباحثون المصريون (\https://www.egyres.com/articles\) إعداد: Ahmed Mohamed مراجعة: علي أدهم
- [2] Nobelprize.org. Retrieved 4 October 2016, from https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2016/popular-physicsprize2016.pdf
- [3] Thouless, D., Kohmoto, M., Nightingale, M & ،den Nijs, M. (1982). Quantized Hall Conductance in a Two-Dimensional Periodic Potential. Physical Review Letters, 49(6), 405-408. doi:10.1103/physrevlett.49.405
- [4] Avron, J., Osadchy, D & ،Seiler, R. (2003). A topological look at the Quantum Hall effect. Phys. Today, 56(8), 38-42. doi:10.1063/1.1611351