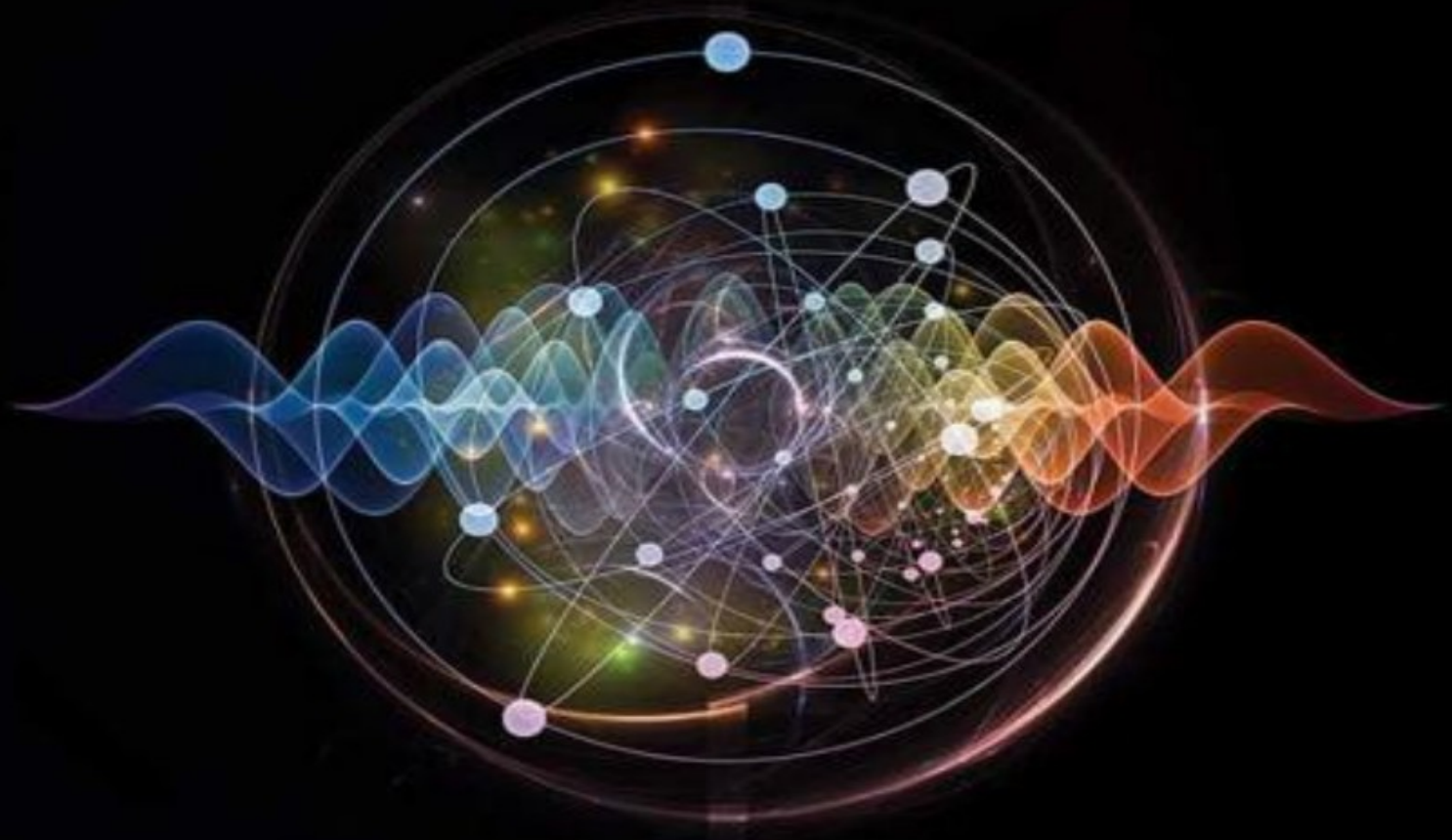
نيلز بور

فيزياء الكم والمعرفة الانسانية



ترجمة: مصطفى العدوي

نيلز بور

فيزياء الكم والمعرفة الانسانية

ترجمة: مصطفى العدوي

فيزياء الكمِّ
والمعرفة الإنسانية

نيلز بـور

◆ المؤلف: نيلز بور
◆ العنوان: فيزياء الكم والمعرفة الإنسانية
◆ ترجمة: مصطفى العدوي
◆ الطبعة: الأولى 2022
◆ تصميم الغلاف: عمرو الكفراوي
◆ مستشار النشر: سوسن بشير
◆ المدير العام: مصطفى الشيخ

رقم الإيداع:
٢٠٢٢ / ١٥٨٣
الترقيم الدولي: ISBN
978 - 977 - 765 - 337 - 4

جميع الحقوق محفوظة. لا يسمح بإعادة إصدار هذا الكتاب أو أي جزء منه، أو تخزينه في نطاق استعادة المعلومات، أو نقله بأي شكل من الأشكال دون إذن مسبق من الناشر.

All rights are reserved. No part of this book may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form, or by any means without prior permission in writing from the publisher.

Afaq Bookshop & Publishing House

1 Kareem El Dawla st. - From Mahmoud Basiuny st. Talaat Harb
CAIRO – EGYPT - Tel: 00202 25778743 - 00202 25779803 Mobile: +202-01111602787
E-mail:afaqbooks@yahoo.com – www.afaqbooks.com
١ شارع كريم الدولة - من شارع محمود بسيوني - ميدان طلعت حرب - القاهرة - جمهورية مصر العربية
ت: ٢٥٧٧٨٧٤٣ ٠٠٢٠٢ - ٢٥٧٧٩٨٠٣ ٠٠٢٠٢ - موبايل: ٠١١١١٦٠٢٧٨٧

نيلز بور

فيزياء الكمِّ والمعرفة الإنسانية

ترجمة

مصطفى العدوي

آفاق للنشر والتوزيع

بطاقة الفهرسة

إعداد الهيئة العامة لدار الكتب والوثائق القومية

إدارة الشؤون الفنية

بور، نيلز.

نيلز بور : فيزياء الكم والمعرفة الإنسانية

ترجمة: مصطفى العدوي

ط1 القاهرة – دار آفاق للنشر والتوزيع – 2022

256 ص، 21 سم.

رقم الإيداع 1583 / 2022

الترقيم الدولي 978 – 977 – 765 – 337 – 4

1 – علمية

2 – بور، نيلز

شكر وإهداء

بودي أن أهدي عملي هذا إلى أسرتي: زوجتي إيمان الرفاعي وأبنائي وأمي آمال إسماعيل وإخوتي: سونة ومحمد وشيرين.

وإلى صديقي الدكتور أحمد سمير سعد الذي طالما كان تشجيعه وطرقه لمجال ترجمة وتبسيط العلوم ملهمًا ومحفِّزًا لي.

وإلى الأستاذ مصطفى الشيخ الذي قدَّم الكثيرَ من الدعم والتشجيع والصبر كي يظهر هذا العمل إلى النور.

وإلى فرق العمل في المبادرات العلمية التطوعية عبر الوطن العربي: السادة أعضاء فرق (أنا أصدِّق العلم) و(أخبار العلوم) و(الباحثون السوريون) و(في العلم) و(أورورا) الذين شرفت بالعمل معهم والتعلُّم منهم.

وأخصُّ بالذكر السادة: جعفر الجزيري ودانة رضوان ومينا خلف وعصام فواز وحسام عبد الله ورامي الحرك وعلي أبو الروس ونهى سليمان وموسى جعفر ومازن سفان وآية فحماوي وأحلام مرشد، الرفاق والأشقاء من البحرين والأردن ولبنان ومصر وسوريا والعراق وفلسطين.

فلهم جميعًا عظيم امتناني وشكري.

مقدمة المترجم

تكتسب أهمية هذا الكتاب من حقيقة أنَّ علم ميكانيكا الكمِّ لم يشهد تطوُّرًا يُذكَر منذ جيل الآباء المؤسِّسين، الذي يحتلُّ (نيلز بور) مؤلِّف هذا الكتاب مكانة رفيعة بينهم. ذلك أنَّه منذ سبعينيات القرن العشرين لم يشهد هذا العلم أيَّ طفراتٍ، وبمجرد انتهاء المجتمع العلمي من صياغة النموذج الذري لم يطرأ عليه أيُّ تغييرٍ، حتى مع كل التطور التكنولوجي الذي أدَّى بالضرورة إلى تطوُّر التجريب، فقد صارت التجربة مزيدًا من التأكيد العملي للأفكار النظرية القديمة، سنجد مثلًا أنَّ بوزون (هيجز) قد ظهرت فرضيته في الستينيات لكنَّ اكتشافه عمليًّا تأكَّد بشكلٍ شاحبٍ في 2012.

بينما ظلَّت المشكلات القديمة عالقة إلى الآن من دون حلٍّ حاسمٍ أو عملٍ جاد للإجابة عن أسئلتها، مشكلات مثل القياس الكمومي والتفسير الكمومي للجاذبية والمادة المظلمة في الكون،

وهي مشكلات عمرها الآن يربو على الثمانين عامًا، وإن كان المرء ليعجب كيف أمكن لهذا الجيل أن يصل إلى كل هذه المعرفة بإمكانياتٍ متواضعة مقارنة بتكنولوجيا اليوم، فلعلَّ هذا الكتاب يسرد بعضًا من الزخم الشديد وتضافُر العقول من أجل إنجاز هذا العمل.

تقول (سابين هوسيفيلدير) وهي عالِمة في الفيزياء النظرية وموسيقية وأديبة: «إنَّ المشكلة تكمن في أنَّ الفيزياء تغيَّرت، لكنَّ الفيزيائيين لم يتغيَّروا، فهم يتَّبعون الأساليبَ القديمة نفسها التي تعلَّموا بها»، ولعلَّنا ندرك الآن أهمية المقولة: «إنَّ الأحداث الاستثنائية تحتاج إلى عقولٍ استثنائية».

إنَّ هذا الكتاب هو شهادة (نيلز بور) على عصر الزخم العلمي والمعرفي، فهو كما ذكر نصًّا أنه كان محظوظًا لكي يشهد التعاونَ الرائع بين صفوة العقول العلمية من كل الجنسيات، هذا التعاون الذي أدَّى إلى ظهور الشكل النهائي للنموذج الذري كما نعرفه اليوم.

الأمر الممتع في هذا الكتاب هو الطريقة التي سرد بها نيلز بور هذا التطور بلغة تفصيلية يملؤها الدهشة والحماس.

هذا الكتاب مكونٌ من مجموعة مقالاتٍ كتبها (نيلز بور) عن أحداثٍ مختلفة، ونُشرت في عدة دوريات وجُمِعت في هذا الكتاب تحت عنوان:

Essays 1958–1962 on Atomic Physics and Human Knowledge

لكنَّنا أضفنا إليه مقالًا آخر من الكتاب الأول والأقدم لـ(نيلز بور) المعنون باسمٍ مشابه لهذا الاسم:

Atomic Physics and Human Knowledge

وهو الكتاب الذي حوى مقالاته خلال الفترة (1934-1958)، وتضمَّنت سردًا لمساجلته الشهيرة مع العالِم العظيم ألبرت أينشتاين، والنقاشات التي اتَّخذت أبعادًا حادة فيما يخص فلسفة علم ميكانيكا الكمِّ، وكما نرى سنعرف ما أصل مقولة أينشتاين (إنَّ الله لا يلعب النرد).

والله من وراء القصد

مصطفى العدوي

21/12/2021

التعريف بالمؤلف

أكتوبر 1885 - 18 7) (Niels Henrik David Bohr) :بالدنماركية (نيلز هنريك دافيد بور) فيزيائي دنماركي وُلِد في كوبنهاجن، أسهم بشكلٍ بارزٍ في صياغة نماذج لفَهْم (نوفمبر 1962 البنية الذرية إضافة إلى ميكانيكا الكمّ، وخصوصًا تفسيره الذي ينادي بقبول الطبيعة الاحتمالية التي تطرحها ميكانيكا الكمّ، ويُعرف هذا التفسير بتفسير كوبنهاجن، وسُمِّيَ على اسمه معهد نيلز بور بكوبنهاجن.

كان رئيس لجنة الطاقة الذرية الدنماركية ورئيس معهد كوبنهاجن للعلوم الطبيعية النظرية، حصل على الدكتوراة في الفيزياء عام 1911، ثم سافر إلى كمبريدج حيث أكمل دراسته تحت إشراف العالِم (طومسون) الذي اكتشف الإلكترون، وبعدها انتقل إلى مانشستر ليدرس على يد العالِم (إرنست رذرفورد) مكتشف نواة الذرة، وسرعان ما اهتدى بور إلى نظريته عن بناء الذرة. ففي 1913 نشر بور بحثًا عن تكوين الذرة والجسيمات في المجلة الفلسفية، ويُعتبر هذا البحث من العلامات في علم الفيزياء. أدَّت هذه النظرية إلى إلغاء جميع النظريات التي سبقتها، مما جعل ألبرت أينشتاين يبدي إعجابه بها ووصفها بالتحفة الرياضية، ومن خلال هذه النظرية استطاع بور أن يصوِّر ذرة الهيدروجين.

عام 1920 افتتح معهد الفيزياء النظرية في كوبنهاجن، وعُيِّن بور رئيسًا له فانضمَّ إليه عددٌ من العلماء وأصبح مركزًا للأبحاث الجديدة في الفيزياء. تقدَّم بور بنظريته المعروفة حول التركيب الذري التي استحقَّ عليها جائزة نوبل في الفيزياء عام 1922.

استمرَّ بور في دراسة تركيب نواة الذرة؛ في عام 1930 كان أول من اكتشف أنَّ النظائر المشعَّة التي ظهرت في تفتت النواة هي اليورانيوم 235، مما كان لهذا الاكتشاف أثره الهام بعد ذلك. وعندما احتلَّ الألمان الدنمارك في عام 1940 واجه بور الكثيرَ من الصعوبات حيث إنَّه كان معادٍ للنازية، كما أنَّ أمه كانت يهودية فاضطرَّ إلى الهرب عام 1943 إلى السويد، كما ساعد عددًا كبيرًا من اليهود على الهرب ثم سافر إلى إنجلترا ومنها إلى أمريكا، وهناك ساعد على إنتاج القنبلة الذرية.

عند انتهاء الحرب عاد إلى كوبنهاجن ورأس معهد الفيزياء النظرية، وحاول جاهدًا أن يسيطر على استخدام الطاقة النووية، حتى تُوفي عام 1962.

تزوج بور عام 1912 وأنجب خمسة أولاد، استطاع أحد أولاده (آجي بور) أن يحصل على نوبل في الفيزياء عام 1975.

التعريف بالمترجم

مصطفى أحمد علي العدوي، مهندس كهرباء (مدير إدارة الكهرباء والآلات الدقيقة) بشركة نفط مصرية.

حاصل على درجة الماجستير في الهندسة الكهربائية عام 2016، له عددٌ من الأبحاث في مجالات الهندسة والطاقة، المشرف السابق لفريق الفيزياء والفلك والهندسة بمبادرة أنا أصدِّق العلم، له 200 مقالٍ علميٍ مترجم في مبادرات: أنا أصدِّق العلم/ أخبار العلوم/ الباحثون السوريون/ في العلم، وهو مدقِّق ومترجم بمبادرتيْ أخبار العلوم/ في العلم.

صدر له ثلاثة مؤلفات أدبية: مجموعتان قصصيتان، الأولى بعنوان: «الـ.....» عن الهيئة العامة المصرية للكتاب في عام 2015، والثانية: «مجتمع المتوحدين السري» 2017، وكذلك نُشرت له رواية «وهم كوتارد» الجزائر-2019.

حصل على المركز الأول للقصة القصيرة في مسابقة نقابة المهندسين المصرية 2017، وهو عضوٌ سابقٌ بنادي أدب جامعة المنصورة، وعضوٌ مؤسسٌ لنادي أدب كلية الهندسة جامعة المنصورة.

مقدمة الكتاب

المجلد الحالي، الذي يشكِّل تكملة لمجموعتين سابقتين من المقالات، يحتوي على عددٍ من المقالات كتبها نيلز بور خلال السنوات الخمس الأخيرة من حياتِه. وضع والدي خططَ ظهور المجموعة الحالية منذ بعض الوقت، وكان المنشور ينتظر الانتهاء النهائي من مقالة (الضوء والحياة- إعادة نظر)، نُشِر المجلد مع تضمين المخطوطة غير المكتملة لهذه المقالة.

يمكن القول إنَّ الموضوعَ الرئيس للمقالات الأربعة الأولى هو تفصيلٌ وتطويرٌ إضافي لوجهات النظر العامة الموصوفة في المجموعات السابقة، لذلك قد يكون من المناسب اقتباس المقطع التالي من مقدمة المؤلف الخاصة بالمجلد السابق:

«لا تكمن أهمية العلوم الفيزيائية في تطوير التفكير الفلسفي العام فقط في مساهماتها في زيادة معرفتنا المتزايدة بالطبيعة التي نحن أنفسنا جزءٌ منها، ولكن أيضًا في الفرص التي قدَّمتها أدواتُنا مِرارًا وتكرارًا لفحصها وصقلها. في القرن العشرين كشفت دراسة التركيب الذري للمادة وجودَ قيودٍ غير متوقعة لنطاق الأفكار الفيزيائية الكلاسيكية، وألقت ضوءًا جديدًا على متطلبات التفسير العلمي الذي تضمنته الفلسفة التقليدية. إنَّ مراجعة أساس التطبيق الواضح لمفاهيمنا الأولية، ضرورة لفهم الظواهر الذرية، ولها تأثيرٌ يتجاوز المجال الخاص بالعلوم الفيزيائية».

يصف المقال الأول حالة الملاحظة في فيزياء الكمِّ ومفهوم مبدأ المكاملة. شعر والدي أنه في هذا المقال نجح في صياغة بعض النقاط الأساسية بشكلٍ أكثر وضوحًا وإيجازًا مما كان عليه في مناسباتٍ سابقة.

في المقالة الثانية، تعامَلَ مع مبدأ المكاملة لمشاكل علم النفس وعلم الاجتماع بمزيدٍ من التفصيل، استخدم مقطعًا من رواية دنماركية -كان والدي مولعًا بها جدًّا منذ شبابه- لتوضيح حالة نفسية يكون فيها علاقات مبدأ المكاملة واضحًا.

تناولت الورقتان التاليتان العلاقة بين الفيزياء وعلم الأحياء، التي أثارت اهتمام والدي بشدة على مرِّ السنين، وناقشها لأول مرة في مقالٍ بعنوان (الضوء والحياة) عام 1932، الذي حواه المجلد السابق. لقد شعر أنَّ بعضَ ملاحظاته في ذلك الوقت لم تُفسَّر دائمًا بشكلٍ صحيحٍ، وكان حريصًا على تقديم وصفٍ لآرائه كما تطورت منذ ذلك الحين، لا سيما في ظلِّ تحفيز الاكتشافات الجديدة العظيمة في مجال الجزيئات علم الأحياء الذي تابعه بمثل هذا الحماس.

تطرَّق في المقال الثالث الذي كتبه عام 1960، وكان والدي يأمل في تناول السؤال في ورقة أكثر تفصيلًا بناءً على محاضرة ألقاها في كولونيا في يونيو 1962 بعنوان (الضوء والحياة- إعادة نظر) لكنَّه بعد فترة وجيزة أُصيب بالمرض، وكان في طريقه للتعافي واستئناف العمل على المقال، إلا أنَّه لم يكتمل حيث تُوفي فجأة في 18 نوفمبر 1962.

لقد ترك مخطوطةً كان قد أعدَّها كأساسٍ للمحاضرة في كولونيا، فيها آراؤه حول العلاقة بين الفيزياء والآراء التي تحتويها، ولكن يجب على القارئ أن يضع في اعتباره الطابع الأوَّلي لصياغتها، فيما يتعلَّق ببعض المقاطع التي تحتوي على تعليقاتٍ على مشاكل بيولوجية محددة، خطَّط المؤلف لمراجعاتٍ رئيسة، لذلك حُذِفت هذه المقاطع من النصِّ، ويُشار إلى جوهرها في ملاحظاتٍ مدرجة بحروفٍ صغيرة.

تصف المقالات الثلاثة الأخيرة في المجلد مراحلَ مختلفة في تطوُّر الفيزياء الذرية ونظرية الكمِّ في سياق الذكريات الشخصية بصحبة زملائه كبارًا وصغارًا؛ كان والدي يستمتع بتذكُّر ذكرياته الحية عن الأحداث الدرامية في كثيرٍ من الأحيان المرتبطة بأصل الأفكار الجديدة والتوضيح التدريجي لها. قاده إعداد هذه المقالات، التي كُتبت في مناسباتٍ خاصة مختلفة، إلى دراساتٍ تاريخية مكثَّفة، يكمل بها ذاكرته من خلال مراسلاته الشخصية الثرية من الفترات المذكورة، وكذلك من خلال المصادر المنشورة. امتدَّ العمل على مقالة رذرفورد على مدى عدة سنوات، قابل خلالها عددًا كبيرًا من الزملاء الذين شاركوا في التطورات المعنيَّة. على الرغم من أنَّ هذه الأوراق الثلاث الأخيرة تاريخية في طبيعتها، إلا أنها في الوقت نفسه أعطت والدي الفرصة ليوضِّح -من زوايا جديدة- الآراء العامة التي تشكِّل الموضوع الأساسي للمجموعات الحالية وكذلك المجموعات السابقة من المقالات.

آجي بور

الفصل الأول

الفيزياء الكميَّة والفلسفة

السببيَّة ومبدأ المكاملة

1958

المقال الأول: السببيَّة ومبدأ المكاملة[(1)]:

السببية: في الفيزياء مفهومٌ يوضِّح أنَّه في حال وجود ظاهرة (سبب) يُنتج عنها ظاهرة أخرى (أثر)، فإنَّ وقوع السبب (1 يسبق الأثر (ترتيب زمني)، مبدأ السببية من القيود الواقعية المفروضة على أي نظرية متماسكة رياضيًّا حتى تصبح مقبولة فيزيائيًّا.

المكاملة: في الفيزياء، هي نتيجة نظرية ونتائج تجريبية لميكانيكا الكمِّ، كما يشار إليها أيضًا بمبدأ المكاملة. ويعتقد أنَّ الأشيا لديها بعض الأقران من الخصائص التكميلية التي لا يمكن ملاحظتُها أو قياسُها في وقتٍ واحدٍ. ويعتبر نيلز بور –مؤلف الكتاب- أول من صاغ هذا المبدأ.

لا تقتصر أهمية العلوم الفيزيائية على فلسفة قوامُها زيادة خبراتنا ومعارفنا بالمادة الجامدة فقط، ولكنَّها قبل كل شيء فرصةٌ لاختبار مدى قوة مفاهيمنا الأساسية.

وعلى الرغم من التعديلات التي نجريها على المصطلحات بسبب تراكُم الأدلة التجريبية وتطورات المفاهيم النظرية وكل ما يضاف للتجارب الفيزيائية، فإنَّها في النهاية تعتمد على أسسٍ من اللغة المشتركة، وملاءمتها لتوجُّهات محيطنا، وكذلك لتتبُّع العلاقة الأساسية بين السبب والنتيجة.

لقد كان نموذج جاليليو هو بناء وصف الظواهر الفيزيائية بناءً على كميات قابلة للقياس، وهو ما أصبح أساسًا متينًا للتوسُّع في هذا المجال من التجارِب.

قدَّم نيوتن نموذجَه للميكانيكا، حيث قام بتعريف حالة نظام من المواد بواسطة مواقعها وسرعاتها اللحظية، لقد أثبت أنه من الممكن -من خلال المبادئ البسيطة المعروفة- اشتقاق حالة النظام خلال أي فترة زمنية من خلال معرفة حالة النظام في زمنٍ محددٍ، وكذلك من خلال القوى المؤثِّرة على الجسيمات[(2)] داخل هذا النظام.

(2 يُطلق مفهوم الجسيمات بشكلٍ عامٍ على أي جسم موضع التجربة، من الممكن أن يكون جسيمًا ذريًّا أو كوكبًا في مدارٍ.

وصف هذا النوع الذي يمثِّل بوضوحٍ نموذجًا مثاليًّا لشكلٍ من أشكال (السببية)، معبرًا عنها بمفهوم الحتمية[(3)]، والذي كان بحاجة لنظرة أكثر توسُّعًا.

3) الحتمية Determinism: فرضية فلسفية تقول إنَّ كلَّ حدثٍ في الكون -بما في ذلك إدراك الإنسان وتصرفاته- خاضعٌ لتسلسلٍ منطقيٍّ سببيٍّ محدد سلفًا ضمن سلسلة غير منقطعة من الحوادث التي يؤدي بعضها إلى بعضٍ وفق قوانين محددة.

وبالتالي في حالة حساب ظواهر القوة الكهرومغناطيسية، حيث يؤخذ في الاعتبار حساب انتشار القوى بسرعاتٍ محددة، كان مبدأ الحتمية حاضرًا، ليس فقط في تعريف حالة المادة عن طريق مواقع وسرعات الجسيمات المشحونة، ولكن أيضًا من خلال اتجاه وشدة القوى الكهربائية والمغناطيسية في كل نقطة من الفضاء خلال زمنٍ محددٍ.

لم يتغيَّر الوضعُ في مثل هذه النواحي بشكلٍ أساسيٍّ حتى بعد أن تمَّ الاعتراف بمفهوم (النسبية)، أي من خلال اعتماد وصف الظواهر الفيزيائية من خلال إطارٍ مرجعي يختاره المراقب أو الراصد (الشخص الذي يقوم برصد الظاهرة). نحن هنا مهتمُّون بالتطوُّر المثمِر الذي جعل من الممكن صياغة قوانين فيزيائية مشتركة بين جميع الراصدين، وربط الظواهر التي قد تبدو غير مترابطة.

على الرغم من أنَّ استخدام هذه الصياغة يتم من خلال التجريد الرياضي مثل المقياس اللا إقليدي(4) رباعي الأبعاد(5) فإنَّ التفسير الفيزيائي يعتمد على الفصل المعتاد بين المكان والزمان، ويحافظ على الطابع الحتمي للوصف.

4) الهندسة اللا إقليدية: يعبِّر مصطلح الهندسة اللا إقليدية في علم الرياضيات عن الهندسة الإهليليجية وهندسة القطوع الزائدة، التي هي مقابل الهندسة الإقليدية. الفرق الأساسي بين الهندسة الإقليدية والهندسة اللا إقليدية هو في طبيعة ونقطة I المستقيمات المتوازية؛ حيث تنص مسلَّمة إقليدس الخامسة على أن في المستوى الثنائي الأبعاد من أجل أي مستقيم في هندسة القطع الزائد يوجد عددٌ لا نهائي من I. ولا يتقاطع مع A يوجد مستقيمٌ وحيدٌ يمرُّ من I لا تقع على المستقيم A بينما في الهندسة الإهليليجية فإنَّ المستقيمين المتوازيين يتقاربان ومن ثمَّ، I من دون أن تقطع A المستقيمات التي تمر بـ يتقاطعان.

5) الفضاء رباعي الأبعاد: هو امتدادٌ رياضي لمفهوم الفضاء ثلاثي الأبعاد. الفضاء ثلاثي الأبعاد هو أبسط تجريدٍ ممكنٍ للملاحظة أن المرء يحتاج فقط إلى ثلاثة أرقام، تُسمَّى الأبعاد، لوصف أحجام أو مواقع الأشياء في العالم اليومي.

علاوة على ذلك، كما أكد أينشتاين فإنَّ تنسيق الزمكان بين المراقبين المختلفين لا يعني أبدًا عكس ما يمكن تسميته «التسلسل الزمني للأحداث»، لذا فإن النظرية النسبية لم توسِّع نطاق الرؤية لكنَّها أيضًا عزَّزت أساسيات الحتمية، وهو الصرح المهيب الذي يُشار إليه عمومًا بالفيزياء الكلاسيكية.

لقد بدأتْ حقبة جديدة من علم الفيزياء عندما اكتشف ماكس بلانك مبادئ عمل ميكانيكا الكمِّ، التي كشفت سمةً أساسيةً من سمات المكاملة الكامنة في العمليات التي تحدث داخل الذرَّة، لقد ابتعد كثيرًا عن الأفكار القديمة التي كانت تنصُّ على محدودية انقسام الذرة أو انشطارها.

لقد أصبح واضحًا أنَّ نظريات الفيزياء الكلاسيكية تمثِّل صورة وصفيَّة قابلة للتطبيق فقط في ظروفٍ شديدة المثالية، حيث تكون الأحداث التي نرغب في تحليلِها ضخمةً بشكلٍ لافتٍ بحيث يمكن تجاهل الأثر الكمومي (الأثر الدقيق للجسيمات الذرية)، وبينما يمكن اعتبار هذا الشرط متحققًا على المستوى العادي أو الاعتيادي، فإننا نواجه في الدلائل التجريبية على مستوى الجسيمات الذرية أنواعًا من الأحداث التي لا تتوافق مع التحليل الحتمي، هنا تظهر أهمية القوانين الكمومية حيث يمكنها تفسير الاستقرار والتفاعلات الفريدة للأنظمة الذرية المسؤولة في نهاية المطاف عن خصائص المادة التي تعتمد وسائلنا للرصد والمشاهدة التجريبية عليها.

لذلك واجه الفيزيائيون مشكلة تطوير التعميم العقلاني للفيزياء الكلاسيكية، التي من شأنها أن تسمح بمفهوم المكاملة المتناسق للتفاعلات على المستوى الكمومي. قُدِّم الحل لهذه المعضلة الصعبة، باستخدام الرياضيات المجردة بعد استكشاف أوَّلي للأدلة التجريبية بطرقٍ -نوعًا ما- بدائية، ومن ثمَّ، في الصيغ الرياضية الكمومية، تستبدل الكميات المعتادة التي تعرف حالة النظام الفيزيائي بمؤثريْن رمزيين في المعادلة الرياضية يتبعان خوارزمية غير تبادلية تتضمن ثابت بلانك.

تمنع هذه الطريقة من التجريد الرياضي من أن تكون هذه القيم الرياضية ثابتة بحيث لا تندرج تحت الوصف الحتمي للفيزياء الكلاسيكية، ولكنه يسمح لنا بتحديد توزيعها الطيفي كما يتضح من الأدلة حول العمليات التي تحدث على المستوى الذري. بالتوافق مع الطابع الذي لا يمكن معه وضع تصور للصيغ الرياضية، فقط يمكن تفسيرها الفيزيائي من خلال القوانين الرياضية، من نوع إحصائي أساسًا، فيما يتعلق بالملاحظات التي استنتجت تحت ظروفٍ تجريبية معينة.

على الرغم من قوة ميكانيكا الكمِّ كوسيلة لطلب عددٍ هائلٍ من الأدلة فيما يتعلق بالظواهر الذرية، فإنَّ انحرافها عن المطالب المعتادة للتفسير السببي أدى بطبيعة الحال إلى إثارة السؤال عمَّا إذا كنَّا هنا معنيين بوصفٍ شاملٍ للتجربة. من الواضح أنَّ الإجابة عن هذا السؤال تتطلَّب دراسة أعمق لشروط استخدام المفاهيم الفيزيائية الكلاسيكية في تحليل الظواهر الذرية.

النقطة الحاسمة هي إدراك أنَّ وصف الترتيب التجريبي، وتسجيل الملاحظات يجب أن يتم تقديمُه بلغة واضحة، وصقله بشكلٍ مناسبٍ بواسطة المصطلحات الفيزيائية المعتادة، هذا مطلبٌ منطقيٌّ بسيطٌ، لأنَّ كلمة «تجرِبة» تعني بالضرورة إجراءً يمكننا من خلالِه توصيل ما قمنا به وما تعلَّمناه للآخرين.

في أثناء الترتيب من أجل تجربة فعلية، يتمُّ تأمين تلبية هذه المتطلبات من خلال استخدام – مثلًا- أدوات قياس أجسامٍ صلبة ثقيلة بدرجة كافية للسماح بحسابٍ كلاسيكي تمامًا لمواقعها وسرعاتها النسبية.

في هذا الصدد، من الضروري أيضًا أن نتذكَّر أنَّ جميعَ المعلومات الواضحة المتعلقة بالجسيمات الذرية مشتقة من العلامات الدائمة التي تتركها على أجهزة التجربة، مثال لذلك وجود بقعة على لوحة فوتوغرافية ناتجة عن تأثير إلكترون متروك على الأجسام التي تحدد الظروف التجريبية.

التي (6)(irreversible التي لا يمكن عكسها) بعيدًا عن أي تعقيداتٍ، فإنَّ تضخيم التأثيرات يعتمد عليها تسجيل وجود الجسيمات الذرية تذكِّرنا إلى حدٍّ ما بمبدأ عدم الانعكاس المتأصل في مفهوم الملاحظة ذاته.

(6) في الفيزياء والكيمياء، تكون العملية غير قابلة للانعكاس إذا لم يمكن عكسها irreversible process: العمليات التي لا يمكن إتمامُها في الاتجاه العكسي، مثال على ذلك الكوب الزجاجي الذي يسقط من المائدة وينكسر حيث لا يستعيد من نفسه حالتَه الأولى. وفي الواقع فلم يرَ أحدٌ أنَّ الأجزاء المكسورة من كوبٍ تجمَّعت وقفزت إلى المائدة وأعادت الكوب سليمًا. وكذلك حال البيضة التي تقع من على المائدة، تلك عمليات غير قابلة للانعكاس.

وصف الظواهر الذرية في هذه النواحي له طابعٌ موضوعي تمامًا، بمعنى أنه لا توجد إشارة صريحة إلى أي مراقبٍ فردي، وبالتالي، مع مراعاة مقتضيات النسبية، لا يوجد غموضٌ في توصيل المعلومات.

فيما يتعلَّق بكلِّ هذه النقاط، لا تختلف مشكلة الملاحظة في فيزياء الكمِّ بأي حالٍ عن النهج الفيزيائي الكلاسيكي. السمة الجديدة أساسًا في تحليل الظواهر الكمومية هو إدخال تمييز أساسي بين جهاز القياس والأشياء قيد التحقيق. هذه نتيجة مباشرة لضرورة إجراء الحسابات على وظائف أدوات القياس بمصطلحاتٍ كلاسيكية بحتة، بعيدًا عن أي عملياتٍ تخصُّ التفاعلات الكمومية، بمعنى أنَّ أجهزة القياس أصبحت جزءًا من التجربة، وليست عنصرًا مستقبلًا بذاته.

في حالة الفيزياء الكمومية تتكشَّف السمات الكمومية للظاهرة من خلال الملاحظات حول معلومات الأجسام الذرية. لكن في نطاق الفيزياء الكلاسيكية، يمكن إهمال التفاعُل بين الجسيم (موضوع التجربة) وأجهزة الرصد والقياس أو التعويض عن أثره في التجربة إذا لزم الأمر، أمَّا في فيزياء الكمِّ يشكِّل هذا التفاعُل جزءًا لا يتجزَّأ من الظاهرة (التفاعُل بين الجسيم موضع

التجربة وأجهزة الرصد والقياس)، وطبقًا لذلك، يجب أن تتضمَّن الحسابات الواضحة للظواهر الكمومية المناسبة -من حيث المبدأ- وصفًا لجميع السمات ذات الصلة بترتيبات التجربة.

حقيقة أنَّ تكرار نفس التجرِبة، المحدَّدة في الأسطر الموصوفة، ينتج بشكلٍ عامٍّ تسجيلاتٍ مختلفة تتعلَّق بالجسيم الذي تُجرى عليه التجربة، تعني على الفور أنَّ الحسابات الكلية للتجربة في هذا المجال يجب أن يتم التعبير عنها بواسطة القوانين الإحصائية. نحتاج إلى التأكيد على أننا هنا لسنا معنيين بالانتقادات المعتادة لاستخدام الإحصاء في وصف الأنظمة الفيزيائية للبناء المعقَّد للغاية من أجل جعل (التعريف الكامل للحالة ضروري من أجل الحساب الحتمي) قابلًا (unlimited divisibility الانقسام اللا محدود) للتطبيق العملي. في حالة الظواهر الكمومية، يُستبعد للأحداث من الظروف المحيطة بالتجربة الكمومية (7).

(7) حتى اكتشاف ميكانيكا الكمِّ، لم يظهر التمييز بين مسألة ما إذا كانت المادة unlimited divisibility: الانقسام اللا محدود قابلة للقسمة إلى ما لا نهاية، ومسألة ما إذا كان يمكن تقطيع المادة إلى أجزاءٍ أصغر إلى ما لا نهاية، ونتيجة لذلك، فإنَّ التي تعني حرفيًّا «غير قابل للانقسام»، تُترجم عادةً على أنَّها «غير قابلة للتجزئة»، في حين أنَّ الذرة الحديثة قابلة للقسمة بالفعل. (átomos ἄτομος) الكلمة اليونانية

في الواقع، إنَّ سمة المكاملة النموذجية لأي ظاهرة كمومية يمكن التعبير عنها بشكلٍ منطقيٍّ في تبعات أي محاولة لأي انقساماتٍ كمومية معرفة بدقة، سيحتاج إلى ترتيب التجربة بما لا يتوافق مع تعريف الظاهرة التي يُجرى دراستها تجريبيًّا أو ملاحظتها والتحقُّق منها.

في نطاق الفيزياء الكلاسيكية، يمكن -من حيث المبدأ- التحقُّق من جميع الخصائص المميزة لجسيمٍ معينٍ من خلال ترتيبٍ تجريبيٍّ واحدٍ، على الرغم من أنَّ الترتيبات المختلفة غالبًا ما تكون ملائمة في الممارسة لدراسة الجوانب المختلفة للظواهر. في الواقع، فإنَّ البيانات التي يتم الحصول عليها بهذه الطريقة تكمل بعضُها بعضًا ببساطة، ويمكن دمجُها في صورة متَّسقة لسلوك الجسيم قيد الملاحظة والتجربة. ومع ذلك، في فيزياء الكمِّ، تُظهر الأدلة حول الجسيمات الذرية التي تم الحصول عليها -من خلال ترتيباتٍ تجريبية مختلفة- نوعًا جديدًا من العلاقة التكاملية. في الواقع، يجب الاعتراف بأنَّ مثل هذه الأدلَّة التي تبدو متناقضة عند محاولة الجمع في صورة واحدة، تستنفد كلَّ المعرفة التي يمكن تصوُّرها حول هذا الجسيم. بعيدًا عن تقييد جهودنا في طرح الأسئلة عن طبيعة شكل التجربة، إنَّ مفهوم المكاملة يميز ببساطة الإجابات التي يمكن أن نتلقاها من خلال هذا التحقيق والبحث، عندما يشكِّل التفاعل بين أدوات القياس والجسيمات جزءًا لا يتجزَّأ من الظاهرة الكمومية موضع الدراسة.

على الرغم من أنَّ الوصف الكلاسيكي للترتيبات التجريبية وعدم قابلية التسجيلات المتعلقة بالأجسام الذرية للانعكاس يضمن تسلسلَ السبب والنتيجة المطابق للمطالب الأولية للسببية، فإنَّ التخلي النهائي عن المثالية الحتمية يُعد تعبيرًا صارخًا في علاقة المكاملة التي تحكم الاستخدام الواضح للمفاهيم الأساسية التي يرتكز تركيبُها غير المقيد للوصف الفيزيائي الكلاسيكي عليها. محدودٍ time-space في الواقع، يتطلَّب التحقُّق من وجود جسيمٍ ذريٍّ في مجال الزمن والتموضع ترتيبًا تجريبيًّا يتضمَّن نقل الزخم أو القوة الدافعة والطاقة إلى أجسام أجهزة القياس مثل المقاييس الثابتة والساعات المتزامنة، التي لا يمكن تضمينها في التجربة من خلال وصفِ أدائها، إذا كانت هذه الأشياء ستؤدي دورَ تحديد الإطار المرجعي للتجربة. على العكس من ذلك، فإنَّ أي تطبيقٍ صارمٍ لقوانين الحفاظ على القوى الدافعة والطاقة المستخدمة في التجربة على العمليات الذرية يعني -من حيث المبدأ- التخلي عن الوصف التفصيلي للزمن والتموضع الخاص بالجسيمات.

تجد هذه الظروف تعبيرًا كميًّا في مبدأ عدم التأكُّد لهايزنبرج(8) والذي يحدد السقف الذي تتحرك تحته ميكانيكا الكم في المتغيرات الحركية والديناميكية المطلوبة لتعريف حالة النظام في الميكانيكا الكلاسيكية.

(8) يُعتبر مبدأ عدم التأكُّد من أهم المبادئ في نظرية الكمِّ بعد أن صاغه العالم الألماني هايزنبرج عام 1927، وينصُّ هذا المبدأ على أنه لا يمكن تحديد خاصيتين مقاستين من خواص جملة كمومية إلا ضمن حدودٍ معينة من الدقة، أي أنَّ تحديد إحدى الخاصيتين بدقة متناهية (ذات عدم تأكُّد ضئيل) يستتبع عدم تأكُّد كبير في قياس الخاصية الأخرى، ويشيع تطبيق هذا المبدأ بكثرة على خاصيتي تحديد المكان أو الموضع والسرعة لجسيم أولي. فهذا المبدأ معناه أن الإنسان ليس قادرًا على معرفة كل شيء بدقة 100%، ولا يمكنه قياس كلِّ شيء بدقة 100%، إنما هناك قدرٌ لا يعرفه ولا يستطيع قياسه. وهذه الحقيقة الطبيعية تخضع لمعادلة يتحكم فيها ثابت بلانك.

في الواقع، فإنَّ القابلية المحدودة للتبديل بين الرموز التي يتم من خلالها تمثيل هذه المتغيرات في الصيغة الرياضية الكمومية تتوافق مع الاستبعاد المتبادل للترتيبات التجريبية المطلوبة لتعريفها الواضح.

في هذا السياق، نحن بالطبع لسنا معنيين بدقة القياسات، ولكن مع تقييد التطبيق المحدد بدقة لمفاهيم الزمن والتموضع وقوانين الحفظ الديناميكي(9)، الذي يستلزمه التمييز الضروري بين أدوات القياس والجسيمات الذرية.

(9) قوانين الحفظ الديناميكي: في الفيزياء، قانون الحفظ أو قانون الانحفاظ هو القانون الذي ينصُّ على أن أي خاصية خاضعة للقياس، معينة لنظام فيزيائي معزول تبقى ثابتة طالما لم يتأثر هذا النظام بغيره.

