تاريخ ميكانيكا الكم

إبراهيم سعد الله
أستاذ (متقاعد) بقسم العلوم الفيزيائية، المدرسة العليا للأساتذة، القبة
brahim.sadallah@g.ens-kouba.dz

ظهر النموذج الكمي في التاريخ سنة 1930. وكان النموذج التقليدي هو السائد منذ نشأته؛ إذ أنه نموذج كامل متكامل متسق قائم بذاته بسيط رائع. لكن ظهرت تجربة سنة 1859 تعارضت نتائجها مع نتائجه، وتكرر ذلك في السنوات 1887 و1914 و1923 و1927. وقد كشفت التجربة الأخيرة عن وجود دالة $\psi(\vec{r},t)$ تواكب حركة جسم مادي كلما تحرك. إنها دالة مدسوسة في طيات الطبيعة، وهو ما يمثل أمرًا غريبًا على النموذج التقليدي بحكم جهل أسبابه. ودام هذا التباين 70 عامًا، مما عطّل البحث العلمي طيلة هذه الفترة.

وقبل المضي في عرض الموضوع، نوّد تعريف مصطلحين:

أ- **النموذج التقليدي**: يشير إلى ثلاثة علوم:

1) قوانين الحركة الثلاث لنيوتن (Newton)،

2) معادلات ماكسويل (Maxwell) الأربع ومرافقاتها،

3) قوانين الإحصاء لبولتزمان (Boltzmann).

ب- **النموذج الكمي**: يشير إلى المسلمات الأربع لديراك (Dirac).

1. قبل ميلاد ميكانيكا الكم

كان النموذج التقليدي هو عُدّة البحث العلمي في هذا المجال منذ نشأته، فأبلى بلاءً حسنًا، إذ كانت نتائجه متفقة مع نتائج التجارب: طوّر البحث العلمي، وحرّك العربات وآلات النسيج وأدوات الحروب وآلات القياس والاتصالات، حتى سُمّي عهده "عهد النهضة العلمية"، وما إلى ذلك. ولم يخطر على بال أحد الشك في صحته وسلامة أسسه؛ إذ كان نموذجًا سهلًا كاملًا متكاملًا متسقًا قائمًا بذاته ورائعًا.

لكن في عام 1859 ظهرت تجربة لم تتفق نتائجها مع نتائج النموذج التقليدي، تناولت ظاهرة الإشعاع الحراري للجسم العتم (الأسود). تسبب ذلك التباين في صدمة حيّرت الباحثين، ولا يعلم أحد أسبابه. أدى هذا الوضع إلى بلبلة بين العلماء، وظهرت إثر ذلك مدارس فكرية في العالم، مما أثّر في صيرورة البحث. والأدهى من ذلك توالي ظهور تجارب تتضارب نتائجها مع نتائج النموذج التقليدي حتى عام 1927.

نشير إلى أن بلانك (Planck) تمكّن من تفسير نتائج التجربة المذكورة بأفكار غير تقليدية عام 1900. لكن العلماء لم يولوا لذلك التفسير الأهمية التي يستحقها لأن أفكار بلانك لم تكن متفقة الأفكار السائدة في النموذج التقليدي.

انقسمت آراء الباحثين إلى ثلاث فرق:

1) فرقة صمتت ولم تُبدِ رأيها في أسباب التباين.

2) فرقة أوعزت التباين إلى عدم فهم النموذج التقليدي بعمق، ورفضت أن تشوبه شائبة. وهي الفرقة الغالبة، وحجة هؤلاء العلماء ما يرونه من تطبيقات لهذا النموذج في آلات وأدوات تستخدم في الحروب والنسيج وأجهزة القياس والاتصالات، إلخ.

3) فرقة أوعزت التباين إلى وجود خلل يعتري النموذج التقليدي، وهي فئة قليلة العدد. وحسب المراجع، نشب صراع صاخب بين الفرقتين الثانية والثالثة، وامتد وتوسع إلى مدارس مختلفة، ودام مدة فاقت 70 عامًا، وبلغت حدة الصراع درجة تجاوزت المعقول. أما حالة البحث العلمي أثناء تلك الفترة فحدّث ولا حرج، إذ تردّت وتعطلت، حتى صار الباحث لا يثق في أبحاث غيره ويشكك في محتوياتها.

