ظواهر غريبة في مادة ثنائية البعد*

ترجمة: د/عبدالفتاح الغرباني و م/عبدالحفيظ العمري

فتح الفائزون بجائزة نوبل هذا العام (٢٠١٦م) الباب على المجهول حيث أمكانية تواجد المادة في أطوار غريبة.

وتمنح نصف جائزة نوبل في الفيزياء ٢٠١٦م لديفيد ثوليس، جامعة واشنطن، سياتل، والنصف الآخر لكل من فريدرك دنكان هالدين، جامعة برينستون، ومايكل كوستيرليتز جامعة براون، بروفيدانس.

أظهرت اكتشافاتهم انجازات في الفهم النظري لغموض المادة وأنشأت آفاق جديدة في تطوير مواد مبتكرة.

استخدموا ديفيد ثوليس، ودنكان هالدين، ومايكل كوستيرليتز أساليب متقدمة في الرياضيات لتفسير الظواهر الغريبة في الأطوار غير العادية (أو حالات) للمادة، مثل

* نشر المقال في موقع منظمة المجتمع العلمي العربي بتاريخ ٢٠ أكتوبر ٢٠١٦م.

obeikandl.com

الموصلات الفائقة، والموائع الفائقة والأغشية المغناطيسية الرقيقة.

درس كل من ثوليس وكوستيرليتز الظواهر التي تنشأ في العالم المسطح - على الأسطح أو داخل الطبقات الرقيقة للغاية التي يمكن أن تعتبر ثنائية الأبعاد، بالمقارنة مع الأبعاد الثلاثية (الطول والعرض والارتفاع) التي عادة ما يوصف بها الواقع.

وقد درس هالدين أيضا المادة التي تشكل خيوط رقيقة بحيث يمكن اعتبارها ذات بعد واحد.

الفيزياء الموجودة في هذا العالم المسطح تختلف كثيرا عن ما ندركه في العالم من حولنا. حتى ولو كانت المادة الرقيقة جدا موزعة تتكون من ملايين من الذرات، وحتى لو يمكن تفسير سلوك كل ذرة باستخدام فيزياء الكم، فالذرات تبدي خصائص مختلفة تماما عندما تتجمع الكثير منها معا. يتم اكتشاف الظواهر جماعية جديدة باستمرار في هذا العالم المسطح، وفيزياء المادة المكثفة هي الآن واحدة من أكثر المجالات حيوية في الفيزياء.

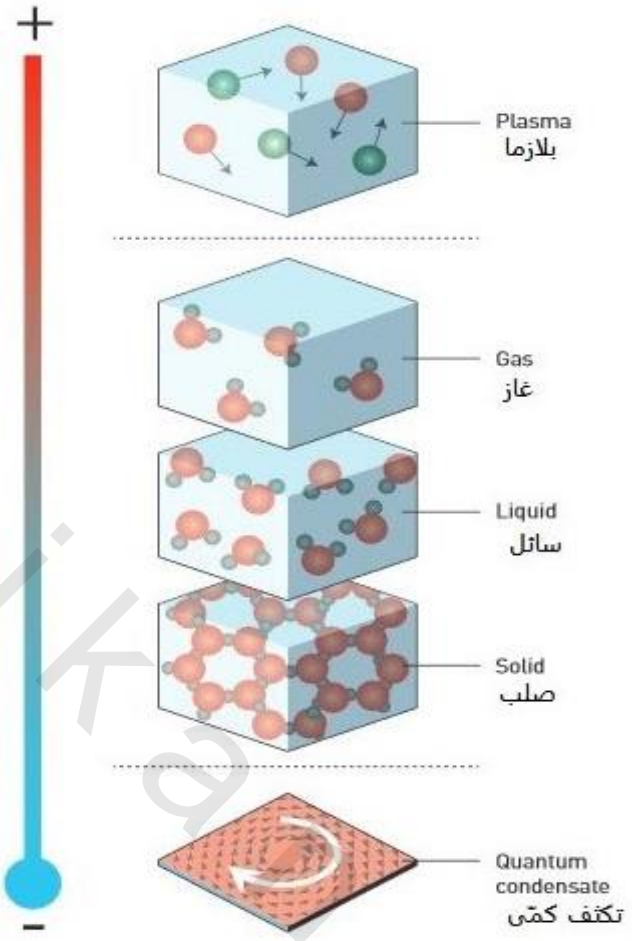
كان استخدام الفائزين بجائزة نوبل المفاهيم الطوبولوجية في الفيزياء حاسما لاكتشافاتهم.

