

## تجارب فيزياء الذرات المبردة تحسم الجدل القائم بين أينشتاين وبور (Bohr)

سيد علي ريان

أستاذ بقسم الكيمياء، المدرسة العليا للأساتذة، القبة

[sidali.riyane@g.ens-kouba.dz](mailto:sidali.riyane@g.ens-kouba.dz)

مثّل نموذج **نيلز بور** (Niels Bohr) لذرة الهيدروجين سنة 1913 نقطة مفصلية في تطور مفاهيم البنية الذرية، إذ دمج بين مفاهيم الفيزياء الكلاسيكية ونظرية الكم الناشئة لتفسير استقرار الذرة وخطوط طيفها. وعلى الرغم من تجاوز ميكانيكا الكم الحديثة لهذا النموذج، فقد احتفظ بقيمته التأسيسية في فهم الطبيعة الذرية. في موازاة ذلك، شكّلت النقاشات بين بور و**أينشتاين** (Einstein) حول تفسير ميكانيكا الكم ذروة الجدل العلمي (أي الإستمولوجي) والعلمي في القرن العشرين. وقد حُسم الخلاف أخيراً عبر تجارب حديثة في فيزياء الذرات المبردة، ولا سيما تجربة **فولفغانغ كيتري** (Wolfgang Ketterle) وفريقه سنة 2025، التي دُعِمت بصورة قاطعة التفسير الاحتمالي لبور على حساب الواقعية الحتمية لأينشتاين. وتهدف هذه المقالة الموجزة إلى استعراض تطور هذا الصراع العلمي بدءاً من نموذج بور، مروراً بجدل التفسير الكمومي، وصولاً إلى التجربة الحاسمة التي جسّدت عملياً مبادئ كانت تُعدّ يوماً ما محض فلسفة.

### مقدمة

منذ أواخر القرن التاسع عشر وبدايات القرن العشرين، بدأت الصورة التقليدية للكون بالاهتزاز تحت وطأة الاكتشافات المتسارعة في عالم الذرة. فمن اكتشاف الإلكترون على يد **طومسون** (Thomson) في سنة 1897 إلى النموذج النووي لـ **لذرفورد** (Rutherford) في سنة 1911، كان التحدي قائماً في فهم البنية الداخلية للذرة وتفسير ثباتها وطيفها الخطي. جاء نيلز بور سنة 1913 ليقتراح نموذجاً كمياً مبسطاً لذرة الهيدروجين عُرف باسمه، اعتمد فيه على منهج تجريبي مؤسس على عمليات رياضية دقيقة، استطاع من خلاله تفسير خطوط طيف ذرة الهيدروجين وأشباهاها بدقة، واضعاً بذلك حجر الأساس للكيمياء الكمية [4].

غير أن ميكانيكا الكم لم تقف عند نتائج بور، بل تطورت لاحقاً على يد **شرودينجر** (Schrödinger) و**هايزنبرغ** (Heisenberg)، لتثير جدلاً تعليمياً وفلسفياً عميقاً حول طبيعة الواقع الكمومي بين مدرستين: الأولى يمثلها نيلز بور، وترتكز على مبدأ التحديد، أي تحديد المسار والموقع والحركة، وتؤمن بالطبيعة المعتمدة على التحديد المرتبطة بالرصد؛ والثانية يُمثلها أينشتاين، وتصرّ على وجود واقع مستقل لا يخضع للقياس [6]. وقد ظل هذا النقاش دون حسم إلى أن تمكّن العلماء من اختبار هذه الرؤى تجريبياً، وأبرزها تجربة الذرات المبردة سنة 2025 بقيادة فولفغانغ كيتري، والتي أعادت صياغة تجربة الشق المزدوج، أو ما يُعرف في مناهجنا التربوية الجزائرية بشقي يونغ، بطريقة متقدمة مكّنت من الفصل بين الموجية والجسيمية عملياً [2].