في معالجة المشكلات الذرية، تُجرى الحسابات الفعلية بشكلٍ ملائم بمساعدة دالة الحالة(10) لشرودنجر، التي يمكن من خلالها استنتاج القوانين الإحصائية التي تحكم الملاحظات التي يمكن الحصول عليها في ظل ظروفٍ محددة من خلال عمليات رياضية محددة. ومع ذلك، يجب الاعتراف بأننا نتعامل هنا مع إجراءٍ رمزيٍ بحت، يتطلَّب التفسير الفيزيائي الواضح له في النهاية إشارة إلى ترتيبٍ تجريبيٍ كاملٍ. يؤدي تجاهل هذه النقطة في بعض الأحيان إلى الارتباك، إنَّ استخدام عبارات مثل «اضطراب الظواهر بسبب الملاحظة»(11) أو «إكساب سمات فيزيائية للجسيمات عن طريق القياسات» يصبح متوافقًا بالكاد مع اللغة الشائعة والتعريف العملي.

(10) دالة الحالة في الديناميكا الحرارية والفيزياء، هي إحدى خواص النظام التي تعتمد فقط على حالة النظام، ولا تعتمد على مسيرة النظام حتى وصل إلى تلك الحالة، مثل الطاقة الداخلية للنظام ودرجة الحرارة والحجم والضغط والكتلة والكثافة ومغناطيسية النظام، كل تلك هي قيمٌ لحالة النظام، حيث تصف حالة توازن حراري لنظام من الديناميكا الحرارية بصرف النظر عن كيفية وصول النظام إلى تلك الحالة.

معادلة شرودنجر في ميكانيكا الكم: عبارة عن معادلة تفاضلية جزئية تصف كيفية تغيُّر الحالة الكمية لنظامٍ فيزيائي مع الزمن وقد صاغها عالم الفيزياء النمساوي إرفين شرودنجر في أواخر عام 1925 ونشرها عام 1926. تصف هذه المعادلة حالات النظم الكمومية المعتمدة على الزمن، وتحتل هذه المعادلة أهمية خاصة في ميكانيكا الكمِّ حيث إنها تكافئ قانون الحركة الثاني لنيوتن في الفيزياء الكلاسيكية.

(11) في الفيزياء، تأثير الملاحظة: هو نظرية تنصُّ على أنَّ مراقبة ظاهرة معينة تغيِّر حتمًا من تلك الظاهرة، وهذا غالبًا ما يكون نتيجة الأدوات التي تغيِّر حالة ما تقيسه بطريقة ما. مثال شائع هو فحص الضغط في إطارات السيارات، فمن الصعب القيام بذلك من دون ترك بعض الهواء خارجًا، وبالتالي تغيير الضغط.

في هذا الصدد، طُرِح السؤال حول ما إذا كان اللجوء إلى «المنطق متعدد القيم»(12) ضروريًّا لتمثيل هذا (الموقف) بشكلٍ أكثر ملاءمة. من الحجة السابقة، سيظهر أنَّ جميعَ حالات الخروج عن اللغة المشتركة والمنطق العادي يتم تجنُّبها تمامًا عن طريق الاحتفاظ بكلمة «ظاهرة» للإشارة فقط إلى المعلومات القابلة للإبلاغ بشكلٍ لا لبسَ فيه، والتي يتم عند حسابها استخدام كلمة «قياس» في المعنى البسيط للمقارنة الموحدة. هذا الحذر في اختيار المصطلحات مهمٌّ بشكلٍ خاصٍّ في استكشاف آفاقٍ جديدة للتجربة، حيث لا يمكن فهم المعلومات في الإطار المألوف الذي وُجِد فيه مثل هذا التطبيق غير المقيد في الفيزياء الكلاسيكية.

(12) المنطق متعدد القيم: هو حساب افتراضي يحتوي على أكثر من قيمتين للحقيقة. في حساب أرسطو المنطقي التقليدي هناك (n) قيمتان محتملتان (أي «صواب» و«خطأ») لأي اقتراح. يمكن توسيع المنطق الكلاسيكي ذي القيمتين إلى منطق عدد أكبر من 2، قد تكون ثلاثية القيم (التي تقبل القيم: «صحيح» و«خطأ» و«غير معروف»)، يمكن إيجاد مثال للقيمة (n) حيث المحدودة (القيم المتعددة المحدودة) بأكثر من ثلاث قيم، والقيمة اللا نهائية (القيم المتعددة اللا محدودة) في المنطق الضبابي fuzzy logic - ومنطق الاحتمالات probability logic-.

في ضوء ما سبق، يمكن أن يُنظَر إلى ميكانيكا الكمِّ على أنَّها تلبي جميعَ متطلبات التفسير المنطقي فيما يتعلَّق بالاتساق والمكاملة. وبالتالي، فإنَّ التركيز على نتائج التجربة المسجلة الدائمة في ظلِّ ظروفٍ تجريبية محددة جيدًا كأساسٍ لتفسيرٍ متسقٍ للصيغ الرياضية الكمومية التي تتوافق مع الفرضيات المتضمنة في الحساب المادي الكلاسيكي، يؤدي إلى أنَّ كلَّ خطوة من التسلسل السببي للأحداث تسمح -من حيث المبدأ- بالتحقُّق، علاوة على ذلك، يتم توفير اكتمال وصف مثل ذلك الهدف في الفيزياء الكلاسيكية من خلال إمكانية أخذ كل ترتيب تجريبي يمكن تصوره في الاعتبار.

لا تعني هذه الحجة بالطبع أنه في الفيزياء الذرية ليس لدينا المزيدُ لنتعلَّمه فيما يتعلَّق بالأدلة التجريبية والأدوات الرياضية المناسبة لفهمها، في الواقع، يبدو من المرجح أنَّ إدخال المزيد من التجريدات في الصيغ الرياضية سيكون مطلوبًا لتفسير السمات الجديدة التي تمَّ اكتشافُها خلال العمليات الذرية ذات الطاقة العالية جدًّا. مع ذلك، فإنَّ النقطة الحاسمة هي أنه في هذا الصدد لا يوجد سبيلٌ للعودة إلى نمط الوصف الذي يفي إلى درجة أعلى بالمتطلبات المعتادة للتمثيل التصويري للعلاقة بين السبب والنتيجة.

في الحقيقة، إنَّ الانتظام والدقة الكمومية تستبعد تحليل متطلبات منطق الفيزياء الكلاسيكية، كما رأينا داخل التجربة تمييزًا منطقيًّا بين أدوات القياس والجسيمات الذرية، الذي يمنع -من حيث المبدأ- الوصف الحتمي الشامل. تلخيصًا، يمكن التأكيد على أنَّه بعيدًا عن أي تخلٍّ ملزمٍ عن نموذج السببية، فإنَّ الإطار الأوسع للمكاملة يعبِّر مباشرة عن موقفِنا فيما يتعلق بحساب الخصائص الأساسية للمادة المفترضة مسبقًا في الوصف المادي الكلاسيكي، ولكن خارج نطاقها.

على الرغم من كل الاختلاف في (المواقف النموذجية) التي تنطبق عليها مفاهيم النسبية والمكاملة، فإنها تقدم في النواحي المعرفية أوجه تشابه بعيدة المدى. في الواقع، نحن مهتمون في كلتا الحالتين باستكشاف التناغمات التي لا يمكن فهمُها من خلال المفاهيم التصويرية التي تم تكييفها مع حساب آفاقٍ أكثر محدودية من التجربة الفيزيائية. ومع ذلك، فإنَّ النقطة الحاسمة هي أنَّه في كلتا الحالتين لا يتضمن التوسيع المناسب لإطار فهمنا أيَّ اهتمامٍ لموضوع الرصد التجريبي، مما يعيق التواصُل الواضح للتجربة. تجادل فكرة النسبية بأن يتم تأمين الموضوعية من خلال اعتبار وصف الظواهر يعتمد على مرجعية مراقب التجربة، بينما في المكاملة يتم تجنُّب

فكرة الذاتية من خلال الاهتمام المناسب بالظروف المطلوبة للتجربة، ومن خلال ضبط محدد جيدًا للمفاهيم الفيزيائية الأولية.

في المنظور الفلسفي العام، من المهم، فيما يتعلَّق بالتحليل والتراكب في مجالات المعرفة الأخرى، إننا نواجه مواقف تذكِّرنا بالوضع في فيزياء الكمِّ، ذلك أنَّ تكامُل الكائنات الحية وخصائص الوعي لدى الأفراد والثقافات البشرية تقدِّم سمات الكمال، التي تشير إلى نمطٍ نموذجي الوصف من خلال فلسفة المكاملة.

إنَّه وبسبب الاستخدام المتنوع للمفردات الغنية المتاحة لتوصيل التجربة من خلال أوسع المجالات، وكذلك بسبب التفسيرات المتعددة في الأدبيات الفلسفية لمفهوم السببية- فقد أسيء فَهْم الهدف من مثل هذه المقارنات في بعض الأحيان، ومع ذلك، فإنَّ التطوير التدريجي لاستخدام المصطلحات المناسبة بشكلٍ أبسط في العلوم الفيزيائية يشير إلى أننا لا نتعامل مع تشابهاتٍ لغوية غامضة إلى حدٍّ ما، ولكن مع أمثلة واضحة للعلاقات المنطقية، التي يتم تلبيتُها على نطاق مجالاتٍ أوسع في سياقاتٍ مختلفة.

الفصل الثاني
وحدة المعرفة الإنسانية
1960

المقال الثاني: وحدة المعرفة الإنسانية:

المسألة المُشار إليها في هذا العنوان قديمة قِدم الحضارة نفسها، لكنَّها اكتسبتْ اهتمامًا متجددًا في أيامِنا هذه مع تزايُد التخصُّص في الدراسات والأنشطة الاجتماعية. على عدة أصعدة، يُعَبَّر عن القلق بالارتباك المتزايد الناجم عن التشعبات الواضحة التي اتَّبعها علماء الإنسانيات تحديدًا والعلماء بشكلٍ عامٍ لمشاكل الإنسان، وفي هذا الصدد كان هناك حديثٌ عن الصدع الثقافي في المجتمع الحديث، ومع ذلك، يجب ألَّا ننسى أنَّنا نعيش في زمانٍ يشهد تطوراتٍ سريعة في العديد من مجالات المعرفة، تعيد إلى ذاكرتنا بكثيرٍ من الإجلال عصر النهضة الأوروبية.

وإذا بدا أنَّ التحرُّر من وجهة نظر القرون الوسطى الحاكمة للعالم احتاج إلى جهادٍ كبيرٍ في ذلك الوقت، فإنَّ ثمارَ ما يُسمَّى بالثورة العلمية هي بالتأكيد الآن جزءٌ من الخلفية الثقافية المشتركة. في قرننا هذا (القرن العشرين)، لم يؤدِّ التقدُّم الهائل في العلوم إلى تقدُّم التكنولوجيا والطب بشكلٍ كبيرٍ فحسب، بل أعطانا في الوقت نفسه درسًا غير متوقعٍ عن مكانتنا كمراقبين لتلك الطبيعة التي نحن جزءٌ منها. بعيدًا عن الانشقاق بين العلوم الإنسانية والعلوم الفيزيائية، فإنَّ هذا التطور يستلزم رسالة ذات أهمية لموقفِنا من المشكلات الإنسانية المشتركة، والتي -كما سأحاول إظهارها- أعطتْ المسألة القديمة لوحدة المعرفة منظورًا جديدًا.

إنَّ السعي وراء البحث العلمي بهدف زيادة وتنظيم تجرِبتنا في العالم من حولِنا عبر العصور أثبت نجاعته، ليس أقلُّها التقدُّم المستمر للتكنولوجيا التي غيَّرت إلى حدٍّ كبيرٍ تفاصيلَ حياتنا اليومية. سنجد أنَّ التطورات المبكرة في علم الفلك وعلم تقسيم الأرض والمساحة التطبيقية والمعادن في مصر وبلاد ما بين النهرين والهند والصين كانت موجَّهة في المقام الأول لخدمة متطلبات المجتمع، إلا أننا في اليونان القديمة نلتقي للمرة الأولى بمحاولات منهجية لتوضيح المبادئ الأساسية لوصف وترتيب المعرفة.

إنَّنا معجبون بعلماء الرياضيات اليونانيين على وجه الخصوص، الذين وضعوا في كثيرٍ من النواحي الأساسَ الراسخَ الذي بنتْ عليه الأجيال اللاحقة. بالنسبة إلى موضوعنا، فمن المهم

إدراك أنَّ تعريف الرموز والعمليات الرياضية يعتمد على الاستخدام المنطقي البسيط للغة الشائعة. في ضوء العزلة الواضحة للتجريدات الرياضية، الذي غالبًا ما يخيف الدوائر الأوسع نطاقًا، يمكن ملاحظة أنَّه حتى التدريب الرياضي الأساسي يسمح لتلاميذ المدارس برؤية التناقض الشهير للسباق بين أخيل والسلحفاة(13). كيف لا يمكن للبطل ذي الأقدام الأسطورية اللحاق بالزواحف البطيئة وتجاوزها إذا حدث له أصغر عائقٍ؟ في الواقع، عند وصول أخيل إلى نقطة بداية السلحفاة، وجد أنَّها انتقلت إلى نقطة أخرى على طول مسار السباق، وسيتكرر هذا الموقف في تسلسلٍ لا نهائيٍّ. لا أحتاج إلى تذكيرك بأنَّ التحليل المنطقي لمواقف من هذا النوع كان يلعب دورًا مهمًّا في تطوير المفاهيم والأساليب الرياضية.

(13) مفارقات زينون: أراد زينون أن يدرِّب نفسه على الضلال والمشاكسة، وأن يسلي شبابه في الوقت نفسه، فألَّف كتابًا في المتناقضات بقي تسعٌ منها، من ضمنها متناقضات الحركة.

في سباقٍ، يستحيل على أسرع راكضٍ أن يتعدَّى الأبطأ، إذ إنَّ اللاحق يجب عليه أولًا أن يصل إلى النقطة التي يبدأ منها السابق، ولذلك فالأبطأ يحتفظ دومًا بأسبقية الفوز».

أولى هذه المتناقضات كما قال زينون إنَّ الجسم لكي يتحرك إلى نقطة (أ) لا بُدَّ أن يصل إلى (ب) وهي منتصف طريقه إلى (أ) ولكي يصل إلى (ب) يجب أن يصل أولًا إلى (ج) منتصف طريقه إلى (ب)، وهكذا إلى ما لا نهاية. وإذ كانت هذه السلسلة التي لا نهاية لها من الحركات تتطلب قدرًا لا نهاية له من الزمن، فإنَّ تحرُّك أي جسمٍ إلى أي نقطة في زمنٍ محددٍ أمرٌ مستحيلٌ.

منذ البداية، كان استخدام الرياضيات ضروريًّا لتقدُّم العلوم الفيزيائية. من ناحية، الهندسة الإقليدية كانت كافية لتوضيح أرخميدس للمشاكل الأساسية للتوازن الساكن، من ناحية أخرى فإنَّ الوصفَ التفصيلي لحركة الأجسام المادية يتطلَّب تطوير حساب التفاضل والتكامل المتناهي الصغر الذي يقوم عليه الصرح الضخم لميكانيكا نيوتن. قبل كل شيء، أثَّر تفسير الحركة المدارية للكواكب في نظامنا الشمسي -بناءً على مبادئ ميكانيكية بسيطة والقانون الكوني للجاذبية- بعمقٍ في الموقف الفلسفي العام في القرون التالية، وعزَّز وجهة النظر القائلة بأنَّ المكان والزمان مثلهما كالسبب والنتيجة يمكن اعتبارهما أساسًا أوليًّا للمعرفة الكلية.

ومع ذلك، فقد استلزم امتداد التجربة الفيزيائية في أيامنا هذه مراجعة جذرية للأساس الواضح لمفاهيمنا الأساسية، مما غيَّر موقفنا من هدف العلوم الفيزيائية. بالطبع، من وجهة نظرنا الحالية، لا يجب اعتبار الفيزياء دراسة لشيء بديهيٍّ بقدرٍ ما، ولكن بالأحرى يجب تطوير طرق لتنظيم وفحص التجربة البشرية. في هذا الصدد، يجب أن تكون مهمتنا هي تفسير مثل هذه التجربة بطريقة منفصلة عن الحكم الذاتي الفردي، وبالتالي أن يكون هذا التفسير موضوعيًّا، بمعنى إمكانية توصيله بشكلٍ لا لبس فيه في اللغة البشرية المشتركة.

بالنسبة إلى مفاهيم المكان والزمان التي ظهرت في الاستخدام البدائي الشائع للكلمات، يجب أن نتذكر مدى أهمية سرعة انتشار الضوء الهائلة، مقارنة بسرعات الأجسام (الجسيمات) المحيطة بنا في ظروفنا العادية.

ومع ذلك، فإنَّ المفاجأة أثبتتْ أنَّه من المستحيل، حتى من خلال أكثر القياسات دقة، التأكُّد في التجارِب المعملية من أي تأثيرٍ للحركة المدارية للأرض حول الشمس على سرعة الضوء، وكشفتْ أنَّ (شكل الأجسام الصلبة والمسافات المتبادلة بينهما) يمكن إدراكُها بشكلٍ مختلفٍ من قِبَل المراقبين الذين يتحركون بسرعة كبيرة بالنسبة إلى بعضهم. وحتى الأحداث، التي يمكن اعتبارها من وجهة نظر مراقبٍ ما أنها متزامنة، يمكن اعتبارُها تحدث في لحظاتٍ مختلفة من وجهة نظر مراقبٍ آخر. بعيدًا عن التعقيدات، فإنَّ الاعتراف بمدى اعتماد عددٍ من التجارب الفيزيائية على وجهة نظر المراقب أثبت أنَّه الأكثر نجاعة في تتبُّع القوانين الأساسية الصحيحة بالنسبة إلى جميع المراقبين.

في الواقع، فإنَّ أينشتاين -من خلال النظرية النسبية العامة- تخلَّى عن كل أفكار المكان والزمان بشكلهما المطلق، مما أعطى عالمنا صورة أكثر وحدة وانسجامًا مما يفوق أحلامنا السابقة، فقد قدَّم درسًا مفيدًا بلغة بسيطة ومتسقة. وعلى الرغم من أنَّ الصياغة الملائمة للنظرية تتضمن تجريداتٍ رياضية باعتبارها هندسة رباعية الأبعاد غير إقليدية، فإنَّ تفسيرها الفيزيائي يعتمد بشكلٍ أساسيٍّ على قدرة كلِّ مراقبٍ على الحفاظ على فصلٍ حادٍّ في فحص ووصف المكان والزمان بشكلٍ يمكن لأي مراقبٍ آخر -في سياقه الشخصي- أن يصف وينسق التجربة عن طريق اللغة المشتركة.

الجوانب الأساسية الجديدة لمشكلة المراقب، بما في ذلك مراجعة الأساس نفسه لتحليل الظواهر من حيث السبب والنتيجة، كان من المقرر الكشفُ عنها من خلال التطور الذي بدأه اكتشاف بلانك للثابت الكوني الكمومي(14) في السنة الأولى من القرن العشرين. في الواقع، أثبت هذا الاكتشاف ما يلي: أنَّ التوسُّع في تطبيق مفاهيم الفيزياء الكلاسيكية سيؤدي في حالة المقاييس الصغيرة لميكانيكا الكمِّ إلى إهمال التفاعلات الكمومية تمامًا. مع ذلك، في العمليات الذرية نجد انسجامًا من نوعٍ جديدٍ، يتحدَّى الوصف التصويري القائم على السببية، ولكنَّه مع ذلك مسؤولٌ عن استقرار الأنظمة الذرية التي تعتمد عليها جميعُ خصائص المادة في نهاية المطاف.

ثابت بلانك هو ثابتٌ فيزيائي، وهو يُستخدم لوصف الكوانتا «أصغر مقدار للطاقة»، فهو بذلك يلعب الدور الرئيس في (14) ميكانيكا الكم. ثابت بلانك هو عبارة عن أصغر وحدة للطاقة (الجول) مضروبة بوحدة الزمن (ثانية)، وبالتالي يمثِّل ثابت بلانك وحدة شغل أو وحدة قدرة (جول.ثانية). وهو يمثِّل أصغر وحدة للشغل في الكون، أي لا يوجد ما هو أقل منها، وهي تلعب دورًا أساسيًّا في السلوك الفيزيائي للمادة والطاقة، وتعتبر من لبنات خلق الكون، مثل الجاذبية والشحنة الأساسية وسرعة الضوء وغيرها.

في هذا المجال الجديد من الخبرة، الذي فتحته التحسينات الحديثة لفن التجارب الفيزيائية، واجهنا العديد من المفاجآت العظيمة، وحتى واجهنا مشكلة في نوعية الإجابات التي يمكن أن نتلقاها إذا ما طرحنا الأسئلة عن الطبيعة في شكل تجارب. في الواقع، في التجربة العادية من المسلَّم به أنَّ الموضوع قيد التحقيق لا تتدخل فيه المراقبة.

مثلا عندما ننظر إلى القمر من خلال التلسكوب، فإننا نتلقَّى ضوءًا من الشمس ينعكس من سطح القمر، لكنَّ الضوء المنعكس هذا أضعف بكثيرٍ من أن يكون له أي تأثيرٍ على موضع وسرعة جسمٍ ثقيلٍ مثل قمر. لكن إذا كان علينا التعامُل مع الأنظمة الذرية، التي يتم تحديد تكوينها وردود أفعالها بناءً على التأثير الخارجي للفعل الكمومي، فنحن في وضعٍ مختلفٍ تمامًا.

في مواجهة السؤال حول كيف يمكننا في ظل هذه الظروف تحقيق وصفٍ موضوعي، من الأهمية بمكان أن ندرك أنَّه مهما تجاوزت الظواهرُ نطاقَ التجربة العادية، يجب أن يستند وصف الترتيب التجريبي وتسجيل الملاحظات إلى لغة شائعة مشتركة. في التجارِب الفعلية، يُلبَّى هذا المطلب من خلال مواصفاتٍ وظروفٍ تجريبية من خلال استخدام الأجسام الثقيلة مثل الأغشية ولوحات التصوير، التي يمكن حسابها بدقة في الفيزياء الكلاسيكية، لكن في هذه الظروف يستبعد أي حساب منفصل للتفاعل بين أدوات القياس والأجسام الذرية قيد التحقيق.

يمنع هذا الموقف على وجه الخصوص الجمع غير المحدود بين إحداثيات المكان والزمان من جهة وقوانين الحفاظ على القوة الدافعة (الزخم) والطاقة من ناحية أخرى التي يعتمد عليها الوصف التصويري السببي للفيزياء الكلاسيكية. وبالتالي، فإن الترتيب التجريبي الذي يهدف إلى التأكُّد من مكان وجود الجسيم الذري تم التحكم في موضعه في وقتٍ معينٍ سيُحدَّد في لحظة لاحقة، يعني ضمنًا نقل القوة الدافعة والطاقة إلى المقاييس الثابتة والساعات الضرورية التي تنظم التجربة. على العكس من ذلك، فإنَّ أي استخدامٍ لترتيب مناسب لدراسة القوة الدافعة (الزخم) وتوازن الطاقة -الحاسم لحساب الخصائص الأساسية للأنظمة الذرية- يعني التخلي عن الإحداثيات المفصلة للزمان والمكان للجسيمات التي تخضع لها التجربة.

في ظل هذه الظروف، ليس من المستغرب أنَّه مع الترتيب التجريبي نفسه، قد نحصل على تسجيلاتٍ مختلفة تتوافق مع مختلف التفاعلات الكمومية الفردية التي لا يمكن إعطاء سوى حسابٍ إحصائي لها. وبالمثل، يجب أن نكون مستعدين لأنَّ الأدلة التي نحصل عليها من خلال ترتيباتٍ تجريبية مختلفة قد تظهر تباينًا غير مسبوقٍ وحتى للوهلة الأولى تبدو متناقضة.

في هذه الحالة، يتطلَّب الأمرُ أن نستخدم مفهوم المكاملة لتوفير إطارٍ واسعٍ بما يكفي لاحتضان القواعد الأساسية للطبيعة التي لا يمكن فهمُها في صورة واحدة. في الواقع، إنَّ الأدلة التي يمكن الحصول عليها في ظلِّ ظروفٍ تجريبية محدَّدة جيدًا -والتي يتم التعبير عنها من خلال الاستخدام المناسب للمفاهيم الفيزيائية الأولية- تستنفد في مجملِها جميعَ المعلومات حول الأجسام الذرية التي يمكن توصيلها بلغة مشتركة.

لقد أصبح من الممكن تقديم حسابٍ مفصَّلٍ حول حدود مبدأ المكاملة لمجالٍ جديدٍ واسعٍ من التجربة من خلال الإنشاء التدريجي للصيغة الرياضية، والمعروفة باسم ميكانيكا الكمِّ، حيث تُستبدل الكميات الفيزيائية الأولية بمشغلين (مؤثرين)(15) رمزيين يخضعان لخوارزمية محددة، بما في ذلك الإجراءات الكمومية، ويعكس عدم القابلية للتبديل التي تخضع لها عمليات القياس المقابلة.

(15) operator: في الرياضيات، المؤثِّر أو المشغِّل هو دالة تقوم بإنجاز نوعٍ من العمليات على دالة أخرى، مثلًا مؤثِّر التفاضُل، عندما يوضع قبل تابعٍ قابلٍ للمفاضلة f(t، فهذا يعني أنَّ هذا التابع تجب مفاضلته بالنسبة إلى المتغير t.

فقط من خلال التعامُل مع الفعل الكمومي كعنصرٍ يتجنَّب التفسير المألوف -مشابه لدور سرعة الضوء في نظرية النسبية كسرعة قصوى للإشارات- يمكن اعتبار هذه الشكلية بمثابة تعميمٍ عقلاني لإطار مفاهيم الفيزياء الكلاسيكية. ومع ذلك، بالنسبة إلى موضوعنا، فإنَّ النقطة الحاسمة هي أنَّ المحتوى المادي لميكانيكا الكمِّ قد استُنفِد بسبب قدرته على صياغة قوانين إحصائية تحكم الملاحظات التي تمَّ الحصول عليها في ظلِّ ظروفٍ محددة بلغة واضحة.

حقيقة أنه في الفيزياء الذرية، حيث نهتم بالقواعد المنظمة بدقة غير مسبوقة، لا يمكن تحقيق الوصف الموضوعي إلا من خلال استخدام إشارة واضحة في حساب الظواهر إلى ظروف التجربة، وتؤكد بطريقة جديدة عدمَ الفصل بين المعرفة وتمكننا من التحقيق. نحن هنا مهتمون بدرسٍ معرفيٍّ عامٍّ يسلِّط الضوءَ على مكانتنا في العديد من المجالات الأخرى التي تهمُّ الإنسان.

بشكلٍ دقيقٍ، لطالما كانت شروط التحليل والتركيب لِمَا يُسمَّى بالخبرات النفسية مشكلة مهمة في الفلسفة؛ من الواضح أنَّ كلماتٍ مثل الأفكار والمشاعر، التي تشير إلى التجارب الحصرية المتبادلة، قد استخدمت منذ أصل اللغة بطريقة نموذجية لتحقيق مبدأ المكاملة.

في هذا السياق يتطلَّب فصلُ الموضوع عن الهدف اهتمامًا خاصًّا، كلُّ اتصالٍ لا لبْسَ فيه حول حالة ونشاط أذهاننا يعني، بالطبع، الفصل بين محتوى وعينا والخلفية التي يُشار إليها بشكلٍ فضفاضٍ باسم «أنفسنا»، ولكن أي محاولة لوصفٍ شاملٍ لثراء الحياة الواعية يتطلَّب -في مختلف المواقف- وضعَ خطٍّ واضحٍ للفصل بين الموضوع والهدف.

من أجل توضيح هذه النقطة المهمة، سأسمح لنفسي بالاستشهاد بالشاعر والفيلسوف الدنماركي، بول مارتن مولر، الذي ترك رواية غير مكتملة لا تزال تُقرأ بفرحٍ من قِبَل الجيل الأكبر وكذلك الجيل الأصغر في هذا البلد(16).

16) بول مارتن مولر Poul Martin Møller:1794 هو فيلسوفٌ ومترجمٌ وكاتبٌ وشاعرٌ دنماركي، وُلِد في 21 مارس في كاليمدور، وتُوفي في 13 مارس 1838 في كوبنهاجن في الدنمارك.
يجدر الإشارة أنَّ نيلز بور دنماركي من كوبنهاج.

في روايتِه، التي تحمل عنوان «مغامرات طالب دنماركي»، يقدِّم المؤلف سردًا حيويًّا وإيحائيًّا بشكلٍ ملحوظٍ للتفاعل بين الجوانب المختلفة لموقفنا، مضاءً بالمناقشات داخل دائرة من الطلاب ذوي الشخصيات المختلفة والمواقف المتباينة للحياة. سأشير على وجه الخصوص إلى محادثة بين اثنين من أبناء العمومة، أحدهما عقلانيٌّ للغاية في المواقف العملية، من النوع الذي كان معروفًا في ذلك الوقت وحتى الآن بين الطلاب على أنَّه غيرُ مثقفٍ، بينما الآخر مدمن للتأمُّلات الفلسفية البعيدة الضارة بعلاقاته الاجتماعية. عندما يوبِّخ العملي ابنَ عمه الفيلسوف لأنَّه لم يتخذ قراره في استغلال الفرص في العثور على وظيفة عملية، التي قدَّمها إليه أصدقاؤه بلطفٍ، يعتذر الفيلسوف الفقير بصدقٍ، لكنه يشرح الصعوبات التي جلبتها له أفكاره.

يقول: أسئلتي التي لا تنتهي تجعل من المستحيل بالنسبة إليَّ تحقيق أي شيء.

علاوة على ذلك، أتأمَّل في أفكاري الخاصة الموقف الذي أجد نفسي فيه، حتى إنَّني أعتقد» أنَّني أفكر في فكرتي، وأقسِّم نفسي إلى تسلسلٍ لا نهائي من الـ«أنا» كلٌّ منَّا يفكر بعضنا في بعضٍ، لا أعرف عند أي «أنا» أتوقَّف باعتباره الحقيقي، وفي اللحظة التي أتوقَّف عندها أجد

بالفعل «أنا» أخرى عندها. أُصبح مرتبكًا، وأشعر بالدوار كما لو كنتُ أنظر إلى هاوية لا نهاية لها، وتؤدي بي أفكاري في النهاية إلى صداعٍ رهيبٍ».

ليردَّ عليه ابنُ العم فيقول: «لا يمكنني بأي حالٍ من الأحوال مساعدتك في فرز ذواتِك الكثيرة هذه؛ إنَّه خارج مجال عملي تمامًا، ويجب أن أكون مجنونًا مثلك تمامًا إذا سمحتُ لنفسي بدخول خيالك الخارق. خطي هو التمسُّك بالأشياء الملموسة، والسير على طول الطريق السريع الواسع للفطرة السليمة، لذلك أنا لا لستُ معقَّدًا أبدًا».

بغض النظر عن الفكاهة الرائعة التي تُروى بها القصة، فليس من السهل بالتأكيد تقديم وصفٍ أكثر صلة بالجوانب الأساسية للموقف الذي نواجهه جميعًا. لحسن الحظ، إنَّ خطرَ الوقوع في الموقف المؤسف للفتى الفيلسوف ضئيلٌ في الحياة العادية، حيث اعتدنا تدريجيًّا المشاركة مع الضروريات العملية وتعلُّم التواصُل بلغة مشتركة لِمَا نحتاج إليه، وما يدور في أذهاننا. في مثل هذا الضبط نحتاج إلى المواءمة بين الجدية والفكاهة، التي تتجلَّى في لعب الأطفال وكذلك في الحياة الناضجة، وهو أمرٌ لا يمكن تجاهله.

يجب أن تؤخذ طريقة مبدأ المكاملة التي تُستخدَم بها كلماتٌ مثل التأمُّل والإرادة في الاعتبار بشكلٍ خاصٍّ عند التحوُّل إلى مشكلة الإرادة الحرة، التي ناقشها الفلاسفة عبر العصور، هل نفعل ما نفعله لأننا نريد أن نفعله، أم أنَّنا نفعل ما نفعله لأنَّنا سنفعله، إذا جاز التعبير، فإنَّ القدرة على تحقيق أقصى استفادة من الظروف هي خبرة بشرية مشتركة. في الواقع، يلعب مفهوم الإرادة دورًا لا غِنى عنه في التواصُل البشري على غرار كلماتٍ مثل الأمل والمسؤولية، كلمات في حدِّ ذاتها لا يمكن تحديدُها بنفس القدر خارج السياق الذي تُستخدَم فيه.

تتوافق مرونة الفصل بين الذات والموضوع في حساب الحياة الواعية مع ثراء التجربة المتنوعة لدرجة أنَّها تنطوي على مجموعة متنوعة من الأساليب. فيما يتعلَّق بمعرفتِنا بالكائنات الأخرى، فإنَّنا نشهد سلوكَهم فقط، ولكن يجب أن ندرك أنَّ كلمة الوعي لا يمكن تجنُّبها عندما يكون مثل هذا السلوك معقَّدًا للغاية بحيث يستلزم تفسيره في اللغة المشتركة الإشارة إلى الوعي الذاتي. من الواضح أنَّ البحثَ عن موضوعٍ نهائي يتعارض مع هدف الوصف الموضوعي، يتضمن التعارض بين الذات والموضوع.

مثل هذه الاعتبارات لا تنطوي على نقصٍ في تقدير الإلهام الذي تقدمه إلينا الإبداعات الفنية العظيمة من خلال الإشارة إلى سمات الكمال المتناغم في موقعنا. إنَّ في التخلي عن المنطق

التحليلي بدرجة متزايدة، والسماح بدوره بالعزف على جميع خيوط العاطفة والشعر والرسم والموسيقى- يحتوي على احتمالاتٍ للترابُط بين الأنماط المتطرفة كتلك التي تُوصَف بأنَّها براجماتية وتلك الصوفية. على العكس من ذلك فإنَّ المفكرين الهنود القدماء بالفعل فهموا الصعوبات المنطقية في إعطاء تعبيرٍ شاملٍ لمثل هذا الكمال، لقد وجدوا مهربًا من التنافُر الظاهر في الحياة من خلال التأكيد على عدم جدوى المطالبة بإجابة السؤال عن معنى الوجود، مدركين أنَّ أيَّ استخدامٍ لكلمة «معنى» يعني المقارنة، لكن مع أي شيء يمكننا أن نقارن الوجود كله؟

الهدف من حجتِنا هو تأكيد أنَّ جميعَ التجارِب، سواء في العلم أو الفلسفة أو الفن، التي قد تكون مفيدة للبشرية، يجب أن تكون قادرة على التواصُل بوسائل التعبير البشرية، وعلى هذا الأساس سوف نتناول مسألة وحدة المعرفة. في مواجهة التنوع الكبير للتطورات الثقافية، يمكننا بالتالي البحث عن تلك السمات في جميع الحضارات التي تضرب بجذورها في الجذور الإنسانية المشتركة، خاصة أننا ندرك بشكلٍ خاصٍّ أنَّ وضعَ الفرد داخل المجتمع يعرض في حدِّ ذاته جوانبَ متعددة وغالبًا ما تكون متنافية.

عند الاقتراب من المشكلة القديمة المتمثِّلة في تأسيس ما يُسمَّى بالقيم الأخلاقية، يجب أن نسأل في المقام الأول عن نطاق مفاهيم مثل العدالة والمحبة، التي تمتزج عن قربٍ في جميع المجتمعات البشرية. لا يزال من الواضح أنَّ الوضعَ الذي يسمح باستخدام القواعد القضائية المقبولة لا يترك مجالًا لحرية التعاطف. ولكن كما أكد بشكلٍ خاصٍّ التراجيديون اليونانيون المشهورون، من الواضح أيضًا أنَّ الرحمة يمكن أن تجعل الجميعَ في صراعٍ مع أي فكرة مُصاغة بإيجازٍ عن العدالة، نحن هنا نواجه علاقاتٍ تخضع لمبدأ المكاملة متأصلة في مكانة الإنسان، ويُعبَّر عنها بشكلٍ خالدٍ في الفلسفة الصينية القديمة، لتذكيرنا بأننا على مسرح الوجود العظيم، نحن أنفسنا ممثلون ومتفرجون.

عند مقارنة الثقافات القومية المختلفة، نواجه صعوبةً خاصة تتمثَّل في تقدير ثقافة أمة ما بحسب تقاليد أمة أخرى. في الواقع، فإنَّ عنصر الرضا المتأصِّل في كل ثقافة يتوافق بشكلٍ وثيقٍ مع غريزة الحفاظ على الذات التي تميز أيَّ نوعٍ من الكائنات الحية. في مثل هذا السياق، من المهم أن ندرك أنَّ خصائصَ الثقافات التي تناقض بعضها بعضًا القائمة على التقاليد التي تعززها الأحداث التاريخية، لا يمكن مقارنتها على الفور بتلك التي تواجهها الفيزياء وعلم النفس والأخلاق، حيث نتعامل مع السمات الجوهرية لثقافات الوضع الإنساني المشترك.

لقد أدَّى الاتصال بين الدول -كما هو واضحٌ في التاريخ الأوروبي- في كثيرٍ من الأحيان إلى اندماج الثقافات التي تحتفظ بعناصر قيِّمة من التقاليد الوطنية الأصلية. إنَّ مسألة كيفية تخفيف ما يُسمَّى بالصدع الثقافي في المجتمعات الحديثة، التي جذبتْ الكثيرَ من الاهتمام في هذا التلاقي، هي بعد كل شيء مشكلة تعليمية أكثر تقييدًا، ويبدو أنَّ الموقف من هذا القبيل لا يستدعي المعلومات فحسب، بل أعتقد أنَّ الجميعَ سيوافقون أيضًا على بعض الفكاهة والمرح. ومع ذلك، فإن أخطر مهمة هي تعزيز التفاهم المُتبادَل بين الدول ذات الخلفيات الثقافية المختلفة للغاية.

إنَّ التقدُّم السريع للعلم والتكنولوجيا في أيامنا هذه، الذي يستلزم وعودًا فريدة من نوعها لتعزيز رفاهية الإنسان وفي الوقت نفسه تهديدات وشيكة للأمن العالمي، يعرِّض حضارتنا بأكملها لتحدٍّ حقيقيٍّ؛ إنَّ كلَّ زيادة في المعرفة والإمكانيات تعني دائمًا المزيدَ من المسؤوليات، ولكن في الوقت الحاضر عندما يرتبط مصيرُ جميع الشعوب ارتباطًا وثيقًا، فإنَّ التعاون والثقة المتبادلة القائميْن على تقدير كلِّ جانبٍ من جوانب الموقف الإنساني المشترك أصبح ضروريًّا أكثر من أي وقتٍ مضى في تاريخ البشرية.

الفصل الثالث

الربط بين العلوم

1960

المقال الثالث: الربط بين العلوم:

إنَّه لمن دواعي سروري البالغ، ومن دون أدنى تردُّدٍ فقد قبلتُ الدعوة الكريمة للتحدُّث في افتتاح هذا المؤتمر الدولي للعلوم الصيدلانية. بصفتي فيزيائيًّا، ليس لديَّ بالطبع أيُّ رؤية في مجال الصيدلة كما هو حال نخبة العلماء المتميزين من مختلف البلدان الذين تجمَّعوا اليوم هنا، ومع ذلك، في هذه المناسبة قد يكون من المناسب التعليق على العلاقة الحميمة بين معرفتِنا في جميع فروع العلم. تأكَّد هذا الارتباط بقوة وحماسٍ من قبل هانز كريستيان أورستد(17)، الذي أنشأ أول فحصٍ صيدليٍّ منظم في الدنمارك، وكان بالنسبة إليه مصدرُ إلهامٍ دائمٍ في أبحاثه العلمية الأساسية، ونشاطه متعدد الجوانب والمثمر في المجتمع الدنماركي.

(17) هانز كريستيان أورستد (Hans Christian Ørsted) 14 أغسطس 1777- 9 مارس 1851: وُلد في رودكوبنج بالدنمارك، وهو عالمٌ فيزيائي وكيميائي دنماركي توقَّع وجود علاقة بين الكهرباء والمغناطيسية وهو ما قاده إلى اكتشاف التأثير المغناطيسي للتيار الكهربائي عام 1820 حين قام بتجربة بيَّنت أن مجالًا مغناطيسيًّا يمكنه أن يؤثِّر في البوصلة يتولَّد حول سلكٍ ما إذا مرَّ من خلال هذا السلك تيارٌ كهربائيٌّ. وفي مجال الكيمياء يُعتبر أورستد هو من أنتج الألومنيوم، وكتب كتاب «روح الطبيعة» (1850م).

تعود تجربة المساعدة التي يمكن أن توفرها المواد التي تحدث في الطبيعة لعلاج الأمراض البشرية إلى بداية الحضارة، عندما كان مفهوم البحث العلمي العقلاني غير معروفٍ. وإنَّه من المثير للاهتمام أن نتذكَّر إلى أي مدى أدَّى البحث عن الأعشاب الطبية في الغابات والمروج إلى تحفيز تطوير علم النبات المنتظم، علاوة على ذلك، فإنَّ تحضير الأدوية ودراسة آثارها كان إثباتًا لأهميتها الأساسية في تقدُّم الكيمياء.

لفترة طويلة ابتعدت دراسة خصائص وتحولات المواد بشكلٍ واضحٍ عن المساعي التي ميَّزت النهج الفيزيائي لحساب سلوك الأجسام في محيطِنا من حيث المكان والزمان والسبب والتأثير، لقد كان هذا هو الأساس للصرح الكامل لميكانيكا نيوتن وحتى النظرية الكهرومغناطيسية القائمة على اكتشافات أوريستد وفاراداي(18)، التي غيَّرت من خلال تطبيقاتها التكنولوجية إلى حدٍّ كبيرٍ إطارَ حياتنا اليومية.

(1791 - 1867): هو عالمٌ كيميائيٌّ وفيزيائيٌّ إنجليزي، وهو من المشاركين فيMichael Faraday مايكل فاراداي (18
علم المجال الكهرومغناطيسي والكهروكيميائي.

حفَّز التطور في القرن التاسع عشر للأفكار القديمة إنشاء الدستور الذري للمادة، وكذلك البحث عن علاقة أوثق بين الكيمياء والفيزياء. من ناحية، أدَّى توضيح مفهوم العناصر الكيميائية إلى فهم القوانين التي تحكم النسب التي تدخل فيها هذه العناصر في المركبات الكيميائية. من ناحية أخرى، أدَّت دراسة الخصائص البسيطة للغازات إلى تطوير النظرية الميكانيكية للحرارة، حيث قدَّمت شرحًا للقوانين العامة للديناميكا الحرارية التي قدمت مثل هذا التطبيق المثمر في فروعٍ شتَّى، وليس أقلّها في الكيمياء الفيزيائية.