وظهرت تجربة لهنريش هيرتز (Heinrich Hertz) سنة 1887 حول الكهرباء الضوئية، وظهر تباين بين نتائج التجربة ونتائج النموذج التقليدي. كما ظهرت تجربة أخرى لجيمس فرانك (James Franck) وجوستاف هيرتز (Gustav Hertz) عام 1914، وظهر هنا أيضًا تباين في نتائجها مع النموذج التقليدي. ولقد أظهرت هذه التجربة تكميم الذرات، بمعنى أن الإلكترونات في الذرة موجودة في سويات طاقية مختلفة، مؤيدة بذلك نظرية بوهر (Bohr)، وهو ما يرفضه النموذج التقليدي.

وفي عام 1923، بيّن آرثر كومبتون (Arthur Compton) تجريبيًا وحسابيًا، بطريقة غير تقليدية، وجود ازدواجية في سلوك حركة الضوء. يتعلق الأمر بسلوك موجي ماكسويلي مألوف وسلوك جسمي غير مألوف، لا ينفكان عن بعضهما. كما أشرنا أدناه

سلوك الضوء عند النموذج التقليدي واحد: ← موجي سلوك الضوء عند التجربة سلوكان: ← موجي / جسمي

التخطيط الأول لسلوك حركة الضوء

وهذا مخالف لمفهوم النموذج التقليدي.

وفي عام 1927، جاءت تجربة سُميت "تجربة دفسن وجرمر (Davisson-Germer)" للفيزيائيين الأمريكيين كلنتون دافيسون (Clinton Davisson) وليستر جرمر (Lester Germer)، الهدف منها تحسين أداء أشعة (X). فشاهدا، من بين ما شاهدا، أهدابًا (موجة) تواكب حركة إلكترون (جسم مادي). فَتَعَجَّبا مما رصداه، إذ لم يكن ذلك مقصد التجربة. يُروى أنهما أوقفا آنذاك التجربة وهرعا إلى المدرج ليعلنا عما شاهداه. يشير المشهد إلى وجود ازدواجية في سلوك حركة الجسم المادي (سلوك جسمي نيوتني مألوف وسلوك موجي غير مألوف، لا ينفكان عن بعضهما). فقد بيّنت هذه التجربة وجود موجة $\psi(\vec{r},t)$ تواكب حركة جسم مادي كلما تحرك. من الواضح أن المشهد يخالف مفهوم النموذج التقليدي، ومن ثمّ فهذه نتيجة تُعد جديدة، لا بد لأي باحث نظري صادق أن يأخذها بعين الاعتبار.

سلوك الجسم عند النموذج التقليدي واحد: ← جسمي سلوك الجسم عند التجربة سلوكان: ← موجي / جسمي

التخطيط الثاني لسلوك حركة الجسم المادي

ملاحظة هامة: هناك جديد، إن كنت لم تدركه بعد! انظر إلى التخطيطين الأول والثاني السابقين، ولاحظ أن سلوك الضوء والجسم عند التجربة متماثلان؛ حركتهما جسمية وموجية في وقت واحد، لا ينفكان عن بعضهما، وليس بإمكان أحد الفصل بينهما البتة. هذا هو الجديد الذي أبرزته التجربة. أما في النموذج التقليدي، فحركة الضوء تختلف عن

حركة الجسم، وهذه هي الثغرة التي اعترت النموذج التقليدي. في النموذج الكمي، الذي سنطلع عليه لاحقًا، يُعامَل الضوء والجسم المادي على قدم المساواة، كما تقول التجربة. فهذا منعرج جديد.

ينبغي التنويه بأنه، رغم أن كومبتون بيّن بالتجربة والحساب وجود السلوك الجسمي للضوء، فإن ابن الهيثم قال في كتاب "المناظر" ضمن الرسالة الأولى (تاريخ المناظر) "ما الضوء إلا أجسام دقاق".

إن تجربة عام 1927 هي آخر التجارب التي أظهرت تناقضًا بين نتائجها ونتائج النموذج التقليدي. وقد أبرزت وجود الدالة (الموجة) $\psi(\vec{r},t)$ التي تواكب حركة جسم مادي إذا تحرك. هذه دالة كانت موجودة في ثنايا الطبيعة، وشاهدها الإنسان لأول مرة وأبهرت العلماء. لكنهم تساءلوا عن دورها ووظيفتها في المسألة؛ لا أحد كان يعرف ماهيتها أو مصدرها أو علاقتها بالحركة. واستمر حال البحث العلمي متعثرًا مدة سبعة عقود. وبعد هذه التجربة، بات جميع العلماء يدركون أن النموذج التقليدي نموذج منقوص.