### 1. نموذج بور – أساس كمي لفهم الذرة

اقترح نيلز بور نموذجاً للذرة يقوم على ثلاث فرضيات رئيسية: الأولى تعتمد على تحديد المسار واعتباره دائرياً أي نصف قطره محدد؛ الثانية تعتبر أن حركة الجسيم داخل الذرة وفي نفس المسار المحدد لا يتيح للذرة امتصاص أو إصدار طاقة، والفرضية الثالثة أن العزم الحركي للجسيم أثناء حركته يكون كمياً بعدد طبيعي. وقد مكّنت هذه الفرضيات بور

من تفسير خطوط طيف الهيدروجين، ولاسيما سلسلة بالمر، بدقة متوافقة مع النتائج التجريبية. كما أسس لمفهوم مستويات الطاقة الذي صار محوراً أساسياً في فهم البنية الإلكترونية للعناصر والروابط الكيميائية [8].

### أثره في الكيمياء النظرية والتطبيقية

لقد شكّلت افتراضات بور حول ذرة الهيدروجين نقطة تحول محورية في مسار العلوم الفيزيائية، إذ أرسيت قاعدة نظرية صلبة جمعت بين مفاهيم ميكانيكا الكم والفيزياء الكلاسيكية، مما أتاح تفسير البنية الطيفية لذرة الهيدروجين بدقة غير مسبوقة. فقد أوضح بور أن للإلكترون مدارات محددة ذات طاقات كمومية، وهو ما مهّد لتطوير ميكانيكا الكم الحديثة وفتح الباب أمام فهم أعمق للتفاعلات الذرية والجزيئية. أما على الصعيد التطبيقي، فقد مكّنت هذه الرؤية الجديدة العلماء من التنبؤ بسلوك العناصر الكيميائية، وتفسير الروابط بين الذرات، وبالتالي إرساء أسس الكيمياء الكمية التي انبثقت عنها تقنيات حديثة في مجالات التحليل الطيفي، والليزر، وأشباه الموصلات، وصولاً إلى التطبيقات الطبية مثل التصوير بالرنين المغناطيسي. وهكذا مثّلت افتراضات بور جسراً بين النظرية والتطبيق، إذ انتقلت من كونها تصورات رياضية إلى أدوات عملية غيّرت وجه العلم والصناعة معاً.

- 1- **التحليل الطيفي:** اعتمد الكيميائيون على معادلات بور لتفسير خطوط الطيف وتحديد هوية العناصر.
- 2- **الطاقات الإلكترونية:** دعم فهم طاقات التآين والانتقالات الإلكترونية.
- 3- **تفسير الروابط الكيميائية:** مهّد الطريق لنظريات الترابط الكيميائي مثل رابطة التكافؤ والمدار الجزيئي.
- 4- **الجانب التعليمي:** شكّل نموذج بور مدخلاً مفاهيمياً لتعليم الذرة في مراحل التعليم الثانوية والجامعية [9].