كذلك كانت دراسات التوازن الإشعاعي الحراري القائمة على النظرية الكهرومغناطيسية تكشف عن سمة من سمات الكمال في العمليات الذرية لا يمكن التوفيق بينها وبين أفكار الفيزياء الكلاسيكية. لقد علَّمنا اكتشاف بلانك للثابت الكوني الكمومي أنَّ تطبيق الوصف المعتاد لسلوك المادة على نطاقٍ كبيرٍ وبكمياتٍ كبيرة يعتمد تمامًا على الظروف التي يكون فيها الفعلُ -داخل هذه الظواهر بشكلٍ اعتيادي- كبيرًا بحيث يمكن أن يهمل الكم (أو الكوانتا) تمامًا. ومع ذلك، فإنَّه في العمليات الذرية الفردية، نلتقي نوعًا جديدَ التناسق مسؤولًا عن الاستقرار المذهل للأنظمة الذرية التي تعتمد عليها جميعُ خصائص المادة في نهاية المطاف.

تطلَّب ترتيب هذا المجال الثري الجديد من التجارِب مراجعةً جذريةً لأساس الاستخدام الواضح لمفاهيمنا الفيزيائية الأساسية، لحساب ما نقوم به بالفعل وما نتعلمه في التجارب الفيزيائية، من الضروري وصف الترتيب التجريبي وتسجيل الملاحظات بلغة مشتركة. ومع ذلك، في دراسة الظواهر الذرية فإننا قد نتعرض لموقفٍ حيث قد يؤدي تكرار تجربة بنفس الترتيب إلى تسجيلاتٍ مختلفة، وقد تعطي التجارب بترتيبات مختلفة نتائجَ تبدو للوهلة الأولى متناقضة بعضها مع بعض.

فُسِّرت هذه المفارقات الظاهرة من خلال الاعتراف بأنَّ ثمَّة تفاعلًا بين الجسيمات قيد التحقيق وأدواتنا للمراقبة، والتي يمكن تجاهلُها في التجربة العادية أو أخذها في الاعتبار بشكلٍ منفصلٍ، ليتضح أنَّه في مجال فيزياء الكم أصبحت جزءًا لا يتجزَّأ من الظاهرة الكمومية.

في ظلِّ هذه الظروف لا يمكن تجميع أجزاء التجربة بالمنطق المعتاد، ولكن يجب اعتبار الظواهر مكمِّلة بعضها لبعض، بمعنى أنَّ أجزاءها تستنفد جميعَ المعلومات حول الأجسام الذرية

التي يمكن التعبير عنها بشكلٍ لا لبْسَ فيه.

أُنشئت أدوات الرياضيات المناسبة لوصفٍ شاملٍ للخطوط التكاملية من خلال ما يُسمَّى بشكل الميكانيكية الكمومية، التي من خلالها تمكَّنَّا من تفسير الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمادة، يوضح الخلاف الطريف بين الفيزيائيين والكيميائيين حول ما إذا كانت الكيمياء قد ابتلعتها الفيزياء أم الفيزياء قد أصبحت كيمياء طبيعة ونطاق هذا التقدم.

سيأخذنا هذا بعيدًا عن موضوعنا لنذكر بالتفصيل التطور العظيم للعلوم الذرية في أيامنا هذه، وسأذكر باختصارٍ أنَّه في ارتباط الإلكترونات بنواة الذرة، وفي الدور الذي تلعبه من أجل ضمِّ الذرات إلى جزيئات المركبات الكيميائية، علينا أن نتعامل مع التأثيرات الكمومية النموذجية التي تقاوم التمثيل التصويري المعتاد، نظرًا للكتلة الكبيرة للنواة مقارنة بكتلة الإلكترونات، فمن الممكن حساب التكوين الذري في الجزيئات بتقريبٍ عالٍ، بما يتوافق مع الصيغ الهيكلية المعروفة التي أثبتت أنه لا غنى عنها في ترتيب الأدلة الكيميائية.

النهج برمته ليس فقط في التوافق التام مع الخواص الحركية الكيميائية المعتادة، بل يؤكد أيضًا الافتراضات البسيطة التي يقوم عليها. وبالتالي، في أي عملية تؤدي إلى مركباتٍ كيميائية، لا تعتمد خصائص الجزيئات الجديدة بشكلٍ أساسي على تكوين الجزيئات التي تشكَّلت من خلال تفاعلها، ولكن على الوضع النسبي للذرات التي تتكوَّن منها؛ ستتوافق أيُّ خصائص ثانوية لحالة هذه الجزيئات مع الذبذبات المتبقية من تكوينها، لن تؤثِّر في الواقع بشكلٍ أساسي على خصائصها الكيميائية فقط بل ستفقد أيضًا بسبب الأثر الحراري في الوسط كلَّ اتصالٍ مع تاريخها السابق.

لقد قدَّم الأثر الكمومي في ضوء الفهم العام للخصائص المحددة للمادة فترة من النمو السريع للعلوم الطبيعية تذكِّرنا في كثيرٍ من النواحي بالثورة العلمية في القرنين السادس عشر والسابع عشر. من بين أكثر هذه التطورات إثارة للإعجاب هو الظهور الحديث للكيمياء الحيوية التي كانت مفيدة بنفس القدر لعلم وظائف الأعضاء وعلم الصيدلة. وبالأخص فإنَّ المحو السريع للتمييز بين الكيمياء العضوية وغير العضوية قد أثار من جديدٍ المشكلة القديمة المتمثِّلة في المدى الذي يمكن أن تفسِّر فيه العلوم الفيزيائية شكلَ الحياة.

غالبًا ما أدَّى الاعتراف التدريجي -من خلال تطوير علم التشريح وعلم وظائف الأعضاء، بالتعقيد الهائل لبنية الكائنات الحية والآليات التنظيمية الدقيقة المتنوعة التي تحكم وظيفتها- إلى

الشك فيما إذا كان الحفاظ على النظام في الكائن الحي متوافقًا مع القوانين العامة للديناميكا الحرارية. ومع ذلك من وجهة نظر حركية الكيمياء الحديثة، لا يمكن توقُّع ألَّا تخضع العمليات الحيوية لقوانين الفيزياء، كما أنَّ البحث الدقيق في تبادل الطاقة والإنتروبيا(19) المصاحبة لعملية التمثيل الغذائي وحركات الكائنات الحية لم تكشف عن أيِّ قيودٍ على مبادئ الديناميكا الحرارية.

(19): أصل الكلمة مأخوذٌ عن اليونانية، ومعناها «تحوُّل»، وهو مفهومٌ مهمٌّ في(Entropy) الإنتروبيا أو القصور الحراري التحريك الحراري، وخاصة للقانون الثاني الذي يتعامل مع العمليات الفيزيائية للأنظمة الكبيرة المكونة من جزيئاتٍ بالغة الأعداد ويبحث سلوكها كعملية تتم تلقائيًا أم لا. ينصُّ القانون الثاني للديناميكا الحرارية على مبدأ أساسي يقول: أي تغيُّر يحدث تلقائيًا في نظامٍ فيزيائي لا بُدَّ وأن يصحبه ازدياد في مقدار «إنتروبيته»، يميل أيُّ نظامٍ مغلق إلى التغيُّر أو التحوُّل تلقائيًا بزيادة إنتروبيته حتى يصل إلى حالة توزيع متساوٍ في جميع أجزائه، مثل تساوي درجة الحرارة، وتساوي الضغط، وتساوي الكثافة، وغير تلك الصفات في نظامٍ ما. وقد يحتاج النظام المعزول للوصول إلى هذا التوازن إلى بعض الوقت. مثال على ذلك إلقاء قطرة من الحبر الأزرق في كوب ماء؛ نلاحظ أن قطرة الحبر تذوب وتنتشر رويدًا رويدًا في الماء حتى يصبح كلُّ جزءٍ من الماء متجانسًا بما فيه من حبرٍ وماءٍ، فنقول إنَّ إنتروبيا النظام تزايدت (أي زادت العشوائية فيه، فلا يوجد به منطقة عالية التركيز، وأخرى منخفضة التركيز، ويصبح توزيع الحبر في الماء متساويًا).

في السنوات الأخيرة، أُحرِز تقدُّم كبيرٌ فيما يتعلَّق بمعرفتنا بالتركيبات الجزيئية المعقدة في الخلايا الحية وخاصة السلاسل الجزيئية المحددة التي تنقل المعلومات الجينية من جيلٍ إلى جيلٍ. علاوة على ذلك، فإنَّ رؤيتنا للعمليات الإنزيمية التي تعمل هذه المعلومات من خلالها على توجيه تكوين الهياكل الجزيئية المحددة الأخرى مثل البروتينات تتزايد باطرادٍ. ورغم كل ما نعرفه، قد يكون لدينا هنا علاقة بالزيادة المطردة في استقرار تكون الخلايا مع استهلاك الطاقة الحرة المقابلة لزيادة الإنتروبيا في العمليات الكيميائية المعتادة غير القابلة للانعكاس.

على خلفية هذه الحقائق، تُطرح وجهة النظر نفسها في كلِّ حياة الكائن الحي بأنَّه علينا أن نتعامل مع عملياتٍ ذات طابعٍ غير قابلٍ للانعكاس، تتوافق مع استقرارٍ متزايدٍ باستمرارٍ في ظل الظروف السائدة التي تحتفظ بها من خلال التغذية والتنفُّس. على الرغم من جميع الاختلافات في المقياس والوظيفة، فإننا نواجه هنا تشابهًا بعيد المدى بين الكائنات الحية والآلات الأوتوماتيكية، في الواقع، بناءً على التطورات الحديثة في التكنولوجيا، من الممكن تصميم آلاتٍ تتفاعل بأي طريقة محددة، بما في ذلك إصلاحها وإعادة إنتاجها، بشرط أن يكون لديها إمكانية الوصول إلى المواد اللازمة ومصادر الطاقة.

على أي حالٍ فيما يتعلَّق بالسؤال الذي نوقش كثيرًا بشأن المقارنة بين الكائنات الحية والآلات، من الضروري أن نضع في اعتبارنا أن الحياة العضوية هي مظهرٌ من مظاهر موارد الطبيعة، تتجاوز بكثيرٍ تلك المستخدمة في بناء الآلات. في الحقيقة، بالنظر إلى طريقة عمل

الأجهزة للحساب والتحكُّم يمكننا بشكلٍ أساسي تجاهُل التكوين الذري للمادة، ونقتصر على حساب الخواص الميكانيكية والكهربائية للمواد المستخدمة وتطبيق القوانين الفيزيائية البسيطة التي تحكم التفاعل بين أجزاء الآلة، ومع ذلك، فإنَّ التاريخ الكامل للتطور العضوي يقدِّم لنا نتائجَ التجربة في الطبيعة للإمكانيات الهائلة للتفاعلات الذرية.

ليس من المستغرب أن تكشف الكائنات الحية -نظرًا لتعقيدها الهائل- عن خصائص وإمكانيات تتناقض بشكلٍ صارخٍ مع تلك التي يتم تحفيزها بواسطة ما يُسمَّى بالمادة غير الحية في ظل ظروف تجريبية بسيطة قابلة للتكاثر، على هذه الخلفية، وجدتْ مفاهيم مثل الهدف والحفاظ على النوع -إشارة إلى سلوك الكائنات الحية ككيانات- تطبيقًا مثمرًا في البحث البيولوجي.

في المناقشات حول أسس علم الأحياء شكَّلت مسألة دور المفاهيم خارج نطاق لغة الفيزياء موضوعًا رئيسًا. من جانب، فقد عبرت عن وجهة نظر مفادها أن مثل هذه المفاهيم -رغم ثرائها- ستثبت في النهاية أنها غير ضرورية. وعلى الجانب الآخر، فقد جادل البعض بأن لدينا هنا علاقة بالعناصر غير القابلة للاختزال إذا أخذنا شكل الحياة في الحسبان.

لقد أعطى الدرس المتعلق بموقفنا كمراقبين للطبيعة الذي علَّمتنا إياه الفيزياء الكمومية خلفية جديدة لمثل هذه المناقشات، يشير هذا الدرس إلى أن الموقف فيما يتعلَّق بالوصف الموضوعي للظواهر البيولوجية يعكس مناهجَ مختلفة في علم وظائف الأعضاء العادي والكيمياء الحيوية الحديثة. لا يرتبط أساس وضع مبدأ المكاملة للوصف في علم الأحياء بمشاكل التحكم في التفاعل بين الجسيم وأداة القياس -التي تؤخذ بعين الاعتبار بالفعل في الكيمياء الحركية- ولكن مع التعقيد الذي لا ينضب عمليًّا للكائن الحي.

بالكاد يمكن اعتبار هذا الموقف ذا طابعٍ مؤقتٍ، ولكن يبدو أنه مرتبطٌ تلقائيًّا بالطريقة التي تطورت بها مفاهيمنا بالكامل بدءًا من خدمة الضروريات الأكثر بدائية للحياة اليومية إلى التعامل مع نمو المعرفة المكتسب بالطرق النظامية أي البحث العلمي. وهكذا، طالما تم الاحتفاظ بكلمة «حياة» لأسبابٍ عملية أو معرفية، فإنَّ النهج المزدوج في علم الأحياء سوف يستمرُّ بالتأكيد.

في مناقشاتنا، اعتبرنا حتى الآن الكائنات الحية كائناتٍ قيد البحث، بطريقة مشابهة لتلك التي نسعى فيها لفهم تجربة أي جزءٍ آخر من الطبيعة. عندما نتعامل مع مشاكل علم النفس، ندخل في مجالٍ جديدٍ من المعرفة، حيث تجتذب مسألة التحليل والتركيب اهتمامًا كبيرًا عبر العصور. اللغة التي نستخدمها في الاتصال الاجتماعي للتعبير عن حالتنا الذهنية مختلفة تمامًا عن تلك

المستخدمة عادةً في العلوم الفيزيائية. وهكذا، فإنَّ كلماتٍ مثل التأمُّل والإرادة، التي تشير إلى المواقف التي لا تتعارض بعضها مع بعض، ولكنها مميزة بنفس القدر للحياة الواعية، استخدمت بطريقة نموذجية تكميلية منذ أصل اللغة.

تتضح العلاقة الوثيقة بين الخبرة النفسية والعمليات الفيزيائية والكيميائية في أجسامنا ليس أقلها من خلال تطبيقات الأدوية في الأمراض العقلية. إنَّ الطابع غير القابل للانعكاس للعمليات الفسيولوجية المعنية يظهر بوضوحٍ أيضًا من خلال الدرجة التي يمكن بها تذكُّر كل ما وصل إلى الوعي، من المغري متابعة مثل هذه الاعتبارات، ولكن في كل خطوة أخرى تظهر صعوباتٌ جديدة مرتبطة بطبيعتِها بالنطاق المحدود للمفاهيم المتاحة لمثل هذا البحث.

حاولتُ في هذا المقال أن أبيِّن كيف أتاحت الأبحاث في عالم الذرة فرصًا جديدة لتتبُّع هذا الانسجام في الطبيعة الذي تحدَّث عنه أوريستد، هذا ما نفضِّل أن نشير إليه على أنه «وحدة المعرفة البشرية».

إنَّ تقدير هذا الانسجام أو الوحدة فقط هو الذي يمكن أن يساعدنا في الحفاظ على التوازن تجاه موقفنا، وتجنُّب هذا الارتباك الذي قد ينتج بسهولة عن التقدُّم المضطرب للعلم والتكنولوجيا في كل مجالٍ من مجالات الاهتمام البشري. يشهد برنامج هذا المؤتمر على حقيقة أنَّ العلوم الصيدلانية تمثل جزءًا لا يتجزَّأ من هذا البحث في عجائب الطبيعة التي نسعى من خلالها إلى تعزيز فهم الإنسان ورفاهيته، على أمل أن يساهم اجتماعكم في هذا الهدف العظيم، أودُّ أن أعبِّر عن خالص تمنياتي أن تكون تجربة ملهمة لكم جميعًا.

الفصل الرابع

الضوء والحياة نظرة أخرى

1962

المقال الرابع: الضوء والحياة، نظرة أخرى:

إنَّه لمن دواعي سروري البالغ أن ألبّي دعوة صديقي القديم ماكس دلبروك(20) للتحدُّث في افتتاح هذا المعهد الجديد لعلم الوراثة في جامعة كولونيا. بالطبع، بصفتي فيزيائيًّا ليس لديَّ معرفة مباشرة بمجال البحث الواسع سريع التطور الذي يختصُّ به هذا المعهد، لكنَّني أرحِّب باقتراح دلبروك للتعليق على بعض الاعتبارات العامة حول العلاقة بين علم الأحياء والفيزياء الذرية، التي كنتُ قد قدمتها في خطابٍ بعنوان «الضوء والحياة»، ألقيتُه في المؤتمر الدولي للعلاج الإشعاعي في كوبنهاجن قبل ثلاثين عامًا. لقد أبدى دلبروك، الذي كان يعمل معنا في ذلك الوقت في كوبنهاجن كعالم فيزياء، اهتمامًا كبيرًا بمثل هذه الاعتبارات التي حفَّزت اهتمامَه بالبيولوجيا، وقدَّمت إليه تحديًا في أبحاثه الناجحة في علم الوراثة.

(20) : وُلد في برلين في 4 سبتمبر 1906، ماكس لودفيج هيننج دلبروك (Max Ludwig Henning Delbrück) وتُوفي في باسادينا بكاليفورنيا في 9 مارس 1981، عالِم فيزياء حيوية أمريكي من أصل ألماني، فاز بجائزة نوبل في الطب سنة 1969 بالاشتراك مع ألفرد هرشي وسالفادور لوريا «لاكتشافاتهم المتعلقة بآليات تكاثُر الفيروسات وتركيبها الجيني».
جامعة كولونيا (Universität zu Köln): هي واحدة من أقدم وأعرق الجامعات في أوروبا، وهي ثاني أكبر جامعة في ألمانيا.

لقد جذبت مكانة الكائنات الحية في التجربة الفيزيائية العامة عبر العصور انتباه العلماء والفلاسفة. وهكذا، شعر أرسطو بتكامُل الكائنات الحية في صعوبة التقديم الأساسي لافتراض القابلية المحدودة لتقسيم المادة، حيث سعت مدرسة المؤمنين بأنَّ الكون مكونٌ من ذرَّاتٍ(21) إلى أساسٍ لفهم النظام السائد في الطبيعة على الرغم من تنوع الظواهر الفيزيائية.

(21) المذهب الذرّي فكرة فلسفية تطوّرت في اليونان خلال القرن الخامس قبل الميلاد، يعتقد الذرّيون أنَّ العناصر الأساسية للحقيقة تتشكّل من الذرة غير القابلة للانقسام والإتلاف، وهي مادة سابحة في الفضاء. ويظنّون أنَّ الذرّة لها حركة، ولكنَّها تنعدم وترتدُّ بعد ارتطامها، وقد تكوّنت الدنيا نتيجة هذه الحركات، ووجدت لفترة من الزمن ثم اختفت. وهذه العوالم والأشياء الظاهرية التي وجدت عليها تختلف فقط في الحجم والشكل وموضع ذراتها. ويعتقد الذريون أنَّ حركة الذرَّات تُحكم بالضرورة، إذن كل حدث هو نتيجة تصادم، وفي النظرية يمكن التنبؤ بها مبكرًا. وقد أدخل الفيلسوف أبيقور الفكرة التي تقول إنَّ الذرات هدفٌ للانحراف العَرَضي، وظنَّ أنَّ الانحراف كسر نموذج الأحداث بحتمية وقدَّم قواعد للإدارة الحرة. وقد صاغ العالم ليوقبوس المذهبَ الذري وطوَّره بتوسُّعٍ أكثر ديموقريطوس، ثم عدَّله وبسَّطه إلى حدٍّ ما أبيقور، ونال شهرته على يد الشاعر الروماني لوكريشيس. وقد تمَّ استقاء المصادر الأصلية لهذا المذهب من خلال قصيدة الشاعر لوكريتيوس: طبيعة الأشياء.

وتيتوس لوكريتيوس كاروس فيلسوف وشاعر روماني، نظَّم قصيدة مطوّلة دعاها «في طبيعة الأشياء»، وصف فيها خصائص المادة وطبيعة الذرّات التي يتألَّف منها الكون، وتحدَّث عن أصل الإنسان والأحوال الجوية والزلازل والأمراض وغيرها.

على العكس من ذلك، فسَّر لوكريتيوس، الذي لخَّص حجج النظرية الذرية، نمو النبات من بذرتِه كدليلٍ على دوام بنية أولية في أثناء التطور، وهو اعتبارٌ يذكِّرنا بشكلٍ لافتٍ للنظر بالنهج المتَّبع في علم الوراثة الحديث.

بعد تطور الميكانيكا الكلاسيكية في عصر النهضة وتطبيقاتها المثمرة لاحقًا على التفسير الذري لقوانين الديناميكا الحرارية كان يُعتقد أنَّ الحفاظ على النظام في البنية المعقدة ووظائف الكائنات الحية يمثِّل صعوباتٍ لا يمكن التغلُّب عليها. لقد نشأت خلفية جديدة لمسلك مثل هذه المشكلات من خلال اكتشاف الفعل الكمومي في السنة الأولى من القرن العشرين، التي كشفت عن سمة من السمات الأحادية في العمليات الذرية التي تتجاوز العقيدة القديمة المتمثلة في التقسيم المحدود للمادة. لقد قدَّم هذا الاكتشاف دليلًا على الاستقرار الملحوظ للأنظمة الذرية والجزيئية التي تعتمد عليها خصائص المواد المكوِّنة لأدواتنا وكذلك أجسامنا في النهاية.

إن الاعتبارات الواردة في عنوان رسالتي هذه مستوحى من الشكل المتسق لميكانيكا الكمِّ مؤخرًا، لقد أوضح هذا التطوُّر بشكلٍ أساسي شروطَ الحساب الموضوعي في الفيزياء الذرية متضمنًا القضاء على كل الأحكام الذاتية. النقطة الحاسمة هي: على الرغم من أنَّنا نتعامل مع ظواهر خارج نطاق فهم الوصف التصويري الحتمي، يجب علينا استخدام لغة مشتركة، مصقولة بشكلٍ مناسبٍ بمصطلحات الفيزياء الكلاسيكية، لإيصال ما فعلناه وما تعلَّمناه من خلال طرح الأسئلة عن الطبيعة في شكل تجارب. في التجارب الفيزيائية الفعلية، يتم استيفاء هذا المطلب عن طريق استخدام أجسامٍ صلبة كأدوات قياسٍ مثل الأغشية والعدسات وألواح التصوير الكبيرة والثقيلة بما يكفي للسماح بتفسير شكلها ومواضعها النسبية وحالات إزاحتها دون النظر إلى أي سماتٍ كمومية متضمنة بطبيعتها في القوانين الذرية الأساسية.

نفترض أنه في الفيزياء الكلاسيكية يمكن تقسيم الظواهر إلى أجزاءٍ فرعية دون حدودٍ، وأنَّه يمكن على الأخص تجاهُل التفاعُل بين أدوات القياس والجسيم قيد التحقيق أو تعويضه بأي قيمة، وعلى ذلك فإنَّ الميزة الأحادية في العمليات الذرية التي يمثِّلها الفعل الكمومي الكوني تشير إلى أنَّ هذا التفاعل في فيزياء الكمِّ هو جزءٌ لا يتجزَّأ من الظاهرة، ولا يمكن إعطاء حسابٍ منفصلٍ لها إذا كانت الأدوات تقوم بالغرض منها المتمثِّل في تحديد الترتيب التجريبي وتسجيل

الملاحظات. لا يمثِّل الظرف القائل بأنَّ هذه التسجيلات -مثل البقعة التي تنتج على لوحة فوتوغرافية بفعل تأثير الإلكترون- تنطوي بشكلٍ أساسي على عملياتٍ غير قابلة للانعكاس، أي صعوبة خاصة لتفسير التجارب ولكنها تؤكد عدم القابلية للانعكاس الذي يحتويها المفهوم ضمنيًّا من حيث المبدأ في مفهوم المراقبة.

إنَّنا في الترتيب التجريبي نفسه المحدد جيدًا نحصل عمومًا على تسجيلاتٍ لعمليات أحادية مختلفة مما يجعل اللجوء إلى الحساب الإحصائي للظواهر الكمومية أمرًا لا غِنى عنه. علاوة على ذلك، فإنَّ استحالة الجمع بين الظواهر التي لوحظت في ظلِّ ترتيباتٍ تجريبية مختلفة في صورة كلاسيكية واحدة تعني أنَّ مثل هذه الظواهر المتناقضة ظاهريًّا يجب اعتبارها خاضعة لمبدأ المكاملة، بمعنى أنَّها مجتمعة تستنفد جميعَ المعرفة المحددة جيدًا حول الجسيمات الذرية، تستبعد أي تناقضات منطقية من خلال الشكل الرياضي المتسق لميكانيكا الكمِّ، الذي يعمل على التعبير عن القوانين الإحصائية التي تحافظ على الملحوظات التي تتم تحت أي مجموعة معينة من الظروف التجريبية.

بالنسبة إلى موضوعنا، من الأهمية بمكان أن تكون السمة الأساسية لمبدأ المكاملة في فيزياء الكم -التي تكيَّفت مع فهم المفارقات المعروفة المتعلقة بالطبيعة المزدوجة للإشعاع الكهرومغناطيسي وجزيئات المواد- واضحة بشكلٍ جليٍّ في حساب خصائص الأنظمة الذرية والجزيئية، وبالتالي، فإنَّ أي محاولة لتحديد موقع الإلكترونات في الذرات والجزيئات من خلال الزمن أو التموضع (الزمكان) سيتطلَّب ترتيبًا تجريبيًّا يحظر ظهور الضبط الطيفي والروابط الكيميائية. ومع ذلك، فإنَّ حقيقة أن أنوية الذرة أثقل كثيرًا من الإلكترونات تسمح بتثبيت التموضعات النسبية للذرات داخل هياكل الجزيئات بالحد الكافي لتثبيت الشكل الهيكلي التي أثبت صحتها البحث الكيميائي. في الواقع، التخلي عن الوصف التصويري للقوانين الأساسية للإلكترونات في الأنظمة الذرية والاستفادة فقط من المعرفة التجريبية لوصف طاقة البدايات والربط في العمليات الجزيئية، يمكننا ضمن مجال واسع من التجربة معالجة تفاعلات هذه الأنظمة بواسطة الحركية الكيميائية العادية، بناءً على القوانين الراسخة للديناميكا الحرارية.

تنطبق هذه الملاحظات على الأقل على الفيزياء الحيوية والكيمياء الحيوية التي شهدت خلال القرن العشرين مثل هذا التقدم غير العادي. إنَّ درجة الحرارة الموحدة عمليًّا داخل الكائنات الحية تقلِّل من متطلبات الديناميكا الحرارية من الثبات أو النقصان المطرد في الطاقة الحرة. وبالتالي،

فإنَّ الافتراض نفسَه يشير إلى أنَّ تكوين جميع الهياكل الجزيئية الموجودة بشكلٍ دائمٍ أو مؤقتٍ يمثِّل عملياتٍ غير قابلة للانعكاس فيها بشكلٍ أساسي تزيد من استقرار الكائن الحي في ظل الظروف السائدة التي يتم الحفاظ عليها بالتغذية والتنفس، كما أن التركيب الضوئي في النباتات هو بالطبع، مصحوبًا بزيادة إجمالية في الإنتروبيا.

على الرغم من هذه الاعتبارات العامة، فلفترة طويلة ظهر أنَّ الوظائف التنظيمية في الكائنات الحية -التي تم الكشفُ عنها بشكلٍ خاصٍّ من خلال دراسات فسيولوجيا الخلية وعلم الأجنة- أوضحت درجةً غير مألوفة للتجربة الفيزيائية والكيميائية العادية بحيث تشير إلى وجود قوانين بيولوجية أساسية من دون نظيرٍ في خصائص المادة الجامدة التي تمت دراستُها في ظلِّ ظروفٍ تجريبية بسيطة قابلة للتكرار. مع التشديد على صعوبات الحفاظ على الكائنات الحية على قيد الحياة في ظل ظروفٍ تهدف إلى حسابٍ ذريٍّ كاملٍ، اقترحت بالتالي أنَّ وجود الحياة ذاته يمكن اعتباره حقيقة أساسية في علم الأحياء بالمعنى نفسه الذي يجب أن يُنظر فيه إلى الفعل الكمومي في الفيزياء الذرية كعنصرٍ أساسي غير قابلٍ للرفض من وجهة نظر المفاهيم الفيزيائية الكلاسيكية.

عند إعادة النظر في هذا التخمين من وجهة نظرنا الحالية، يجب أن نضع في الاعتبار أنَّ مهمة علم الأحياء لا يمكن أن تكون مهمة تفسير مصير كل الذرات التي لا حصر لها، التي تم تضمينها بشكلٍ دائمٍ أو مؤقتٍ في كائن حي. في دراسة الآليات البيولوجية التنظيمية، يصبح الوضع أنه: لا يمكن التمييز بين البناء التفصيلي لهذه الآليات والوظائف التي تؤديها في الحفاظ على حياة الكائن الحي بأكمله. تعكس العديد من المصطلحات المستخدمة في علم وظائف الأعضاء الإجراءات البحثية العملية، بدءًا من الاعتراف بالدور الوظيفي لأجزاء الكائن الحي، وانتهاءً إلى الحساب الفيزيائي والكيميائي لهياكلها الدقيقة والعمليات التي تتضمنها. طالما يتحدث المرء عن الحياة لأسبابٍ عملية أو معرفية، فإنَّ هذه المصطلحات الغائية(22) ستُستخدم في استكمال مصطلحات البيولوجيا الجزيئية، ومع ذلك، لا يعني هذا الظرف في حدِّ ذاته أيَّ قيودٍ على تطبيق علم الأحياء في المبادئ الراسخة للفيزياء الذرية.

(22) الغائية (بالإنجليزية: finality أو Teleology): هي استنباط منطقي أو تفسير للشيء بوصفه تابعًا وظيفيًّا لنهايته أو غايته أو هدفه، والكلمة مشتقة من المفردتين اليونانيتين «telos» (النهاية أو الهدف أو الغاية) و«logos» (السبب أو تُسمَّى الغاية التي يفرضها استعمالٌ بشري، مثل الغاية من شوكة الطعام، «غاية غير جوهرية» (أو علائقية). .(التفسير وتؤكد الغائية الطبيعية -التي شاعت في الفلسفة الكلاسيكية لكنها باتت نقطة خلافية اليوم- أنَّ الكيانات الطبيعية لديها أيضًا

غايات جوهرية، منفلتة من عقال الاستعمال أو الرأي البشريين. على سبيل المثال: زعم أرسطو أن الغاية الجوهرية لجوزة بلوط تتمثل في أن تصبح شجرة بلوط تامة النضج.

هامش في نص الكتاب: في محاضرة كولونيا (التي أُلقيت بالألمانية) أدخل المؤلف العبارة التالية: في الملاذ الأخير، يتعلَّق الأمر بكيفية إحراز المرء للتقدُّم في علم الأحياء، أعتقد أنَّ الشعور بالدهشة الذي كان يشعر به الفيزيائيون منذ ثلاثين عامًا قد اتخذ منعطفًا جديدًا، ستكون الحياة دائمًا عجيبة، لكن ما يتغير هو التوازن بين الشعور بالدهشة والشجاعة لمحاولة الفهم. (مترجم من نص التسجيل على الشريط).

لتقريب فهم المسألة الأساسية، من الضروري التمييز بين العمليات الذرية المنفصلة التي تحدث ضمن امتداداتٍ مكانية صغيرة وتنتهي في فتراتٍ زمنية قصيرة، وتشكيل ووظائف الهياكل الأكبر التي تشكَّلت من تكتلات الجزيئات المتماسكة معًا لفتراتٍ مماثلة أو تتجاوزها في انقسامات الخلايا.

حتى هذه العناصر التي تكوِّن هيكل الكائن الحي غالبًا ما تعرض خصائص وسلوكًا يشير إلى تنظيمٍ من نوعٍ أكثر تحديدًا من ذلك الذي تظهره أجزاء أي آلة يمكننا بناؤها. يتم تحديد وظائف اللبنات الأساسية لأجهزة الحساب الميكانيكية والكهرومغناطيسية الحديثة ببساطة من خلال شكلها وخصائص المواد العادية مثل الصلابة الميكانيكية والتوصيل الكهربائي والقابلية المغناطيسية. بقدر ما يتعلَّق الأمر ببناء الآلات، تتشكَّل هذه المواد مرة واحدة وإلى الأبد من خلال تراكماتٍ بلورية منتظمة إلى حدٍّ ما من الذرات، بينما في الكائنات الحية علينا أن نفعل أمرًا آخر في إيقاعٍ رائعٍ، حيث البلمرة الجزيئية والتي -حينما تحدث إلى الأبد- من شأنها أن تجعل الكائن الحي ميتًا مثل البلورة.

هامش في متن الكتاب: حُذِفت فقرة هنا، للتعليق على تحقيقات تتبع النظائر التي أجراها جورج هيفيشي، التي أظهرت أنَّ جزءًا كبيرًا من ذرات الكالسيوم المدمجة في الهيكل العظمي للفأر في المرحلة الجنينية يبقى هناك طوال حياة الحيوان. ناقش المؤلف مشكلة كيف يمكن للكائن الحي أن يقتصد في الكالسيوم إلى هذا الحد الملحوظ في أثناء نمو الهيكل العظمي.

أدَّى تطبيق الأساليب الفيزيائية ووجهات النظر إلى تقدُّمٍ كبيرٍ في العديد من مجالات علم الأحياء الأخرى، ومن الأمثلة المثيرة للإعجاب الاكتشافات الحديثة للبنية الدقيقة للعضلات، ونقل المواد المستخدمة في نشاط الأعصاب. في الوقت نفسه الذي تضيف فيه هذه الاكتشافات إلى معرفتنا بتعقيد الكائنات الحية، فإنها تشير إلى احتمالات الآليات الفيزيائية التي لم نكتشفها حتى الآن. في علم الوراثة، سمحت الدراسات المبكرة التي أجراها نيكولاي تيموفيف ريسوفسكي وكارل زيمر ودلبورك للطفرات الناتجة عن اختراق الإشعاع بإجراء أول تقييمٍ تقريبي للامتدادات المكانية داخل الكروموسومات الضرورية لاستقرار الجينات. حدثت نقطة تحوُّل في هذا المجال

بأكمله، منذ قرابة عشر سنوات مع اقتراح كريك وواتسون المبتكر لتفسير بنية جزيئات الحمض النووي، أتذكر جيدًا كيف قال دلبروك في حديثه إليَّ عن الاكتشاف أنه قد يؤدي إلى ثورة في علم الأحياء الدقيقة، يمكن مقارنتها بتطور الفيزياء الذرية التي بدأها نموذج رذرفورد النووي للذرة.

في هذا الصدد، أتذكر أيضًا كيف بدأ كريستيان أنفينسن محاضرته في كوبنهاجن قبل بضع سنوات بالقول إنَّه وزملاءه كانوا يعتبرون أنفسهم حتى الآن علماء وراثيين وكيميائيين حيويين متعلمين، لكنَّهم شعروا الآن كأنَّهم هواة يحاولون أن يصنعوا رأسًا وذيلًا من الأدلة البيوكيميائية المنفصلة. كان الموقف الذي صوَّره مشابهًا بشكلٍ لافتٍ للنظر للوضع الذي واجه الفيزيائيين حين اكتشاف النواة الذرية، التي -إلى درجة غير متوقعة- أكملت معرفتنا حول بنية الذرة، مما جعلنا نكتشف كيف يمكن استخدامها من أجل طلب المعلومات المتراكمة حول الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمادة. وكما هو معروف، تحقق هذا الهدف إلى حدٍّ كبيرٍ في غضون عقودٍ قليلة من خلال تعاون جيلٍ كاملٍ من الفيزيائيين، الذي يشبه في حدَّته ونطاقه ما يحدث في هذه السنوات (من القرن العشرين) في علم الوراثة والبيولوجيا الجزيئية.

ملاحظة من نص الكتاب: تم حذف قسم هنا للتعليق على مشكلة الإيقاع في عملية نمو الخلية. ناقش المؤلف على وجه الخصوص التحكُّم في تكرار الحمض النووي، والدور الذي قد يلعبه هيكل الكروموسومات في هذه العملية وكذلك في استقرار المادة الوراثية، كما نظر في إمكانية أن ترتبط عملية الازدواج ارتباطًا وثيقًا بنقل المعلومات من الحمض النووي.

قبل أن أختم، أودُّ أن ألفتَ الانتباه بإيجازٍ إلى مصدر المعرفة البيولوجية الذي تقدِّمه فيما يُسمَّى بالتجربة النفسية المرتبطة بالحياة. لا أحتاج إلى تأكيد أنَّ كلمة الوعي تظهر نفسها في وصف سلوك معقدٍ للغاية لدرجة أن اتصالها يعني الإشارة إلى وعي الكائن الحي لذاته. علاوة على ذلك، تشير كلماتٌ مثل الأفكار والمشاعر إلى تجارِب حصرية متبادلة، وبالتالي فقد استخدمت أصل اللغة البشرية بطريقة تكاملية نموذجية منذ ذلك الحين. بالطبع، في الوصف المادي الموضوعي، لا توجد إشارة إلى موضوع الملاحظة، بينما في الحديث عن التجربة الواعية نقول «أفكر» أو «أشعر». إنَّ التشابُه مع طلب أخذ جميع الميزات الأساسية للترتيب التجريبي في الاعتبار في فيزياء الكمِّ ينعكس من خلال الأفعال المختلفة التي نربطها بالضمير.

تشير حقيقة أنَّ كلَّ شيء جاء إلى وعينا عَبْر الذاكرة إلى ترك آثارٍ دائمة في الكائن الحي، بالطبع نحن هنا فقط معنيُّون بالتجارب الجديدة ذات الأهمية للعمل أو التأمل، وبالتالي، فإننا عادة لا نعي تنفُّسنا ونبضات القلب، وبالكاد ندرك عمل عضلاتنا وعظامنا في أثناء حركة أطرافنا.

ومع ذلك، من خلال استقبال انطباعات الحسِّ التي نتصرَّف على أساسها في الوقت الحالي أو لاحقًا، يحدث بعضُ التعديل الذي لا رجعة فيه في الجهاز العصبي، مما يؤدي إلى تعديلٍ جديدٍ، ومن دون الدخول في أي صورة ساذجة إلى حدٍّ ما عن توطين نشاط الدماغ وتكامله، من المغري مقارنة هذا التكيُّف بالعمليات غير القابلة للانعكاس التي تتم من خلالها استعادة الاستقرار في الوضع الجديد.

بطبيعة الحال، فإن إمكانية حدوث مثل هذه العمليات فقط وليس آثارها الفعلية هي وراثية، مما يترك الأجيال القادمة غير مثقلة بتاريخ التفكير، مهما كانت قيمته بالنسبة إلى تعليمهم.

في الإعراب عن أحرِّ التمنيَّات لنجاح تحقيقات المجموعة المتميزة من العلماء العاملين في هذا المعهد الجديد والمجهز بشكلٍ رائعٍ، لا يمكنني التفكير في احتمالٍ أفضل من أنه سيساهم في زيادة رؤيتنا لهذا الترتيب من الطبيعة الذي هو الهدف الأصلي لتفسير المفهوم الذري.

ملاحظة داخل نص الكتاب: في أثناء تحرير المخطوطة للنشر أُجريت بعضُ التعديلات الطفيفة على الشكل الرسمي للمقال.

الفصل الخامس

محاضرة رذرفورد التذكارية 1958

ذكريات مؤسِّس العلوم النووية
وبعض التطورات التي ترتَّبت على أعمالِه

1961

المقال الخامس: محاضرة رذرفورد التذكارية 1958:

ذكريات مؤسِّس العلوم النووية، وبعض التطورات التي ترتَّبت على أعمالِه 1961 (23).

(23) النص الحالي هو نسخة مفصَّلة، اكتملت عام 1961 من المحاضرة التي أُلقيت من دون مخطوطة معدَّة، في اجتماع الجمعية الفيزيائية بلندن في إمبريال كوليدج للعلوم والتكنولوجيا في 28 نوفمبر 1958.

لقد كان من دواعي سروري أن أقبل دعوة الجمعية الفيزيائية للمساهمة في سلسلة محاضرات رذرفورد التذكارية التي علَّق خلالها العديدُ من أقرب مساعدي رذرفورد على مرِّ السنين على إنجازاته العلمية الأساسية ونقلوا ذكرياتهم عن شخصه العظيم. وبصفتي شخصًا محظوظًا كوني انضممتُ -في سنٍّ مبكرة- إلى مجموعة الفيزيائيين الذين يعملون بإلهامٍ من رذرفورد، وأُدين بالكثير لصداقته الحميمة خلال السنوات العديدة التي تلت ذلك، أرحِّب بمهمة استرجاع بعض أعزّ ذكرياتي. ونظرًا لأنه من المستحيل في محاضرة واحدة إجراء مسحٍ كاملٍ لأعمال إرنست رذرفورد الهائلة والمتعددة الجوانب وعواقبها بعيدة المدى، لذا سأقتصر على الفترات التي كان لديَّ فيها ذكرياتٌ شخصية، والتطورات التي حدثت على مرأى عيني.

I

كانت المرة الأولى التي حظيتُ فيها بتجربة رائعة لرؤية رذرفورد والاستماع إليه في خريف عام 1911 عندما كنتُ أعمل في كامبريدج مع طومسون بعد دراستي الجامعية في كوبنهاجن، حيث نزل رذرفورد من مانشستر للتحدُّث في عشاء كافنديش السنوي. على الرغم من أنني لم أتواصل شخصيًّا مع رذرفورد في هذه المناسبة، إلا أنَّني تلقيتُ انطباعًا عميقًا عن سحر وقوة شخصيته التي تمكَّن من خلالها من تحقيق ما لا يُصدَّق تقريبًا أينما عمل.

أقيم العشاء في جوٍّ من اللطافة، وأتاح الفرصة للعديد من زملاء رذرفورد لتذكر بعض الحكايات التي اقتُرِنت باسمه بالفعل. من بين العديد من القصص التي توضح مدى استغراقه في

أبحاثه، ورد أنَّ مساعد مختبر كافنديش لاحظ أنه من بين جميع الفيزيائيين الشباب المتحمسين الذين عملوا على مرِّ السنين في المختبر الشهير، كان رذرفورد الشخص الوحيد الذي يقسم بالإله على جهازه بكل قوة.

من خطاب رذرفورد الخاص، أتذكَّر بشكلٍ خاصٍّ الدفءَ الذي استقبل به آخر نجاحٍ لصديقه القديم ويلسون، الذي حصل للتوِّ -من خلال طريقة غرفة السحاب المبتكرة- على الصور الأولى لمسارات أشعة ألفا، تُظهِر حالاتٍ واضحة من الانحناءات الحادة في طريقهم المعتاد المستقيم بشكلٍ ملحوظٍ. لقد كان رذرفورد على دراية تامة بالظاهرة التي قادته قبل أشهر قليلة فقط إلى اكتشاف نواة الذرة، ولكن هذه التفاصيل من تاريخ الأشعة يمكن الآن رؤيتها مباشرة بأعيننا. اعترف أنها كانت مفاجأة، مما جعله يشعر بمتعة بالغة. في هذا الصدد، تحدَّث رذرفورد بإعجابٍ شديدٍ عن المثابرة التي اتَّبعها ويلسون في أثناء رفقتهم في كافنديش في أبحاثه حول تكوين السحب باستخدام أجهزة أكثر دقة، كما أخبرني ويلسون لاحقًا، فقد أيقظ اهتمامه بهذه الظواهر الجميلة عندما كان شابًّا يشاهد ظهور الضباب واختفاءه عندما صعدت التيارات الهوائية إلى التلال الجبلية الاسكتلندية ونزلت مرة أخرى في الوديان.