الطوبولوجيا هو فرع من فروع الرياضيات التي تصف الخصائص التي تتغير تدريجيا.

وباستخدام الطوبولوجيا الحديثة، قدم الفائزون بجائزة هذا العام نتائج مفاجئة، والتي فتحت مجالات جديدة للبحث وأدت إلى خلق مفاهيم جديدة ومهمة في عدد من مجالات الفيزياء.

تصبح فيزياء الكم مرئية أثناء برودتها

في العمق تخضع كل المادة لقوانين فيزياء الكم. الغازات والسوائل والمواد الصلبة هي الأطوار المعتادة للمادة، والتي فيها غالبا ما تُخفي الحركات الذرية العشوائية الآثار الكمية. ولكن في البرودة الشديدة، قريبة من الصفر المطلق (-٢٧٣ درجة مئوية) تلعب المادة مراحل جديدة وغريبة وتتصرف بطرق غير متوقعة. فيزياء الكم، التي على خلاف ذلك تعمل فقط في عالم ذي مقاييس ذرية، أصبحت فجأة مرئية (الشكل١).



أطوار المادة. الأطوار الأكثر شيوعا هي الغاز، والسائلة والصلبة. ومع ذلك، في درجات حرارة عالية جدا أو منخفضة، فالمادة تفترض حالات أخرى، أكثر غرابة.

تتغير الأطوار العادية للمادة من طور لآخر عندما تتغير درجات الحرارة. على سبيل المثال، يحدث هذا التحول عندما الثلج- الذي يتكون من بلورات منظمة بشكل جيد، يُسخن

ويتحول إلى ماء، وهي مرحلة أكثر فوضوية للمادة. عندما ننظر إلى العالم المسطح المعروف قليلا في المادة، نجد الأطوار المادية التي لم يتم استكشافها بالكامل.

أشياء غريبة يمكن أن تحدث في البرودة. على سبيل المثال، المقاومة بكل الجسيمات المتحركة على خلاف ذلك تتوقف فجأة. هذا هو الحال عندما يمر التيار الكهربائي دون أي مقاومة في موصل فائق للكهرباء، أو عندما يستمر دوران دوامة في الموائع الفائقة إلى الأبد دون إبطاء.

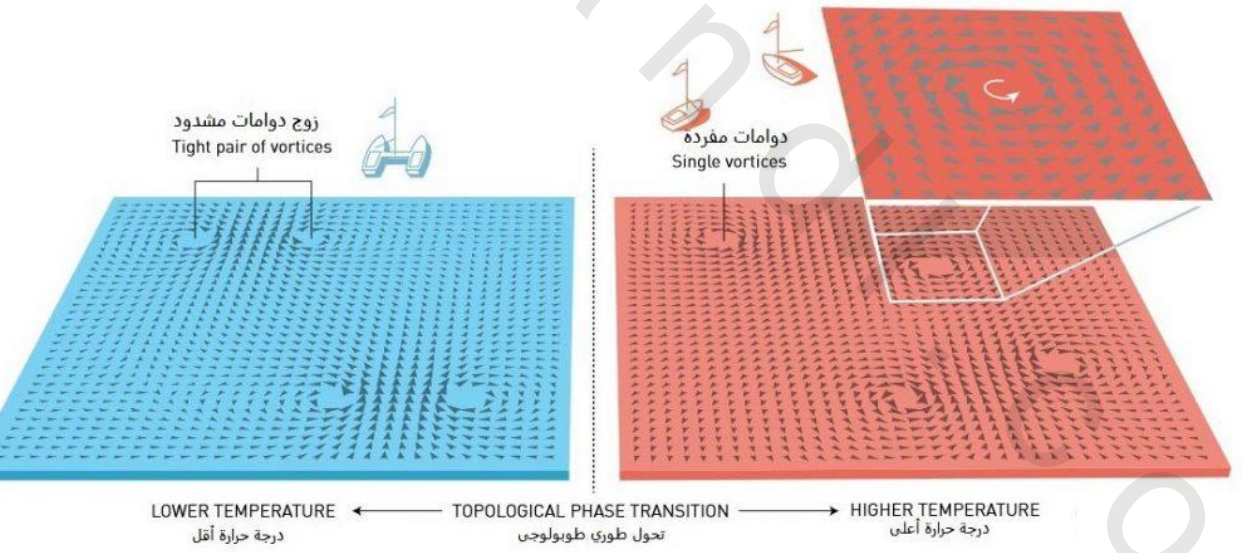
وكان أول شخص قام بدراسة منهجية للموائع الفائقة هو الروسي بيوتر كابيتسا، في ثلاثينات القرن الماضي. حيث قام بتبريد الهليوم ٤، الموجود في الهواء، إلى درجة - ٢٧١ درجة مئوية، وجعلته ينساب حتى الجانبين في الوعاء الحامل له. بعبارة أخرى، فإنه تصرف بغرابة كما الموائع الفائقة تتصرف عندما تختفي اللزوجة تماما. كوفئ كابيتسا بجائزة نوبل في الفيزياء عام ١٩٧٨م، ومنذ ذلك الحين عدة أنواع من الموائع الفائقة تم إنشاؤها في المختبر. الهليوم الفائق الميوعة، والأغشية رقيقة من الموصلات الفائقة، والطبقات الرقيقة من المواد المغناطيسية والخيوط النانوية