حاول بعض كبار العلماء تصحيح الخلل الذي لوحظ في النموذج التقليدي؛ فبذلوا جهودًا مضنية، لاسيما خلال الربع الأول من القرن العشرين. فقد ازداد النقاش آنذاك حدةً شمل العلماء ومدارسهم، وبرزت أفكار مختلفة تهدف إلى جعل النموذج التقليدي يفسر نتائج التجارب المثيرة للجدل. وهكذا، أدخلوا على النموذج وسائط في العلاقات الفيزيائية، وقدّموا نماذج أخرى، لكن بمفاهيم تقليدية، مثل نموذج بوهر ونموذج سمرفيلد (Sommerfeld) وأفكار دي بروي (de Broglie)، وغير ذلك. وفي هذا الخضم، نجح نموذج بوهر ونموذج سمرفيلد في تكميم الدفع الزاوي والطاقة لذرة الهيدروجين، لكنهما سرعان ما فشلا في جهات أخرى. والحقيقة أن هذا المقام لا يسمح بذكر ما جاء في تلك الوثائق التي ظهرت وقتئذ.

وبعد وقت طويل من اكتشاف الموجة $\psi(\vec{r},t)$، تمكن بورن (Born) من تحديد دورها، ووضع ذلك في ثلاث مسلّمات. تقول أولاها "الدالة التي تواكب حركة الجملة الفيزيائية تنطوي على كافة المعلومات التي يمكن الوصول إليها (حول الجملة)." هذه الفكرة مازال العمل بها جاريًا، وتُعدّ عمدة من أعمدة ميكانيكا الكم.

يمكن للمرء أن يتخيّل الحالة التي عاشها الباحث خلال الحقبة 1859-1930؛ إذ كان تائهًا واهمًا غير واثق من نتيجة بحثه، ويشكك في نتائج بحوث غيره. والأدهى أنه لم يكن له سند يثق فيه. وأدى هذا الوضع إلى حالة ارتباك في البحث العلمي، ليس هذا فحسب، بل نشبت خلافات وفتن بين العلماء، لا يسع المقام لذكر تفاصيلها. وحتى هذه المرحلة، لم يكن هناك باحث نظري يأخذ بعين الاعتبار الدالة وازدواجية سلوك الضوء والجسم المادي.

2. إرهاصات ميلاد ميكانيكا الكم

في الوقت الذي كان فيه البحث العلمي غارقًا في تناقضات بين نتائج الحساب المستند إلى النموذج التقليدي، ونتائج التجارب، والعلماء هائمون، صدر كتاب لبول ديراك بتاريخ 29 ماي 1930عنوانه "مبادئ ميكانيكا الكم" (Principles of Quantum Mechanics). أسس هذا الكتاب نموذجًا لميكانيكا الكم، وهو نموذج بسيط كامل متكامل متسق قائم بذاته ورائع، حسم فيه المعضلة والصراع الطويل، فأنقذ بذلك البحث العلمي في هذا المجال وأخرجه من الظلمات.

قال ديراك: "لما عزمت على تأليف كتاب 'المبادئ الأساسية لميكانيكا الكم' حدثتني نفسي، هل أكتبه بلغة رياضية أم بلغة لفظية؟ فرجّحت اللغة اللفظية لأجعله أقرب إلى الفيزيائيين".

من هو ديراك؟ إن ديراك من علماء الرياضيات، وله عدة نظريات في الفيزياء، نذكر منها نظرية ميكانيكا الكم، ونظرية بحر الإلكترونات، ونظرية الثقوب (Hole Theory) وصلتها بالمادة المضادة (Antimatter) التي كان مكتشفها. وقد أسس معادلة الحركة الكمية النسبية التي سميت باسمه، واكتشف من خلالها وجود اللف (Spin) الذاتي لكل

جسيم في الطبيعة؛ وهو الدفع الزاوي الذاتي. ولديراك دالة $\delta(x)$ تسمى باسمه، وقد أعطاها الرياضياتي لورنت شوارتز (Laurent Schwartz) معنى رياضيًا دقيقًا. كما توقع ديراك وجود جسيم في الطبيعة، فظهر ذلك الجسم بالقياس بعد أربع سنوات. وله إبداع في الإحصاء الكمي، والإشعاع الكهرومغناطيسي، وكان له نشاط في الديناميكا الكهربائية الكمية (Quantum electrodynamics).