بعد أسابيع قليلة من عشاء كافنديش، ذهبتُ إلى مانشستر لزيارة أحد زملاء والدي (الذي تُوفي مؤخرًا) وكان أيضًا صديقًا مقرَّبًا لروذرفورد. أتيحت لي الفرصة مرة أخرى لرؤية رذرفورد الذي حضر في غضون ذلك الاجتماع الافتتاحي لمجلس سولفاي في بروكسل، حيث التقى بلانك وأينشتاين للمرة الأولى. في أثناء حديث رذرفورد الذي ألقاه بحماسٍ مميزٍ حول العديد من الآفاق الجديدة في العلوم الفيزيائية، وافق بلطفٍ على رغبتي في الانضمام إلى المجموعة العاملة في مختبره، حيث كان يجب أن أنتهي في أوائل ربيع 1912 من دراستي في كامبريدج، وكنتُ مهتمًّا بشدة بأفكار طومسون الأصلية حول القوانين الأساسية للإلكترونات.

في تلك الأيام، تجمَّع العديدُ من الفيزيائيين الشباب من مختلف البلدان حول رذرفورد، جذبتهم عبقريتُه كفيزيائي ومواهبه الفريدة كقائد للتعاون العلمي. على الرغم من أنَّ رذرفورد كان دائمًا مشغولًا بشدة بعمله، فإنَّه تحلَّى بالصبر للاستماع إلى كل شابٍّ، إذا شعر أنَّ لديه أي فكرة مهما كانت متواضعة من وجهة نظره. في الوقت نفسه، كان يحظى باستقلالية تامة؛ لم يكن يحترم السلطة إلا قليلًا، ولم يكن قادرًا على تحمُّل ما أسمَّاه بـ«الحديث المتكلِّف».

في مثل هذه المناسبات، كان بإمكانه أحيانًا التحدُّث بطريقة صبيانية عن زملائه الموقَّرين، لكنه لم يسمح لنفسه أبدًا بالدخول في خلافاتٍ شخصية، وكان يقول: «هناك شخصٌ واحدٌ فقط يمكنه أن ينتزع سمعة المرء، وهذا هو الشخص ذاته!».

لقد كانت النتائج المترتبة على اكتشاف نواة الذرة هي مركز اهتمام كلِّ مجموعة مانشستر. في الأسابيع الأولى من إقامتي في المختبر، استجبتُ لنصيحة رذرفورد، وتحصَّلتُ على دورة تمهيدية حول الأساليب التجريبية للبحث الإشعاعي التي رُتِّبت وفقًا لتعليمات جيجر وماكوور ومارسدن المتمرسة لصالح الطلاب والزوار الجدد، ثم سرعان ما أصبحتُ مستغرِقًا في التضمينات النظرية العامة للنموذج الذري الجديد، وخاصة إمكانية أنها توفِّر تمييزًا بين ما يتعلَّق بالخصائص الفيزيائية والكيميائية للمادة، تلك التي تنشأ مباشرة في نواة الذرة نفسها، وتلك التي تعتمد في المقام الأول على توزيع الإلكترونات المرتبطة بالنواة على مسافاتٍ كبيرة جدًّا مقارنة بالأبعاد النووية.

توجَّب البحث عن تفسير التفكك الإشعاعي في التكوين الأساسي للنواة، من الواضح أنَّ الخصائص الفيزيائية والكيميائية العادية للعناصر تتجلَّى في خصائص النظام الإلكتروني المحيط. ووضح أيضًا أنه نظرًا للكتلة الكبيرة للنواة وامتدادها الصغير مقارنةً بكامل الذرة فإن تكوين نظام الإلكترون سيعتمد بشكلٍ حصريٍّ تقريبًا على إجمالي الشحنة الكهربائية للنواة. اقترحت هذه الاعتبارات في وقتٍ واحدٍ إمكانية تأسيس حساب الخصائص الفيزيائية والكيميائية لكل عنصرٍ على عددٍ صحيحٍ واحدٍ، يُعرف الآن عمومًا باسم العدد الذري، معبرًا عن الشحنة النووية كمضاعف للوحدة الأولية للكهرباء.

في تطوير هذه الآراء شجعتني على الأقل المناقشات مع جورج هيفسي الذي ميَّز نفسه بين مجموعة مانشستر من خلال معرفته غير المألوفة بطرق المواد الكيميائية، بالتحديد، منذ 1911، كان قد ابتكر طريقة التتبُّع البارعة التي أصبحت منذ ذلك الحين أداة قوية جدًّا في البحث الكيميائي والبيولوجي. ووصف هيفسي نفسَه بشكلٍ لا يخلو من الطرافة بأنَّه توجَّه إلى هذه الطريقة من خلال النتائج السلبية للعمل المتقن الذي أجراه كردٍّ فعلٍ على تحدٍّ من قِبَل رذرفورد الذي أخبره أنه «إذا كان يريد مصلحته» فعليه فصْل الراديوم (د) عن القيم الكمومية الكبيرة من كلوريد الرصاص المستخرج من البيتشبلند (أو اليورانينيت وهو خامٌ معدني نشط إشعاعيًّا،

يتكوَّن بشكلٍ أساسيٍ من ثاني أكسيد اليورانيوم) وتقديمه إلى رذرفورد عن طريق الحكومة النمساوية.

لقد أخذتْ آرائي شكلًا أكثر تحديدًا في المحادثات مع (هيفسي) حول المغامرة الرائعة في سنوات مونتريال ومانشستر، حيث قام رذرفورد ومعاونوه بعد اكتشافات (بيكريل) ومدام (كوري) ببناء علم النشاط الإشعاعي من خلال فكِّ الارتباط التدريجي للترابط المتسلسل عن طريق التفكك الإشعاعي. وهكذا، عندما علمتُ أنَّ عدد العناصر المستقرة والمتحللة التي تحددت بالفعل تجاوزت الأماكن المتاحة في الجدول الشهير لـ(مندلييف)، أدهشني أنَّ هذه المواد غير القابلة للانفصال كيميائيًّا، التي لفتت انتباه (سودي) إليها في وقتٍ مبكرٍ، وسميت بواسطته لاحقًا باسم الـ«نظائر»، تمتلك نفس الشحنة النووية، وتختلف فقط في الكتلة والبنية الداخلية للنواة. كان الاستنتاج الفوري هو أنه من خلال الاضمحلال الإشعاعي، فإنَّ العنصر بشكلٍ مستقلٍّ تمامًا عن أي تغييرٍ في وزنه الذري سيغيِّر مكانه في الجدول الدوري بخطوتين لأسفل أو خطوة واحدة للأعلى، بما يتوافق مع الانخفاض أو الزيادة في الشحنة النووية المصاحبة لـانبعاث الأشعة ألفا أو أشعة بيتا على التوالي.

عندما التفتُّ إلى رذرفورد لمعرفة ردِّ فعله على مثل هذه الأفكار، أعرب كما هي عادته عن اهتمامِه الحذِر بأي أفكارٍ واعدة بسيطة، لكنَّه حذَّر بضرورة أخذ الحيطة من المبالغة في الضغط على تأثير النموذج الذري والاستقراء من الأدلَّة التجريبية الهزيلة نسبيًّا. ومع ذلك، فإنَّ مثل هذه الآراء التي ربما نشأت من عدة جهات كانت في ذلك الوقت قد نوقشت بشكلٍ حيويٍ داخل مجموعة مانشستر، وكان الدليل على دعمها سريعًا لا سيما من خلال التحقيقات الكيميائية التي أجراها (هيفسي) و(رسل).

حصلتْ على وجه الخصوص فكرة العدد الذري على دعمٍ قويٍ باعتباره لاعبًا أساسيًّا في تحديد الخصائص الفيزيائية العامة للعناصر من التحقيقات الطيفية من قِبَل راسل وروسي لمزيجٍ من الأيونيوم والثوريوم، التي أشارت إلى هوية الأطياف البصرية لهذيْن العنصريْن، على الرغم من اختلاف خواصهما المشعَّة وأوزانهما الذرية. وعلى أساس تحليل الدليل الكامل المتاح آنذاك أشار راسل إلى العلاقة العامة بين العمليات الإشعاعية المحددة والتغيير الناتج في العدد الذري للعنصر في محاضرة إلى المجتمع الكيميائي في أواخر خريف 1912.

في هذا السبيل كان المثير للاهتمام أنَّه بعد إجراء مزيدٍ من البحث خصوصًا عن طريق فليك أُعلن قانون الإزاحة الإشعاعية في شكلِه الكامل بعد بضعة أشهرٍ من قِبَل سودي الذي كان يعمل في جامعة جلاسكو، وكذلك من قِبَل (كازيميرز فاچانسفي) في جامعة كارلسروه، لم يتعرَّف هؤلاء المؤلفون على العلاقة الوثيقة بين قانون الإزاحة الإشعاعية والسمات الأساسية لنموذج رذرفورد الذري، واعتبر (فاچانسفي) أنَّ التغيير في الخواص الكيميائية المرتبط بتكوين الإلكترون للذرات كحجة قوية ضد نموذج راذرفورد وفقًا لـأشعة ألفا وبيتا التي كانت تصدر من نواة الذرة. في الوقت نفسه تقريبًا قُدِّمت فكرة العدد الذري بشكلٍ مستقلٍ بواسطة (فان دن بروك) في جامعة أمستردام، ولكن في تصنيفه للعناصر كانت الشحنة النووية المختلفة لا تزال تُنسب إلى كل مادة مستقرة أو مشعَّة.

حتى هذه اللحظة، كانت الأهداف الأساسية للمناقشات داخل مجموعة مانشستر هي النتائج المباشرة لاكتشاف نواة الذرة. قدَّم البرنامج العام لتفسير الخبرة المتراكمة حول الخصائص الفيزيائية والكيميائية العادية للمادة على أساس نموذج رذرفورد للذرة رغم ذلك مشاكل أكثر تعقيدًا، وكان من المقرر توضيحها تدريجيًّا في السنوات التالية. وهكذا في عام 1912 أصبح هناك مسألة توجُّه أوَّلي فيما يتعلَّق بالسمات العامة للوضع الحالي لتصوُّر الذرَّة.

منذ البداية، كان واضحًا أنَّه طبقًا لنموذج رذرفورد، لا يمكن بأي حالٍ التوفيق بين الاستقرار النموذجي للأنظمة الذرية والمبادئ الكلاسيكية للميكانيكا والديناميكا الكهربية.

في الحقيقة وطبقًا لميكانيكا نيوتن، لا يوجد نظامٌ لشحن النقاط يعترف بتوازنٍ ثابتٍ مستقرّ، وأي حركة للإلكترونات حول النواة ستؤدي -وفقًا للديناميكا الكهربية لماكسويل- إلى تبديد الطاقة من خلال الإشعاع المصحوب بانكماشٍ ثابتٍ في النظام، مما يؤدي إلى اجتماع النواة والإلكترونات داخل منطقة امتداد أصغر بكثيرٍ من الأبعاد الذرية (أي سقوط الإلكترونات داخل نواة الذرة).

ومع ذلك، لم يكن هذا الموقف مفاجئًا للغاية، حيث كشف بالفعل عن قيودٍ أساسية للنظريات الفيزيائية الكلاسيكية من خلال اكتشاف بلانك في عام 1900 لمقدار الفعل الكوني الذي وجد -خاصة عن طريق أينشتاين- مثل هذا التطبيق الواعد في حساب درجات حرارة محددة وتفاعلات ضوئية كيميائية. بغض النظر تمامًا عن الأدلة التجريبية الجديدة فيما يتعلَّق ببنية الذرَّة، كان

هناك بالتالي توقُّعٌ واسعُ النطاق بأنَّ المفاهيم الكمومية قد يكون لها تأثيرٌ حاسمٌ على مشكلة التكوين الذري للمادة بأكملها.

وهكذا، حاول (هاس) في عام 1910 -على أساس نموذج طومسون الذري- إصلاحَ أبعاد وفترات الحركات الإلكترونية عن طريق علاقة بلانك بين الطاقة وتردد تذبذبات التوافقيات. علاوة على ذلك، استخدم (جي نيكلسون) في عام 1912 العزمَ الزاوي الكمومي في بحثه عن أصل خطوطٍ معينة في أطياف السدم النجمية والإكليل الشمسي.

قبل كل شيء، يجب أن نذكر أنه باتِّباع الأفكار المبكرة لـ(نيرنست) حول اللف الكمومي للجزيئات، توقع أن يحقق تحليل الأطياف الجزيئية في النهاية -على أساس التفسير اللاحق من خلال نظرية الكمِّ- قانون الجمع الطيفي العام.

في وقتٍ مبكرٍ من إقامتي في مانشستر في ربيع عام 1912، أصبحتُ مقتنعًا بأنَّ القوانين الأساسية لإلكترون ذرة رذرفورد محكومٌ بالفعل الكمومي. عثرتُ على دعمٍ لهذا الرأي ليس فقط في حقيقة أنَّ علاقة بلانك بدتْ قابلة للتطبيق تقريبًا على الإلكترونات الأكثر ارتباطًا بالخصائص الكيميائية والبصرية للعناصر، ولكن بشكلٍ خاصٍّ في تتبُّع العلاقات المتشابهة فيما يتعلَّق بالإلكترونات الأكثر ارتباطًا في الذرة التي كشفت عنها خاصية الاختراق الإشعاعي التي اكتشفها (باركلا). وهكذا، فإنَّ قياسات الطاقة اللازمة لإنتاج إشعاع (باركلا) عن طريق القصف الإلكتروني لعناصر مختلفة، التي أجراها (ويدينجتون) في نفس الوقت الذي أجريت فيه في كامبريدج، أظهرت انتظامًا بسيطًا في النوع لأقوى طاقة ملزمة يمكن توقُّعها ليدور إلكترون في مدار بلانك حول النواة بشحنة مرقمة بالعدد الذري. من محاضرة رذرفورد التي نُشرت وقتها لـ(لورنس براج)، كنتُ مهتمًّا جدًّا بمعرفة أنَّ (ويليام براج) في جامعة ليدز في تحقيقه الأول لأطياف الأشعة السينية، استنادًا إلى اكتشاف (لاو) في عام 1912، كان مدركًا تمامًا لتأثير نتائج (ويدينجتون) على الاتصال بين إشعاع (باركلا) وترتيب العناصر في جدول مندلييف، وهي المشكلة التي من خلال عمل (موسلي) في جامعة مانشستر سرعان ما ستتلقف مثل هذا التوضيح الكامل.

خلال الشهر الأخير من إقامتي في مانشستر، كنتُ مشغولًا بشكلٍ أساسيٍّ بالتحقيق النظري لقوة إيقاف المادة للأشعة ألفا وبيتا، هذه المشكلة التي ناقشها في الأصل (طومسون) من وجهة نظر نموذجه الذري، وأعاد (داروين) فحصَها للتوِّ على أساس نموذج رذرفورد.

فيما يتعلَّق بالاعتبارات المذكورة أعلاه فيما يتعلَّق بالترددات التي ينطوي عليها ارتباط الإلكترون في الذرة، فقد خطر لي أنَّ نقل الطاقة من الجسيمات إلى الإلكترونات يمكن معالجته ببساطة على غرار تشتُّت وامتصاص الإشعاع، وبهذه الطريقة، ثبت أنه من الممكن تفسير نتائج و2 للهيدروجين والهيليوم وفقًا للأدلة I قياسات طاقة التوقف كدعمٍ إضافيٍّ لنسب الأعداد الذرية الكيميائية العامة، ولا سيما مع عرض رذرفورد و(رويدز) للتكوين من غاز الهيليوم عن طريق جمع الجسيمات السابقة المتسربة من أنابيب انبعاث رقيقة الجدران. أيضًا بالنسبة إلى الحالة الأكثر تعقيدًا للمواد الثقيلة، تأكدت من توافق تقريبي مع الأعداد الذرية المتوقعة والقيم المقدرة لطاقات الربط للإلكترونات، لكن الطرق النظرية كانت بدائية للغاية بحيث لا تعطي نتائجَ أكثر دقة. كما هو معروف جيدًا، تحقَّقت المعالجة المناسبة للمشكلة بالطرق الحديثة لميكانيكا الكم لأول مرة في عام 1930 بواسطة (هانز بيته).

على الرغم من تركيز رذرفورد في ذلك الوقت على إعداد كتابه الرائع «المواد المشعَّة وإشعاعاتها» فإنَّه تابع عملي باهتمامٍ كبيرٍ، مما أتاح لي الفرصة للتعرُّف على العناية التي كان دائمًا يوليها لمنشورات تلاميذه. بعد عودتي إلى الدنمارك، تزوجت في منتصف صيف عام 1912، وفي رحلة زفافنا في أغسطس إلى إنجلترا واسكتلندا، مررنا أنا وزوجتي عبر مانشستر لزيارة رذرفورد وتسليم المخطوطة الكاملة لورقتي البحثية حول مشاكل التوقف. استقبلنا كلٌّ من رذرفورد وزوجته بالودِّ الذي أرسى أساس الصداقة الحميمة التي ربطت العائلات عبر السنين.

II

بعد الاستقرار في كوبنهاجن، بقيتُ على اتصالٍ وثيقٍ مع رذرفورد، كنتُ أبلغه بانتظامٍ تطور العمل على المشكلات الذرية العامة التي كنت قد بدأتها في مانشستر. كانت إجابات رذرفورد المشتركة، التي كانت دائمًا مشجِّعة للغاية، هي العفوية والبهجة التي تحدث بها عن العمل في مختبره. لقد كانت بالفعل بداية مراسلة طويلة استمرت أكثر من 25 عامًا، أحيت-في كل مرة أراجعها- ذكرياتي عن حماس رذرفورد للتقدُّم في المجال الذي بدأه بنفسه، والاهتمام الحار الذي أبداه بمساعي كل من يحاول المساهمة فيه. كانت رسائلي إلى رذرفورد في خريف عام 1912 تتعلق بالمساعي المستمرة لتتبُّع دور الفعل الكمومي للقوانين الأساسية للإلكترون في ذرة رذرفورد، بما في ذلك مشاكل الارتباطات الجزيئية والتأثيرات الإشعاعية والمغناطيسية.

ومع ذلك، فإن سؤال الاستقرار المقدَّم في جميع هذه الاعتبارات يزيد تعقيد الصعوبات التي تحفِّز البحثَ عن قوى السيطرة. ومع ذلك، بعد محاولاتٍ مختلفة لتطبيق الأفكار الكمومية بطريقة أكثر اتساقًا، صدمني في أوائل ربيع عام 1913 أنَّ هناك دليلًا لمشكلة الاستقرار الذري ينطبق بشكلٍ مباشرٍ على ذرة رذرفورد قدمت من خلال القوانين البسيطة الملحوظة التي تحكم الأطياف البصرية للعناصر.

أوضح (ريدبيرج)، على أساس القياسات الدقيقة للغاية للأطوال الموجية للخطوط الطيفية بواسطة (رولاند) وآخرين، وبعد مساهمات (بالمر) و(شوستر) -سلف رذرفورد في كرسي مانشستر- قوانين الطيف العامة ببراعة أكبر، كانت النتيجة الرئيسة للتحليل الشامل للسلسلة لكل خط في طيف υ الواضحة في أطياف الخط وعلاقتها المتبادلة هي الاعتراف بأنَّ التردُّد عنصر معين يمكن تمثيله بدقة لا مثيل لها هكذا:

$$\upsilon = T' - T''$$

لأي عنصرٍ T هما أي اثنين من الأطوال الطيفية من الأطياف المتعددة T'' و T' حيث.

من الواضح أنَّ قانون الجمع الأساسي هذا يتحدَّى التفسير الميكانيكي العادي، ومن المثير للاهتمام أن نتذكر كيف أكد اللورد (رايلي) في هذا الصدد بشكلٍ وثيقٍ على أنَّ أيَّ علاقة عامة بين ترددات الأنماط العادية للاهتزاز لنموذج ميكانيكي ستكون تربيعية وليست خطية كما في هذه الترددات. بالنسبة إلى ذرة رذرفورد، يجب ألا نتوقع طيفًا خطيًّا، لأنَّه وفقًا للديناميكا الكهربية العادية فإن ترددات الإشعاع المصاحب للحركة الإلكترونية ستتغيَّر باستمرارٍ مع الطاقة المنبعثة، لذلك كان من الطبيعي محاولة تأسيس تفسير الأطياف تبعًا لقانون التجميع مباشرة.

هو ثابت بلانك، h حيث، $h\upsilon$ بقبول فكرة أينشتاين عن كمات الضوء أو الفوتونات ذات الطاقة ما دفع المرء إلى افتراض أنَّ أيَّ انبعاثٍ أو امتصاصٍ للإشعاع بواسطة الذرة هو عملية فردية على أنها طاقة لربط الإلكترونات في حالة مستقرة، hT مصحوبة بنقل الطاقة $h\,(T' - T'')$، وتفسير أو ما يُسمَّى بحالة ثبات الذرة، هذا الافتراض قدَّم شرحًا فوريًّا للمظهر المتقلِّب الواضح لخطوط الانبعاث والامتصاص في أطيافٍ متسلسلة، وهكذا، في عمليات الانبعاث نشهد انتقال الذرة من مستوى طاقة أعلى إلى مستوى طاقة أقل، بينما في عمليات الامتصاص نتعامل بشكلٍ عامٍّ مع نقل الذرة من الحالة الأساسية المستقرة مع طاقة أقل إلى مستوى أعلى كذرة ذات حالة مستثارة.

في أبسط حالة من طيف الهيدروجين، تكون المصطلحات بدقة كبيرة يُرمز لها كالتالي:

$$T_n = R/n^2$$

ثابت (ريدبرج). وهكذا أدَّى التفسير المشار إليه إلى سلسلة من Rعددٌ صحيحٌ، و n حيث القيم المتناقصة لطاقة الارتباط للإلكترون في ذرة الهيدروجين، مما يشير إلى عملية متدرجة يمرُّ بها الإلكترون، في الأصل على مسافة كبيرة من النواة عن طريق انتقالات إشعاعية إلى حالاتٍ أقل فأقل، حتى يصل إلى الحالة المستقرة، n ثابتة من روابط أقوى وأكثر ثباتًا، يتميز بقيم علاوة على ذلك، فإنَّ مقارنة طاقة الربط في هذه الحالة مع طاقة $n = 1$. المحددة بواسطة الإلكترون المتحرك في مدار (كبلر) حول النواة أسفرت عن أبعادٍ مدارية من نفس ترتيب الأحجام الذرية المشتقة من خصائص الغازات. اعتمادًا على نموذج رذرفورد الذري، اقترح هذا الرأي أيضًا فورًا تفسيرًا لظهور ثابت (ريدبيرج) في الأطياف الأكثر تعقيدًا للعناصر الأخرى، وهكذا، استنتج أننا هنا نواجه عمليات انتقالٍ تحتوي على حالات الاستثارة للذرة، حيث أحضرت إحدى الإلكترونات إلى خارج المنطقة التي تحتلها الإلكترونات الأخرى الأكثر ارتباطًا بالنواة، وبالتالي تعرضنا لمجالٍ من القوة يشبه تلك المحيطة بوحدة الشحنة.

من الواضح أنَّ تتبُّع علاقة الوثيقة بين نموذج رذرفورد الذري والأدلة الطيفية يمثِّل مشاكل معقدة، من ناحية، استند تعريف شحنة وكتلة الإلكترون والنواة كليًّا على تحليل الظواهر الفيزيائية من حيث مبادئ الميكانيكا الكلاسيكية والكهرومغناطيسية. من ناحية أخرى، فإنَّ ما يُسمَّى بالفرضية الكمومية، التي تنص على أنَّ أيَّ تغييرٍ في الطاقة الجوهرية للذرة يتكوَّن من انتقالٍ كاملٍ بين حالتين ثابتتين، يستبعد إمكانية المحاسبة على المبادئ الكلاسيكية للعمليات الإشعاعية أو أي تفاعلٍ آخر يتضمن استقرار الذرة. كما نعلم اليوم، فإنَّ حل مثل هذه المشكلات يتطلَّب تطويرَ أشكالٍ رياضية، والتفسير الصحيح الذي ينطوي على مراجعة جذرية لأساس الاستخدام الواضح للمفاهيم الفيزيائية الأوَّلية، والاعتراف بالعلاقات التكميلية بين الظواهر التي لوحظت في ظلِّ مختلف الظروف التجريبية. ومع ذلك، في ذلك الوقت، أمكن إحراز بعض التقدُّم من خلال استخدام الصور المادية الكلاسيكية لتصنيف الحالات الثابتة بناءً على افتراضات بلانك الأصلية فيما يتعلَّق بحالات الطاقة لتذبذبات التوافقيات، بالأخص قُدِّمت نقطة البداية من خلال المقارنة الوثيقة بين متذبذبٍ بتردُّدٍ معينٍ وحركة كبلر للإلكترون حول النواة، مع تردُّدٍ دائري اعتمادًا على طاقة الربط.

تمامًا كما في حالة المتذبذب التوافقي أظهرت عملية حسابية بسيطة أنَّ لكل حالة من الحالات الثابتة لذرة الهيدروجين يمكن تحديد الإجراء المتكامل خلال الفترة المدارية للإلكترون بـ nh، وهي حالة المدارات الدائرية التي تعادل الزخم الزاوي الكمومي بوحدات $h / 2\pi$.

والكتلة m e يتضمَّن هذا التحديد تثبيت ثابت (ريدبيرج) من حيث الشحنة الإلكترونية للإلكترون وثابت بلانك، وفقًا للصيغة:

$$R = \frac{2\pi^2 me^4}{h^3}$$

لقد وُجد أنها تتفق مع القيمة التجريبية ضمن دقة القياسات المتاحة لـ h و m و e.

على الرغم من أنَّ هذا الاتفاق قدَّم إشارة إلى مجال استخدام النماذج الميكانيكية في تصوير الحالات الثابتة، فإنَّ الصعوبات التي يتضمَّنها أيُّ مزيجٍ من الأفكار الكمومية ومبادئ الميكانيكا العادية ظلَّت قائمة بالطبع، لذلك كان من المطمئن أكثر أن نجد أنَّ النهج الكامل للمشاكل الطيفية قد استوفى المطلب الواضح باحتضان الوصف المادي الكلاسيكي في الحد حيث يكون الإجراء المتضمن كبيرًا بما يكفي للسماح بإهمال الكمومية الفردية، قدَّمتْ هذه الاعتبارات في الواقع أول إشارة إلى ما يُسمَّى «مبدأ المطابقة» الذي يعبر عن هدف تمثيل الحساب الإحصائي الأساسي لفيزياء الكم كتعميمٍ عقلاني للوصف الفيزيائي الكلاسيكي.

وبالتالي، يجب في الديناميكا الكهربائية العادية تحديد تركيبة الإشعاع المنبعث من نظامٍ إلكترونيٍّ من خلال تردُّدات واتساع التذبذبات التوافقية التي يمكن من خلالها حلُّ حركة النظام. بالطبع، لا توجد علاقة بسيطة كهذه بين حركة كبلر للإلكترون حول نواة ثقيلة والإشعاع المنبعث من التحولات بين الحالات الثابتة للنظام، ومع ذلك، في الحالة المحدودة للانتقالات بين الحالات كبيرة مقارنةً باختلافها، يمكن إثبات أنَّ تردُّدات مكونات n التي تكون فيها قيم العدد الكمومي الإشعاع، تظهر كنتيجة لعمليات الانتقال الفردية العشوائية، تتطابق بشكلٍ مقاربٍ مع المكونات التوافقية لحركة الإلكترون.

علاوة على ذلك، فإنَّ حقيقة أنَّه في مدار كبلر -على عكس التذبذب التوافقي البسيط- لا يظهر فقط تواتُر الدوران ولكن أيضًا في التوافقيات الأعلى مما يوفر إمكانية تتبُّع التشبيه الكلاسيكي

فيما يتعلَّق بالتركيبة غير المقيدة للمصطلحات في أطياف ذرة الهيدروجين.

ومع ذلك، فإنَّ الإثبات الواضح للعلاقة بين نموذج رذرفورد الذري والدليل الطيفي كان لفترة من الزمن يعوقه ظرفٌ غريبٌ؛ قبل عشرين عامًا، لاحظ (بيكرينج) في أطياف النجوم البعيدة سلسلةً من الخطوط ذات الأطوال الموجية التي تظهر علاقة عددية وثيقة مع طيف الهيدروجين العادي، لذلك نُسبت هذه الخطوط بشكلٍ عامٍ إلى الهيدروجين، واعتقد (ريدبيرج) أنَّها تزيل التناقض الواضح بين بساطة طيف الهيدروجين وتعقيد أطياف العناصر الأخرى، بما في ذلك أطياف القلويات، التي يبدو هيكلُها أقرب إلى طيف الهيدروجين. لقد دعم هذا الرأي أيضًا عالم التحليل الطيفي البارز (فلور)، الذي لاحظ في ذلك الوقت في التجارب المعملية من خلال مزيجٍ من الهيدروجين وغاز الهيليوم خطوطَ (بيكرينج) والسلسلة الطيفية الجديدة ذات الصلة.

ومع ذلك، لا يمكن تضمين خطوط (بيكرينج) و(فاولر) في صيغة (ريدبيرج) لطيْف بالتعبير عن المصطلحات الطيفية بأخذ نصف تكاملاتٍ n الهيدروجين، إلا إذا تم السماح للرقم بالإضافة إلى قيمٍ متكاملة؛ لكن من الواضح أنَّ هذا الافتراض سيدمر النهج المقارب للعلاقة الكلاسيكية بين الطاقة والترددات الطيفية. من ناحية أخرى، فإنَّ مثل هذا التوافُق سيحمل طيفَ nh التي يتمُّ تحديد حالاتها الثابتة بنفس القيمة Ze نظامٍ يتكوَّن من إلكترون مرتبطٍ بنواة شحنة من الإجراء المتكامل. في الواقع، سيتم إعطاء المصطلحات الطيفية لمثل هذا النظام بواسطة في صيغة n نفس النتيجة مثل إدخال قيم نصف متكاملة لـ $Z = 2$ الذي ينتج عند Z^2R / n^2، (ريدبيرج). وبالتالي، كان من الطبيعي أن نعزو خطوط (بيكرينج) و(فاولر) إلى الهيليوم المتأيِّن من خلال الإثارة الحرارية العالية كالتي في النجوم وفي التفريغ القوي الذي استخدمها (فاولر). في الواقع، إذا تم تأكيد هذا الاستنتاج، فسيتم اتخاذ خطوة أولى نحو إنشاء علاقات كمومية بين خصائص العناصر المختلفة على أساس نموذج رذرفورد.

III

عندما راسلتُ في مارس 1913 رذرفورد، أرفقتُ مسودة أول ورقة بحثية عن النظرية الكمومية للقوانين الحاكمة للذرة، شددتُ على أهمية تسوية مسألة أصل خطوط (بيكرينج)، واغتنمتُ الفرصة لسؤاله عن إمكانية تنفيذ التجارِب لهذا الغرض في مختبره، حيث كان الجهاز

الطيفي المناسب متاحًا منذ أيام (شوستر)، وتلقَّيتُ إجابة سريعة، وهكذا كانت سمات حكم رذرفورد العلمي الدقيق وموقفه الإنساني المفيد، سأقتبسها بالكامل:

عزيزي دكتور بور 20 مارس 1913

لقد تلقيتُ ورقتَكَ البحثية بصدرٍ رحبٍ، وقرأتها باهتمامٍ كبيرٍ، لكنَّني أريد أن ألقي نظرة عليها بعناية عندما يكون لديَّ وقتُ فراغٍ أكبر. إنَّ أفكارَك حول طريقة منشأ طيف الهيدروجين بارعة للغاية، ويبدو أنها تعمل بشكلٍ جيدٍ، لكنَّ المزجَ بين أفكار بلانك والميكانيكا القديمة يجعل من الصعب للغاية تكوين فكرة فيزيائية والتي تُعدُّ أساسًا لها، يبدو لي أنَّ هناك صعوبة كبيرة في فرضيتك، التي ليس لديَّ شكٌّ في أنَّك تدركها تمامًا، وهي كيف يقرر الإلكترون التردد الذي سيهتز عنده عندما ينتقل من حالة ثابتة إلى أخرى؟

يبدو لي أنَّه يجب أن تفترض أنَّ الإلكترون يعرف مسبقًا أين سيتوقف.

هناك انتقادٌ للطابع البسيط الذي انتهجته في ترتيب ورقتك البحثية، أعتقد في سعيك لأن تكون واضحًا جعلتَ بحثَكَ طويلًا جدًّا، وميالًا لتكرار تصريحاتك في أجزاءٍ مختلفة من الورقة، أعتقد أنه يجب اقتطاع أجزاءٍ من ورقتك، وأعتقد أنه يمكنك القيام بذلك من دون التضحية بأي شيءٍ من أجل الوضوح. لا أعرف ما إذا كنتَ تقدِّر حقيقة أنَّ الصحف الطويلة لديها وسيلة لإخافة القراء الذين يشعرون أنه ليس لديهم الوقت للغوص فيها.

سأراجع ورقتك بعناية فائقة، وأعلمك برأيي في التفاصيل، سأكون سعيدًا جدًّا، وسأقوم بإرسالها إلى (فيل ماج)، ولكن سأكون أكثر سعادة إذا كان من الممكن خفض حجمها إلى جزءٍ معقولٍ. على أي حالٍ، سأقوم بإجراء أي تصحيحات ضرورية باللغة الإنجليزية. سأكون سعيدًا جدًّا برؤية أوراقك اللاحقة، ولكن من فضلك خذ نصيحتي بجدية، وحاول أن تجعلها موجزة قدر الإمكان من دون الإخلال بوضوحها.

يسعدني أن أعلم بمجيئك إلى إنجلترا لاحقًا، وسنكون سعداء جدًّا برؤيتك عندما تأتي إلى مانشستر.

بالمناسبة، كنتُ مهتمًّا كثيرًا بتكهناتك فيما يتعلق بطيف (فاولر)، لقد ذكرت الأمر لـ(إيفانز) هنا، الذي أخبرني أنه يوليها اهتمامًا كبيرًا، وأعتقد أنه من المحتمل أن يقوم ببعض التجارب حول هذا الموضوع عندما يأتي مرة أخرى في الفصل التالي. يسير العمل

العام بشكلٍ جيدٍ، لكنَّني تأخرت مؤقتًا عندما وجدتُ أنَّ كتلة الجسيم ألفا تأتي أكبر مما يجب أن تكون عليه، إذا كان هذا صحيحًا، فهو استنتاجٌ مهمٌّ لدرجة أنني لا أستطيع نشره حتى أتأكد من دقتي في كل نقطة، تستغرق التجارِب وقتًا طويلًا، ويجب إجراؤها بدقة كبيرة.

المخلص

إ. راذرفورد

ملاحظة: أفترض أنَّه ليس لديك اعتراضٌ على تقديري في قطع أي مسألة قد أعتبرها غير ضرورية في ورقتك؟ برجاء الرد.

كانت ملاحظة رذرفورد الأولى وثيقة الصلة بالموضوع بالتأكيد، حيث تطرَّق إلى نقطة كانت ستصبح قضية مركزية في المناقشات المطولة اللاحقة.

كانت آرائي الخاصة في ذلك الوقت، كما عبَّرتُ عنها في محاضرة في اجتماعٍ للجمعية الفيزيائية الدنماركية في أكتوبر 1913، أنَّ مجرد الابتعاد الجذري عن المطالب المعتادة للتفسير المادي المتضمن في الافتراض الكمومي يجب أن يترك مجالًا كافيًا بحد ذاته لإمكانية تحقيق دمج الافتراضات الجديدة في مخططٍ متسقٍ منطقيًّا في الوقت المناسب.

فيما يتعلق بملاحظة رذرفورد، من المهم أن نذكر أن أينشتاين في ورقته الشهيرة عام 1917 حول اشتقاق صيغة بلانك للإشعاع الحراري، اتَّخذ نفس نقطة البداية فيما يتعلَّق بأصل الأطياف، وأشار إلى التشابُه بين القوانين الإحصائية التي تحكم حدوثَ عمليات الإشعاع التلقائية والقانون الأساسي للانحلال الإشعاعي الذي صاغه رذرفورد و(سودي) بالفعل في 1903. إنَّ هذا القانون سمح لهم بضربة واحدة بفكِّ تشابُك الظواهر المتعددة للنشاط الإشعاعي الطبيعي المعروف آنذاك، أثبت أيضًا الدليل على فهم التفرع الغريب الذي لوحظ لاحقًا في عمليات الانحلال التلقائي.

النقطة الثانية التي أثيرت بشكلٍ مركزٍ في رسالة رذرفورد جعلتني في موقفٍ محرجٍ للغاية. في الواقع، قبل أيامٍ قليلة من تلقي إجابته، كنتُ قد أرسلتُ إلى رذرفورد نسخة مطوَّلة إلى حدٍّ كبيرٍ من المخطوطة السابقة، والإضافات بشكلٍ خاصٍّ فيما يتعلَّق بالعلاقة بين أطياف الانبعاث والامتصاص والمراسلات المقاربة مع النظريات الفيزيائية الكلاسيكية.

لذلك شعرتُ أنَّ الطريقة الوحيدة لتصحيح الأمور هي الذهاب في الحال إلى مانشستر والتحدث في كلِّ شيء مع رذرفورد نفسه. على الرغم من أن رذرفورد كان مشغولًا أكثر من أي وقتٍ

مضى، إلا أنه أظهر صبرًا ملائكيًّا تقريبًا معي، وبعد مناقشاتٍ خلال عدة أمسيات طويلة، أعلن خلالها أنه لم يفكر أبدًا في أنني يجب أن أثبت مثل هذا العناد، لقد وافق على ترك جميع النقاط القديمة والجديدة في الورقة النهائية.

بالتأكيد، حسَّنتُ الأسلوب واللغة بشكلٍ أساسي من خلال مساعدة رذرفورد ونصائحه، وأتيحت لي الفرصة في كثيرٍ من الأحيان للتفكير في مدى صحته في الاعتراض على العرض التقديمي المعقَّد إلى حدٍّ ما، وخاصة التكرارات العديدة الناتجة عن الرجوع إلى الأدبيات السابقة.

لذلك، أتاحت محاضرة رذرفورد التذكارية هذه فرصة مرحبًا بها لتقديم وصفٍ أكثر إيجازًا للتطور الفعلي للحجج في تلك السنوات.

خلال الأشهر التالية، أخذ النقاش حول أصل الخطوط الطيفية المنسوبة إلى أيونات الهيليوم منعطفًا مثيرًا، في المقام الأول، كان (إيفانز) قادرًا على إنتاج خطوط (فاولر) في التفريغ من خلال الهيليوم شديد النقاء، دون إظهار أي أثرٍ لخطوط الهيدروجين العادية، ومع ذلك، لم يقتنع (فاولر) وشدَّد على الطريقة الزائفة التي قد تظهر بها الأطياف في مخلوط الغازات. قبل كل شيء، أشار إلى أنَّ قياساته الدقيقة للأطوال الموجية لخطوط (بيكرينج) لا تتطابق تمامًا مع تلك المحسوبة من معادلي حيث $Z = 2$. ومع ذلك، عثر بسهولة على إجابة عن النقطة الأخيرة، في التعبير عن ثابت (رايدبرج) لا يجب أن تؤخذ على أنها m حيث كان من الواضح أنَّ الكتلة هي كتلة النواة. M كتلة إلكترون حرٍّ، ولكن كما يطلق عليها كتلة المخفضة $mM(m+M)^{-1}$، حيث في الواقع، أخذ هذا التصحيح في الاعتبار، كانت العلاقة المتوقعة بين أطياف الهيدروجين والهيليوم المتأين متوافقة تمامًا مع جميع القياسات، وقد رحَّب (فاولر) بهذه النتيجة على الفور، الذي اغتنم الفرصة للإشارة إلى أنه -أيضًا في أطياف العناصر الأخرى- هناك التسلسل الذي لوحظ فيه أنَّ ثابت (رايدبرج) العادي يجب أن يضاعف بعددٍ قريبٍ من أربعة. يمكن الآن التعرُّف على أطياف التسلسل التي يُشار إليها عمومًا باسم أطياف الشرارة على أنها تنشأ من أيونات مثارة على عكس ذلك تُسمَّى أطياف القوس بسبب الذرات المحايدة المثارة.

كانت الدراسات الطيفية المستمرة في السنوات التالية للكشف عن العديد من أطياف الذرات، التي لم يُمحَ منها إلكترون واحد فقط بل عدة إلكترونات. على وجه الخصوص، أدَّت الدراسات المعروفة التي أجراها (بوين) إلى إدراك أنَّ أصل الأطياف السديمية التي ناقشها (نيكولسون) لا يجب البحث عنها في عناصر افتراضية جديدة، ولكن في ذرات الأكسجين والنيتروجين التي في

حالة شديدة التأيُّن. في النهاية، نشأ احتمالُ الوصول، من خلال تحليل العمليات التي ترتبط بها الإلكترونات واحدة تلو الأخرى بالنواة، في مسحٍ لربط كل إلكترون في الحالة مستقرة لذرة رذرفورد. في عام 1913، كان الدليل التجريبي لا يزال نادرًا جدًّا، ولم تكن الطرق النظرية لتصنيف الحالات الثابتة متطورة بشكلٍ كافٍ للتعامل مع مهمة طموحة جدًّا.

IV

في غضون ذلك، استمرَّ العمل على التكوين الإلكتروني للذرة تدريجيًّا، وسرعان ما سمحتُ لنفسي بطلب المساعدة والمشورة من رذرفورد. وهكذا، في يونيو 1913، ذهبتُ إلى مانشستر بورقة ثانية تناولت إلى جانب المناقشة المستمرة لقانون الإزاحة الإشعاعية وأصل إشعاع (باركلا)، الحالة المستقرة للذرات التي تحتوي على عدة إلكترونات. فيما يتعلق بهذه المشكلة، حاولتُ مبدئيًّا ترتيبَ مدارات الإلكترون في حلقاتٍ مغلقة تشبه بنية الغلاف التي قدمها في الأصل (طومسون) في محاولته المبكرة لحساب نموذجه الذري للصفات الدورية في جدول مندلييف للعناصر.