الموصلة كهربائيا تمثل عدد قليل من العديد من الأطوار المادية الجديدة التي تُدرس الآن بشكل مكثف.

أزواج الدوامة قدمت الحل

أعتقد الباحثون لأمد طويل أن التقلبات الحرارية تدمر كل النظام في المادة في العالم المسطح، ثنائي الأبعاد، حتى عند الصفر المطلق. إذا لم تكن هناك أطوار منظمة، فلا يمكن أن تكون هناك تحولات في الطور. ولكن في أوائل السبعينات، التقى ديفيد ثوليس ومايكل كوستيرليتز في برمنجهام، بريطانيا العظمى، وتحدا تلك لنظرية. معا، بدأ العمل على مشكلة تحولات الطور في العالم المسطح (من باب الفضول، من باب العلم بالشيء، كما يدعيان). أدى هذا التعاون لإنتاج فهم جديد كليا في تحولات الطور، والذي أعتبر واحد من أهم الاكتشافات في القرن العشرين في فيزياء المادة المكثفة. والتي أصبحت تسمى انتقال كي تيKT (Kosterlitz-Thouless) أوانتقال BKT، حيث B هو فاديم بريجينسكي، عالم الفيزياء النظرية – المتوفي حاليا - من موسكو الذي قدم أفكار مماثلة.

المرحلة الانتقالية الطوبولوجية ليست مرحلة انتقالية عادية، مثل الذي بين الثلج والماء. الدور الرئيسي في انتقال الطوبولوجية يُلعب بواسطة الدوامات الصغيرة في المادة المسطحة. في درجات حرارة منخفضة تشكل أزواج مترابطة. عندما ترتفع درجة الحرارة، وهي مرحلة انتقالية يحدث: تتباعد الدوامات فجأة عن بعضها البعض، وتسبح في المادة لوحدها (الشكل٢).



مرحلة انتقالية. يحدث هذا عندما أطوار المادة تنتقل بين بعضها البعض، كما هو الحال عندما يذوب الجليد ويصبح ماء. باستخدام الطوبولوجيا، وصفت نظرية KT انتقال

الطور الطوبولوجية في طبقة رقيقة من مادة شديدة البرودة. في البرودة، تتشكل دوامة أزواج ثم تنفصل فجأة في درجة حرارة مرحلة انتقالية. وكان هذا واحدا من أعظم الاكتشافات الهامة في القرن العشرين في فيزياء المادة المكثفة.

الشيء الرائع في هذه النظرية هو أنها يمكن أن تستخدم لأنواع مختلفة من المواد في أبعاد منخفضة - الانتقال KT هو عام. فقد أصبح أداة مفيدة، ولا يتم تطبيقها في مجال المادة المكثفة وحسب، ولكن أيضا في مجالات أخرى من الفيزياء، مثل الفيزياء الذرية أو الميكانيكا الإحصائية. كما تم تطوير نظرية انتقالKT من قبل كل من منشئيها وغيرهم، وكذلك تم تأكيدها تجريبيا.

قفزات الكم الغامضة

قدمت التطورات التجريبية في نهاية المطاف عددا من حالات جديدة للمادة التي تتطلب تفسيرا. في الثمانينات، قدم كل من ديفيد ثوليس ودانكان هالدين أطار عمل نظري جديد الذي

تحدى النظريات السابقة، والتي كان إحداها نظرية ميكانيكا الكم لتحديد المواد التي توصل الكهرباء. وطورت للمرة الأولى في الثلاثينات، وبعد بضعة عقود، اعتبر مجال الفيزياء هذا قد تم فهمه جيدا.