## 2. أينشتاين وخلفيته التعليمية

لم يكن أينشتاين، في مسيرته العلمية والفلسفية، مجرد فيزيائي تجريبي أو رياضي، بل كان مفكراً يسعى إلى صياغة صورة متكاملة عن العالم الطبيعي تتجاوز حدود الصيغ الرياضية إلى معنى الواقع ذاته. ومنذ بدايات أبحاثه في النظرية النسبية وصولاً إلى نقاشاته العميقة مع نيلز بور في مؤتمر سولفاي، ظلّ أينشتاين يؤكد على فكرة مركزية مفادها أنّ للطبيعة وجوداً مستقلاً عن عمليات الرصد والقياس التي يجريها العلماء. فقد كان يرى أن وظيفة الفيزياء لا تقتصر على تنظيم نتائج القياسات، بل اكتشاف البنية الواقعية الكامنة وراء الظواهر، أي ما يمكن أن يُسمى "الواقعية الفيزيائية". يتضح هذا الموقف أكثر عند مقارنته بتفسيرات ميكانيكا الكم في مدرسة كوبنهاغن، حيث ذهب بور وهايزنبرغ إلى أنّ القياس لا يكشف عن خاصية كامنة مسبقاً في الجسم، بل هو الذي يحددها ويُنشئها. أما بالنسبة لأينشتاين، فقد كان هذا التصور صادمًا وغير مقبول، لأنه ينفي وجود حقائق فيزيائية موضوعية تسبق تدخل المراقب. ومن هنا صاغ عبارته الشهيرة: "هل يعتقد القمر أنه موجود فقط حين أنظر إليه؟" ليُجسّد رفضه لفكرة أن الواقع مرهون بفعل الملاحظة. بلغ الجدل ذروته في الورقة التي كتبها أينشتاين مع **بودولسكي** (Podolsky) و**روزن** (Rosen) سنة 1935. في هذه الورقة حاول أن يبرهن على أنّ ميكانيكا الكم – كما تُفهم وفق تفسير كوبنهاغن – نظرية غير مكتملة، لأنها لا تصف "العناصر الواقعية" التي لا بد أن تكون موجودة بمعزل عن القياس. وجوهر حجته أنّه إذا كان بالإمكان التنبؤ بدقة بخاصية لجسيم ما دون أن نمسّه أو نقيسه مباشرة، فإنّ هذه الخاصية يجب أن تكون واقعية ومستقلة عن فعل القياس. من هذا المنظور، أصرّ أينشتاين على أنّ العالم الطبيعي يتمتع ببنية موضوعية، وأنّ القوانين الفيزيائية ينبغي أن تصف تلك البنية بدلاً من الاكتفاء بالعلاقات الاحتمالية للقياسات. ورغم أنّ التجارب اللاحقة – خصوصاً تجارب بيل في ستينيات القرن العشرين – أظهرت أن الطبيعة أكثر غرابة مما تصور أينشتاين، فإنّ موقفه ظلّ مؤثراً في الفلسفة العلمية. فقد حفّز البحث عن "النظريات الخفية" التي يمكن أن تكشف عن الواقع وراء الاحتمال، وأبقى النقاش مفتوحاً حول طبيعة الحقيقة الفيزيائية.

إنَّ إصرار أينشتاين على وجود واقع مستقل لا يخضع للقياس لم يكن مجرد اعتراض على ميكانيكا الكم، بل كان تعبيراً عن رؤيته الكونية لوظيفة العلم: السعي إلى كشف نظام موضوعي يتجاوز إرادة الراصد وأدواته. وبهذا المعنى، فإن فكره لا يزال يشكّل دعامة أساسية في النقاشات المعاصرة حول العلاقة بين النظرية والواقع، بين ما نرصده وما يوجد حقاً في أعماق الطبيعة.

### 3. جدل بور وأينشتاين – الواقع، الرصد، والاحتمال

رغم نجاح نموذج بور، فإن تفسيره الاحتمالي للواقع الكمي لم يُرضِ أينشتاين الذي طالما كرر: "الله لا يلعب النرد" [7]. فقد رأى أنَّ الجسيمات لا بد أن تملك خصائص محددة قبل الرصد، وأن ميكانيكا الكم ليست سوى وصفاً ناقصاً لواقع أعمق تحكمه "متغيرات خفية" [3]. وقد برز هذا الصراع في مؤتمرات سولفاي، حيث اقترح أينشتاين تجارب فكرية (مثل تجربة تحديد مسار الفوتون في الشق المزدوج) للتشكيك في تفسير بور. إلا أن بور ردَّ بأن مجرد محاولة الرصد تغيّر طبيعة الجسيم وتُفقد التداخل الموجي [5]. وقد ظل هذا الجدل فلسفياً إلى أن جاء القرن الحادي والعشرون بتقنيات مكّنت من اختبار تجريبيّاً.