ينبغي التنويه بأن ما جاء في كتاب ديراك يُمثّل ثقافة مختلفة عن ثقافة النموذج التقليدي. ذلك أنه استخدم جبرًا غير تبديلي، بينما استخدم غيره جبرًا مختلفًا. والغريب أن لا أحد يعرف من أين استلهم ديراك أفكاره؛ فلم يذكر شيئًا مما ذكره الآخرون خلال السبعين سنة المشار إليها أعلاه، ولم يتطرق إلى ما تطرق إليه باقي العلماء، ولم يشر إلى ذلك في كتابه. لذلك يحق القول إن نظرية الكم هي من إبداعه.

بالإضافة إلى ما تقدّم، يُلاحَظ أن أصل علم الكم مستقل تمامًا عن أصل العلم التقليدي؛ فلا توجد صلة بين أصليهما، رغم أنهما يعالجان الجملة الفيزيائية ذاتها. إنه لأمر غريب حقًا.

يُستشف من كتاب مبادئ ميكانيكا الكم أن ديراك أسس علم الكم من خلال أربع مسلمات نسردها باختصار:

- **المسلمة الأولى** ربط فيها بين الكائنات الفيزيائية لجملة بالمؤثرات في فضاء هلبرتي، تقول: " كل كائن فيزيائي لجملة فيزيائية، موضعها ودفعاها وطاقتها و ...، يوافقه مؤثر O في فضاء هلبرتي، ويخضع لمعادلة القيم الخاصة (أو القيم الذاتية)"

$$O\varphi_\alpha = a_\alpha \varphi_\alpha$$

حيث O هو المؤثر الذي يوافق الكائن الفيزيائي في فضاء هلبرتي، وحلها يكون على الشكل:

$\{a_\alpha\} = a_1$، a_2، $\cdots$ ، a_α ، $\cdots$ أعداد تُسمى القيم الخاصة (أو الذاتية) للمؤثر O، وتُسمى مجموعة هذه الأعداد طيفه.

$\{\varphi_\alpha\} = \varphi_1$، φ_2، $\cdots$ ، φ_α ، $\cdots$ دوال خاصة (أو ذاتية) للمؤثر O توافق القيم الخاصة، وتشكل أساسًا تامًا متعامدًا ومتجانسًا.

- وأردف ديراك قائلًا في **المسلمة الثاني**: "إذا ذهبت إلى المخبر وقمت بقياس لكائن فيزيائي لجملة فيزيائية، فلن تشاهد سوى إحدى القيم الخاصة للمؤثر الذي توافقه في الفضاء الهلبرتي لا غير". هنا حدد ديراك ما يمكن مشاهدته عند قياس كائن فيزيائي، أي أن المقدار الفيزيائي للكائن الفيزيائي يساوي القيمة الخاصة للمؤثر الموافق، ولا شيء آخر.
- **المسلمة الثالثة** تعنى بالحالة التي تشغلها الجملة الفيزيائية. وهنا يقول ديراك: "تشغل الجملة الفيزيائية جميع الحالات المتاحة لها في وقت واحد؛ باحتمال $|c_1(t)|^2$ للحالة الأولى، واحتمال $|c_2(t)|^2$ للحالة الثانية، ...، واحتمال $|c_\alpha(t)|^2$ للحالة α...، حيث $\sum_\alpha |c_\alpha(t)|^2 = 1$ ، وحيث الدالة التي تصف حالة الجملة في اللحظة t هي

$$\psi(\vec{r},t) = \sum_\alpha c_\alpha(t)\varphi_\alpha(\vec{r})$$

على أن يتحقق الشرط الإحصائي، وهو شرط من شروط بورن

$$\int d^3r|\psi(\vec{r},t)|^2 = 1.$$

وعند القيام بقياس كائن فيزيائي للجملة، تنهار حالاتها إلى الحالة التي تشاهد فيها القيمة الخاصة للكائن.

- أما **المسلمة الرابعة** فحدد فيها ديراك معادلة الحركة الكمية.