لذا كانت مفاجأة كبيرة عندما أثبت ديفيد ثوليس في عام ١٩٨٣م أن الصورة السابقة كانت غير مكتملة، عند درجات حرارة منخفضة وفي مجالات مغناطيسية قوية، أصبح من الضرورة ظهور نوع جديد من النظرية، عندها أصبحت مفاهيم الطوبولوجيا هامة. في نفس الوقت تقريبا، توصل دانكان هالدين إلى استنتاج مماثل، وغير متوقع، أثناء تحليل السلاسل الذرية المغناطيسية. وكان عملهم فعال في التطورات الدراماتيكية اللاحقة لنظرية الأطوار جديدة للمادة.

هذه الظاهرة الغامضة التي وصفها ديفيد ثوليس نظريا، باستخدام الطوبولوجيا، هي تأثير هول الكمي. تم اكتشاف هذا في عام ١٩٨٠م من قبل الفيزيائي الألماني كلاوس فون كليتزينج، الذي كوفئ بجائزة نوبل في عام ١٩٨٥م، درس طبقة موصلة رقيقة بين اثنين من أشباه الموصلات، حيث تم

تبريد الإلكترونات إلى بضع درجات فوق الصفر المطلق وعرضت لحقل مغناطيسي قوي.

في الفيزياء، فإنه ليس من الشائع أن تحدث أشياء متطرفة عندما يتم خفض درجة الحرارة؛ على سبيل المثال، العديد من المواد تصبح ممغنطة. يحدث هذا لأن كل مغناطيس ذرية صغيرة في المادة تشير فجأة إلى نفس الاتجاه، مما أدى إلى حقل مغناطيسي قوي، والتي يمكن أيضا أن يقاس.

ومع ذلك، فإن تأثير هول الكمي هو أكثر صعوبة للفهم؛ تظهر الناقلية الكهربائية (هي معكوس المقاومة الكهربائية والمواصلة هي قدرة المادة الكهربية على تمرير الشحنات) في طبقة أنها لا تحمل إلا قيم معينة فقط، والتي هي أيضا غاية في الدقة، وهو أمر غير معتاد في الفيزياء. توفر القياسات بالضبط نفس النتائج حتى لو تفاوتت درجة الحرارة، أو المجال المغناطيسي أو كمية الشوائب في أشباه الموصلات.

عندما يتغير المجال المغناطيسي بشكل كافي، تتغير ناقلية الطبقة أيضا، ولكن فقط في خطوات؛ التقليل من قوة المجال المغناطيسي تجعل الناقلية الكهربائية أولا أكبر مرتين

بالضبط، ومن ثم يتضاعف إلى ثلاث مرات، وأربع مرات، وهلم جرا. لا يمكن تفسير هذه الخطوات الصحيحة من قبل الفيزياء المعروفة في ذلك الوقت، ولكن ديفيد ثوليس وجد الحل لهذا اللغز باستخدام الطوبولوجيا.

أجابت الطوبولوجيا

تصف الطوبولوجيا الخصائص التي تبقى على حالها عندما يستطيل الشيء، أو يلتف أو يتشوه، ولكن ليس إذا تمزق إربا.

طوبولوجيا، الشكل الكروي والوعاء ينتمي إلى نفس الفئة، لأن كومة كروية من الطين يمكن أن تتحول إلى وعاء. ومع ذلك، الكعكة مع وجود ثقب في الوسط، وفنجان القهوة مع وجود ثقب في حامل اليد ينتمون إلى فئة أخرى. كما يمكن لكل واحد منهما أن يأخذ شكل الآخر. وبالتالي يمكن أن الأجسام الطوبولوجية تحتوي على فتحة واحدة، أو اثنين، أو ثلاثة، أو أربع ... ولكن هذا الرقم يجب أن يكون عدد صحيح.

هذا يبدو أنه يكون مفيد في وصف الناقلية الكهربائية التي عثر عليها في تأثير هول الكمي، والذي تتغير في خطوات التي هي بالضبط مضاعفات عدد صحيح (الشكل٣).

الطوبولوجيا. هذا الفرع من الرياضيات يهتم بالخصائص التي تغيير تدريجيا، مثل عدد من الثقوب في الكائنات المذكورة أعلاه. كانت الطوبولوجيا مفتاح اكتشافات الفائزين بجائزة نوبل، وهذا ما يفسر لماذا الكهربائية التوصيل داخل طبقات رقيقة تتغير في خطوات صحيحة.