قابلتُ في مختبر رذرفورد في تلك المناسبة (هيفسي) و(بانيث) اللذيْن أخبراني عن نجاح الدراسات المنهجية الأولى بطريقة التتبُّع لقابلية ذوبان كبريتيد الرصاص والكرومات، التي قاما بتنفيذها معًا في بداية ذلك العام في فيينا. من جميع النواحي، كانت هذه الزيارات المتكررة إلى مانشستر بمثابة تحفيزٍ كبيرٍ، ومنحتني فرصة ترحيب لمواكبة العمل في المختبر. في ذلك الوقت، بمساعدة (روبنسون) كان رذرفورد منشغلًا بتحليل انبعاث أشعة جاما، وبالتعاون مع (أندريد) درس أطياف أشعة جاما. علاوة على ذلك، كان (داروين) و(موزلي) منشغلين بشدة بالتحقيقات النظرية والتجريبية الدقيقة حول حيود الأشعة السينية في البلورات.

سرعان ما ظهرت فرصةٌ خاصة لرؤية رذرفورد مرة أخرى في سياق اجتماع الرابطة البريطانية لتقدُّم العلوم في برمنجهام في سبتمبر 1913. في الاجتماع الذي حضرته السيدة (كوري)، دارت هناك مناقشة عامة حول مشكلة الإشعاع بمشاركة (رايدليج) و(لارمور) و(لورنتز)، وخاصة (جينز) الذين قدموا مسحًا تمهيديًّا لتطبيق نظرية الكم على مشكلة القوانين الأساسية للذرة. كان هذا العرض بالتأكيد أول تعبيرٍ علني عن الاهتمام الجاد بالاعتبارات التي قوبلت بشكلٍ عامٍّ خارج مجموعة مانشستر بالكثيرِ من الشكِّ.

كانت الحادثة التي امتعت رذرفورد ونحن معه عبارة عن تعليق اللورد (رايلي) ردًّا على طلبٍ رسميٍّ من السير (جوزيف لارمور) للتعبير عن رأيه في آخر التطورات. كان الرد السريع من المخضرم العظيم، الذي أسهم في السنوات السابقة بشكلٍ حاسمٍ في توضيح مشاكل الإشعاع، هو: «في أيام شبابي تحيَّزتُ بشدة لوجهات نظرٍ معينة، ومن بينها أنَّ الرجل الذي تجاوز عامه الستين يجب ألا يعبِّر عن رأيه في الأفكار الحديثة، على الرغم من أنني يجب أن أعترف أنني اليوم لا أتبنَّى هذا الرأي بقوة كبيرة، إلا أنني أحتفظ بها بقوة كافية لعدم المشاركة في هذا النقاش!».

في زيارتي لمانشستر في يونيو، كنتُ قد ناقشتُ مع (داروين) و(موسلي) مهمة التسلسل الصحيح لترتيب العناصر وفقًا لعددهم الذري، وتعلَّمتُ بعد ذلك لأول مرة عن خطط (موسلي) لتسوية هذه المشكلة عن طريق قياساتٍ منهجية لأطيافٍ عالية التردُّد للعناصر بواسطة طريقة (لاو-براج). بفضل جهد (موسلي) غير العادي وهدايا التجريب الهادف، تطور عمله بسرعة مذهلة، وفي نوفمبر 1913، تلقيتُ أكثر رسالة مثيرة للاهتمام منه مع سرد لنتائجه المهمة، ومع بعض الأسئلة المتعلقة بتفسيرها في السطور التي أثبتت أنها قابلة للتطبيق على الأطياف البصرية.

في التاريخ الحديث للفيزياء والكيمياء، اجتذبتْ أحداثٌ قليلة منذ البداية اهتمامًا عامًّا مثل اكتشاف (موسلي) للقوانين البسيطة التي تسمح بالتخصيص الواضح للعدد الذري لأي عنصرٍ من طيف التردد العالي. لم يتم التعرُّف على الدعم الحاسم لنموذج رذرفورد الذري على الفور فحسب، ولكن أيضًا تم إبراز الحدس الذي قاد مندلييف في أماكن معينة في طاولته للابتعاد عن تسلسل الأوزان الذرية المتزايدة. على وجه الخصوص، كان من الواضح أنَّ قوانين (موزلي) قدمت دليلًا لا يخطئ في البحث عن عناصر غير مكتشفة بعد تتناسب مع الأماكن الشاغرة في سلسلة الأعداد الذرية.

أيضًا فيما يتعلَّق بمشكلة تكوين الإلكترونات في الذرة، كان عمل (موسلي) هو الشروع في تقدُّمٍ مهمٍّ، من المؤكد أنَّ هيمنة الجاذبية التي تمارسها النواة على الإلكترونات الفردية على التنافر المتبادل، في الجزء الأعمق من الذرة، أتاحت الأساس لفهم التشابُه المذهل بين أطياف (موسلي) وتلك المتوقعة لنظامٍ يتكوَّن لإلكترون واحدٍ مرتبطٍ بالنواة المجردة. ومع ذلك، فإن المقاربة جلبت معلوماتٍ جديدة تتعلَّق بهيكل غلاف التكوين الإلكتروني للذرات.

قُدِّمت مساهمةٌ مهمة في هذه المشكلة بعد فترة وجيزة من قِبَل (كوسل)، الذي أشار إلى إزالة إلكترون من إحدى سلاسل الحلقات أو المستويات المحيطة بالنواة كأصل أنواع إشعاع (باركلا) لأطياف (موسلي) إلى عمليات $K\alpha$ و $K\beta$ على وجه الخصوص، أرجع مكونات M و L و K بأحد K- الانتقال الفردية التي يتمُّ من خلالها استبدال الإلكترون المفقود في المستوى على التوالي. من خلال هذه الطريقة، كان M-، والمستوى L- الإلكترونات في المستوى (كوسيل) قادرًا على تتبُّع المزيد من العلاقات بين قياسات (موسلي) للترددات الطيفية، مما سمح له بتمثيل الطيف عالي التردد لعنصرٍ ما كمخططٍ تركيبيٍّ يكون فيه ناتج أي رمزٍ مقترنًا بثابت بلانك منتجًا للطاقة المطلوبة لتحريك إلكترون من غلاف في الذرة إلى مسافة بعيدة عن كل مستويات النواة.

بالإضافة إلى ذلك، قدمت آراء (كوسل) شرحًا لحقيقة أن امتصاص اختراق الإشعاع ذي الطول الموجي المتزايد يبدأ عمليًّا بحافة امتصاص تمثِّل الإزالة الكاملة في خطوة واحدة لإلكترون الغلاف المعني. تم افتراض عدم وجود حالات الإثارة المتوسطة بسبب الاحتلال الكامل لجميع القذائف في الحالة المستقرة للذرة. كما هو معروفٌ جيدًا، وجد هذا الرأي في النهاية تعبيره النهائي من خلال صياغة (باولي) في عام 1924 لمبدأ الاستبعاد العام لحالات ربط الإلكترون، مستوحى من اشتقاق (ستونر) للتفاصيل الدقيقة لهيكل غلاف ذرة رذرفورد من تحليل انتظامات الأطياف البصرية.

V

في خريف عام 1913، نشأت ضجة أخرى بين علماء الفيزياء من خلال اكتشاف (ستارك) للتأثير الكبير المفاجئ للحقول الكهربائية على بنية الخطوط في طيف الهيدروجين. مع اهتمامه الشديد بكل تقدُّمٍ في العلوم الفيزيائية كتب رذرفورد عندما تلقَّى ورقة ستارك من الأكاديمية البروسية: «أعتقد أنَّ الأمر متروكٌ لك في الوقت الحالي لكتابة شيء عن (زيمان) والتأثيرات الكهربائية، إذا كان من الممكن التوفيق بينها وبين نظريتك». استجابةً لتحدي رذرفورد، حاولتُ النظر في الأمر، وسرعان ما أصبح واضحًا لي أنه في ضوء تأثيرات المجالات الكهربائية والمغناطيسية توجب علينا أن نتعامل مع اثنين من المشاكل المختلفة.

كان جوهر تفسيرات (لورنتز) و(لارنور) لاكتشاف (زيمان) الشهير في عام 1896 أنه يشير مباشرة إلى حركات الإلكترون كأصلٍ لخطوط الطيف بطريقة مستقلة إلى حدٍّ كبيرٍ عن الافتراضات الخاصة حول آلية ربط الإلكترونات بالذرة. حتى إذا خصصت أصل الأطياف للانتقالات الفردية بين الحالات الثابتة، فإنَّ مبدأ المطابقة أدَّى بالتالي في ضوء نظرية (لارمور) العامة إلى توقُّع تأثير (زيمان) العادي لجميع الخطوط الطيفية المنبعثة من الإلكترونات المرتبطة في مجال التناظر المركزي، كما في ذرة رذرفورد. بدلًا من ذلك، قدَّم ظهور ما يُسمَّى بتأثيرات (زيمان) الشاذة ألغازًا جديدة لا يمكن التغلُّب عليها إلا بعد أكثر من عشر سنواتٍ عندما تبعت البنية المعقدة للخطوط في أطياف السلسلة إلى حقيقة اللف المغزلي للإلكترون. يمكن العثور على سردٍ تاريخي مثيرٍ للاهتمام لهذا التطور، الذي قُدِّمت مساهماتٌ مهمة له من جوانب مختلفة في المجلد المعروف الذي نُشر مؤخرًا في ذكرى (باولي).

ومع ذلك، في حالة المجال الكهربائي، لم يكن من المتوقع حدوثُ أي تأثيرٍ يتناسب شدته مع الإشعاع المنبعث من متذبذب التوافقيات، وبالتالي استبعد اكتشاف (ستارك) الفكرة التقليدية للاهتزازات المرنة للإلكترونات كأصل خطوط الطيف. وبالنسبة إلى حركة كبلر للإلكترون حول النواة، حتى المجال الكهربائي الخارجي الضعيف نسبيًّا سيؤدي من خلال الاضطرابات المقترنة إلى إحداث تغييراتٍ كبيرة في شكل واتجاه المدار. من خلال دراسة الحالات الخاصة التي يظل فيها المدار دوريًّا بحتًا في المجال الخارجي، كان من الممكن -من خلال الحجج من نفس النوع مثل تلك المطبقة على الحالات الثابتة لذرة الهيدروجين غير المضطربة- استنتاج ترتيب حجم تأثير (ستارك) وخاصة لشرح صعوده السريع من خطٍّ إلى آخر داخل سلسلة طيف الهيدروجين. ومع ذلك، أظهرت هذه الاعتبارات بوضوحٍ أنه من أجل شرح التفاصيل الدقيقة للظاهرة، لم يتم تطوير طرق تصنيف الحالات الثابتة للأنظمة الذرية بشكلٍ كافٍ.

في هذا الصدد تحقَّق تقدُّمٌ كبيرٌ في السنوات التالية من خلال إدخال الأرقام الكمومية التي تحدد مكونات العزم الزاوي وتكاملات الحركة الأخرى. تم اقتراح مثل هذه الطرق لأول مرة بواسطة (ويلسون) في 1915، الذي طبَّقها على مدارات الإلكترون في ذرة الهيدروجين. ومع ذلك، نظرًا للظروف التي تفيد: أنَّ كلَّ مدارٍ في هذه الحالة في ميكانيكا نيوتن هو ببساطة دوري -مع تواتر لدورة كاملة (لفة) يعتمد فقط على الطاقة الإجمالية للنظام- لم يتم الكشف عن أي آثار فيزيائية. ومع ذلك، فإن الاعتماد على سرعة كتلة الإلكترون الذي تنبَّأت به ميكانيكا أينشتاين

الجديدة يزيل تباطؤ الحركة، ويقدم فترة ثانية في مكوناتها التوافقية من خلال التقدم البطيء المستمر لقمة مدار كيبلر. في الواقع، كما هو موضَّح في مقالة (سومرفيلد) الشهيرة عام 1916، سمحت الصيغة الكمومية المنفصلة للزخم الزاوي والشغل في حركة الإشعاع- بتفسيرٍ مفصَّلٍ للبنية الدقيقة المرصودة للخطوط في أطياف ذرة الهيدروجين وأيون الهيليوم.

علاوة على ذلك، عُولِجت تأثير المجالات المغناطيسية والكهربائية على طيف الهيدروجين من قِبَل (سومرفيلد) و(إبشتاين) اللذين -من خلال التطبيق المتقن لطرق جعل الأنظمة متعددة الدورات كمومية- كانا قادرين -بالتوافق التام مع الملاحظات- على اشتقاق المصطلحات الطيفية بواسطة التركيبة التي يظهر منها تحليل خطوط الهيدروجين. تم تأمين توافق هذه الأساليب مع مبدأ ثابت الحرارة للحالات الثابتة الذي صاغه (إهرنفست) في عام 1914 من أجل تلبية متطلبات الديناميكا الحرارية، من خلال الظروف التي لم تعدل تكاملات الفعل التي تشير إليها الأرقام الكمومية وفقًا للميكانيكا الكلاسيكية من خلال التباين البطيء للمجال الخارجي مقارنة بالفترات المميزة للنظام.

حصلت مزيد من الأدلة على فاعلية النهج في تطبيق مبدأ المطابقة للإشعاع المنبعث من الأنظمة متعددة الفترات، مما يسمح باستنتاجاتٍ نوعية فيما يتعلق بالاحتمالات النسبية لعمليات الانتقال المختلفة. لم تتأكد هذه الاعتبارات من خلال تفسير (كرامرز) للاختلافات المتقلبة على ما يبدو في شدة مكونات تأثير (ستارك) لخطوط الهيدروجين. حتى وجد أنه من الممكن تفسير حجة التطابق لغياب أنواعٍ معينة من التحولات في الذرات الأخرى، بما يتجاوز تلك التي -كما أشار (روبينوفيتش)- يمكن استبعادُها من خلال قوانين الحفاظ على الطاقة والزخم الزاوي المطبق على التفاعل بين الذرة والإشعاع.

بمساعدة الأدلة التجريبية التي تزايدت بسرعة حول بنية الأطياف الضوئية المعقدة، وكذلك البحث المنهجي عن انتظامٍ أدق في أطياف التردُّد العالي بواسطة سيجبان ومعاونيه صُنِّفت حالات الربط في الذرات التي تحتوي على عدة إلكترونات على أنها متقدمة باستمرارٍ. لقد أدَّت دراسة الطريقة التي يمكن بها بناء الحالات المستقرة للذرات من خلال الارتباطات المتتالية للإلكترونات بالنواة إلى توضيحٍ تدريجيٍّ لهيكل غلاف التكوين الإلكتروني في الذرة. وهكذا، على الرغم من أنَّ العناصر الأساسية للتفسير مثل دوران الإلكترون لا تزال غير معروفة، فقد أصبح من الممكن في غضون نحو عشر سنوات من اكتشاف رذرفورد للنواة الذرية تحقيق تفسيرٍ

موجزٍ للعديد من السمات الدورية الأكثر لفتًا للانتباه في جدول مندلييف. ومع ذلك، كان النهج بأكمله لا يزال ذا طابعٍ شبه تجريبي إلى حدٍّ كبيرٍ، وسرعان ما أصبح واضحًا أنه -للحصول على شكلٍ رياضي شاملٍ للخصائص الفيزيائية والكيميائية للعناصر- كان هناك حاجة إلى خروجٍ جذريٍ عن الميكانيكا الكلاسيكية من أجل دمج الافتراض الكمومي في مخططٍ متسقٍ منطقيًّا. بالنسبة إلى هذا التطور المعروف جيدًا سيكون لدينا فرصة للحديث عنه، لكنني سأبدأ أولًا في سرد ذكرياتي عن رذرفورد.

VI

أدَّى اندلاع الحرب العالمية الأولى إلى افتكاكٍ شبه كاملٍ لمجموعة مانشستر، لكنَّني كنتُ محظوظًا لأنني بقيتُ على اتصالٍ وثيقٍ برذرفورد، الذي دعاني في ربيع عام 1914 لخلافة داروين في جامعة (شوستر) للفيزياء الرياضية. عند وصولنا إلى مانشستر في أوائل الخريف، بعد رحلة عاصفة حول اسكتلندا، استقبلنا أنا وزوجتي كثيرٌ من أصدقائنا القدامى الذين بقوا في المختبر بعد مغادرة الزملاء من الخارج والمشاركة في الواجبات العسكرية من قِبَل معظم البريطانيين. كان رذرفورد وزوجته في ذلك الوقت لا يزالان في أمريكا في طريق عودتهما من زيارة أقاربهما في نيوزيلندا، وغني عن القول إنه فور عودتهما الآمنة إلى مانشستر بعد بضعة أسابيع استقبلناه جميعًا براحة كبيرة وفرحٍ.

سرعان ما انشغل رذرفورد بالمشاريع العسكرية، لا سيما فيما يتعلَّق بتطوير أساليب التتبُّع السليم للغواصات، وكان تعليم الطلاب تقريبًا متروكًا بالكامل لـ(إيفانز) و(ماكوير) وأنا، ومع ذلك فقد وجد رذرفورد وقتًا لمواصلة عمله الرائد، الذي بدأه بالفعل قبل نهاية الحرب ليعطي مثل هذه النتائج العظيمة، وأظهر الاهتمام الحار نفسه الذي كان يوليه لاجتهادات مساعديه. فيما يتعلق بمشكلة التكوين الذري، أعطيت دفعة جديدة من خلال نشر تجارب (فرانك) و(هيرتز) الشهيرة في عام 1914 حول تحفيز الذرات بواسطة تأثير الإلكترون.

من ناحية، أعطت هذه التجارِب، التي أُجريت باستخدام بخار الزئبق، أكثرَ الأدلة وضوحًا على النقل التدريجي للطاقة في العمليات الذرية؛ من ناحية أخرى، كانت قيمة طاقة التأيُّن لذرات الزئبق التي أشارت إليها التجارب على ما يبدو أقل من نصف القيمة المتوقعة في تفسير طيف الزئبق، ما دفعت المرء إلى الشك في أنَّ التأيُّن الملحوظ لم يكن مرتبطًا بشكلٍ مباشرٍ بالتصادمات

الإلكترونية، ولكنَّه كان بسبب تأثيرٍ ضوئيٍّ مصاحبٍ على الأقطاب الكهربائية، الناتج عن الإشعاع المنبعث من ذرات الزئبق عند عودتها من الحالة المثارة الأولى إلى الحالة المستقرة. بتشجيعٍ من رذرفورد، خططتُ أنا و(ماكاور) إجراءَ تجارب للبحث في هذه النقطة، صُمِّمَ ونُفِّذَ جهاز كوارتز معقد مع أقطاب كهربائية وشبكات مختلفة بمساعدة منفاخ الزجاج الألماني المتخصص في المختبر، الذي كان قد صنع في الأيام السابقة أنابيب أشعة ألفا لتحقيقات رذرفورد حول تكوين الهيليوم.

ومع ذلك، فإنَّ تفاؤل رذرفورد الذي لا يفشل أبدًا كان له تأثيرٌ مشجعٌ للغاية على محيطه، وأتذكر كيف في وقت حدوث نكسة خطيرة في الحرب، اقتبس رذرفورد الكلام القديم المنسوب إلى نابليون حول استحالة محاربة البريطانيين لأنهم أغبياء جدًّا لدرجة أنهم لا يفهمون متى يخسرون. بالنسبة إليَّ، كانت أيضًا تجربة ممتعة ومفيدة للغاية أن أُقبَل في المناقشات الشهرية بين مجموعة من أصدقاء رذرفورد المقرَّبين، بما في ذلك (ألكسندر) الفيلسوف، والمؤرخ (توت)، وعالم الأنثروبولوجيا (إليوت سميث)، و(حاييم وايزمان) الكيميائي، الذي سيصبح بعد ثلاثين عامًا أول رئيسٍ لإسرائيل، ولشخصيته المميزة كان رذرفورد يخصُّه باحترامٍ كبيرٍ.

كانت الصدمة الرهيبة لنا جميعًا هي الخبر المأساوي في عام 1915 بوفاة (موسلي) المفاجئة في حملة (جاليبولي)، التي استنكرها بشدة مجتمع علماء الفيزياء في جميع أنحاء العالم، لم يكن أقلُّهم رذرفورد، الذي سعى إلى نقل (موسلي) من الجبهة إلى واجباتٍ أقل خطورة، وهو ما لم يؤخذ على محمل الجدِّ.

في صيف عام 1916، غادرتُ أنا وزوجتي مانشستر وعدتُ إلى الدنمارك، حيث عُيِّنتُ في منصب أستاذ الفيزياء النظرية الذي كان قد أُنشئ حديثًا في جامعة كوبنهاجن.

على الرغم من الصعوبات المتزايدة للتواصل بالبريد، فقد استمرَّت المراسلات مع رذرفورد. من جانبي، أبلغتُ عن التقدُّم الذي أحرزته في العمل على تمثيلٍ أكثر عمومية للنظرية الكمومية للقوانين الأساسية للذرة، التي حفَّزها في ذلك الوقت التطور فيما يتعلَّق بتصنيف الحالات المستقرة. في هذا الصدد، اهتم رذرفورد بالأخبار التي يمكن أن أعطيها من اتصالاتي، ولا سيما أول اتصالٍ شخصي لي مع (سومرفيلد) و(إهرنفست). في رسائله الخاصة، قدَّم رذرفورد أيضًا وصفًا حيًّا لكيفية مواصلة دراسته في اتجاهاتٍ مختلفة رغم الصعوبات المتزايدة وضغط الالتزامات الأخرى. وهكذا، في خريف عام 1916، كتب رذرفورد عن اهتمامِه الشديد ببعض

النتائج المدهشة فيما يتعلَّق بامتصاص أشعة جاما الصلبة التي تنتجها أنابيب الجهد العالي التي أصبحت متاحة في ذلك الوقت.

في السنوات التالية، كان رذرفورد مشغولًا أكثر فأكثر بإمكانية تحقيق الانشطار النووي عن طريق أشعة ألفا السريعة، وكتب بالفعل في رسالة بتاريخ 9 ديسمبر 1917: «أضيع أحيانًا نصفَ يومي لمحاولة ضئيلة في تجاربي الخاصة، وأعتقد أنَّ النتائج ستثبت في النهاية أنها ذات أهمية كبيرة.

كنتُ أتمنَّى لو أنك هنا لمناقشة هذه الأمور، أقوم باكتشاف وإحصاء الذرات الأخف التي تحركها الجسيمات السابقة، والنتائج على ما أعتقد تُلقي قدرًا كبيرًا من الضوء على خصائص وتوزيع القوى بالقرب من النواة، أحاول أيضًا تفتيت الذرة بهذه الطريقة، في إحدى الحالات، تبدو النتائج واعدة، ولكن سيتطلَّب الأمرُ قدرًا كبيرًا من العمل للتأكد، يساعدني (كاي) وهو الآن إحصائيٌّ خبيرٌ».

بعد عام، في 17 نوفمبر 1918، أعلن رذرفورد بطريقته المميزة عن مزيدٍ من التقدُّم: «أتمنَّى لو أنَّك هنا لمناقشة معنى بعض نتائجي في تصادم النوى. لقد حصلتُ على بعض النتائج المذهلة إلى حدٍّ ما، لكنَّه عملٌ ثقيلٌ وطويلٌ وهو الحصول على أدلة معينة على افتراضاتي، يُعدُّ حساب التلألؤ الضعيف أمرًا صعبًا على الأعين القديمة، ولكن بمساعدة (كاي) قمتُ بعملٍ جيدٍ في أوقاتٍ غريبة خلال السنوات الأربع الماضية».

قدَّم رذرفورد ورقتَه البحثية الشهيرة في المجلة الفلسفية عام 1919، التي تحتوي على رواية اكتشافه الأساسي للانشطار النووي الخاضع للرقابة. وأشار إلى زيارة مساعده القديم (إرنست مارسدن) إلى مانشستر في نوفمبر 1918، الذي كان قد حصل على إجازة في أثناء الهدنة من الخدمة العسكرية في فرنسا. وبفضل خبرته العظيمة في تجارب التلألؤ من أيام مانشستر القديمة عندما أجرى، بالتعاون مع (جيجر)، التجارِب التي قادت رذرفورد إلى اكتشافه للنواة الذرية، ساعده (مارسدن) في توضيح بعض الحالات الشاذَّة الظاهرة في التوزيع الإحصائي لارتفاع سرعة البروتونات المنبعثة من قصف النيتروجين بأشعة ألفا. من مانشستر عاد (مارسدن) إلى نيوزيلندا لتولي واجباته الجامعية، لكنَّه ظلَّ على اتصالٍ وثيقٍ برذرفورد على مرِّ السنين.

في يوليو من عام 1919، بعد أن أصبح السفر في أثناء الهدنة ممكنًا مرة أخرى، ذهبتُ إلى مانشستر لرؤية رذرفورد، وتعرَّفتُ إلى مزيدٍ من التفاصيل عن اكتشافه الجديد العظيم للتحويلات النووية الخاضعة للرقابة أو الاصطناعية، التي شهدت ما يُطلَق عليه «الكيمياء الحديثة»، التي مع مرور الوقت ستؤدي إلى مثل هذه النتائج الهائلة فيما يتعلَّق بتحكُّم الإنسان في قوى الطبيعة. كان رذرفورد في ذلك الوقت وحيدًا تقريبًا في المختبر، وكما قال في رسائله، كانت المساعدة الوحيدة في أبحاثه الأساسية -بصرف النظر عن الزيارة القصيرة لـ(مارسدن)- يتلقَّاها من مساعده المخلص (ويليام كاي)، الذي كان من خلال لطفه ومساعدته على مرِّ السنين محبَّبًا للجميع في المختبر. وخلال زيارتي تحدَّث رذرفورد أيضًا عن قرارٍ عظيمٍ كان عليه اتخاذه ردًّا على عرض أستاذ (كافنديش) في كامبريدج الذي تُرك شاغرًا بعد تقاعُد (طومسون)؛ لم يكن من السهل على رذرفورد أن يقرِّر ترك مانشستر بعد كل هذه السنوات من الزخم، لكن بالطبع كان عليه أن يتبع الدعوة لخلافة السلسلة الفريدة لأساتذة (كافنديش).

VII

في البداية اجتمع حول رذرفورد في مختبر (كافنديش) مجموعةٌ كبيرة ورائعة من الباحثين، كان من أبرز الشخصيات (أستون)، الذي عمل على مدار سنواتٍ عديدة مع طومسون، وقد بدأ بالفعل خلال زمن الحرب في تطوير طرق التحليل الطيفي الشامل التي كان من المفترض أن تؤدي إلى إثبات وجود نظائر لكل عنصرٍ تقريبًا.

أعطى هذا الاكتشاف التأكيد المقنع لنموذج رذرفورد الذري، لكنَّه لم يكن متوقعًا تمامًا. بالفعل في أوائل أيام مانشستر، كان من المفهوم أنَّ المخالفات الظاهرة في تسلسل الأوزان الذرية للعناصر عندما ترتبت وفقًا لخصائصها الكيميائية تشير إلى -حتى بالنسبة إلى العناصر المستقرة- عدم توقُّع أن الشحنة النووية لها علاقة فريدة بالكتلة النووية أو عدم إمكانية توقُّع وجود علاقة فريدة بين الشحنة النووية والكتلة النووية. أعرب رذرفورد عن سعادتِه بعمل أستون في رسائل وجهَّها إليَّ في يناير وفبراير 1920، لا سيما نظائر الكلور التي أظهرت بوضوحٍ الطابعَ الإحصائي لانحرافات الأوزان الذرية الكيميائية عن القيم التكاملية، كما علَّق بخفة دم على الخلافات الحية في مختبر كافنديش حول المزايا النسبية للنماذج الذرية المختلفة التي أدَّى إليها اكتشاف (أستون).

لقد قدمت دعمًا كبيرًا لاستمرار عمل رذرفورد الرائد في تكوين وتفكك النوى الذرية، وكذلك في إدارة المختبر العظيم، حيث انضم إليه منذ البداية (جيمس شادويك) من مجموعة مانشستر القديمة، الذي عاد لتوّه من معتقلٍ طويلٍ في ألمانيا، حيث كان يعمل في برلين مع (جيجر) عند اندلاع الحرب.

من بين المتعاونين مع رذرفورد في أوائل سنوات كامبريدج كان أيضًا (بلاكيت) و(إيليس)، وكان كلاهما قادمًا من مهنة في خدمات الدفاع، وقد بدأ (إليس) في الفيزياء من قبل (شادويك) في أثناء رفقتهما في السجن الألماني. من الأصول الأخرى للمجموعة في كافنديش وصل (كابيتسا) بعد بضع سنوات جالبًا معه مشاريع بارعة لا سيما في إنتاج الحقول المغناطيسية ذات الشدة التي لم يُسمع بها من قبل، في هذا العمل، كان يساعده منذ البداية (جون كوكروفت) الذي تميَّز بمزجه الفريد بين البصيرة العلمية والتكنولوجية مما أهَّله كي يصبح متعاونًا بارزًا مع رذرفورد.

في البداية شارك (تشارلز داروين) -الذي كانت رؤيته الرياضية مفيدة للغاية في سنوات مانشستر- (رالف فاولر) مسؤولية الجزء النظري من الأنشطة في كافنديش.

وبالتعاون قدَّما في ذلك الوقت مساهماتٍ مهمة في الديناميكا الحرارية الإحصائية وتطبيقها على مشاكل الفيزياء الفلكية.

بعد رحيل داروين إلى إدنبرة، أصبح فاولر المستشار النظري والمعلم الرئيس في كامبريدج حتى الحرب العالمية الثانية صهرًا لرذرفورد، لم يشارك (فاولر) بحماسٍ في العمل في كافنديش فحسب بل سرعان ما وجد العديدَ من الطلاب الموهوبين الذين استفادوا من إلهامه. من بين هؤلاء كان (لينارد جونز) و(هارتري) وكلاهما ساهم -بطريقته الخاصة- في تطوير الفيزياء الذرية والجزيئية، وخاصة (ديراك) الذي تميَّز منذ شبابه المبكر بقوته المنطقية الفريدة.

منذ أن غادرت مانشستر في عام 1916، حاولتُ بالطبع استخدام الخبرة المكتسبة في مختبر رذرفورد، وبامتنانٍ أتذكر كيف دعم رذرفورد منذ البداية بشكلٍ لطيفٍ وفعَّالٍ مسعاي في كوبنهاجن لإنشاء معهدٍ لتعزيز التعاون الحميم بين علماء الفيزياء النظرية والتجريبية. كان تشجيعًا خاصة في خريف عام 1920، عندما كان مبنى المعهد على وشك الانتهاء، وجد رذرفورد وقتًا لزيارتنا في كوبنهاجن، وكعربون تقديرٍ، منحته الجامعة درجة فخرية، وفي تلك المناسبة ألقى خطابًا محفزًا ملؤه روح الدعابة، سيتذكره الجميع لفترة طويلة. بالنسبة إلى العمل

في المعهد الجديد، كان من المفيد جدًّا أن ينضم إلينا بعد فترة وجيزة من الحرب صديقي القديم من أيام مانشستر (جورج هيفسي) الذي قام خلال أكثر من عشرين عامًا من العمل في كوبنهاجن بتنفيذ العديد من أعماله الكيميائية الفيزيائية الشهيرة والبحوث البيولوجية، على أساس طريقة التتبُّع النظيري. كان الحدث الخاص -الذي اهتمَّ به رذرفورد كثيرًا- هو تطبيق طريقة (موزلي) من قبل (كوستر) و(هيفسي) في عام 1922 للبحث الناجح عن العنصر المفقود المُسمَّى الآن الهافنيوم، الذي أعطت خصائصه دعمًا إضافيًّا قويًّا لتفسير النظام الدوري للعناصر. أُعطيت بداية ميمونة للعمل التجريبي العام من خلال زيارة قام بها (جيمس فرانك) عند افتتاح المختبر، وحيث سيقوم خلال الأشهر التالية بإرشاد المتعاونين الدنماركيين بلطفٍ إلى التقنية الدقيقة لإثارة الأطياف الذرية بالقصف الإلكتروني، والتي كانت قد تطورت ببراعة على يد (جوستاف هيرتز).

كان أول الفيزيائيين النظريين المتميزين الذين مكثوا معنا لفترة أطول هو (هانز كرامرز)، حينما جاء إلى كوبنهاجن خلال الحرب كان شابًّا صغيرًا، أثبت أنه إضافة ثمينة لمجموعتنا خلال السنوات العشر التي عمل فيها معنا حتى عام 1926، ترك منصبه كمحاضرٍ في المعهد لتولي منصب الأستاذية في (أوتريخت). بعد فترة وجيزة من وصول (كرامرز) إلى كوبنهاجن، جاء شابَّان واعدان هما (أوسكار كلاين) من السويد و(سفين روسلاند) من النرويج، اللذان صنعا مجدًا لاسميهما من خلال العمل البارز في عام 1920 من خلال ما يُسمَّى بالاصطدامات من النوع الثاني، التي يتمُّ فيها نقل الذرات بواسطة القصف الإلكتروني من حالة ثباتٍ أعلى إلى حالة ثباتٍ أقل مع زيادة سرعة الإلكترون.

في الواقع، يُعد حدوث مثل هذه العمليات أمرًا حاسمًا لضمان التوازن الحراري بطريقة مماثلة للتحولات الإشعاعية المستحثة التي لعبت دورًا أساسيًّا في اشتقاق أينشتاين لصيغة بلانك للإشعاع الحراري، أثبتت دراسة الاصطدامات من النوع الثاني أهمية خاصة لتوضيح الخصائص الإشعاعية للأجواء النجمية، التي قدَّمها (ساها) كعملٍ أساسيٍّ في ذلك الوقت في أثناء دراساته في كامبريدج مع (فاولر).

انضمَّ (باولي) إلى مجموعة معهد كوبنهاجن عام 1922، وبعد ذلك بعامين انضم إليهما (هايزنبرج)، وكلاهما تلميذ في (سومرفيلد)، وقد أنجزا على الرغم من صغر سنهما أكثرَ الأعمال روعة. كنتُ قد تعرَّفتُ عليهما وكوَّنتُ انطباعًا عميقًا عن موهبتهما غير العادية في صيف عام 1922 خلال زيارة لإلقاء محاضرة في (جوتنجن)، التي بدأت تعاونًا طويلًا ومثمرًا بين

المجموعة العاملة هناك تحت قيادة (بورن) و(فرانك)، ومجموعة كوبنهاجن. منذ الأيام الأولى حافظنا على اتصالنا الوثيق بالمركز العظيم في كامبريدج، خاصة من خلال الزيارات الطويلة إلى كوبنهاجن التي قام بها (داروين) و(ديراك) و(فاولر) و(هارتري) و(موت) وآخرون.

VIII

في تلك السنوات أحدث تعاونٌ فريدٌ لجيلٍ كاملٍ من علماء الفيزياء النظرية من العديد من البلدان خطوة بخطوة تعميمًا متسقًا منطقيًّا للميكانيكا الكلاسيكية والكهرومغناطيسية، وُصِف أحيانًا بأنَّه العصر البطولي في الفيزياء الكمومية. بالنسبة إلى كل من تابع هذا التطور رأى تجربة لا تُنسى، أن نشهد -من خلال الجمع بين خطوطٍ مختلفة من النهج، وإدخال الأساليب الرياضية المناسبة- كيف ظهرت نظرة جديدة فيما يتعلَّق بفهم التجربة الفيزيائية، كان لا بُدَّ من التغلُّب على العديد من العقبات قبل الوصول إلى هذا الهدف، أُحرِزَ تقدُّمٌ حاسمٌ مرارًا وتكرارًا من قبل بعض من هم أصغرنا سنًّا.

كانت نقطة البداية المشتركة هي الاعتراف بأنَّه على الرغم من المساعدة الكبيرة التي قدَّمها استخدام الصور الميكانيكية مؤقتًا لتصنيف الحالات الثابتة للذرات المعزولة أو المعرَّضة لقوى خارجية ثابتة، فإنَّه بدا واضحًا -كما ذكرنا سابقًا- ثمة حاجة إلى رحلة جديدة. لم تكن صعوبة تصوير التكوين الإلكتروني للمركبات الكيميائية على أساس نموذج رذرفورد الذري أكثر وضوحًا فحسب، بل ظهرت أيضًا صعوباتٌ لا يمكن التغلُّب عليها في أي محاولاتٍ لتفسير تعقيد الأطياف الذرية بالتفصيل، ولا سيما في الأشكال المزدوجة الغريبة لطيف قوس الهيليوم.

قُدِّمَت الخطوة الأولى لصياغة أكثر عمومية لمبدأ المطابقة من خلال مشكلة التشتُّت البصري. اقتُرِحت العلاقة الوثيقة بين التشتُّت الذري والامتصاص الانتقائي للخطوط الطيفية بشكلٍ جميلٍ من خلال التجارب البارعة لـ (روبرت وليامز وود) و(بيفان) على أساس صياغة أينشتاين للقوانين الإحصائية لحدوث التحولات التي يسبِّبها الإشعاع بين الحالات الثابتة للنظام الذري. نجح (كرامرز) في عام 1924 في إنشاء معادلة تشتُّت عامة تتضمن فقط طاقات هذه الحالات واحتمالات التحولات التلقائية بينها. تضمنت هذه النظرية -التي طوَّرها (كرامرز) و(هايزنبرج)- تأثيرات تشتت جديدة مرتبطة بالظهور تحت تأثير الإشعاع لإمكانيات التحولات غير الموجودة في الذرة غير المضطربة، والتناظرية التي تُعرف بتأثيرٍ في الأطياف الجزيئية.

بعد ذلك بفترة وجيزة، حقَّق هايزنبرج تقدُّمًا ذا أهمية جوهرية، حيث قدَّم في عام 1925 أكثر الأشكال الشكلية إبداعًا، التي تجنَّب فيها كلَّ استخدامٍ للصور المدارية بخلاف التشابهات المقاربة العامة. في هذا المفهوم الجريء يُحتفظ بالمعادلات ذات الشكل الأساسي للميكانيكا في شكلها الهاميلتوني، ولكن تُستبدل المتغيرات المقترنة بمشغلين خاضعين لخوارزمية غير تبادلية تتضمن ثابت بلانك بالإضافة إلى الرمز $\sqrt{-1}$. في الواقع، من خلال تمثيل الكميات الميكانيكية بواسطة المصفوفات الهيرميتية مع العناصر التي تشير إلى جميع عمليات الانتقال المحتملة بين الحالات الثابتة، فقد ثبت أنَّ هذا ممكنٌ من دون أي تعسف لاستنتاج طاقات هذه الحالات، واحتمالات عمليات الانتقال المرتبطة بها. هذا ما يُسمَّى بميكانيكا الكم، التي قدَّم (بورن) و(جوردان) وكذلك (ديراك) منذ البداية مساهماتٍ مهمة فيها، مما فتح الطريق أمام معالجة إحصائية متسقة للعديد من المشاكل الذرية التي كانت حتى الآن قابلة فقط لنهجٍ شبه تجريبي.

لإنجاز هذه المهمة العظيمة، أثبت التركيز على القياس الرسمي بين الميكانيكا والبصريات -الذي شدَّد عليه (هاملتون) في الأصل- أنه مفيدٌ للغاية. وهكذا، بالإشارة إلى الأدوار المماثلة التي تلعبها الأرقام الكمومية في تصنيف الحالات الثابتة عن طريق الصور الميكانيكية، وبواسطة عدد العقد في توصيف الموجات الموجودة المحتملة في الوسائط المرنة، قدَّم دي برولي بالفعل في 1924 مقارنة بين سلوك جسيمات المادة الحرة وخصائص الفوتونات.

كان إلقاء الضوء بشكلٍ خاصّ على عرض (دي برولي) لهوية سرعة الجسيم مع سرعة المجموعة لحزمة موجية تتركب من مكوناتٍ ذات أطوالٍ موجية محصورة في فترة زمنية صغيرة، وكلٌّ منها مرتبطٌ بقيمة القوى الدافعة (الزخم) بواسطة معادلة أينشتاين بين زخم فوتون والطول الموجي المقابل للإشعاع. كما هو معروفٌ جيدًا، سرعان ما تلقَّت أهمية هذه المقارنة تأكيدًا حاسمًا مع اكتشافات (دافيسون) و(جيرمر) و(جورج طومسون) حول التشتُّت الانتقائي للإلكترونات في البلورات، حيث تصور الحالات الثابتة كحلولٍ مناسبة لمعادلة الموجة الأساسية، التي حصلت من خلال اعتبار (هاميلتوني) لنظام الجسيمات الكهربائية كمشغل تفاضلي يعمل على وظيفة الإحداثيات التي تحدِّد تكوين النظام. في حالة ذرة الهيدروجين، لم تؤدِّ هذه الطريقة فقط إلى تحديدٍ بسيطٍ بشكلٍ ملحوظٍ لطاقات الحالات الثابتة، ولكن أظهر (شرودنجر) أيضًا أنَّ تراكب أي حلَّين مناسبين يتوافقان مع توزيع الشحنة الكهربائية والتيار في ذرة، والتي من شأنها أن

تؤدي إلى انبعاث وامتصاص صدى إشعاعٍ أحادي اللون لتردُّدٍ يتزامن مع بعض خطوط طيف الهيدروجين طبقًا للديناميكا الكهربائية الكلاسيكية.

وبالمثل، كان شرودنجر قادرًا على شرح السمات الأساسية لتشتُّت الإشعاع بواسطة الذرات من خلال تمثيل الشحنة، والتوزيع الحالي للذرة المضطربة بسبب الإشعاع الساقط على أنَّه تأثير تراكب للوظائف المناسبة التي تحدِّد تنوُّع الحالات الثابتة المحتملة لـنظامٍ غير مضطربٍ. كان الاستنتاج من مثل هذه الأسطر لقوانين تأثير (كومبتون) -على الرغم من الدعم المذهل الذي قدَّمته لفكرة أينشتاين الأصلية للفوتون- قد أظهر صعوبات واضحة للمعالجة بالتقريب، في محاولة للجمع بين الحفاظ على الطاقة والقوى الدافعة بتقسيم العملية إلى خطوتين منفصلتين تتكوَّن من امتصاص وانبعاث إشعاعٍ يشبه التحولات الإشعاعية بين الحالات الثابتة للنظام الذري.

هذا الاعتراف بالنطاق الواسع للحجج التي تنطوي على استخدام مبدأ تراكب مشابه لمبدأ نظرية المجال الكهرومغناطيسي الكلاسيكية، والذي ضُمِن فقط في نسخة الصياغة لميكانيكا الكم في شكل مصفوفة، يعني تقدُّمًا كبيرًا في علاج المشكلات الذرية، ومع ذلك، كان من الواضح منذ البداية أنَّ ميكانيكا الموجات لم تشِر إلى أي تعديلٍ أقل جذرية للنهج الفيزيائي الكلاسيكي من الوصف الإحصائي المتصور في مبدأ المطابقة. وهكذا، أتذكر كيف أننا في زيارة قام بها (شرودنجر) إلى كوبنهاجن عام 1926، عندما قدَّم لنا وصفًا مثيرًا للإعجاب لعملِه الرائع، تجادلنا معه في أنَّ أيَّ إجراءٍ يتجاهل الطابع الفردي للعمليات الكمية لن يفسر أبدًا صيغة بلانك الأساسية للإشعاع الحراري.