وباختصار، فإن المسلمة الأولى تسمى "آلة الحساب"، إذ تُحدد فيها القيم الخاصة المتاحة والدوال الخاصة الموافقة لها. والمسلمة الثانية تسمى "آلة القياس"، إذ يتم فيها تحديد ما يمكن مشاهدته عند القياس، وهي القيمة الخاصة للمؤثر الموافق للكائن. أما المسلمة الثالثة، فقد حدد فيها ديراك حالة الجملة. إن الدالة $\psi(\vec{r},t)$ هي التي أبرزتها التجربة سنة 1927. وهكذا، فالمسلمات الأربع تُعدّ بمثابة قواعد نموذج ميكانيكا الكم الكامل المتكامل القائم بذاته.

نلاحظ أن ثقافة ونهج النموذج التقليدي يختلفان عن ثقافة ونهج النموذج الكمي، فبينهما بون شاسع. ولهذا، اختلف أصلاهما، رغم أنهما يعالجان الجملة الفيزيائية ذاتها. كما نلاحظ أن ساحة العمل في الميكانيكا التقليدية غير محددة بدقة، بينما الأمر عكس ذلك في ساحة العمل في ميكانيكا الكم، وهي فضاء هلبرتي تديره أربع عمليات في منتهى الوضوح والدقة.

بعد اكتشاف النموذج الكمي عام 1930، شرع الباحثون في تبنّيه والعمل في إطاره فنهض البحث العلمي في مختلف الاتجاهات، وغزرت نتائجه، فتطور بسرعة لا نظير لها في التاريخ. ومن ثمّ، اطلع المهتمون على تفاصيل بناء المادة والجزيء والذرة، والنواة وكذا تفاصيل في بناء النواة... حتى قال بعضهم إن ما اكتشفه الإنسان في بضع سنين بعد ظهور النموذج الكمي يفوق ما اكتشفه طوال تاريخه السابق! كيف لا، وقد تمكن العلماء من معرفة بنية نواة الذرة معرفة مفصلة، ووصل بهم الأمر إلى شطرها بعد عشر سنوات من ظهور كتاب ديراك. كما اطلعوا على مقدار الطاقة المنسابة من الانشطار، وصنعوا منها السلاح، وتوصلوا إلى التحكم فيها فأنتجوا الطاقة النووية عبر المفاعلات. ومن جهة أخرى، تمكن الإنسان من إدماج النوى الخفيفة، وعرف مقدار الطاقة المهولة التي تنساب من الاندماج، وصنع من ذلك السلاح، لكنه لم يفلح إلى يومنا هذا في التحكم في هذه العملية. كل ذلك تم إبان تلك الفترة الوجيزة.

ومهما أشدنا بالدور الأساسي الذي أدّاه العالم ديراك في بعث ميكانيكا الكم، فلا بد أن ندرك أن ذلك كان تتويجًا لأعماله وأعمال جيله من علماء الفيزياء الفطاحل.

3. في الختام

لقد خلّف عمل الباحثين خلال الربع الأول من القرن العشرين ثروة علمية هائلة، ونحن لا نبالغ في ذلك، فقد تركوا لنا نقاشات واسعة، ومؤلفات، ونماذج وآراء ومدارس حول أسباب التباين بين نتائج التجارب ونتائج النموذج التقليدي. ورغم جهودهم، لم يتمكنوا من الوصول إلى حل شافٍ للقضية. لقد دخلت هذه الثقافة مناهج التعليم في الجامعات، فألحقت ضررًا جسيمًا وعطّلت متعلمي علم الكم على فهمه، وجعلته علمًا غامضًا لدرجة أن كثيرًا منهم قرروا التمسّك بالنموذج التقليدي دون غيره. وإذا نظرنا إلى هذا النموذج من زاوية معينة، وجدنا أنه كان علمًا غير نافع في حينه، إذ لم يستطع حل معضلة التباين وما له علاقة بميكانيكا الكم. والغريب أنه يُدرس تحت عنوان ميكانيكا الكم، وهي بريئة منه.

هناك جامعات كثيرة أفرغت رفوف مكاتبها من تلك الثقافة "التقليدية"، ورغم ذلك، ما زالت مكتبات جامعاتنا تئن بتلك الكتب، ظنًا منها أنها تسهم في تكوين الطالب. فماذا سيتعلم طالب في مجال ميكانيكا الكم من نموذج بوهر أو نموذج سمرفيلد أو من أفكار دي بروي؟ اللهم إلا إذا كان الطالب يهتم بالجانب التاريخي أكثر من غيره.