في تأثير هول الكمي، تتحرك الإلكترونات بحرية نسبيا في طبقة ما بين أشباه الموصلات وتشكل ما يسمى مائع الكم

obeikandl.com

الطوبولوجي. وبنفس الطريقة غالبا ما تظهر خصائص جديدة عندما تأتي العديد من الجزيئات معا، والإلكترونات في مائع الكم الطوبولوجي أيضا تبدي خصائص مثيرة للدهشة.

كما أنه لا يمكن التأكد مما إذا كان هناك ثقب في فنجان القهوة من خلال النظر فقط في جزء صغير منه، فإنه من المستحيل تحديد ما إذا كانت الالكترونات قد شكلت مائع الكم الطوبولوجي إذا لاحظت فقط ما يحدث للبعض منها. ومع ذلك، تصف الناقلية الحركة الجماعية للإلكترونات، وبسبب الطوبولوجيا، فإنها تتفاوت في الخطوات، إنها محددة القيمة. وهناك سمة أخرى في مائع الكم الطوبولوجي هي أن حدوده له خصائص غير عادية.

وهذا ما تنبأت به النظرية وتم أثباته بعد ذلك تجريبيا.

حصل حدث آخر في عام ١٩٨٨م، عندما اكتشف دنكان هالدين أن موائع الكم الطوبولوجية، تشبه تأثير هول الكمي، ويمكن أن تتشكل في طبقات رقيقة من أشباه الموصلات حتى في غياب المجال المغناطيسي. وقال انه لم يحلم أن يتم التحقق من نموذجه النظري تجريبيا، ولكن في الآونة الأخيرة عام ٢٠١٤م تم التحقق من صحة هذا النموذج في

تجربة باستخدام ذرات التي تم تبريدها إلى الصفر المطلق تقريبا.

المواد الطوبولوجية الجديدة القادمة

في بداية العمل ، من عام ١٩٨٢م، قدم دنكان هالدين التنبؤ التي أذهل حتى الخبراء في هذا المجال. في الدراسات النظرية لسلاسل الذرات المغناطيسية التي تحدث في بعض المواد، اكتشف أن هذه السلاسل لها خواص مختلفة جذريا اعتمادا على خاصية المغناطيس الذرية. في فيزياء الكم هناك نوعان من المغناطيس الذرية، الفردية والزوجية.

أظهر هالدين أن السلسلة المكونة من المغناطيس الزوجية هي طوبولوجية، في حين أن السلسلة المكونة من المغناطيس الفردية ليست كذلك.

مثل مائع الكم الطوبولوجي، فإنه ليس من الممكن تحديد ما إذا كان سلسلة الذرية هي طوبولوجية أم لا بمجرد اختبار جزء صغير منه. وتماما كما هو الحال بالنسبة للمائع الكمي، فالخصائص الطوبولوجية تظهر نفسها في الحواف.

هنا، في نهايات السلسلة، لأن الخاصية الكمومية تعرف كأنصاف مغزلية (ففي ميكانيكا الكم فإن اللف هو من الخصائص الجوهرية لجميع الجسيمات الأولية.) في نهايات السلسلة الطوبولوجية.

في البداية، لم يصدق أحد الأسباب التي قدمها هالدين حول السلاسل الذرية؛ لأن الباحثين كانوا مقتنعين بأنهم فهموها تماما.

ولكن اتضح أن هالدين اكتشف أول مثال على نوع جديد من المواد الطوبولوجية، والتي هي الآن مجال حيوي للبحث في فيزياء المادة المكثفة.

كلا من موائع هول الكمية والسلاسل الذرية المغناطيسية الزوجية متضمنة في هذه المجموعة الجديدة من الحالات الطوبولوجية.

وفي وقت لاحق، اكتشف الباحثون العديد من حالات المادة الطوبولوجية الأخرى غير المتوقعة، ليس فقط السلاسل ولا الطبقات رقيقة الحدود، ولكن أيضا في المواد العادية ثلاثية الأبعاد.

ويجري الحديث عن العوازل الطوبولوجية، والموصلات الفائقة الطوبولوجية والمعادن الطوبولوجية.

هذه أمثلة من المجالات التي، على مدى العقد الماضي، حددت من البحوث الهامة في فيزياء المادة المكثفة، لأسباب ليس أقلها الأمل أن المواد الطوبولوجية ستكون مفيدة للأجيال الجديدة من الأجهزة الإلكترونية والموصلات الفائقة، أو في أجهزة الكمبيوتر الكمية مستقبلا.

الأبحاث الحالية تكشف أسرار المادة في العالم المسطح الغريب التي اكتشفها الفائزون بجائزة نوبل لهذا العام.

***

مصدر المقال:

https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2016/popular-physicsprize2016.pdf

***