على الرغم من التشابُه الملحوظ بين السمات الأساسية للعمليات الذرية ومشكلات الرنين الكلاسيكية، يجب أن يؤخذ في الاعتبار بالفعل أننا في ميكانيكا الموجة نتعامل مع وظائف لا تأخذ قيمًا حقيقية بشكلٍ عامٍ، ولكنَّها تتطلَّب الاستخدام الأساسي للرمز $\sqrt{-1}$ تمامًا مثل مصفوفات ميكانيكا الكمِّ. علاوة على ذلك، عند التعامُل مع تكوين الذرات بأكثر من إلكترون واحد، أو التصادمات بين الذرات والجسيمات الكهربائية الحرة، لا تمثل دالة الحالة في الفضاء العادي ولكن في مساحة تكوين بأبعادٍ عديدة، حيث توجد درجاتٌ من الحرية في النظام الكلي. كما أوضح الطابع الإحصائي الأساسي للاستقطاعات الفيزيائية من ميكانيكا الموجات في النهاية من خلال المعالجة الرائعة لـ(بورن) لمشاكل التصادم العامة.

وضحت معادلة المحتويات الفيزيائية لكلا الشكلين الرياضيين المختلفين تمامًا من خلال نظرية التحوُّل التي صاغها بشكلٍ مستقلٍ (ديراك) في كوبنهاجن، و(جوردان) في جوتنجن، التي أدخلتْ في الفيزياء الكمومية إمكانياتٍ لتغيير المتغيرات المماثلة لتلك التي قدمها الرمز المتماثل من معادلات الحركة في الديناميات الكلاسيكية في الشكل الأساسي الذي قدَّمه (هاملتون). سنواجه موقفًا مشابهًا في صياغة الديناميكا الكهربية الكمومية التي تتضمن مفهوم الفوتون، تحقَّق هذا الهدف لأول مرة في نظرية (ديراك) الكمومية لمراحل معالجة الإشعاع واتساع المكونات التوافقية للحقول كمتغيراتٍ غير انتقالية. وبعد المزيدِ من المساهمات البارعة التي قدَّمها (جوردان) و(كلاين) و(ويجنر)، وجدتْ هذه الشكلية كما هو معروف جيدًا استكمالًا أساسيًّا في أعمال (هايزنبرج) و(باولي).

قُدِّم توضيحٌ خاصٌّ لقوة ونطاق الطرق الرياضية لفيزياء الكمِّ من خلال إحصائيات الكمِّ المتميزة المتعلقة بأنظمة الجسيمات المتطابقة، حيث يتعيَّن علينا القيام بميزة دخيلة على الفيزياء الكلاسيكية مثل الفعل الكومي نفسه. إنَّ أيَّ مشكلة تتطلَّب تطبيقًا ملائمًا لإحصاءات (بوز-أينشتاين) أو (فيرمي-ديراك) من حيث المبدأ تستبعد الرسم التصويري وعلى وجه الخصوص، ترك هذا الموقف مجالًا للصياغة الصحيحة لمبدأ استبعاد (باولي)، الذي لم يقدِّم فقط التوضيحَ النهائي للعلاقات الدورية في جدول مندلييف، ولكن في السنوات التالية أثبت أنَّه مفيدٌ لفَهْم معظم الجوانب المتنوعة لـ (القوانين الأساسية الذرية للمادة).

قُدِّمت مساهمة أساسية في توضيح مبادئ الإحصاء الكمومي من خلال تفسير (هايزنبرج) المبتكر في عام 1926 لازدواجية طيف الهليوم؛ لقد أوضح أنها تتكوَّن من مجموعة من الحالات الثابتة للذرات التي تحتوي على إلكترونين من مجموعتين غير متحدتين تقابلان وظائف موجية مكانية متماثلة وغير متماثلة، مرتبطة على التوالي بالاتجاهات المعاكسة والمتوازية لدوران الإلكترون. بعد ذلك بوقتٍ قصيرٍ، نجح (ريتلر) و(لندن) على نفس المنوال في شرح آلية الربط في جزيء الهيدروجين وبالتالي فتح الطريق لفهم الروابط الكيميائية أحادية القطب. حتى صيغة رذرفورد الشهيرة لتشتُّت الجسيمات المشحونة بواسطة النوى الذرية، كما أوضح (موت)، عُدِّلَت بشكلٍ أساسي عند تطبيقها على الاصطدامات بين الجسيمات المتطابقة مثل البروتونات ونواة الهيدروجين أو أشعة ألفا ونواة الهليوم. لكن في التجارب الفعلية لتشتت الزوايا الكبيرة لأشعة

ألفا السريعة بواسطة نوى ثقيلة، التي استخلص منها رذرفورد استنتاجاته الأساسية، كانت لا تزال في نطاق صلاحية الميكانيكا الكلاسيكية.

لقد وجد الاستخدام المتصاعد لمزيدٍ من التجريدات الرياضية الدقيقة لضمان الاتساق في حساب الظواهر الذرية في عام 1928 ذروة مؤقتة في نظرية الكمِّ النسبية للإلكترون لـ(ديراك)، وهكذا، دمج مفهوم دوران الإلكترون -الذي قدَّم كلٌّ من (داروين) و(باولي) مساهماتٍ مهمة في علاجه- بشكلٍ متناغمٍ في تحليل سبينور لـ(ديراك). قبل كل شيء، فيما يتعلَّق باكتشاف البوزيترون من قبل (أندرسون) و(بلاكيت)، أعدت نظرية (ديراك) الاعتراف بوجود جسيماتٍ مضادة متساوية الكتلة عن طريق الشحنات الكهربائية المعاكسة والتوجهات المعاكسة للعزم المغناطيسي بالنسبة إلى محور الدوران. كما هو معروفٌ جيدًا، لدينا هنا التطور الذي قدم بطريقة جديدة من حيث استعادة وتوسيع هذه الخواص في الفراغ وقابلية الانعكاس للزمن الذي كان أحد الأفكار الأساسية للنهج الفيزيائي الكلاسيكي.

إن التقدُّم الرائع لمعرفتنا بالتكوين الذري للمادة، والأساليب التي يمكن من خلالها اكتساب هذه المعرفة وترابطها- قد حملنا بالفعل إلى ما هو أبعد من نطاق الوصف التصويري الحتمي الذي جلبه نيوتن وماكسويل إلى هذا الكمال، بعد هذا التطور الذي كان في متناولنا، غالبًا ما أتيحت لي الفرصة للتفكير في التأثير المهيمن لاكتشاف رذرفورد الأصلي للنواة الذرية، الذي قدَّم لنا في كل مرحلة تحديًا قويًّا للغاية.

IX

خلال السنوات الطويلة والغنية التي عمل خلالها رذرفورد بقوة لا تعرف الكلل في كافنديش، اعتدتُ أن أذهب إلى كامبريدج حيث تلقيتُ -بناءً على دعوة رذرفورد- العديدَ من المحاضرات حول المشكلات النظرية، بما في ذلك الآثار المعرفية لتطوير النظرية الكمومية. في مثل هذه المناسبات كنتُ أشعر بالتشجيع وبالعقل المنفتح والاهتمام الشديد الذي تابع به رذرفورد التقدُّم في مجال البحث الذي بدأه بنفسه إلى حدٍّ كبيرٍ، والذي يجب أن يحملنا تطوره إلى ما هو أبعد من الأفق الذي ظهر للوهلة الأولى في المراحل المبكرة.

في الواقع، أدَّى الاستخدام المكثَّف للطرق الرياضية المجردة للتعامل مع الأدلة المتزايدة بسرعة حول الظواهر الذرية إلى ظهور مشكلة الملاحظة أو المراقبة برمَّتِها أكثر فأكثر على

السطح. هذه المشكلة في جذورها قديمة قِدَم العلوم الفيزيائية نفسها، لذا سنجد أنَّ الفلاسفة في اليونان القديمة الذين أسَّسوا تفسيرَ الخصائص المحددة للمواد باستخدام القابلية للتجزئة المحدودة لكل مادة رأوا أن خشونة أعضاء حواسنا ستمنع إلى الأبد الملاحظة المباشرة للذرات المفردة في هذا الصدد، تغيَّر الوضعُ جذريًّا في أيامنا هذه من خلال بناء أجهزة التضخيم مثل الغرف السحابية وآليات العداد التي طورها رذرفورد و(جيجر) فيما يتعلَّق بقياسات أرقام وشحنات جسيمات ألفا، ومع ذلك، كان استكشاف عالَم الذرات، كما رأينا، للكشف عن قيودٍ متأصلة في نمط الوصف المتجسد في لغة مشتركة طورت من أجل التوجيه في محيطنا ولحساب أحداث حياتنا اليومية.

بكلماتٍ تتفق مع موقف رذرفورد الكامل، يمكن للمرء أن يقول إنَّ الهدف من التجريب هو طرح أسئلة عن الطبيعة، وبالطبع يدين رذرفورد بنجاحه في هذه المهمة إلى حدسه في تشكيل مثل هذه الأسئلة للسماح بالإجابات الأكثر فائدة. ومن أجل الاستزادة من المعرفة العامة كان يجب أن تكثر الأسئلة، من الواضح أن تسجيل الملاحظات، وكذلك تصميم ومعالجة الأجهزة أمرٌ ضروري لتعريف الظروف التجريبية، يجب أن يوصف بلغة واضحة. في البحث الفيزيائي الفعلي، يكون تلبية هذا الطلب من مواصفات الترتيب التجريبي من خلال استخدام أجسامٍ مثل الأغشية وألواح التصوير، كبيرة وثقيلة جدًّا بحيث يمكن حساب التلاعب بها من وجهة نظر الفيزياء الكلاسيكية، على الرغم من أنَّ خصائص المواد التي تتكوَّن منها الأدوات وكذلك أجسادنا تعتمد بشكلٍ أساسيّ على تكوين واستقرار النظم الذرية المكونة التي تتحدى مثل هذا الحساب.

إن وصف التجربة العادية يفترض مسبقًا القابلية للتجزئة من دون قيدٍ لمسار الظاهرة من حيث الزمن والتموضع، وربط جميع الخطوات في سلسلة غير منقطعة من حيث السبب والنتيجة. في نهاية المطاف، تعتمد وجهة النظر هذه على دقة حواسنا، التي تتطلَّب من أجل الإدراك تفاعلًا مع الأشياء الصغيرة جدًّا قيد التحقيق لدرجة أنها تكون في الظروف العادية من دون تأثيرٍ ملموسٍ على مسار الأحداث. في صرح الفيزياء الكلاسيكية، يجد هذا الموقف تعبيره المثالي في افتراض أنَّ التفاعل بين الجسيم موضوع التجربة وأدوات الملاحظة يمكن إهماله أو تعويضه بأي حالٍ من الأحوال.

إنَّ عنصر الكمال الذي يرمز إليه بالفعل الكمومي الدخيل على مبادئ الفيزياء الكلاسيكية، له نتيجة: أنه في دراسة التفاعلات الكمومية فإنَّ أي استفسارٍ تجريبي يتضمن تفاعلًا بين الجسيم

الذري وأدوات القياس -على الرغم من أنها ضرورية لـ توصيف الظواهر- تتجنب حسابًا منفصلًا إذا كانت التجربة تخدم غرضها المتمثِّل في تقديم إجاباتٍ لا لبس فيها عن أسئلتنا. إنَّ الاعتراف بهذا الموقف هو بالفعل الذي يجعل اللجوء إلى طريقة الوصف الإحصائي أمرًا ضروريًّا فيما يتعلَّق بتوقعات حدوث التأثيرات الكمومية الفردية في نفس الترتيب التجريبي، والذي يزيل أي تناقضٍ ظاهرٍ بين الظواهر التي لوحظت في ظل الاستبعاد المتبادل للظروف تجريبية. مهما أظهرت من تناقض في هذه الظواهر في البداية، يجب أن ندرك أنها تخضع لمبدأ المكاملة، بمعنى أنها مجتمعة تستنفد جميعَ المعلومات حول الجسم الذري، التي يمكن التعبير عنها بلغة مشتركة من دون غموضٍ.

لا يعني مفهوم مبدأ المكاملة أيَّ تنازلٍ عن التحليل التفصيلي الذي يحدُّ من نطاق تحقيقنا، ولكنَّه يؤكد ببساطة طبيعة الوصف الموضوعي، بغض النظر عن الحكم الموضوعي، في أي مجالٍ من مجالات الخبرة، حيث يتضمن الاتصال الواضح بشكلٍ أساسي مراعاة الظروف التي حصلت فيها الأدلة. من الناحية المنطقية، فإنَّ مثل هذا الموقف معروفٌ جيدًا من خلال المناقشات حول المشكلات النفسية والاجتماعية، حيث استخدمت العديد من الكلمات بطريقة تخضع لمبدأ المكاملة منذ أصل اللغة. بالطبع نحن هنا غالبًا ما نتعامل مع صفاتٍ غير مناسبة لخاصية التحليل الكمي المميزة لما يُسمَّى بالعلوم الدقيقة، والتي تتمثَّل مهمتُها -وفقًا لبرنامج جاليليو- في بناء كلِّ الوصف على قياساتٍ محددة جيدًا.

بغض النظر عن المساعدة التي قدَّمتها الرياضيات دائمًا لمثل هذه المهمة، يجب إدراك أنَّ تعريف الرموز والعمليات الرياضية يعتمد على الاستخدام المنطقي البسيط للغة الشائعة. بالطبع لا ينبغي اعتبار الرياضيات فرعًا خاصًّا من المعرفة القائمة على تراكُم الخبرة، بل يجب اعتبارها تنقيحًا للغة العامة، وتكميلها بأدواتٍ مناسبة لتمثيل العلاقات التي يكون فيها التواصُل اللفظي العادي غيرَ دقيقٍ أو مرهقًا للغاية. بالمعنى الدقيق للكلمة، فإنَّ الشكلية الرياضية لميكانيكا الكمِّ والديناميكا الكهربائية تقدِّم قواعدَ حسابية لاستنتاج التوقُّعات حول الملاحظات التي حُصِّلت في ظلِّ ظروفٍ تجريبية محددة جيدًا تحدِّدها المفاهيم الفيزيائية الكلاسيكية. إنَّ الطابعَ الشاملَ لهذا الوصف لا يعتمد فقط على الحرية، التي توفِّرها الشكلية الرياضية في اختيار هذه الشروط بأي طريقة يمكن تصوُّرها، ولكن أيضًا على حقيقة أنَّ التعريفَ ذاته للظواهر قيد النظر لاستكمالها

يتضمن عنصرًا غير قابلٍ للانعكاس في عملية المراقبة التي تؤكد على الطابع الأساسي الذي لا رجعة فيه لمفهوم الملاحظة نفسها.

بالطبع، استبعدت جميع التناقضات من وجهة نظر مبدأ المكاملة في فيزياء الكم مسبقًا من خلال الاتساق المنطقي للمخطط الرياضي الذي يدعم كلَّ طلبٍ من المطابقات. لقد عبَّر مبدأ عدم التأكُّد الذي صاغه (هايزنبرج) في 1927 عن الحد النهائي المتبادل لتثبيت أي متغيرين مترافقين من خلال القانون الرياضي، إنَّه خطوةٌ حاسمة نحو توضيح مشكلة القياس في ميكانيكا الكمِّ. لقد أصبح من الواضح أنَّ التمثيلَ الشكلي للكميات المادية من قِبَل المشغلين في المعادلة الرياضية غير القابلين للتبديل يعكس بشكلٍ مباشرٍ علاقة الاستبعاد المتبادل بين العمليات التي يتم من خلالها تحديد تعريف الكميات الفيزيائية وقياسها.

من أجل التعرُّف على هذا الموقف، كانت هناك حاجة إلى معالجة تفصيلية لمجموعة كبيرة ومتنوعة من الأمثلة على هذه الحجج. على الرغم من الأهمية العامة لمبدأ التراكب في فيزياء الكمومية، فقد عُثِر مرارًا وتكرارًا على دليلٍ مهمٍ للدراسة الوثيقة لمشاكل الملاحظة في تحليل (رايلي) الكلاسيكي للعلاقة العكسية بين دقة تشكيل الصورة بواسطة المجاهر وقوة حل أدوات التحليل الطيفي، في هذا الصدد، غالبًا ما أثبت إتقان (داروين) لطرق الفيزياء الرياضية أنه مفيدٌ.

مع كل التقدير لاختيار بلانك السعيد للكلمات عند تقديم مفهوم «الفعل الكمومي» الكوني، أو القيمة الإيحائية لفكرة «اللف المغزلي الأساسي»، يجب إدراك أنَّ مثل هذه المفاهيم تشير فقط إلى العلاقات بين الأدلة التجريبية المعرَّفة جيدًا، التي لا يمكن فهمها من خلال النمط الكلاسيكي للوصف. إن الأرقام التي تعبر عن القيم الكمومية أو اللف المغزلي في الوحدات الفيزيائية التقليدية لا تتعلق بالقياسات المباشرة للأفعال المعرَّفة بشكلٍ كلاسيكي أو العزم الزاوي، ولكنَّها قابلة للتفسير المنطقي فقط من خلال اتساق استخدام الشكلية الرياضية لنظرية الكمِّ. على وجه الخصوص، الاستحالة التي نوقشت كثيرًا لقياس العزم المغناطيسي للإلكترون الحر بواسطة المقاييس المغناطيسية العادية تتضح مباشرة في حقيقة أنَّ اللف والعزم المغناطيسي في نظرية (ديراك) لا ينتجان عن أي تغيير في معادلة (هاميلتون) الأساسية للحركة، ولكنها تظهر كنتيجة للطابع الشاذ غير التبادلي في حساب التفاضل والتكامل.

لم تتم تسوية مسألة التفسير الصحيح لمفاهيم مبدأ المكاملة وعدم التأكُّد من دون نزاعاتٍ حية، لا سيما في اجتماعات سولفاي في عامي 1927 و1930. في هذه المناسبات، تحدَّانا

أينشتاين بنقدِه الخفي الذي أعطى الإلهام بشكلٍ خاصٍّ لتحليلٍ أعمق لدور الأدوات في عملية القياس. كانت النقطة الحاسمة التي تستبعد بشكلٍ لا رجعة فيه إمكانية العودة إلى الوصف التصويري السببي، هي الاعتراف بأنَّ نطاق التطبيق الواضح لقوانين الحفظ العامة للقوى الدافعة والطاقة مقيدٌ بطبيعته بالظروف التي يكون فيها أيُّ ترتيبٍ تجريبيٍّ، مما يسمح بتحديد موقع الأجسام الذرية في التموضع والزمان، يعني نقلًا لا يمكن التحكُّم فيه من حيث المبدأ للقوى الدافعة والطاقة إلى المقاييس الثابتة والساعات المنظمة التي لا غنى عنها لتعريف الإطار المرجعي. يعتمد التفسير المادي للصياغة النسبية لنظرية الكمِّ في النهاية على إمكانية تلبية جميع متطلبات النسبية في حساب التعامُل مع جهاز القياس الميكروسكوبي.

وضح هذا الظرف جليًّا في مناقشة «قابلية مكونات المجال الكهرومغناطيسي للقياس» التي أثارها (لاندا) و(بيرلس) كحجة جادة ضد اتساق نظرية المجال الكمومي. بالطبع أظهر تحقيقٌ مفصَّلٌ بالتعاون مع (روزنفيلد) أنَّ جميع تنبؤات النظرية في هذا الصدد يمكن أن تتحقَّق عندما يتم الاهتمام بالخصوصية المتبادلة لتثبيت قيم الشدة الكهربائية والمغناطيسية ومواصفات تكوين الفوتون داخل المجال. استوفى موقفٌ مشابه في نظرية البوزيترون حيث يعني أيُّ ترتيبٍ مناسبٍ لقياسات توزيع الشحنة في الفضاء إنشاء أزواج إلكترونية لا يمكن السيطرة عليها بالضرورة.

لا تعتمد السمات الكمومية النموذجية للمجالات الكهرومغناطيسية على المقياس، لأنَّ الثابتيْن لا يسمحان بأي تثبيتٍ لكميات الأبعاد ذات -h والفعل الكمومي c الأساسيين - سرعة الضوء والكتلة e الطول أو الفاصل الزمني، لذا فإنَّ نظرية الإلكترون النسبية تتضمن الشحنة الإلكترونية h / mc. للإلكترون، وتقتصر الخصائص الأساسية للظاهرة على الامتدادات المكانية للترتيب m حقيقة أنَّ هذا الطول لا يزال كبيرًا مقارنةً بـ «نصف قطر الإلكترون» e^2/mc^2، الذي يحدُّ من التطبيق الواضح لمفاهيم النظرية الكهرومغناطيسية الكلاسيكية، مع ذلك فإنها تقترح أنه لا يزال هناك مجالٌ واسعٌ لصلاحية الديناميكا الكهربية الكمومية، على الرغم من أنَّ العديدَ من نتائجها لا يمكن اختباره من خلال ترتيبات تجريبية عملية تتضمن أدوات قياسٍ كبيرة بما يكفي للسماح بإهمال العنصر الإحصائي في بنائها ومعالجتها. من شأن هذه الصعوبات أن تمنع أيَّ تحقيقٍ مباشرٍ في التفاعلات الوثيقة للمكونات الأساسية للمادة، التي زاد عددُها إلى حدٍّ كبيرٍ بسبب الاكتشافات الحديثة، وفي استكشاف علاقاتهم يجب أن نكون مستعدين لنهجٍ جديدٍ يتجاوز نطاق نظرية الكمِّ الحالية.

لا داعي لتأكيد أنَّ مثل هذه المشكلات لا تنشأ في حساب الخصائص الفيزيائية والكيميائية العادية للمادة بناءً على نموذج رذرفورد الذري، حيث تستخدم الخصائص المحددة جيدًا للجسيمات المكونة فقط في التحليل. هنا يقدم الوصف التكميلي بالفعل النهج المناسب لمشكلة الاستقرار الذري التي واجهناها منذ البداية، وبالتالي، فإنَّ تفسير الانتظام الطيفي والروابط الكيميائية يشير إلى الظروف التجريبية التي تستبعد بعضُها بعضًا تلك التي تسمح بالتحكُّم الدقيق في موضع الإلكترونات الفردية وإزاحتها في الأنظمة الذرية.

في هذا الصدد، من الأهمية بمكان إدراك أنَّ التطبيق المثمر للصيغ الهيكلية في الكيمياء يعتمد فقط على حقيقة أنَّ النوى الذرية أثقل بكثيرٍ من الإلكترونات، مقارنة بالأبعاد الجزيئية، فإنَّ عدم التأكُّد في موضع يمكِّن من إهمال النوى إلى حدٍّ كبيرٍ. عندما ننظر إلى التطور بأكمله، ندرك أنَّ اكتشاف تركيز كتلة الذرة داخل منطقة صغيرة جدًّا مقارنة بامتدادها يُعدُّ دليلًا على فهم مجال خبرة هائلٍ يشمل البنية البلورية من المواد الصلبة، وكذلك الأنظمة الجزيئية المعقدة التي تحمل الخصائص الجينية للكائنات الحية.

كما هو معروفٌ، أثبتت طرق نظرية الكمِّ أيضًا أنها حاسمة في توضيح العديد من المشكلات المتعلقة بتكوين واستقرار النوى الذرية نفسها. بالنسبة إلى بعض الجوانب التي تمَّ الكشفُ عنها مبكرًا لمثل هذه المشكلات، سيكون لديَّ الفرصة للإشارة إلى مواصلة سرد ذكرياتي عن رذرفورد، ولكن سيكون خارج نطاق هذه المحاضرة التذكارية لمحاولة سرد تفصيلي للرؤية المتزايدة بسرعة في القوانين الأساسية للأنوية الذرية التي نتجت عن عمل الجيل الحالي من علماء الفيزياء التجريبية والنظرية. يذكر هذا التطور بالفعل الكبار بيننا بالتوضيح التدريجي للقوانين الأساسية لإلكترون الذرَّة في العقود الأولى بعد اكتشاف رذرفورد الأساسي.

X

كلُّ فيزيائي بالتأكيد على دراية بالسلسلة المهيبة من الدراسات الرائعة التي عزَّز بها رذرفورد حتى نهاية حياته رؤيتنا لخصائص وتشكيل النوى الذرية، لذلك سوف أذكر هنا فقط بعضَ ذكرياتي في تلك السنوات، عندما أُتيحت لي الفرصة في كثيرٍ من الأحيان لمتابعة العمل في مختبر كافنديش، وتعلَّمتُ من الحديث مع رذرفورد اتجاه آرائه والمشكلات التي تشغل باله هو ومعاونيه.

بفضل حدسه النافذ، كان رذرفورد على دراية مبكرة بالمشكلات الغريبة والجديدة التي يمثِّلها وجود النوى المركبة واستقرارها، وفي الفترة التي قضاها في مانشستر أشار إلى أنَّ أيَّ نهجٍ لحلِّ هذه المشاكل يتطلَّب افتراض قوى ذات مدى قصيرٍ بين المكونات النووية، من نوعٍ يختلف جوهريًّا عن القوى الكهربائية التي تعمل بين الجسيمات المشحونة. وبهدف إلقاء مزيدٍ من الضوء على قوى نووية محددة، أجرى رذرفورد و(شادويك) في السنوات الأولى في كامبريدج دراساتٍ شاملة في التشتُّت الشاذ لأشعة ألفا في الاصطدامات النووية القريبة.

على الرغم من الحصول على أدلة جديدة مهمة جدًّا في هذه الدراسات، فقد ساد الشعورُ أكثر فأكثر أنَّه بالنسبة إلى التعمُّق أكثر في المشكلات النووية لم تكن مصادر أشعة ألفا الطبيعية كافية، وأنَّه من المستحسن وجود حزمٍ مكثَّفة من الطاقة العالية، الجسيمات الناتجة عن التسريع الاصطناعي للأيونات. على الرغم من رغبة (شادويك) في البدء في بناءٍ مسرعٍ مناسبٍ، كان رذرفورد خلال عدة سنوات مترددًا في الشروع في مثل هذا المشروع الكبير والمكلِّف في مختبره، هذا الموقف مفهومٌ تمامًا عندما ينظر المرء إلى التقدُّم الرائع الذي حقَّقه رذرفورد حتى الآن بمساعدة معداتٍ تجريبية متواضعة جدًّا. يجب أن تكون مهمة التنافس مع المصادر الطبيعية المشعة هائلة جدًّا في ذلك الوقت، ومع ذلك، تغيَّرت النظرة العامة من خلال تطوير نظرية الكمِّ وتطبيقها الأول على المشكلات النووية.

كان رذرفورد نفسُه قد أشار في وقتٍ مبكرٍ من عام 1920 في محاضرته الثانية لبيكر بوضوحٍ إلى صعوبات تفسير انبعاث أشعة ألفا من النوى على أساس الأفكار الميكانيكية البسيطة، التي أثبتت أنَّها مفيدة جدًّا في تفسير تشتُّت جسيمات ألفا بواسطة النوى الذرية، نظرًا لأنَّ سرعة الجسيمات المقذوفة لم تكن كبيرة بما يكفي للسماح لها عن طريق الانعكاس بالدخول مرة أخرى إلى النواة مقابل التنافر الكهربائي، ومع ذلك، سرعان ما تعرَّف على احتمالات اختراق الجسيمات من خلال الحواجز المحتملة كنتيجة لميكانيكا الموجات. وفي عام 1928 قدَّم جامو الذي يعمل في جوتنجن، وكذلك (كوندون) و(جورني) في برينستون شرحًا عامًّا لاضمحلال ألفا، ووصفًا تفصيليًّا للعلاقة بين عمر النواة والطاقة الحركية لجزيئات ألفا المنبعثة، بما يتوافق مع القواعد التجريبية التي وجدها (جيجر) و(نوتال) في أوائل أيام مانشستر.

عندما انضمَّ إلينا (جامو) في صيف عام 1928 في كوبنهاجن، كان يبحث في تغلغل الجسيمات المشحونة في النوى عن طريق تأثير النفق العكسي. كان قد بدأ هذا العمل في

جوتنجن، وناقشه مع (هويترزمان) و(أتكينسون)، وكانت النتيجة أنَّ هذا الأخير قد أدَّى إلى اقتراحٍ أنَّ مصدر الطاقة الشمسية يمكن تتبُّعه إلى التحولات النووية الناتجة عن تأثير البروتونات ذات السرعات الحرارية الكبيرة المتوقعة -وفقًا لأفكار إدينجتون- في باطن الشمس.

خلال زيارة قصيرة إلى كامبريدج في أكتوبر 1928، ناقش (جامو) الآفاق التجريبية الناشئة عن اعتباراته النظرية مع (كوكروفت)، الذي أقنع نفسه بتقديراتٍ أكثر تفصيلًا بإمكانية الحصول على تأثيراتٍ ملحوظة عن طريق قصف نوى خفيفة ببروتونات ذات طاقة أصغر بكثيرٍ من جزيئات ألفا من المصادر المشعَّة الطبيعية. ولأنَّ النتيجة بدت واعدة، وافق رذرفورد على اقتراح (كوكروفت) لبناء مسرِّعٍ عالي الجهد لمثل هذه التجارب، وبدأ العمل في بناء الجهاز بواسطة (كوكروفت) في نهاية عام 1928، واستمرَّ خلال العام التالي بالتعاون مع (والتون).

أُجريت التجارِب الأولى بالبروتونات المتسارعة في مارس 1930، التي بحثوا فيها عن أشعة جاما المنبعثة نتيجة تفاعل البروتونات مع النوى المستهدفة، لم تسفر عن أي نتيجة. ولاحقًا كان لا بُدَّ من إعادة بناء الجهاز بسبب تغيير المختبر، وكما هو معروف تحصَّلوا على إنتاج جزيئات ألفا عالية السرعة بتأثير البروتون على نوى الليثيوم في مارس 1932.

بدأت هذه التجارب مرحلة جديدة من التقدُّم المهم، حيث زادت معرفتنا بالتفاعلات النووية وارتفع إتقان تقنيات مسرع الجسيمات بشكلٍ متزايدٍ من عامٍ إلى آخر. أعطت تجارب (كوكروفت) و(والتون) الأولى بالفعل نتائجَ ذات أهمية كبيرة من عدة جوانب. لم يؤكدوا فقط بكلِّ التفاصيل تنبؤات نظرية الكمِّ فيما يتعلَّق باعتماد المقطع العرضي للتفاعل على طاقة البروتونات، ولكن كان من الممكن أيضًا ربط الطاقة الحركية لأشعة ألفا المنبعثة بكتل الجسيمات المتفاعلة التي كانت معروفة في ذلك الوقت بدقة كافية بفضل تطوير (أستون) المبتكر للتحليل الطيفي الشامل. لقد قدمت هذه المقارنة أولَ اختبارٍ تجريبي للعلاقة الشهيرة التي اقترحها أينشتاين بين الطاقة والكتلة، التي قادها قبل سنواتٍ عديدة من خلال الحجج النسبية، لا داعي لتذكُّر كم كانت هذه العلاقة ذات أهمية قصوى لإثباتها في التطوير الإضافي للبحوث النووية.

تقدِّم قصة اكتشاف (شادويك) للنيوترون سماتٍ درامية مماثلة، من سمات اتساع وجهات نظر رذرفورد أنَّه توقَّع مبكرًا وجودَ مكونٍ ذي شحنة متعادلة ثقيلٍ داخل النواة لكتلة تتطابق بشكلٍ وثيقٍ مع تلك الموجودة في البروتون. كما أصبح واضحًا تدريجيًّا أنَّ هذه الفكرة ستسفر بالفعل عن اكتشافات (أستون) لنظائر جميع العناصر تقريبًا ذات الكتل الذرية التي تقترب من مضاعفات

الوزن الذري للهيدروجين. فيما يتعلَّق بدراساتهم للعديد من أنواع التحلُّل النووي الناجم عن أشعة ألفا، قام رذرفورد و(شادويك) ببحثٍ مكثَّفٍ عن أدلة تتعلَّق بوجود مثل هذا الجسيم. رغم ذلك وصلت المشكلة إلى ذروتها من خلال ملاحظة (بوث) و(جوليوت كوري) لإشعاعٍ مخترقٍ ناتجٍ عن قصف البريليوم بواسطة جسيمات ألفا. في البداية، كان من المفترض أن يكون هذا الإشعاع من نوع أشعة جاما، ولكن مع إلمام (شادويك) الكامل بالجوانب المتنوعة للظواهر الإشعاعية، فقد أدرك بوضوحٍ أنَّ الدليل التجريبي لم يكن متوافقًا مع هذا الرأي.

في الواقع، من خلال تحقيقٍ بارعٍ كشف فيه عن عددٍ من السمات الجديدة للظاهرة، تمكَّن (شادويك) من إثبات أنَّ المرء واجه قوى دافعة وتبادلًا للطاقة من خلال جسيمٍ محايدٍ، حدَّد كتلته على أنها تختلف عن كتلة البروتون بأقل من جزءٍ من الألف. نظرًا للسهولة التي يمكن بها للنيوترونات -مقارنة بالجسيمات المشحونة- المرور عبر المادة من دون نقل الطاقة إلى الإلكترونات والاختراقات إلى النوى الذرية فقد فتح اكتشاف (شادويك) إمكانياتٍ كبيرة لإنتاج أنواعٍ جديدة من التحويلات النووية.

وضحت بعضُ الحالات الأكثر إثارة للاهتمام لمثل هذه التأثيرات الجديدة على الفور في كافنديش بواسطة (فيذر)، الذي حصل على صورٍ لغرفة السحب تُظهِر أنَّ نواة النيتروجين تتفكَّك تحت إطلاق جسيم ألفا بواسطة القصف النيوتروني. وكما هو معروفٌ جيدًا، أدَّت الدراسات المستمرة في العديد من المختبرات على طول هذه الخطوط بسرعة إلى زيادة معرفتنا بالتكوين النووي وعمليات التحويل.

في ربيع عام 1932، في أحد مؤتمراتنا السنوية في معهد كوبنهاجن، بينما نحن دائمًا سعداء برؤية العديد من المتعاونين السابقين، كان أحد الموضوعات الرئيسة للنقاش بكلِّ تأكيدٍ «الآثار المترتبة على اكتشاف النيوترون»، والنقطة الخاصة التي أثيرت كانت الظرف الغريب على ما يبدو أنه في صور حجرة السحب الجميلة لـ(دي)، حيث لم يلاحظ أي تفاعل على الإطلاق بين النيوترونات والإلكترونات المرتبطة بالذرات.

فيما يتعلق بهذه النقطة، قيل إنَّه بسبب الاعتماد في فيزياء الكمِّ للمقطع العرضي للتشتُّت على الكتلة المخفضة للجسيمات المتصادمة، فإنَّ هذه الحقيقة لن تكون غير متسقة حتى مع افتراض وجود تفاعلٍ قصير المدى بين نيوترون وإلكترون ذي قوة مماثلة لتلك الموجودة بين النيوترون

والبروتون. وبعد بضعة أيامٍ، تلقيتُ رسالة من رذرفورد تتطرق بالمصادفة إلى هذه النقطة، التي لا يمكنني مقاومة الاقتباس منها بالكامل:

12 أبريل 1932.

«عزيزي بور،

لقد كنتُ سعيدًا جدًّا لسماع معلوماتٍ عنكم جميعًا من (فاولر) عندما عاد إلى كامبريدج، ومعرفة أنَّ لديك لقاءً ممتازًا مع الأصدقاء القدامى. كنتُ مهتمًّا بسماع نظريتك عن النيوترون، لقد رأيتُها موصوفة بشكلٍ جيدٍ للغاية من قِبَل (كروثر) المراسل العلمي لمانشستر جارديان، وهو ذكيٌّ للغاية في هذه الأمور. يسعدني جدًّا أن أسمع أنَّك تنظر بعين الاعتبار إلى النيوترون، أعتقد أنَّ دليل دعمها، الذي حصل عليه (شادويك) وآخرون قد اكتمل الآن في الأجزاء الأساسية. لا تزال نقطة خلافية حول مقدار التأيُّن الذي ينتج -أو ما ينبغي إنتاجه- لمراعاة الامتصاص، بغض النظر عن الاصطدامات مع النوى.

إنها لا تمطر ولكنها تتساقط، ولديَّ تطورٌ مثيرٌ آخر لأخبركم به عن أي حسابٍ قصيرٍ يجب أن يظهر في دورية نيتشر الأسبوع المقبل، أنت تعلم أنَّ لدينا معملَ جهدٍ عالٍ حيث يمكن الحصول على الجهد الكهربي المستمر بجهدٍ يصل إلى 600000 فولت أو أكثر. لقد قاموا مؤخرًا بفحص تأثيرات قصف العناصر الخفيفة بالبروتونات. تسقط البروتونات على سطح مادة مائلة بزاوية 45 درجة إلى محور الأنبوب، وقد لوحظت التأثيرات الناتجة على الجانب بطريقة التلألؤ، حيث يتم تغطية شاشة كبريتيد الزنك بما يكفي من المايكا لإيقاف البروتونات. في حالة الليثيوم، لوحظ التلألؤ اللامع، بدءًا من حوالي 125000 فولت ويتصاعد بسرعة كبيرة مع الجهد عندما يمكن الحصول على عدة مئات في الدقيقة بتيارٍ بروتوني يبلغ بضعة مللي أمبير. يبدو أنَّ جسيمات ألفا لها مدى محددٌ مستقلٌّ عمليًّا عن الجهد يبلغ 8 سم في الهواء. أبسط افتراض هو أنَّ الليثيوم 7 يلتقط بروتونًا يتكسر مع انبعاث جسيمين عاديين، ووفقًا لوجهة النظر هذه، يبلغ إجمالي الطاقة المحررة نحو 16 مليون فولت، وهذا الترتيب الصحيح للتغييرات في الكتلة المعنية، بافتراض الحفاظ على الطاقة.

سيتم إجراء تجارب خاصة لاحقًا لاختبار طبيعة الجسيمات، ولكن من سطوع التلألؤ والمسار في غرفة (ويلسون)، يبدو من المحتمل أنَّها جزيئات ألفا في التجارب خلال الأيام

القليلة الماضية، لوحظت تأثيراتٌ مماثلة في البورون والفلور، ولكن نطاقات الجسيمات أصغر على الرغم من أنها تبدو مثل جسيمات ألفا، قد يكون البورون 11 يلتقط بروتونًا ويتكسَّر إلى ثلاثة جسيمات ألفا، بينما يتفكك الفلور إلى أكسجين وألفا. تتوافق تغيُّرات الطاقة بشكلٍ تقريبي مع هذه الاستنتاجات، أنا متأكدٌ أنك ستهتم كثيرًا بهذه النتائج الجديدة التي نأمل استمرارها في المستقبل القريب.

من الواضح أنَّ جسيم ألفا والنيوترون والبروتون سيؤدي على الأرجح إلى ظهور أنواعٍ مختلفة من التفكك، وقد يكون من المهم أنَّه لم يتم ملاحظة النتائج حتى الآن إلا في عناصر يبدو كما لو أنَّ إضافة البروتون الرابع تؤدي في الحال إلى تكوين جسيم ألفا، وما $4n+3$ يترتب على ذلك من تفكك. ومع ذلك، أعتقد أن السؤال برمته يجب أن يُنظر إليه على أنَّه نتيجة عملية واحدة وليس نتيجة خطوات.

يسعدني جدًّا أنَّ الطاقة والطاقة المستخدمة في التجربة من أجل الحصول على إمكانات عالية قد تمَّت مكافأتها بنتائج محدَّدة ومثيرة للاهتمام. كان يجب أن يكونوا قد لاحظوا التأثيرَ قبل عامٍ أو نحو ذلك لكنهم لم يجربوه بالطريقة الصحيحة، يمكنك بسهولة أن تدرك أنَّ هذه النتائج قد تفتح مجالًا واسعًا من البحث في التحويل بشكلٍ عامٍ.

نحن جميعًا في حالة جيدة جدًّا في المنزل، وسأواصل إعطاء المحاضرات غدًا. مع أطيب التمنيات لك ولسيدة بور.

تفضلوا بقبول فائق الاحترام

رذرفورد».

يُظهر البريليوم بعضَ التأثيرات الغريبة التي لم يتم تحديدها بعد، ربما سأشير إلى هذه التجارب في مناقشة الجمعية الملكية حول النوى يوم الخميس 25 أبريل.

بالطبع، عند قراءة هذه الرسالة، يجب ألَّا يغيب عن البال أنَّ زياراتي السابقة إلى كامبريدج قد أبقتني على دراية بالعمل الجاري في مختبر كافنديش، لذلك لم يكن رذرفورد بحاجة إلى تحديد المساهمات الفردية لمساعديه. هذه الرسالة هي في الواقع تعبيرٌ عفويٌّ عن فرحه الغزير بالإنجازات العظيمة التي تحقَّقت في تلك السنوات وتوقه لمتابعة نتائجها.

بصفته رائدًا حقيقيًّا، لم يعتمد رذرفورد أبدًا على الحدس فقط، مهما كان الأمرُ بعيدًا، لكنه كان دائمًا يبحث عن مصادر جديدة للمعرفة، التي يمكن أن تؤدي إلى تقدُّمٍ غير متوقع. وهكذا، في كامبريدج أيضًا، واصل رذرفورد ومعاونوه بنشاطٍ كبيرٍ وجهازه المصقول بشكلٍ مطرد دراسات العمليات الإشعاعية لانحلال ألفا وبيتا. كشف العمل المهم الذي قام به رذرفورد و(إيليس) على أطياف أشعة بيتا عن إمكانية التمييز الواضح بين التأثيرات النووية وتفاعل الجسيم مع نظام الإلكترون الخارجي، وأدَّى إلى توضيح آلية التحويل الداخلي.

علاوة على ذلك، أثار عرض (إيليس) للتوزيع الطيفي المستمر للإلكترونات المنبعثة مباشرة من النواة سؤالًا محيرًا حول الحفاظ على الطاقة، وهو الذي تمَّت الإجابة عنه في النهاية من خلال فرضية (باولي) الجريئة عن الانبعاث المتزامن للنيوترينو، مما يوفر الأساس لنظرية «(فيرمي) المبتكرة عن الطاقة «نظرية اضمحلال بيتا.

من خلال التحسُّن الكبير في الدقة في قياسات أطياف أشعة ألفا بواسطة رذرفورد و(وين ويليامز) وآخرين، ألقي الكثيرُ من الضوء الجديد على البنية الدقيقة لهذه الأطياف وعلاقتها بمستويات الطاقة للنواة المتبقية الناتجة عن تحلل ألفا. كانت إحدى المغامرات الخاصة في مرحلة مبكرة هي اكتشاف التقاط الإلكترونات بواسطة أشعة ألفا التي اكتشفها رذرفورد بعد الملاحظة الأولى للظاهرة في عام 1922 بواسطة (هندرسون) في أحد أبحاثه الأكثر إتقانًا. كما هو معروف جيدًا، فإنَّ هذا العمل، الذي جلب الكثيرَ من المعلومات حول عملية التقاط الإلكترون، كان يجذب انتباهًا جديدًا بعد سنواتٍ قليلة من وفاة رذرفورد عندما أُكتشفت عمليات انشطار النوى الثقيلة بواسطة تأثير النيوترون، جاء من خلال دراسة اختراق الشظايا النووية عالية الشحنة من خلال المادة، حيث يكون التقاط الإلكترون هو السمة الغالبة على الواجهة.