### 4. تجربة كيتري (2025) – حسم الجدل بالتبريد الليزري

تُعَدُّ تقنية التبريد الليزري للذرات والجزيئات من أبرز الإنجازات العلمية في فيزياء الذرة والكم، إذ تتيح التحكم الدقيق في حركة الجسيمات على مستوى بالغ الصغر. تقوم الفكرة على استغلال التفاعل بين الذرات أو الجزيئات وأشعة الليزر ذات أطوال موجية مختارة بعناية، بحيث يؤدي امتصاص الفوتونات وإعادة إصدارها إلى تقليل السرعة الحركية للجسيمات. وبما أنَّ درجة الحرارة في الفيزياء مرتبطة بطاقة الحركة، فإن خفض السرعة يقود مباشرة إلى تبريدها حتى تصل إلى أجزاء من الميكروكلفن، أي قريبة من الصفر المطلق. وقد أتاح هذا التطور بناء ما يُعرف بـ "المصائد البصرية" التي تمسك الذرات في فضاء محدد، وتتيح دراستها دون اضطراب حراري.

لقد كان لهذا الإنجاز أثرٌ بالغ في العديد من المجالات. فعلى الصعيد الأساسي، مكّن العلماء من التحقق بدقة غير مسبوقة من الميكانيكا الكمومية، ودراسة حالات جديدة من المادة مثل تكاثف بوز-أينشتاين الذي لا يظهر إلا عند درجات حرارة فائقة الانخفاض. كما وفّر التبريد الليزري قاعدة لتطوير الساعات الذرية فائقة الدقة التي تُستخدم اليوم في الملاحية عبر الأقمار الصناعية (GPS) وفي معايرة الزمن العالمي. أما على الصعيد التطبيقي، فقد فتحت هذه التقنية آفاقاً في مجال الحوسبة الكمومية، إذ يسمح التحكم بالذرات الباردة ببناء كيوبتات أكثر استقراراً، ما يقربنا من تحقيق معالجات كمومية عملية.

إضافةً إلى ذلك، يساهم تبريد الجزيئات في التقدّم بمجالات مثل الكيمياء فائقة البرودة، حيث يمكن دراسة التفاعلات الكيميائية بدقة على مستوى الحالات الكمومية الفردية، وهو ما يعزّز فهمنا لآليات الطبيعة على مستوى أساسي. وبذلك، فإن التبريد الليزري لا يُعدُّ مجرد تقنية مخبرية، بل يُمثّل أداةً استراتيجية في دفع حدود المعرفة الإنسانية، وربط النظريات الفيزيائية بالاكتشافات التجريبية التي تمهّد لثورات علمية وتكنولوجية مستقبلية.

في تطور ثوري، قام فريق بقيادة فولفغانغ كيتري سنة 2025 بتجربة باستخدام ذرات مبردة بالليزر مُرتّبة في شبكة ضوئية، حيث لعبت كل ذرة دور "شق" في تجربة موسعة للشق المزدوج [5]. وقد تمكّنت هذه التجربة من رصد الفوتونات المنثارة عن الذرات بشكل يسمح بتحليل التداخل من جهة، أو تحديد المسار من جهة أخرى.

#### النتائج الأساسية:

- عند عدم معرفة المسار، بقي التداخل موجوداً (سلوك موجي).

- عند معرفة المسار بدقة، اختفى التداخل وظهر السلوك الجسيمي.
- أكد هذا التلازم بين الرصد وفقدان التماسك الموجي، كما تنبأ بور منذ قرن [5].
- رفض ضمني لفكرة المتغيرات الخفية الواقعية التي دافع عنها أينشتاين، متماشياً مع نتائج تجارب بيل التي سبقت ذلك في السبعينيات.

### الأثر التطبيقي والعلمياتي:

- أكدت التجربة أن الرصد يغيّر الواقع الكمي، مما يدعم تفسير كوبنهاغن.
- فتحت الباب أمام تطوير الحوسبة الكمية والتشفير الكمي.
- أعادت تسليط الضوء على مفاهيم التشابك الكمي وفقدان التماسك.