بدأ التقدُّم الكبير فيما يتعلَّق بالنظرة العامة والتقنية التجريبية في عام 1933 من خلال اكتشاف (فريدريك جوليو) و(إيرين كوري) لِمَا يُسمَّى بالنشاط الإشعاعي بيتا الاصطناعي الناتج عن التحولات النووية التي بدأها قصف أشعة ألفا. لا أحتاج هنا لتذكير كيف تم اكتشاف نظائر مشعة لعددٍ كبيرٍ من العناصر من خلال التحقيقات المنهجية الرائعة التي أجراها (إنريكو فيرمي) للتحويلات النووية المستحثة بالنيوترونات، اكتسبت الكثير من المعلومات حول العمليات النووية التي بدأت عن طريق التقاط النيوترونات البطيئة.

كشفت الدراسة المستمرة لمثل هذه العمليات بشكلٍ خاصٍّ عن تأثيرات الرنين الأكثر بروزًا للحدة التي تفوق بكثيرٍ القمم في المقطع العرضي للتفاعلات الناتجة عن أشعة ألفا التي لوحظت لأول مرة بواسطة (بوز)، ولتفسير (جيرني) الذي قام على أساس الإمكانات ومن خلال نموذجٍ جيدٍ، مما حزا بـ (جامو) للفت انتباه رذرفورد في الحال.

أظهرت ملاحظات (بلاكيت) بالفعل (باستخدام تقنية غرفة السحب الأوتوماتيكية المبتكرة) أنَّه في العملية نفسها التي تم التحقيق فيها في تجارب رذرفورد الأصلية حول التفكُّك النووي الاصطناعي، ظلَّ الجسيم ألفا الناتج كحدثٍ ثانويٍّ للتجربة مدمجًا في النواة المتبقية بعد هروب البروتون. أصبح من الواضح الآن أنَّ جميعَ أنواع التحويلات النووية داخل منطقة طاقة كبيرة تحدث في خطوتين منفصلتين جيدًا، الأولى هي تكوين نواة مركبة طويلة العمر نسبيًّا، بينما الثانية هي إطلاق طاقة الإثارة نتيجة التنافُس بين مختلف الأنماط الممكنة للتفكك والعمليات الإشعاعية. مثل هذه الآراء، التي اهتمَّ بها رذرفورد بشدة، كانت موضوع الدورة الأخيرة من المحاضرات التي ألقيتُها بناءً على دعوة رذرفورد في عام 1936 في مختبر كافنديش.

بعد أقلِّ من عامين على وفاة رذرفورد عام 1937، بدأ تطورٌ جديدٌ ومثيرٌ من خلال اكتشاف عمليات الانشطار لأثقل العناصر من قِبَل صديقه القديم والمتعاون في مونتريال (أوتو هان)، الذي عمل في برلين مع (فريتز ستراسمان). بعد هذا الاكتشاف مباشرة، قدَّم (ليز مايتنر) و(أوتو فريش)، اللذان كانا يعملان في ستوكهولم وكوبنهاجن ثم أصبح كلاهما في كامبريدج، مساهمةً مهمةً في فَهْم هذه الظاهرة من خلال الإشارة إلى الانخفاض الحاد في استقرار شحنة النوى العالية الذي كان بمثابة نتيجة بسيطة لموازنة قوى التماسك بين المكونات النووية والتنافر الكهروستاتيكي.

أظهر تحقيقٌ من كثبٍ في عملية الانشطار بالتعاون مع (ويلر) أنَّ العديدَ من سماتها المميزة يمكن تفسيرها من حيث آلية التفاعلات النووية التي تضمَّنت كخطوة أولى تكوين نواة مركبة. في سنوات رذرفورد الأخيرة، وجد في (ماركوس أوليفانت) متعاونًا وصديقًا يذكرنا موقفه وقوته في العمل كثيرًا بموقفه العام. في ذلك الوقت، فُتِحت إمكانياتٌ جديدة للبحث من خلال اكتشاف أوري أو الديوتيريوم، ومن خلال بناء السيكلوترون بواسطة (لورانس)، H_2 النظير الهيدروجين الثقيل الذي حصل في دراساته الأولى حول التفكُّك النووي بواسطة حزم الديوترون على عددٍ من التأثيرات المدهشة الجديدة. في التجارِب الكلاسيكية لرذرفورد و(أوليفانت)، حيث تمَّ من خلال

أو ^3Hقصف نظائر الليثيوم المنفصلة بالبروتونات والديوترونات مما أدَّى ذلك إلى اكتشاف ^3Heالتريتيوم، و تم إنشاء الأساس بالفعل لمحاولة حديثة قوية لتطبيق التفاعلات النووية الحرارية لتحقيق الوعود الكاملة لمصادر الطاقة الذرية.

منذ بداية أبحاثه الإشعاعية، كان رذرفورد مدركًا تمامًا لوجهات النظر الواسعة التي تفتَّحت في عدة اتجاهات. على وجه الخصوص، اهتمَّ مبكرًا بإمكانية الوصول إلى تقديرٍ لعمر الأرض، وفَهْم التوازن الحراري في قشرة كوكبنا. حتى لو كان تحرير الطاقة النووية للأغراض التكنولوجية لا يزال قادمًا، فلا بُدَّ أنه كان من دواعي سرور رذرفورد أن تفسير مصدر الطاقة الشمسية غير المعروف تمامًا حتى الآن نتيجة للتطور الذي بدأه قد ظهر في الأفق في حياته.

XII

عندما ننظر إلى الوراء إلى حياة رذرفورد فإنَّنا نراها بالطبع على خلفية فريدة من نوعها لإنجازاته العلمية التي صنعت حقبة تاريخية، لكنَّ ذكرياتنا ستظلُّ دائمًا مشعَّة بسحر شخصيته. في محاضرات تذكارية سابقة، استذكر العديدُ من أقرب زملاء رذرفورد الإلهامَ الذي انبثق من نشاطِه وحماسِه وسحر طرقه المندفعة. على الرغم من النطاق الكبير والمتسارع لأنشطة رذرفورد العلمية والإدارية، سادت الروح نفسها في كافنديش كما تمتعنا بها جميعًا في أيام مانشستر الأولى.

لقد كتب صديقه القديم (أ. إس إيف) في أثناء العمل في مونتريال، سردًا أمينًا لحياة رذرفورد المليئة بالأحداث منذ الطفولة حتى أيامه الأخيرة، خاصة أن الاقتباسات العديدة في كتاب (إيف) من مراسلات رذرفورد الكبيرة المذهلة تعطي انطباعًا حيويًّا عن علاقته بزملائه وتلاميذه في جميع أنحاء العالم. لا يفشل (إيف) أيضًا في الإبلاغ عن بعض قصص الدعابة التي نشأت باستمرارٍ حول رذرفورد، التي أشرتُ إليها في خطابٍ أعيد إنتاجه في كتابه، عندما زارنا رذرفورد للمرة الثانية والأخيرة في كوبنهاجن عام 1932.

كان من سمات موقف رذرفورد الكامل الاهتمام الدافئ الذي أبداه بأيٍّ من الفيزيائيين الشباب العديدين الذين كان على اتصالٍ معهم لفتراتٍ أقصر أو أطول. وهكذا، أتذكَّر بوضوحٍ ظروفَ لقائي الأول في مكتب رذرفورد في كافنديش مع الشاب (روبرت أوبنهايمر)، الذي سأصبح معه على علاقة صداقة وثيقة. في الواقع، قبل أن يصل (أوبنهايمر) إلى المكتب أثنى رذرفورد

-بتقديره الشديد للمواهب- على أعمال الشاب الرائعة، والتي مع مرور الوقت كانت ستخلق له مكانته البارزة في الحياة العلمية في الولايات المتحدة.

كما هو معروف، كان (أوبنهايمر)، بعد فترة وجيزة من زيارته لكامبريدج، أثناء دراسته في جوتنجن من بين أوَّل من لفت الانتباه إلى ظاهرة اختراق الجسيمات من خلال الحواجز المحتملة، التي يجب أن تكون أساسية للتفسير المبتكر لانحلال ألفا من قبل (جامو) وآخرين. بعد إقامته في كوبنهاجن، جاء (جامو) في عام 1929 إلى كامبريدج، حيث حظيت مساهماته المستمرة في تفسير الظواهر النووية بتقديرٍ كبيرٍ من قبل رذرفورد، الذي استمتع أيضًا بشكلٍ كبيرٍ بالفكاهة الغريبة والرائعة التي كشف عنها (جامو) في وصاله اليومي والتي قدمها لاحقًا بشكلٍ غزيرٍ في مؤلفاته المشهورة.

من بين العديد من الفيزيائيين الشباب من الخارج الذين عملوا في مختبر كافنديش في تلك السنوات، كان (كابيتزا) واحدًا من أكثر الشخصيات الملونة والمذهلة، الذي أُعجب رذرفورد بقوة خياله وموهبته كمهندسٍ فيزيائي. كانت العلاقة بين رذرفورد و(كابيتزا) سمة مميزة لكليهما، وعلى الرغم من اللقاءات العاطفية التي لا مفرَّ منها، تميَّزت من البداية إلى النهاية بعاطفة متبادلة عميقة. كانت هذه المشاعر أيضًا وراء جهود رذرفورد لدعم أعمال (كابيتزا) بعد عودته إلى روسيا في عام 1934، وكانت من جانب (كابيتزا) التي عبَّر عنها بشكلٍ مؤثِّرٍ في رسالة تلقيتُها منه بعد وفاة رذرفورد.

في بداية الثلاثينيات، كامتدادٍ لكافنديش، عندما أنشئ مختبر (موند) بمبادرة رذرفورد للترويج لمشاريع (كابيتزا) الواعدة، أراد كابيتزا في تزيين مكتبه أن يعبِّر عن فرحته بصداقة رذرفورد، فقد نحت تمساحًا على الجدار الخارجي مما تسبَّب في تعليقاتٍ غير لطيفة لا يمكن استيعابها إلا بالرجوع إلى الفولكلور الروسي الخاص حول الحياة الحيوانية. قبل كل شيء، فإن ارتياح رذرفورد للتفسير الفني لـ(إريك جيل) للمنحوتة الموضوعة في قاعة المدخل صدم كثيرًا من أصدقاء رذرفورد. في زيارة لكامبريدج، اعترفتُ بأنني لا أستطيع مشاركة هذا السخط، وقد لقيتْ هذه الملاحظة ترحيبًا كبيرًا لدرجة أنَّ (كابيتزا) و(ديراك) قدَّما إليَّ نسخة طبق الأصل من هذا الارتياح؛ مثبتة فوق المدفأة في مكتبي في معهد كوبنهاجن، ومنذ ذلك الحين تعطني متعة يومية.

عندما حصل رذرفورد، تقديرًا لمنصبه في العلوم، على رتبة النبلاء البريطانية، فقد اهتمَّ بشدة بمسؤولياته الجديدة كعضوٍ في مجلس اللوردات، ولكن لم يكن هناك أيُّ تغييرٍ في مباشرة

وبساطة سلوكه، وبالتالي، لا أتذكر أيَّ كلامٍ أكثر شدة من قوله بالنسبة إليَّ، عندما كنتُ في حفل عشاءٍ في نادي المجتمع الملكي في محادثة مع بعض أصدقائه أشرت إليه بصيغة الغائب باسم «اللورد رذرفورد، فقد أثار غضبه تجاهي في عبارة: «هل تجعلني ربًّا؟».

خلال ما يقرب من عشرين عامًا عمل خلالها رذرفورد، حتى وفاته، بطاقة غير منقوصة في كامبريدج، ظللتُ أنا وزوجتي على اتصالٍ وثيقٍ به وبعائلته. في كل عام تقريبًا، استقبلنا بشكلٍ مضيافٍ في منزلهم الجميل في نيونهام جوتدج على خلفية الكليات القديمة، مع الحديقة الجميلة التي وجد فيها رذرفورد الاسترخاء، والتي منحت ماري رذرفورد الكثيرَ من العمل الممتع بصيانتها. أتذكر العديدَ من ساعات المساء الهادئة في دراسة رذرفورد التي قضيتُها في مناقشة ليس فقط الآفاق الجديدة للعلوم الفيزيائية ولكن أيضًا موضوعات عديدة من المجالات الأخرى التي تهم الإنسان. في مثل هذه المحادثات، لم يغرِني أبدًا بالمبالغة في الاهتمام بمساهماته الخاصة، لأن رذرفورد بعد يومٍ طويلٍ من العمل كان عرضة للنوم بمجرد أن يبدو له الخطاب عديم الجدوى. ثم كان على المرء أن ينتظر حتى يستيقظ ثم يستأنف المحادثة بحماسته المعتادة كأنَّ شيئًا لم يحدث. في أيام الأحد، كان رذرفورد يلعب الجولف بانتظامٍ في الصباح مع بعض الأصدقاء المقربين، ويتناول العشاء في المساء في كلية ترينيتي، حيث التقى العديدَ من العلماء البارزين، واستمتع بمناقشاتٍ حول الموضوعات المختلفة. بفضل فضوله الذي لا يشبع لجميع جوانب الحياة، كان لدى رذرفورد تقديرٌ كبيرٌ لزملائه المتعلمين؛ ومع ذلك، أتذكر كيف لاحظ ذات مرة، في طريق عودتنا من ترينيتي، أن من يسمون بالإنسانيين ذهبوا بعيدًا بعض الشيء عندما أعربوا عن فخرهم بجهلِهم التام لِمَا يحدث في أثناء الضغط على زرٍّ في بابهم الأمامي وصوت الجرس في المطبخ.

أدَّت بعضُ أقوال رذرفورد إلى سوء فَهْمٍ أنه لم يقدِّر تمامًا قيمة الشكليات الرياضية لتقدُّم العلوم الفيزيائية، وعلى العكس من ذلك، نظرًا لأنَّ فرع الفيزياء بأكمله، الذي ابتكره بنفسه إلى حدٍّ كبيرٍ، وتطور سريعًا، فقد أعرب رذرفورد غالبًا عن إعجابه بالطرق النظرية الجديدة، بل إنه اهتم أيضًا بالأسئلة المتعلقة بالآثار الفلسفية لنظرية الكم. أتذكر بشكلٍ خاصٍّ -في إقامتي الأخيرة معه قبل أسابيع قليلة من وفاته- كيف كان مفتونًا بمبدأ المكاملة في المشاكل البيولوجية والاجتماعية، وكيف ناقش بشغفٍ إمكانية الحصول على أدلة تجريبية حول أصل التقاليد الوطنية

والأحكام المسبقة عن طريق مثل هذه الإجراءات غير التقليدية مثل تبادل الأطفال حديثي الولادة بين الدول.

بعد بضعة أسابيع، في احتفالات الذكرى المئوية لـ(جالفاني) في بولونيا، علِمنا بحزنٍ وخوفٍ بوفاة رذرفورد، وذهبتُ على الفور إلى إنجلترا لحضور جنازته. بعد أن كنتُ معه قبل وقتٍ قصيرٍ جدًّا، ووجدتُ رذرفورد في نشاطه الكامل وفي نفس الروح المعنوية العالية كما هو الحال دائمًا، لقد قابلتُ ماري رذرفورد مرة أخرى في ظلِّ ظروفٍ مأساوية، تحدثنا عن حياة إرنست الرائعة، حيث كانت رفيقة مخلصة منذ صغرها، وكيف كان بالنسبة إليَّ تقريبًا الأب الثاني. في أحد الأيام التالية، دُفِن رذرفورد في وستمنستر، بالقرب من تابوت نيوتن.

لم يعش رذرفورد ليرى الثورة التكنولوجية العظيمة التي نجمت عن اكتشافه لنواة الذرة وأبحاثه الأساسية اللاحقة، ومع ذلك، كان دائمًا على دراية بالمسؤولية المرتبطة بأي زيادة في معرفتنا وقدراتنا. نحن الآن نواجه التحدي الأكثر خطورة لحضارتنا كلها، لنحرص على منع الاستخدام الكارثي للقوى الهائلة التي وصلت إلى أيدي الإنسان، وتحويل التقدُّم الكبير إلى تعزيز رفاهية البشرية جمعاء. البعض منَّا، الذين تم استدعاؤهم للمشاركة في المشاريع الحربية، غالبًا ما يفكرون في رذرفورد وسعيه بشكلٍ متواضعٍ للتصرُّف بالطريقة التي تخيلها هو نفسه. تظل الذكرى التي تركها لنا رذرفورد مصدرًا غنيًّا للتشجيع والثبات لكل من كان محظوظًا بمعرفته والاقتراب منه، الأجيال التي تسعى في السنوات القادمة لاستكشاف عالم الذرات ستستمر في استلهام عمل وحياة الرائد العظيم.

الفصل السادس

نشأة ميكانيكا الكمِّ

1962

المقال السادس: نشأة ميكانيكا الكمِّ (24):

(24) وُرِد في الكتاب أنَّ هذا المقال مترجمٌ إلى الإنجليزية عن مقالٍ باللغة الألمانية بعنوان Die Entstehung der Quantenmechanik.

يمنحني عيد الميلاد الستين لـ(فيرنر هايزنبرج) فرصة ترحيبٍ لسرد بعض ذكرياتي عن الوقت الذي عمل فيه معنا في كوبنهاجن، وبعبقريته التي وضعت أسسَ ميكانيكا الكمِّ.

قابلتُ الطالب الشاب هايزنبرج لأول مرة منذ ما يقرب من أربعين عامًا في ربيع عام 1922، كان ذلك في جوتنجن، حيث دُعيت لإلقاء سلسلة من المحاضرات حول حالة نظرية الكمِّ في التكوين الذري. على الرغم من التقدُّم الكبير الذي أحرزه (سومرفيلد) ومدرسته بإتقانهم الفائق للطرق التي طوَّرها (هاملتون) و(جاكوبي) لمعالجة الأنظمة الميكانيكية من حيث كميات الفعل غير المتغيرة، فإنَّ مشكلة دمج الفعل الكمومي في التعميم المتسق لـلفيزياء الكلاسيكية كانت لا تزال تحتوي على صعوباتٍ عميقة. أدَّت المواقف المتباينة تجاه هذه المشكلة إلى مناقشاتٍ حية، وأتذكر بسرورٍ الاهتمامَ الذي استجاب به المستمعون الأصغر سنًّا بشكلٍ خاصٍّ لتأكيدي على مبدأ التطابق كدليلٍ على مزيدٍ من التطوير.

في هذه المناسبة ناقشنا إمكانية حضور اثنين من أصغر تلاميذ (سومرفيلد) إلى كوبنهاجن، وكان لديه توقعاتٌ أكبر. بينما انضمَّ (باولي) إلى مجموعتنا بالفعل في العام نفسه، مكث هايزنبرج لمدة عامٍ آخر في ميونيخ تبعًا لنصيحة (سومرفيلد) لإكمال أطروحة الدكتوراه قبل أن يأتي هايزنبرج إلى كوبنهاجن لإقامة أطول في خريف عام 1924، كان من دواعي سرورنا أن نراه هنا لفترة وجيزة بالفعل في الربيع السابق، ثم استمرَّت مناقشات (جوتينج) في المعهد، وكذلك في جولات المشي الطويلة، واكتسبتُ انطباعًا أقوى عن هدايا هايزنبرج النادرة.

تطرقت محادثاتُنا إلى العديد من المشكلات في الفيزياء والفلسفة، وأكدنا بشكلٍ خاصٍّ شرطَ التعريف الواضح للمفاهيم المعنية. كانت مناقشات المشاكل في الفيزياء الذرية معنية -قبل كل شيء- بالطابع الغريب للفعل الكمومي فيما يتعلَّق بالمفاهيم المستخدمة في وصف جميع النتائج

التجريبية، وفي هذا الصدد تحدَّثنا أيضًا عن إمكانية وجود تجريداتٍ رياضية هنا كما في نظرية النسبية التي قد تكون مفيدة. في ذلك الوقت لم تكن مثل هذه الرؤى في متناول اليد، لكن تطوير الأفكار المادية كان قد دخل للتوّ مرحلة جديدة.

أجريت محاولة لتضمين التفاعلات الذرية الفردية في إطار نظرية الإشعاع الكلاسيكية بالتعاون مع (كرامرز) و(سلاتر). على الرغم من أنَّنا واجهنا صعوباتٍ في البداية فيما يتعلَّق بالحفاظ الصارم على الطاقة والقوى الدافعة، فقد أدَّت هذه التحقيقات إلى مزيدٍ من التطوير لمفهوم التذبذبات الافتراضية كحلقة وصلٍ بين الذرات ومجالات الإشعاع.

بعد فترة وجيزة، تحققتْ خطوة كبيرة إلى الأمام من خلال نظرية التشتُّت لـ(كرامر)، التي تطورت على خطوط التطابق، والتي أسَّست ارتباطًا مباشرًا بقواعد الاحتمالية العامة لأينشتاين لعمليات الامتصاص والانبعاثات التلقائية والمستحثة.

تولَّى هايزنبرج و(كرامر) على الفور تعاونًا وثيقًا أدَّى إلى تطوير نظرية التشتت، على وجه الخصوص قاما بدراسة نوعٍ جديدٍ من التفاعُل الذري المرتبط بالاضطرابات التي تسبِّبها مجالات الإشعاع، لكن ظلَّ العلاج شبه تجريبي، بمعنى أنَّه لا يوجد حتى الآن أساسٌ قائمٌ بذاته لاشتقاق المصطلحات الطيفية للذرات أو احتمالات تفاعلها. عندها لم يكن هناك سوى أملٍ غامضٍ في إمكانية استغلال العلاقة المذكورة للتوّ بين تأثيرات التشتُّت والاضطراب لإعادة صياغة تدريجية للنظرية، التي من خلالها -خطوة بخطوة- سيتمُّ القضاء على كلِّ استخدامٍ غير مناسبٍ للأفكار الكلاسيكية. نظرًا لإعجابنا بصعوبات مثل هذا البرنامج، شعرنا جميعًا بإعجابٍ كبيرٍ عندما اكتشف هايزنبرج البالغ من العمر 23 عامًا كيفية الوصول إلى الهدف بضربة واحدة.

من خلال تمثيلِه البارز للكميات الحركية والديناميكية من خلال الرموز غير القابلة للتبديل، وضع بالفعل الأساس الذي يجب أن يرتكز عليه التطور الإضافي، سرعان ما تمَّ الانتهاء الرسمي لميكانيكا الكمِّ الجديدة بالتعاون الوثيق مع (جوردان) و(بورن). في هذا الصدد، أودُّ أن أذكر أنَّ هايزنبرج عند تلقِّيه رسالة من (جوردان)، وصف مشاعره بالكلمات التالية تقريبًا: «الآن يتحدث علماء الرياضيات في جوتنجن كثيرًا عن المصفوفات الهرمية، لكنني لا أعرف حتى ما هي المصفوفة». بعد ذلك بوقتٍ قصيرٍ، قدَّم (ديراك) -الذي أخبره هايزنبرج عن أفكاره الجديدة في زيارة إلى كامبريدج- مثالًا رائعًا آخر لعالم فيزياء شابٍّ قادرٍ على إنشاء الأدوات الرياضية المناسبة لعملِه بنفسِه.

على الرغم من إحراز تقدُّمٍ حاسمٍ في التمثيل المتسق للمشكلات الكمومية بشكلٍ واضحٍ من خلال الشكلية الجديدة، فقد ظهر لبعض الوقت كما لو أنَّ متطلبات المراسلات لم يتم الوفاء بها جميعًا بعد. وهكذا، أتذكر كيف عبّر (باولي) -الذي كانت معالجته لحالات الطاقة لذرة الهيدروجين أحد التطبيقات المثمرة الأولى لآراء هايزنبرج- عن عدم رضاه عن الموقف، وشدَّد على أنَّه يجب أن يكون واضحًا أنه يمكن تحديد موقع القمر في مداره حول الأرض، في حين أنَّه وفقًا لميكانيكا المصفوفة، فإنَّ كلَّ حالة لنظامٍ ثنائي الجسم مع طاقة محددة جيدًا تسمح فقط بالتوقعات الإحصائية المتعلقة بـالكميات الحركية المعنية.

في هذا الصدد، كان من المفترض أن يأتي الضوء الجديد من التناظر بين حركة الجسيمات المادية وانتشار الموجات للفوتونات، الذي أشار إليه (دي برولي) بالفعل عام 1924. على هذا الأساس، نجح (شرودنجر) في عام 1926 بإنشاء معادلته الموجية الشهيرة بنجاحٍ باهرٍ في تطبيق الوسائل القوية لنظرية الدالة في علاج العديد من المشاكل الذرية. فيما يتعلَّق بمشكلة المطابقة، كان من الضروري قبل كل شيء أن يتمَّ تمثيل كل حلٍّ لمعادلة (شرودنجر) على أنه تراكبٌ للدوال الذاتية التوافقية، مما جعل من الممكن متابعة -بالتفصيل- كيف يمكن مقارنة حركة الجسيمات بانتشار حزم الموجة.

لكن في البداية ظلَّ هناك نقصٌ معينٌ في الوضوح فيما يتعلَّق بالعلاقة المتبادَلة بين المعالجات الرياضية المختلفة ظاهريًا للمشكلات الكمومية. كمثالٍ على المناقشات في تلك الأيام، قد أذكر كيف بدَّد (أوسكار كلاين) الشكَّ الذي عبَّر عنه هايزنبرج فيما يتعلَّق بإمكانية تفسير تأثير (ستيرن جيرلاخ) من حيث انتشار الموجة، هذا الأخير، كان على دراية خاصة بالتشابُه بين الميكانيكا والبصريات، الذي أشار إليه (هاملتون)، وكان هو نفسه قد سار على درب معادلة الموجة، يمكن أن يشير فقط إلى تفسير (هوجنس) القديم للانكسار المزدوج في البلورات.

أتاحت زيارة (شرودنجر) إلى كوبنهاجن في خريف عام 1926 فرصةً خاصة لتبادل وجهات النظر بشكلٍ حيويٍّ، في هذه المناسبة، حاولتُ أنا وهايزنبرج إقناعه بأنَّ معالجتَه الجميلة لظواهر التشتُّت لا يمكن أن تتوافق مع قانون بلانك لإشعاع الجسم الأسود دون مراعاة صراحة الطابع الفردي لعمليات الامتصاص والانبعاث.

سرعان ما وضح التفسير الإحصائي لميكانيكا موجات شرودنجر من خلال تحقيق (بورن) في مشاكل الاصطدام. أنشئ التكافؤ الكامل للطرق المختلفة بالفعل في عام 1926 من خلال نظرية

التحوُّل لـ(ديراك) و(جوردان). في هذا الصدد، أتذكر كيف أشار هايزنبرج في ندوة المعهد إلى أنَّ ميكانيكا المصفوفة تسمح بتحديد ليس فقط القيمة المتوقعة للكمية المادية، ولكن أيضًا القيم المتوقعة لكل قوة من هذه الكمية، وكيف صرَّح (ديراك) في المناقشة اللاحقة أنَّ هذه الملاحظة أعطته فكرة عن التحولات العامة.

في شتاء 1925-1926 عمل هايزنبرج في جوتنجن، حيث كنتُ في زيارتها أيضًا لبضعة أيامٍ؛ تحدَّثنا بشكلٍ خاصٍّ عن اكتشاف اللف المغزلي للإلكترون، الذي أضاء تاريخه الدرامي مؤخرًا من عدة جوانب في مجلد (باولي) التذكاري. وكان من دواعي سرور المجموعة في كوبنهاجن أنَّ هايزنبرج وافق خلال هذه الزيارة على تولي منصب المحاضر في معهدنا بعد (كرامر)، الذي قبل كرسي الفيزياء النظرية في أوترخت، حظيت محاضراتُه في العام الدراسي التالي بتقدير الطلاب، ليس فقط لمحتواها ولكن أيضًا لإتقان هايزنبرج المثالي للغة الدنماركية.

كان هذا العام مثمرًا للغاية لاستمرار العمل العلمي الأساسي لهايزنبرج، وكان الإنجاز البارز هو توضيح ازدواجية طيف الهيليوم، التي أُعتبرت لفترة طويلة واحدة من أكبر الصعوبات في نظرية الكمِّ للقوانين الأساسية للذرة. من خلال معالجة هايزنبرج للف المغزلي الإلكتروني فيما يتعلَّق بخصائص التناظر للدوال الموجية، ظهر مبدأ (باولي) أكثر وضوحًا، تسبَّب هذا على التوِّ في إبراز أهم النتائج. كان هذا قد قاد هايزنبرج بنفسه مباشرة إلى فَهْم المغناطيسية الحديدية، وسرعان ما جاء توضيح الروابط الكيميائية أحادية القطب من قِبَل (ريتلر) و(لندن)، وكذلك حلَّ (دينيسون) اللغز القديم المتعلق بالحرارة النوعية للهيدروجين.

فيما يتعلَّق بالتطور السريع للفيزياء الذرية في تلك السنوات، كان الاهتمام يتركز بشكلٍ متزايدٍ على مسألة الترتيب المنطقي لثروة البيانات التجريبية. وجد تحقيق هايزنبرج العميق لهذه المشاكل تعبيرًا عنه في الورقة الشهيرة «المحتوى المرئي للكينماتيكا وميكانيكا نظرية الكمِّ»، التي ظهرت في نهاية إقامته في كوبنهاجن، التي تمَّت فيها صياغة علاقات اللا حتمية لأول مرة. منذ البداية، اتسمَّ الموقف تجاه التناقضات الواضحة في نظرية الكمِّ بالتركيز على سمات الكمال في العمليات الأولية المرتبطة بالفعل الكمومي. وبينما كان من الواضح حتى الآن أنَّ محتوى الطاقة والكميات الثابتة الأخرى يمكن تحديدها بدقة فقط للأنظمة المعزولة، كشف تحليل هايزنبرج إلى أي مدى تتأثَّر حالة النظام الذري في أثناء أي ملاحظة بالتفاعل الذي لا مفرَّ منه مع أدوات القياس.

أدَّى التركيز على مشاكل الملاحظة مرة أخرى إلى طرح الأسئلة التي تحدَّثتُ عنها أنا وهايزنبرج في زيارته الأولى لكوبنهاجن التي أدَّت إلى مزيدٍ من المناقشات حول المشكلات المعرفية العامة. مجرد شرط أن يكون إمكانية توصيل النتائج التجريبية بطريقة لا لبس فيها يعني أنَّ الترتيب التجريبي ونتائج الملاحظة يجب التعبير عنها بلغة مشتركة تتكيَّف مع توجهنا في البيئة، وبالتالي، فإنَّ وصف الظواهر الكمومية يتطلب تمييزًا من حيث المبدأ بين الجسيمات قيد التحقيق وجهاز القياس الذي يتم من خلاله تحديد الظروف التجريبية. على وجه الخصوص، فإن التناقضات التي جابهناها هنا لم تكن مألوفة حتى الآن في الفيزياء، مما أكد ضرورة المعرفة الجيدة لمجالات التجربة الأخرى، وأن تؤخذ في الاعتبار الظروف التي تمَّت فيها التجربة.

في تقديم بعض ذكرياتي عن الأيام الخوالي، كان في ذهني قبل كل شيء تأكيدٌ على كيفية التعاون الوثيق بين جيلٍ كاملٍ من الفيزيائيين في العديد من البلدان خطوة بخطوة في خلق النظام في مجالٍ جديدٍ واسعٍ من المعرفة. في هذه الفترة من تطور العلوم الفيزيائية، والتي كانت المشاركة فيها مغامرة رائعة، احتلَّ فيرنر هايزنبرج مكانة بارزة.

الفصل السابع

كيف أسهمت اجتماعات سولفاي
في تطوير ميكانيكا الكمِّ

1962

المقال السابع: كيف أسهمت اجتماعات سولفاي(25) في تطوير ميكانيكا الكمِّ:

مؤتمرات سولفاي (المعروفة أيضًا بمجالس سولفاي أو محاضرات سولفاي أو لجان سولفاي) هي مؤتمراتٌ علميَّة في (25) الفيزياء والكيمياء تُعقد منذ عام 1911. في أوائل القرن العشرين، كانت هذه المجالس تجمع بين أبرز العلماء في ذلك الوقت، الشيء الذي سمح بتقدُّمٍ مهمٍّ في ميكانيكا الكمِّ، ونُظِّمت هذه المؤتمرات تحت رعاية إرنست سولفاي، كيميائي وصناعي بلجيكي.

عُقدت سلسلة المؤتمرات قبل خمسين عامًا فقط بمبادرة بعيدة النظر من (إرنست سولفاي)، واستمرت تحت رعاية المعهد الدولي للفيزياء الذي أسَّسه. أُعتبِرت مناسبة فريدة لعلماء الفيزياء لمناقشة المشكلات الأساسية التي كانت في مركز الاهتمام خلال الفترات المختلفة، وبالتالي فقد حفَّزت في نواحٍ كثيرة التطورَ الحديثَ للعلوم الفيزيائية.

سيكون التسجيل الدقيق للتقارير والمناقشات اللاحقة في كل هذه الاجتماعات في المستقبل مصدرًا للمعلومات الأكثر قيمة لطلاب تاريخ العلوم الراغبين في تكوين انطباعٍ حول جدليات المشكلات الجديدة التي أثيرت في بداية هذا القرن (القرن العشرين). خلال هذه المناقشات حدث ما يمكن تسميته بالتوضيح التدريجي لهذه المشكلات من خلال الجهود المشتركة لجيلٍ كاملٍ من الفيزيائيين في العقود التالية ليس فقط لتحسين رؤيتنا نحو التكوين الذري للمادة، ولكن لخلق رؤية جديدة فيما يتعلق بفهم التجربة الفيزيائية.

كنتُ أحد أولئك الذين حضروا معظم الوقت عددًا من مؤتمرات سولفاي، وكنتُ ممن لديهم اتصالٌ شخصي بالعديد من المشاركين خلال هذه الاجتماعات، لقد رحَّبتُ بالدعوة في هذه المناسبة لأسترجع بعض ذكرياتي عن الدور الذي لعبته النقاشات في إيضاح المشاكل التي تواجهنا. عند اقترابي من هذه المهمة، سأسعى لتقديم هذه المناقشات على خلفية التطور متعدد الجوانب الذي شهدته الفيزياء الذرية في الخمسين عامًا الماضية.

I

يشير موضوع مؤتمر سولفاي الأول في عام 1911 الذي كان بعنوان (نظرية الإشعاع وكوانتا) إلى خلفية المناقشات في تلك الأيام. ربما كانت أهم التطورات في الفيزياء في القرن السابق هي تطوير نظرية ماكسويل الكهرومغناطيسية، التي قدَّمت تفسيرًا بعيدَ المدى للظواهر الإشعاعية، والتفسير الإحصائي للمبادئ الديناميكية الحرارية التي بلغت ذروتها في إدراك (بولتزمان) للعلاقة بين الإنتروبيا واحتمالات حالة نظام ميكانيكي معقد، ومع ذلك، فإنَّ حساب التوزيع الطيفي لإشعاع التجويف في التوازن الحراري مع الجدران المحيطة به يمثِّل صعوباتٍ غير متوقعة، خاصة من خلال تحليل (رايلي) المتقن.

وصلنا إلى نقطة تحوُّلٍ رئيسة في مسار التطور من خلال اكتشاف بلانك في السنة الأولى من القرن العشرين، للعمل الكمومي الكوني الذي يكشف عن سمة من سمات الكمال في العمليات الذرية ذات طابعٍ مختلفٍ تمامًا عن الأفكار الفيزيائية الكلاسيكية، ولعلَّها تتجاوز الفكرة القديمة القائلة بقابلية التجزيء المحدودة للمادة. على هذه الخلفية الجديدة، شدَّد أينشتاين مبكرًا على المفارقات الواضحة المتضمنة في أي محاولة لوصفٍ مفصَّلٍ للتفاعل بين الإشعاع والمادة، مما دعم أفكار بلانك التي قدمتها الدراسات الخاصة بالحرارة المحددة للمواد الصلبة في درجة حرارة منخفضة. وكذلك فيما يتعلق بمعالجته الأصلية للتأثير الكهروضوئي، قدَّم أيضًا فكرة الكمِّ الضوئي أو الفوتونات كحاملاتٍ للطاقة والقوى الدافعة في العمليات الإشعاعية الأولية.

لقد كان إدخال مفهوم الفوتون يعني إحياء المعضلة القديمة من أيام (نيوتن) و(هيجنز) للتكوين الجسيمي أو الموجي للضوء، الذي بدا أنَّه انحاز لصالح الأخير من خلال إنشاء النظرية الكهرومغناطيسية للإشعاع.

كان الموقف أكثر غرابة، لأنَّ تعريف الطاقة أو القوى الدافعة للفوتون، المعطى من خلال ناتج ثابت بلانك وتردد أو رقم موجة الإشعاع، يشير مباشرة إلى خصائص صورة الموجة، وهكذا واجهنا نوعًا جديدًا من العلاقة التي تخضع لمبدأ المكاملة بين تطبيقات المفاهيم الأساسية المختلفة للفيزياء الكلاسيكية، التي كانت دراستها طوال الوقت تضيق الخناق على الوصف الحتمي الواضح، وتدعونا شيئًا فشيئًا إلى حسابٍ إحصائي أساسي حتى في أبسط العمليات الذرية.

بدأت المناقشات في الاجتماع من خلال عرضٍ لامعٍ من قِبَل (لورنتز) للجدل القائم على الأفكار الكلاسيكية التي تؤدي إلى مبدأ التقسيم المتوازن للطاقة بين درجاتٍ مختلفة من الحرية لنظامٍ

فيزيائي، بما في ذلك حركة الجسيمات المادية المكونة له، وأيضًا الأوضاع العادية لاهتزاز المجال الكهرومغناطيسي المرتبط بالشحنة الكهربائية للجسيمات. هذه الحجة التي تتبع خطوط تحليل (رايلي) للتوازن الإشعاعي الحراري أدَّت إلى النتيجة المتناقضة المتمثِّلة في عدم وجود توازن في درجة الحرارة، حيث سيتمُّ نقل الطاقة الكاملة للنظام تدريجيًّا إلى اهتزازاتٍ كهرومغناطيسية ذات ترددات متزايدة باطرادٍ.

من الواضح أنَّ الطريقة الوحيدة للتوفيق بين نظرية الإشعاع ومبادئ الميكانيكا الإحصائية العادية كان اقتراح (جينز) بأنَّه في ظل الظروف التجريبية لا يمكن للباحث أن يحقِّق توازنًا حقيقيًّا، ولكن فقط في حالة شبه ثابتة، حيث يمكن ملاحظة هروبه في أثناء إنتاج الإشعاع عالي التردُّد، كان الشاهد على حدة الشعور بالصعوبات في نظرية الإشعاع هي رسالة من اللورد (رايلي)، قُرئت في المؤتمر وفيها حثَّ على أخذ اقتراح (جينز) في الاعتبار بعناية.

ومع ذلك، من خلال الفحص الدقيق، سرعان ما أصبح واضحًا أنَّ حجة جينز لا يمكن دعمُها، من نواحٍ عديدة، كانت التقارير والمناقشات في المؤتمر أكثر إبهارًا، وهكذا، بعد تقارير (واربورج) و(روبنز) للأدلة التجريبية التي تدعم قانون بلانك للإشعاع الحراري، قدَّم بلانك نفسُه عرضًا للحجج التي قادته إلى اكتشاف الفعل الكمومي، وفي تعليقه على صعوبات مواءمة هذه الميزة الجديدة مع إطار مفاهيم الفيزياء الكلاسيكية، شدَّد على أنَّ النقطة الأساسية لم تكن تقديم فرضية جديدة لأصغر وحدة ممكنة من الطاقة (الكوانتا)، بل إعادة صياغة مفهوم الفعل ذاته، وأعرب عن الاقتناع بأنَّ مبدأ الحد الأدنى للفعل -الذي تم تأكيده أيضًا في نظرية النسبية- سيثبت أنَّه دليلٌ على مزيدٍ من التطوير لنظرية الكمِّ.

في التقرير الأخير في المؤتمر، لخَّص أينشتاين العديدَ من تطبيقات مفهوم الكمِّ، وتناول بشكلٍ خاصٍّ الحججَ الأساسية المستخدَمة في شرحه لشذوذٍ معينٍ للحرارة عند درجات حرارة منخفضة. قُدِّمت مناقشات هذه الظواهر في الاجتماع من خلال تقرير (نيرنست) حول تطبيق نظرية الكمِّ على مشاكل مختلفة في الفيزياء والكيمياء، حيث نظر بشكلٍ خاصٍّ في خصائص المادة عند درجات حرارة منخفضة للغاية. من المهم أن نقرأ كيف قدَّم (نيرنست) في تقريره عن النظرية المعروفة التي تتعلَّق بالإنتروبيا عند الصفر المطلق، التي قدَّمت منذ عام 1906 تطبيقاتٍ مهمة، ظهرت الآن كحالة خاصة لقانون أكثر عمومية مشتقٍّ من نظرية الكوانتا (أصغر وحدة كمومية من الطاقة). لذا فإنَّ ظاهرة التوصيلية الفائقة لبعض المعادن في درجات الحرارة

المنخفضة للغاية والتي ذكرها (كامرلينج أونز) قدَّمت لغزًا كبيرًا عند اكتشافها، كان (نيرنست) هو الذي وجد تفسيرها أولًا بعد سنواتٍ عديدة.

ميزة جديدة تلقَّت التعليقات من عدة جوانب، وهي فكرة (نرنست) عن التدوير الكمومي لجزيئات الغاز التي تلقَّت هذا التأكيد الجميل من خلال قياسات البنية الدقيقة لخطوط امتصاص الأشعة تحت الحمراء. أُقترِح استخدام مماثل لنظرية الكمِّ في تقرير (لانجفين) عن نظريته الناجحة لتغير الخصائص المغناطيسية للمادة مع درجة الحرارة، حيث أشار بشكلٍ خاصٍّ إلى فكرة وحدة العزم المغناطيسي (مجنطون)، التي قدَّمها (فايس) لشرح العلاقات العددية الرائعة بين قوة العزم المغناطيسية الأولية للذرات المستنتجة من تحليل القياسات. لقد أوضح (لانجفين) أنه يمكن اشتقاق قيمة المغناطيس بأي معدلٍ تقريبًا على افتراض أن الإلكترونات في الذرات تدور بعزمٍ زاوٍ يتوافق مع كم بلانك.