### الخاتمة

يُجسّد المسار الذي بدأه نيلز بور بنموذجه لذرة الهيدروجين سنة 1913، وانتهى بتجربة كيتري سنة 2025، واحدة من أعظم الرحلات الفكرية والعلمية في تاريخ الإنسانية. لقد انتقلت العلوم الفيزيائية، بفضل هذا التطور، من محاولة بناء تصوّرات أولية عن الذرة استناداً إلى افتراضات رياضية مبسطة، إلى عالم من التجارب عالية الدقة والتقنيات المتقدمة التي مكّنت العلماء من اختبار أعقد الفرضيات وإثبات أو دحض ما كان يوماً مجرد تخمين علمياتي. إن الفارق بين نقطة البداية ونقطة النهاية لا يتمثل فقط في حجم المعارف المكتسبة، بل في طبيعة السؤال ذاته: من "كيف نتصور الذرة؟" إلى "كيف يكشف الرصد عن طبيعة الواقع الكمومي نفسه؟".

لقد أظهر هذا الامتداد التاريخي أن قوة نموذج بور لم تكن كامنة في كونه التفسير النهائي لبنية الذرة، بل في كونه خطوة تأسيسية أطلقت سلسلة متواصلة من التطورات النظرية والتجريبية، وأعادت صياغة علاقة الإنسان بالواقع المجهرى. فما كان في زمن بور مجرد افتراض فكري، صار اليوم حقيقة تجريبية مدعومة بأدق الأدوات المخبرية، وهو ما يعكس قدرة العلوم الفيزيائية الحديثة على تحويل ما يُتصوّر ذهنياً إلى وقائع ملموسة تخضع للمشاهدة والتجريب. بهذا المعنى، لم يكن نموذج بور نهاية رحلة البحث، بل الشرارة التي مهّدت الطريق لاكتشافات متلاحقة أعادت رسم حدود الممكن في فهم المادة والطاقة.

وبين الرؤية الحتمية التي دافع عنها أينشتاين، والتفسير الذي تبناه بور، لعبت التجربة العلمية الدور الحاسم في حسم الجدل. فقد بيّنت أحدث التجارب، ومنها تجربة كيتري، أن الواقع الكمومي لا يمكن مقارنته بمنطق الكلاسيكية الصارمة، ولا إدراكه خارج إطار فعل الرصد ذاته. إن الانتصار لمبدأ الاحتمال على الحتمية ليس مجرد انتصار لفكرة فيزيائية على أخرى، بل هو انتصار لمنهج علمي يعترف بتعقيد الظواهر ويفسح المجال أمام تعدد التفسيرات ما دامت مدعومة بالبرهان التجريبي. وهكذا، تظل قصة بور وما تلاها شاهداً على أن العلم ليس تراكمًا للمعارف فحسب، بل هو أيضاً رحلة فكرية تعيد تشكيل علاقتنا بالوجود وتفتح آفاقاً جديدة لفهم ما كان يبدو عصياً على الإدراك.

### المراجع

- [1] Atkins, P., & de Paula, J., Atkins' Physical Chemistry, Oxford University Press, 2017.
- [2] Bacciagaluppi, G. & Valentini, A., Quantum Theory at the Crossroads. Cambridge University Press, 2009.
- [3] Bell, J. S., Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics. Cambridge University Press, 1987.

- [4] Bohr, N., On the Constitution of Atoms and Molecules, Philosophical Magazine, 26(151), (1913),1–25.
- [5] Bohr, N., Atomic Theory and the Description of Nature. Cambridge University Press, 1934.
- [6] Born, M., The Born–Einstein Letters. Macmillan, 1917.
- [7] Einstein, A., On a Heuristic Point of View Concerning the Production and Transformation of Light, Annalen der Physik, 1905.
- [5] Levine, I. N., Quantum Chemistry, Pearson, 2014.
- [6] McQuarrie, D. A., Quantum Chemistry, University Science Books, 2008.