وصف (سومرفيلد) المحاولات الحماسية والإرشادية الأخرى لاستكشاف السمات الكمومية في العديد من خصائص المادة، وبشكلٍ خاصٍّ إنتاج الأشعة السينية بواسطة الإلكترونات عالية السرعة، بالإضافة إلى المشكلات التي تتضمن تأيُّن الذرات في الظاهرة الكهروضوئية والتأثير الإلكتروني. في تعليقه على المشكلة الأخيرة، لفت (سومرفيلد) الانتباه إلى تشابُه بعض اعتباراته مع تلك التي كُشِفَ عنها في ورقة حديثة من قِبَل (هاس). (هاس) قام بمحاولة تطبيق الأفكار الكمومية على ارتباط الإلكترون في نموذجٍ ذريٍّ مثل ذلك الذي اقترحه (طومسون) باستخدام كرة مشحونة ذات مجالٍ موجبٍ ومنتظمٍ، فكانت النتيجة أن تحصل على ترددات دورانية لها نفس قيمة الترددات في المطياف البصري. من ناحيته أضاف (سومرفيلد) أنه عوضًا عن المحاولة -باستخدام هذه الاعتبارات- لاستنتاج ثابت بلانك، فإنه يفضل أن يأخذ وجود الفعل الكمومي كأساسٍ لأي نهجٍ لمسائل تكوين الذرات والجزيئات، على خلفية هذا الاتجاه الأخير في تطور النموذج الذري فإن هذا الكلام له بالفعل طابع النبوءة.

وقت الاجتماع لم يكن هناك وجودٌ لمسألة معالجة شاملة للمشاكل التي أثارها اكتشاف بلانك، فقط كان هناك فهمٌ عامٌّ لظهور آفاقٍ جديدة عظيمة للعلوم الفيزيائية. وعلى الرغم من المراجعة الجذرية لأساس التطبيق الواضح للمفاهيم الفيزيائية الأولية والذي كان مطلوبًا هنا، فقد كان تشجيعًا للجميع على أنَّ البناء قائمٌ على أرضٍ صلبة، حيث تجلَّت بشكلٍ لافتٍ للنظر الانتصارات الجديدة للكلاسيكية في نهج التعامُل مع خصائص الغازات المتخلخلة واستخدام التقلبات

الإحصائية لحساب الذرات، والأكثر ملاءمة، كانت التقارير التفصيلية عن هذه التطورات في سياق المؤتمر الذي قدَّمه كل من (مارتن كنودسن) و(جان بيرين).

لقد تحصَّلتُ على سردٍ حيٍّ للمناقشات في أول اجتماع لسولفاي من راذرفورد، عندما التقيتُه في مانشستر عام 1911، بعد وقتٍ قصيرٍ من عودته من بروكسل، رغم ذلك لم يخبرني راذرفورد في تلك المناسبة ما أدركته قبل بضعة أشهر فقط من خلال النظر في تقرير الاجتماع، أنَّه لم يذكر خلال المناقشات في المؤتمر أي حدثٍ جديدٍ من شأنه التأثير على التطور التالي بعمقٍ كبيرٍ، أي اكتشافه لنواة الذرة. في الواقع، من خلال استكمال الأدلة حول بنية الذرة بطريقة غير متوقعة، والتي يمكن تفسيرها بمفاهيم ميكانيكية بسيطة، وفي الوقت نفسه الكشف عن عدم ملاءمة مثل هذه المفاهيم لأي مشكلة تتعلَّق باستقرار الأنظمة الذرية، لا ينبغي التعرض لاكتشاف رذرفورد على أنه بمثابة إرشادات فقط، ولكنها ستمثِّل تحديًا في العديد من المراحل اللاحقة من تطور فيزياء الكمِّ.

II

بحلول وقت مؤتمر سولفاي التالي في عام 1913، الذي كان موضوعه هو بنية المادة، حُصِّلَت معلومات جديدة مهمة من خلال اكتشاف (لاو) في 1912 لحيود أشعة رونتجن في البلورات. لقد أزال الاكتشاف بالفعل كلَّ الشكوك حول ضرورة إسناد خصائص الموجة إلى هذا الإشعاع المخترق، حيث وضحتْ السمات الفيزيائية في تفاعله مع المادة، كما أكد (ويليام براج) بشكلٍ لافتٍ للنظر من خلال صور غرفة السحاب التي رسمها (ويلسون) التي تُظهر المسارات للإلكترونات عالية السرعة المحررة عن طريق امتصاص الإشعاع في الغازات. كما هو معروفٌ جيدًا، كان اكتشاف (لاو) هو الحافز المباشر للاستكشافات الرائعة للهياكل البلورية بواسطة (ويليام) و(لورنس براج)، اللذين كانا قادريْن على تحديدهما من خلال تحليل انعكاس الإشعاع أحادي اللون من التسلسلات المختلفة للتكوينات المستوية المتوازية للذرات في المشابك البلورية من ناحية الطول الموجي للإشعاع واستنتاج نوع تناظر الشبكة.

سبقت مناقشة هذه التطورات، التي شكَّلت الموضوع الرئيس للمؤتمر، في تقريرٍ من قِبَل (طومسون) عن طريقة نوعية لاستكشاف العديد من الخصائص العامة للمادة. من المفيد لفهم الموقف العام للفيزيائيين في ذلك الوقت أن تفرد الأساس لمثل هذا الاستكشاف الذي قدَّمه

اكتشاف رذرفورد للنواة الذرية لم يكن موضع تقديرٍ بشكلٍ عامٍ بعد. كانت الإشارة الوحيدة إلى هذا الاكتشاف من قبل رذرفورد نفسه، الذي أصرَّ في المناقشة التي أعقبت تقرير (طومسون) على وفرة ودقة الأدلة التجريبية التي يقوم عليها النموذج النووي للذرة.

قبل بضعة أشهرٍ من المؤتمر، نُشرت أول ورقة بحثية عن النظرية الكمومية للقوانين الأساسية للذرة، حيث اتخذت خطوات أولية لاستخدام نموذج رذرفورد الذري لشرح الخصائص المحددة للعناصر اعتمادًا على ارتباط الإلكترونات المحيطة بالنواة. كما هو موضحٌ سابقًا، قدَّم هذا السؤال صعوباتٍ لا يمكن التغلُّب عليها عند معالجتها من خلال الأفكار العادية للميكانيكا والديناميكا الكهربية، التي بموجبها لا يسمح أيُّ نظامٍ بشحن النقاط بتوازنٍ ساكنٍ ثابتٍ، وأي حركة للإلكترونات حول النواة ستؤدي إلى تبديد الطاقة من خلال الإشعاع الكهرومغناطيسي المصحوب بتقلُّصٍ سريعٍ لمدارات الإلكترون في نظامٍ محايدٍ أصغر بكثيرٍ من حجم الذرات المشتقة من التجربة الفيزيائية والكيميائية العامة. لذلك اقترح هذا الموقف أن تعتمد معالجة مشكلات الاستقرار بشكلٍ مباشرٍ على الطابع الفردي للعمليات الذرية التي أظهرها اكتشاف الفعل الكمومي.

قُدِّمت نقطة البداية من خلال التنظيمات التجريبية التي أظهرها المطياف البصري للعناصر، التي أدركها (ريدبيرج) للمرة الأولى، يمكن التعبير عنها من خلال «مبدأ الدمج»، الذي وفقًا لتكرار أي خط طيفي تم تمثيله بدقة متناهية مثل الفرق بين عضوين من مجموعة من المصطلحات المميزة للعنصر. بالاعتماد مباشرة على معالجة أينشتاين للأثر الضوئي، كان من الممكن في الواقع تفسير قانون الدمج كدليلٍ على العمليات الأولية التي نقلت فيها الذرة تحت انبعاث أو امتصاص إشعاع أحادي اللون من واحدة إلى أخرى مما يُسمَّى بالحالات الثابتة من الذرة. هذا الرأي، الذي سمح لمنتج ثابت بلانك وأي من المصطلحات الطيفية بالتعرُّف على طاقة الربط للإلكترونات في الحالة الثابتة المقابلة، قدَّم أيضًا شرحًا بسيطًا للعلاقة المتقلبة على ما يبدو بين خطوط الانبعاث والامتصاص في التسلسل الطيفي، نظرًا لأننا في الحالة الأولى نواجه انتقالاتٍ من حالة مثارة للذرة إلى حالة ما من الطاقة المنخفضة، بينما في الحالة الأخيرة علينا عمومًا أن نتعامل مع عملية الانتقال من الحالة المستقرة ذات الطاقة الأقل إلى الحالة المُثارة.

قُدِّمَ هذا التصور مؤقتًا لمثل هذه الحالات من نظام الإلكترون كحركاتٍ كوكبية تخضع لقوانين كبلر، فقد وجد أنَّه من الممكن استنتاج ثابت (ريدبيرج) من خلال مقارنة مناسبة مع تعبير بلانك

الأصلي لحالات الطاقة لهزاز توافقي. ظهرت العلاقة الحميمة مع نموذج رذرفورد الذري، ليس أقلُّها في العلاقة البسيطة بين طيف ذرة الهيدروجين وطيف أيون الهيليوم، حيث تكون علاقة بأنظمة تتكوَّن من إلكترون مرتبط بنواة ذات امتداد دقيق، ويحمل واحدًا واثنين من الشحنات الكهربائية الأولية، على التوالي. في هذا الصدد، من المهم أن نتذكر أنه في وقت المؤتمر نفسه، كان (موسلي) يدرس الأطيافَ عالية التردُّد للعناصر بطريقة (لاو-براج)، واكتشف بالفعل القوانين البسيطة بشكلٍ ملحوظٍ التي لم تسمح فقط بتحديد الهوية من الشحنة النووية لأي عنصرٍ، ولكن كان علينا حتى إعطاء أول مؤشرٍ مباشرٍ لهيكل غلاف التكوين الإلكتروني في الذرة المسؤول عن الاستمرارية غير المألوفة المعروضة في جدول مندلييف الشهير.

III

تأثَّر التعاون العلمي الدولي بسبب الحرب العالمية الأولى، لم تُستأنف اجتماعات سولفاي حتى ربيع عام 1921. افتتح (لورنتز) المؤتمر، الذي حمل عنوان «الإلكترونات والأنوية»، بمسحٍ واضحٍ لمبادئ نظرية الإلكترون الكلاسيكية، التي قدَّمت على وجه الخصوص شرحًا للسمات الأساسية لتأثير (زيمان)، التي أشارت مباشرة إلى حركات الإلكترون في الذرة مثل أصل الأطياف.

بصفته المتحدث التالي، قدَّم رذرفورد وصفًا مفصَّلًا للظواهر العديدة التي تلقَّت في الوقت نفسه مثل هذا التفسير المقنع من خلال نموذجه الذري. بصرف النظر عن الفهم الفوري للسمات الأساسية للتحولات الإشعاعية ووجود النظائر التي قدمها نموذجُه، فإنَّ تطبيق نظرية الكمِّ على ارتباط الإلكترون في الذرة قد أحرز تقدُّمًا كبيرًا. أدَّى التصنيف الأكثر اكتمالًا للحالات الكمومية الثابتة من خلال استخدام تكاملات الفعل الثابت -على يد سومرفيلد ومدرسته- إلى شرح العديد من التفاصيل في بنية الأطياف، وخاصة تأثير (ستارك)، الذي أدى اكتشافُه إلى استبعاد إمكانية تتبُّع ظهور خطوط الأطياف إلى الاهتزازات التوافقية للإلكترونات في الذرة.

في السنوات التالية، كان من الممكن بالفعل -من خلال الدراسة المستمرة للأطياف البصرية عالية التردد من قِبَل (سيجبان) و(كاتالان) وآخرين- الوصول إلى صورة مفصَّلة لهيكل غلاف توزيع الإلكترون في الحالة المستقرة للذرة، والتي عكست بوضوحٍ السماتَ الدورية لجدول مندلييف. تضمَّنت هذه التطورات توضيحًا لعدة نقاطٍ مهمة، مثل مبدأ (باولي) للاستبعاد المتبادل

للحالات الكمية المكافئة، واكتشاف اللف المغزلي للإلكترون الذي يتضمَّن خروجًا عن التناظر المركزي في حالات ارتباط الإلكترون الضروري لحساب تأثير (زيمان) الشاذ على أسس نموذج رذرفورد الذري.

في حين أنَّ مثل هذه التطورات في المفاهيم النظرية لم تأتِ بعد، فقد قُدِّمت تقاريرٌ في المؤتمر عن التقدُّم التجريبي الأخير فيما يتعلَّق بالسمات المميزة للتفاعل بين الإشعاع والمادة. وهكذا، ناقش (موريس دي برولي) بعضَ التأثيرات الأكثر إثارة للاهتمام التي واجهته في تجاربه مع الأشعة السينية، التي كشفت بشكلٍ خاصٍّ عن علاقة بين عمليات الامتصاص والانبعاث التي تذكر بتلك التي تظهرها الأطياف في المنطقة البصرية.

علاوة على ذلك، أبلغ (ميليكان) عن استمرار تحقيقاته المنهجية حول التأثير الكهروضوئي، الذي أدَّى إلى هذا التحسُّن في دقة التحديد التجريبي لثابت بلانك. كانت هناك مساهمة ذات أهمية أساسية لتأسيس نظرية الكمِّ خلال الحرب قدَّمها أينشتاين، الذي أظهر كيف يمكن ببساطة اشتقاق صيغة بلانك للإشعاع من خلال الافتراضات نفسها التي أثبتت أنَّها مثمرة في تفسير الانتظام الطيفي، ووجد مثل هذا الدعم المذهل في التحقيقات الشهيرة التي أجراها (فرانك) و(هيرتز) حول إثارة الذرات بقصفٍ إلكتروني. لقد كانت صياغة أينشتاين البارعة لقوانين الاحتمالات العامة لحدوث التحولات الإشعاعية التلقائية بين الحالات الثابتة وكذلك التحولات التي يسببها الإشعاع، وليس أقلها تحليله للحفاظ على الطاقة والقوى الدافعة في عمليات الانبعاث والامتصاص، كانت لإثبات أساسي للتطورات المستقبلية.

في وقت المؤتمر، أُحرِز تقدُّم أوَّلي من خلال استخدام الحجج العامة لضمان التمسك بمبادئ الديناميكا الحرارية والنهج المقارب لوصف النظريات الفيزيائية الكلاسيكية في الحد حيث يكون الإجراء المتضمن كبيرًا بما يكفي للسماح بإهمال الكم الفردي. في المقام الأول، قدَّم (إهرنفست) مبدأ الثبات الساكن للحالة الثابتة. عبَّر عن المطلب الأخير من خلال صياغة ما يُسمَّى بمبدأ المطابقة، الذي قدم منذ البداية إرشاداتٍ للاستكشاف النوعي للعديد من الظواهر الذرية المختلفة، والهدف من هذا المطلب هو السماح بظهور حسابٍ إحصائيٍّ للعمليات الكمية الفردية كتعميمٍ عقلاني للوصف الحتمي للفيزياء الكلاسيكية.

في هذه المناسبة، دُعيتُ لتقديم مسحٍ عامٍّ لهذه التطورات الأخيرة في نظرية الكم، ولكن نظرًا لأن المرض منعني من المشاركة في المؤتمر، فقد تولَّى (إهرنفست) التكرُّم بمهمة تقديم بحثي،

.الذي أضاف إليه شرحًا واضحًا جدًّا، ملخصًا النقاط الأساسية في حجة المطابقة

تميَّز موقف (إهرنفست) بالإدراك الحاد لأوجه القصور والحماس الدافئ لأي تقدُّمٍ متواضع، وهو ما يعكس عرضه بأمانة حالة تدفُّق أفكارنا في ذلك الوقت، فضلًا عن الشعور بتوقُّع الاقتراب من التقدُّم الحاسم.

IV

دارت المناقشات في مؤتمر سولفاي التالي في 1924 حول مشكلة التوصيل المعدني. قدَّم (لورنتز) مسحًا للإجراءات التي يمكن من خلالها معالجة هذه المشكلة وفقًا لمبادئ الفيزياء الكلاسيكية، الذي تتبَّع في سلسلة من الأوراق البحثية الشهيرة عواقبَ الافتراض بأن الإلكترونات في المعادن تتصرف مثل غازٍ يتبع سرعة ماكسويل في قانون التوزيع. على الرغم من النجاح الأوَّلي لمثل هذه الاعتبارات، إلا أنَّ شكوكًا جدية حول مدى كفاية الافتراضات الأساسية قد نشأت تدريجيًّا. تم التأكيد على هذه الصعوبات بشكلٍ أكبر خلال المناقشات في المؤتمر، حيث قُدِّمت تقاريرٌ عن التقدُّم التجريبي من قِبَل خبراء مثل (بريدجمان) و(كامرلينج أونز) و(روزينهاين) و(هال)، كما عُلِّق على الجوانب النظرية للوضع بشكلٍ خاصٍّ من قبل (ريتشاردسون)، حيث طبقت مبدئيًّا نظرية الكمِّ على الخطوط المستخدمة في المسائل الذرية.

ومع ذلك، في وقت المؤتمر، أصبح من الواضح أكثر فأكثر أنَّه حتى هذا الاستخدام المحدود للصور الميكانيكية التي أُبقي عليها حتى الآن في نهج المطابقة لا يمكن دعمه عند التعامل مع مشاكل أكثر تعقيدًا. إذا نظرنا إلى الوراء في تلك الأيام، فمن المثير للاهتمام بالفعل أن نتذكر أنه قد تقدَّم المشروع بشكلٍ مختلفٍ، الذي ينبغي أن يكون ذا أهمية كبيرة للتطور اللاحق. وهكذا، اكتشف (آرثر كومبتون) في عام 1923 التغيير في تواتر الأشعة السينية عن طريق التشتت من الإلكترونات الحرة، وشدَّد هو و(ديباي) على الدعم الذي قدَّمه هذا الاكتشاف لمفهوم أينشتاين للفوتون، على الرغم من الصعوبات المتزايدة في تصوير العلاقة المتبادلة بين عمليات امتصاص وانبعاث الفوتونات بواسطة الإلكترون بالطريقة البسيطة المستخدمة في تفسير الأطياف الذرية.

خلال عامٍ ظهرت مثل هذه المشكلات في ضوءٍ جديدٍ من خلال مقارنة (لويس دي بروي) ذات الصلة بحركة الجسيمات وانتشار الموجات، والتي سرعان ما وجدت تأكيدًا مذهلًا في التجارب التي أجراها (دافيسون) و(جيرمر) و(جورج طومسون) حول حيود الإلكترونات في بلوراتٍ. لا

أحتاج في هذا المكان أن أذكر بالتفصيل كيف أنَّ فكرة (دي برولي) الأصلية من خلال (شرودنجر) يجب أن تثبت أنها أساسية لإنشاء معادلة موجية عامة، التي من خلال التطبيق الجديد للطرق المتطورة للغاية للفيزياء الرياضية كان من المفترض أن توفر القوة أداة لتوضيح المشاكل الذرية المتنوعة.

كما يعلم الجميع، بدأت مقاربة أخرى للمشكلة الأساسية لفيزياء الكمِّ في عام 1924 من قِبَل (كرامر)، الذي نجح قبل شهرٍ من المؤتمر في تطوير نظرية عامة لتشتُّت الإشعاع بواسطة الأنظمة الذرية. كان علاج التشتُّت منذ البداية جزءًا أساسيًّا من النهج الكلاسيكي لمشاكل الإشعاع، ومن المثير للاهتمام أن نتذكر أنَّ (لورنتز) نفسه دعا مِرارًا وتكرارًا إلى الانتباه إلى عدم وجود مثل هذا التوجيه في نظرية الكمِّ. وبالاعتماد على حجج المطابقة، أظهر (كرامر) كيف يمكن ربط تأثير التشتت ارتباطًا مباشرًا بالقوانين التي صاغها أينشتاين لاحتمالات العمليات الإشعاعية الفردية التلقائية والمستحثة.

في نظرية التشتُّت التي طورها (كرامر) و(هايزنبرج) لتشمل التأثيرات الجديدة الناشئة عن اضطراب حالات الأنظمة الذرية التي تنتجها المجالات الكهرومغناطيسية، كان يجب على (هايزنبرج) أن يجد نقطة انطلاق لتطوير شكليات ميكانيكا الكمِّ، حيث حُذفت كلُّ الإشارات إلى الصور الكلاسيكية بخلاف المطابقات المقاربة تمامًا. ومن خلال عمل (بورن) و(هايزنبرج) و(جوردان) وكذلك (ديراك)، سرعان ما تم إعطاء هذا المفهوم الجريء والذكي صياغة عامة يتم فيها استبدال المتغيرات الحركية والديناميكية الكلاسيكية بمشغلين رمزيين يطيعان الجبر غير التبادلي الذي يتضمن ثابت بلانك.

العلاقة بين مقاربات (هيزنبرج) و(شرودنجر) لمشاكل نظرية الكمِّ والنطاق الكامل لتفسير الشكليات تم توضيحها بعد فترة وجيزة من شرحها بشكلٍ تعليمي من قِبَل (ديراك) و(جوردان) بمساعدة التحويلات الرئيسة للمتغيرات على غرار معالجة هاملتون الأصلية الكلاسيكية للمشاكل الميكانيكية. على وجه الخصوص، عملت هذه الاعتبارات على إظهار التناقض الواضح بين مبدأ التراكب في ميكانيكا الموجة وافتراض فردية تفاعلات الكمِّ الأولية. نجح ديراك في تطبيق مثل هذه الاعتبارات على مشاكل المجالات الكهرومغناطيسية باستخدام ترافق المتغيرات لكلٍّ من سعة الموجة ومراحل مكوناتها التوافقية، مما طوَّر من النظرية الكمومية للإشعاع، حيث دمج بشكلٍ

متصلٍ مفهومَ الفوتون الأصلي لأينشتاين. كان هذا التطور الثوري برمته يشكل خلفية المؤتمر التالي، الذي كان أول اجتماعات سولفاي التي تمكَّنتُ من حضورها.

V

افتتح مؤتمر عام 1927، الذي كان موضوعه الإلكترونات والفوتونات، من خلال تقارير (لورنس براج) و(آرثر كومبتون) حول الدليل التجريبي الجديد الغني بشأن تشتُّت الإشعاع عالي التردُّد بواسطة الإلكترونات التي تظهر سماتٍ مختلفة على نطاقٍ واسعٍ عندما تكون مرتبطة بقوة في الهياكل البلورية من المواد الثقيلة، وعندما تكون خالية عمليًّا من ذرات الغازات الخفيفة. أعقب هذه التقارير معظم الشروحات المفيدة من قِبَل (لويس دي برولي) و(بورن) و(هايزنبرج)، وكذلك من قِبَل (شرودينجر)، حول التطورات العظيمة فيما يتعلَّق بالصياغة المتسقة لنظرية الكمِّ، التي أشرتُ إليها بالفعل.

كان الموضوع الرئيس للمناقشة هو التخلي عن الوصف الحتمي التصويري المتضمن في الأساليب الجديدة. كانت ثمة مسألة معينة: إلى أي مدى أشارت ميكانيكا الموجة إلى احتمالات انحرافٍ أقل جذرية عن الوصف المادي العادي مما كان متصورًا حتى الآن في جميع المحاولات لحل المفارقات التي أدَّى إليها اكتشاف الفعل الكمومي منذ البداية؟ ومع ذلك فإن الطابع الإحصائي الأساسي لتفسير التجربة الفيزيائية بواسطة الصور الموجية لم يكن واضحًا فقط من معالجة (بورن) الناجحة لمشكلات الاصطدام، ولكن ربما ظهر الطابع الرمزي للمفهوم بأكمله بشكلٍ لافتٍ للنظر في ضرورة استبدال تنسيق الفراغ ثلاثي الأبعاد العادي عن طريق تمثيل حالة نظام يحتوي على عدة جسيماتٍ كدالة موجية في مساحة تكوين مع العديد من الإحداثيات مثل العدد الإجمالي لدرجات حرية النظام.

في سياق المناقشات، تأكدت النقطة الأخيرة بشكلٍ خاصٍّ فيما يتعلق بالتقدُّم الكبير الذي أُحرز بالفعل والخاص بمعالجة الأنظمة التي تشتمل على جسيماتٍ من نفس الكتلة والشحنة واللف المغزلي، مما يكشف في حالة هذه الجسيمات «المتطابقة» عن وجود القيود الفردية المتضمنة في المفاهيم الفيزيائية الكلاسيكية.

بالفعل احتوت مؤشرات مثل هذه الميزات الجديدة فيما يتعلق بالإلكترونات في صياغة (باولي) لمبدأ الاستبعاد، وفيما يتعلق بمفهوم الجسيمات للإشعاع الكمومي، كان (بوز) في مرحلة مبكرة

تسمى الانتباه إلى إمكانية بسيطة لاشتقاق شكل بلانك لإشعاع درجة الحرارة من خلال تطبيق إحصائيات تتضمن خروجًا عن الطريقة التي اتبعها (بولتزمان) في حساب نظامٍ متعددِ الجسيمات، والذي أثبت أنه مناسبٌ جدًّا للعديد من تطبيقات الميكانيكا الإحصائية الكلاسيكية.

بالفعل في 1926، قُدِّمت مساهمة حاسمة في معالجة الذرات بأكثر من إلكترون واحدٍ من خلال تفسير (هايزنبرج) للازدواجية الغريبة في طيف الهيليوم، التي ظلَّت على مدار سنواتٍ عديدة واحدة من العقبات الرئيسة لنظرية الكمِّ فيما يخصُّ المبادئ الرئيسة للذرة. من خلال استكشاف خصائص التناظر لوظيفة الموجة في مساحة التكوين، والاعتبارات التي أخذها (ديراك) بشكلٍ مستقلٍّ ثم اتبعها (فيرمي)، لقد نجح هايزنبرج في إظهار أنَّ الحالات الثابتة لذرة الهيليوم تنقسم إلى فئتين، تقابل مجموعتين غير متحدتين من المصطلحات الطيفية، ويمثِّلها دوال الموجة المكانية المتناظرة وغير المتكافئة المرتبطة بالدوران الإلكترون المعاكس والمتوازي، على التوالي.

لا أحتاج إلى تذكُّر كيف أدَّى هذا الإنجاز الرائع إلى ما يشبه كرة الثلج لمزيدٍ من التقدُّم، وكيف أنَّه في غضون عامٍ واحدٍ، أعطت المعالجة المتشابهة لـ(ريتلر) و(لندن) للقوانين الأساسية للإلكترون لجزيء الهيدروجين أولَ دليلٍ لفهم الروابط الكيميائية غير القطبية. علاوة على ذلك، أدَّت الاعتبارات المماثلة لوظيفة الموجة البروتونية لجزيء الهيدروجين الدوار إلى تخصيص دوران للبروتون، وبالتالي إلى فهم الفصل بين حالات أورثو وبارا في نمط الاستبدال في الحلقات العطرية، وكما أوضح (دينيسون) قدمت تفسيرًا لشذوذٍ غامضٍ حتى الآن في الحرارة النوعية لغاز الهيدروجين عند درجة حرارة منخفضة.

بلغ هذا التطور الكامل ذروته في الاعتراف بوجود عائلتين من الجسيمات، يشار إليهما الآن باسم الفرميونات والبوزونات، وبالتالي، فإن أي حالة لنظامٍ يتكوَّن من جسيماتٍ ذات لف مغزلي مثل الإلكترونات أو البروتونات يجب تمثيلُها بواسطة دالة موجية غير متماثلة، بمعنى أنها تغيِّر علامتها عندما تكون إحداثيات الجسيمين من نفس النوع متبادل. على العكس من ذلك، فإن الوظائف الموجية المتماثلة فقط هي التي تؤخذ في الاعتبار بالنسبة للفوتونات، والتي وفقًا لنظرية (ديراك) للإشعاع، يجب أن توصف بأنها اللف المغزلي 1، وبالنسبة للكيانات مثل الجسيمات ألفا من دون لف مغزلي.

سرعان ما وضح هذا الموقف بشكلٍ جميلٍ من خلال شرح (موت) للانحرافات الملحوظة من صيغة تشتت رذرفورد الشهيرة في حالة الاصطدام بين جسيماتٍ متطابقة، مثل جزيئات ألفا ونواة الهيليوم، أو البروتونات ونواة الهيدروجين. مع مثل هذه التطبيقات للشكلية، فإننا في الواقع لا نواجه فقط عدم كفاية الصور المدارية، ولكن حتى مع التخلي عن التمييز بين الجسيمات المعنية. كلما أمكن دعم الأفكار التقليدية لفردية الجسيمات من خلال التحقُّق من موقعها في مجالاتٍ مكانية منفصلة، فإنَّ جميعَ تطبيقات إحصائيات (فيرمي-ديراك) و(بوز-أينشتاين) غير ذات صلة بمعنى أنها تؤدي إلى التعبير نفسه لكثافة الاحتمال للجسيمات.

قبل بضعة أشهرٍ فقط من المؤتمر، قدَّم (هايزنبرج) مساهمة كبيرة في توضيح المحتوى المادي لميكانيكا الكمِّ من خلال صياغة ما يُسمَّى مبدأ عدم التأكُّد، معبرًا عن التقييد المتبادل لتثبيت المتغيرات المتعارضة الأساسية. لا يظهر هذا القيد كنتيجة مباشرة لعلاقات التبديل بين هذه المتغيرات فحسب، بل يعكس أيضًا بشكلٍ مباشرٍ التفاعلَ بين النظام تحت الملاحظة وأدوات القياس، يتضمن الاعتراف الكامل بالنقطة الحاسمة الأخيرة مسألة نطاق التطبيق الواضح للمفاهيم الفيزياء الكلاسيكية في حساب الظواهر الذرية.

لتقديم المناقشة حول هذه النقاط، طُلب مني في المؤتمر تقديم تقريرٍ عن المشكلات المعرفية التي تواجهنا في فيزياء الكمِّ، واغتنمتُ الفرصة للدخول في مسألة المصطلحات المناسبة، والتأكيد على وجهة نظر مبدأ المكاملة. كانت الحجة الرئيسة هي أنَّ الاتصال الواضح للأدلة المادية يتطلَّب أن يُعبَّر عن الترتيب التجريبي وكذلك تسجيل الملاحظات بلغة مشتركة، تنقَّح بشكلٍ مناسبٍ بواسطة مفردات الفيزياء الكلاسيكية. في جميع التجارب الفعلية، يلبى هذا الطلب باستخدام أدوات قياسٍ مثل الأغشية والعدسات ولوحات التصوير الفوتوغرافي الكبيرة والثقيلة لدرجة أنه على الرغم من الدور الحاسم للعمل الكمومي لاستقرار وخصائص هذه الأجسام يمكن أن نتجاهل جميع التأثيرات الكمومية في حساب تموضعهم وحركتهم.

بينما في نطاق الفيزياء الكلاسيكية نتعامل مع المثالية، التي بموجبها يمكن تقسيم جميع الظواهر بشكلٍ تعسفي، والتفاعل بين أدوات القياس والجسيم تحت الملاحظة يكون مُهمَلًا، أو يعوض بأي معدلٍ، لقد تأكدنا من أنَّ هذا التفاعل في فيزياء الكمِّ جزءٌ لا يتجزَّأ من الظاهرة، التي لا يمكن إعطاء حسابٍ منفصلٍ لها إذا كانت الأدوات تخدم غرض تحديد الظروف التي نحصل على الملاحظات بموجبها. في هذا الصدد، يجب أيضًا أن نتذكر أنَّ تسجيل الملاحظات يعتمد في

النهاية على إنتاج علاماتٍ دائمة على أدوات القياس، مثل البقعة الناتجة على لوحة فوتوغرافية عن طريق تأثير الفوتون أو الإلكترون. إنَّ مثل هذا التسجيل يتضمن عملياتٍ فيزيائية وكيميائية لا رجعة فيها بشكلٍ أساسي، ولا يقدِّم أيَّ تعقيدٍ خاصٍّ، ولكنَّه يؤكِّد عنصرَ (غير قابلٍ للانعكاس) المتضمن في مفهوم الملاحظة ذاته. الميزة الجديدة المميزة في فيزياء الكمِّ هي مجرد التقسيم المحدود للظواهر، التي تتطلَّب وصفًا لا لبسَ فيه تحديدًا لجميع الأجزاء المهمة من الترتيب التجريبي.

نظرًا لأنَّه في الترتيب نفسه سيتم ملاحظة العديد من التأثيرات الفردية المختلفة بشكلٍ عامٍّ، فإنَّ اللجوءَ إلى الإحصاء في فيزياء الكمِّ أمرٌ لا مفرَّ منه من حيث المبدأ. علاوة على ذلك، يجب اعتبار الأدلة التي نتحصَّل عليها في ظلِّ ظروفٍ مختلفة ورفض الفهم في صورة واحدة، على الرغم من أي تباينٍ واضحٍ، يخضع لمبدأ المكاملة، بمعنى أنها تستنفد معًا جميعَ المعلومات المحددة جيدًا حول الجسيم الذري. من وجهة النظر هذه، فإنَّ الغرض الكامل من شكليات نظرية الكمِّ هو اشتقاق توقعات للملاحظات التي حصلنا عليها في ظل ظروفٍ تجريبية معينة. في هذا الصدد، تؤكِّد أنَّ القضاء على جميع التناقضات يضمن من خلال الاتساق الرياضي للشكليات، والطابع الشامل للوصف ضمن نطاقه الذي يتضح من قدرته على التكيُّف مع أي ترتيبٍ تجريبي يمكن تخيله.

في المناقشات النشطة للغاية حول مثل هذه النقاط، التي تمكَّن (لورنتز) من خلال انفتاحه الذهني وموقفه المتوازن من التصرف في اتجاهاتٍ مثمرة، شكَّل غموض المصطلحات صعوباتٍ كبيرة للاتفاق فيما يتعلَّق بالمشكلات المعرفية. عُبِّر عن هذا الموقف بروح الدعابة من قبل (إهرنفست)، الذي كتب على السبورة جملة من الكتاب المقدس تصف ارتباك اللغات الذي أزعج بناء برج بابل.

استمر تبادُل الآراء الذي بدأ في الجلسات بشغفٍ داخل مجموعاتٍ أصغر خلال الأمسيات، وكانت فرصة إجراء محادثاتٍ أطول مع أينشتاين و(إهرنفست) أمرٌ مرحبٌ به للغاية. أعرب أينشتاين بشكلٍ خاصٍّ عن التردُّد في التخلي عن الوصف الحتمي من حيث المبدأ، الذي تحدَّنا بالحجج التي تشير إلى إمكانية أخذ التفاعل بين الأجسام الذرية وأدوات القياس في الاعتبار بشكلٍ أكثر وضوحًا. على الرغم من أن إجاباتنا بشأن عدم جدوى هذا الاحتمال لم تقنع (أينشتاين)، الذي عاد إلى المشاكل في المؤتمر التالي، كانت المناقشات مصدرَ إلهامٍ إضافي

لاستكشاف الموقف فيما يتعلَّق بالتحليل والتوليف في فيزياء الكمِّ ومثيلاتها في مجالاتٍ أخرى من المعرفة الإنسانية، حيث تعني المصطلحات العرفية الانتباه إلى الظروف التي يتم فيها اكتساب الخبرة.

VI

في اجتماع عام 1930، ترأَّس (لانجفين) المؤتمر للمرة الأولى بعد وفاة (لورنتز)، وتحدَّث عن الخسارة التي تكبَّدها معهد سولفاي من خلال وفاة (إرنست سولفاي)، الذي بمبادرته وكرمه أنشأ المعهد. كما تحدَّث الرئيس عن الطريقة الفريدة التي تولَّى بها (لورنتز) قيادة جميع اجتماعات سولفاي السابقة والحيوية التي واصل بها أبحاثه العلمية الرائعة حتى أيامه الأخيرة. كان موضوع الاجتماع هو الخصائص المغناطيسية للمادة، بناءً على فَهْم (لانجفين) نفسه قدَّم مثل هذه المساهمات المهمة، والمعرفة التجريبية التي عززت كثيرًا في تلك السنوات، لا سيما من خلال دراسات (فايس) ومدرسته.

أُفتتح المؤتمر بتقريرٍ من قِبَل (سومرفيلد) حول المغناطيسية والتحليل الطيفي، حيث ناقش بشكلٍ خاصٍّ معرفة العزم الزاوي والعزم المغناطيسي، التي أُشتقَّت من دراسات تكوين الإلكترون بالذرات، مما أدى إلى شرح الجدول الدوري. فيما يتعلق بالنقطة المثيرة للاهتمام المتمثلة في التباين الغريب للعزم المغناطيسي داخل عائلة العناصر الأرضية النادرة، أبلغ (فان فليك) عن أحدث النتائج وتفسيرها النظري. وقدَّم (فيرمي) أيضًا تقريرًا عن العزم المغناطيسي للنواة الذرية، حيث أشار (باولي) لأول مرة إلى العثور على أصل ما يُسمَّى بالبنية فائقة الدقة للخطوط الطيفية.

قُدِّم المسح العام للأدلة التجريبية المتزايدة بسرعة حول الخصائص المغناطيسية للمادة في تقارير من قِبَل (كابريرا) و(فايس)، اللذين ناقشا معادلة حالة المواد المغناطيسية، التي تضم التغييرات المفاجئة في خصائص هذه المواد عند درجات حرارة محددة مثل نقطة كوري. على الرغم من المحاولات السابقة لربط هذه التأثيرات، لا سيما من خلال إدخال (فايس) لمجالٍ مغناطيسي داخلي مرتبط بالحالة المغناطيسية الحديدية، عثر مؤخرًا على دليلٍ لفهم الظواهر من خلال مقارنة (هايزنبرج) الأصلية لمحاذاة الإلكترون يدور في المواد المغناطيسية الحديدية مع

الإحصائيات الكمية التي تحكم خصائص التناظر للوظائف الموجية المسؤولة عن الروابط الكيميائية في نظرية (ريتلر) في لندن للتشكيل الجزيئي.

في المؤتمر، قُدِّم عرضٌ شاملٌ للمعالجة النظرية للظواهر المغناطيسية في تقريرٍ صادر عن (باولي)، مع الوضوح المميز والتأكيد على الأساسيات، ناقش أيضًا المشكلات التي أثارتها نظرية ديراك الكميَّة البارعة للإلكترون، التي استبدلت فيها معادلة الموجة النسبية التي اقترحها (كلاين) و(جوردون) بمجموعة من المعادلات من الدرجة الأولى التي تسمح بالتكامل المتناغم للعزم المغناطيسي واللف المغزلي للإلكترون. كانت النقطة الخاصة التي نوقشت في هذا الصدد هي مسألة إلى أي مدى يمكن للمرء أن ينظر إلى مثل هذه الكميات على أنها قابلة للقياس بنفس معنى كتلة الإلكترون والشحنة التي يعتمد تعريفها على تحليل الظواهر التي يمكن تفسيرها بالكامل بالمصطلحات الكلاسيكية، أي استخدام متسق لمفهوم اللف المغزلي، تمامًا مثل استخدام الفعل الكمومي نفسه يشير إلى الظواهر التي تقاوم مثل هذا التحليل، وعلى وجه الخصوص مفهوم اللف المغزلي هو تجريدٌ يسمح بصياغة عامة للحفاظ على القوى الدافعة الزاوية، ويؤكد هذا الموقف استحالة قياس العزم المغناطيسي للإلكترون الحر، كما نوقشت بالتفصيل في تقرير (باولي).

بدت واضحة الآفاق التي فتحها التطوير الأخير للتقنية التجريبية لمزيدٍ من الدراسات للظواهر المغناطيسية في الاجتماع الذي أبلغ عنه بواسطة (كوتون) و(كابتزا)، في حين أنه من خلال الإنشاءات الجريئة لـ(كابيتزا)، أصبح من الممكن إنتاج مجالات مغناطيسية ذات قوة غير مسبوقة ضمن امتداداتٍ مكانية محدودة وفترات زمنية، سمح التصميم المبتكر من قبل (كوتون) للمغناطيس الدائم الضخم بالحصول على مجالاتٍ ثابتة وامتدادٍ أكبر مما هو متاح حتى الآن. في تكملة لتقرير (كوتون)، لفتت مدام (كوري) الانتباه بشكلٍ خاصٍّ إلى استخدام مثل هذه المغناطيسات في تحقيقات العمليات الإشعاعية، التي يجب أن تعطي نتائجَ جديدة مهمة خاصة من خلال عمل (روزنبلوم) فيما يتعلق بالبنية الدقيقة لأطياف أشعة ألفا.

بينما كان الموضوع الرئيس للاجتماع هو ظاهرة المغناطيسية، من المثير للاهتمام أن نتذكر أنه في ذلك الوقت أُحرِز تقدُّم كبيرٌ أيضًا في معالجة الجوانب الأخرى لخصائص المادة. وهكذا، تغلبنا في هذه الأثناء على العديد من الصعوبات التي تعيق فهم التوصيل الكهربائي في المعادن، التي ظهرت بشدة في المناقشات في مؤتمر عام 1924. في عام 1928، حصل (سومرفيلد)

بالفعل، من خلال استبدال توزيع سرعة (ماكسويل) للإلكترونات بتوزيع (فيرمي) على أكثر النتائج الواعدة في توضيح هذه المشكلة. كما هو معروف، نجح (بلوخ) على هذا الأساس من خلال الاستخدام المناسب لميكانيكا الموجات في تطوير نظرية مفصلة للتوصيل المعدني تشرح العديدَ من الميزات، خاصة فيما يتعلَّق بالاعتماد على درجة الحرارة للظواهر. ومع ذلك، فشلت النظرية في تفسير الموصلية الفائقة، التي لم يُعثَر على دليلٍ لفهمها إلا في السنوات الأخيرة من خلال تطوير طرق محسّنة لمعالجة التفاعلات في أنظمة الجسم المتعددة، وتبدو مثل هذه الأساليب مناسبة أيضًا لتفسير الأدلة الرائعة التي حصلت مؤخرًا حول الطابع الكمي للتيارات الفائقة.

ومع ذلك، فإن ذكرياتٍ خاصة من اجتماع عام 1930 مرتبطة بالفرصة التي أتاحها لاستئناف مناقشة المشكلات المعرفية التي نوقشت في المؤتمر عام 1927. في هذه المناسبة طرح أينشتاين حججًا جديدة، حاول من خلالها الالتفافَ على مبدأ عدم التأكد من خلال الاستفادة من تكافؤ الطاقة والكتلة المشتقة من النظرية النسبية. وبالتالي، اقترح أنَّه ينبغي أن تحدد طاقة نبضة إشعاع موقوتة بدقة غير محدودة عن طريق وزن جهازٍ يحتوي على ساعة متصلة بغالق يطلق النبض. ومع ذلك، من خلال النظر من كثبٍ، وجدت المفارقة الواضحة حلَّها في تأثير مجال الجاذبية على توقيت الساعة، التي توقع أينشتاين نفسه في وقتٍ مبكرٍ التحول الأحمر في التوزيع الطيفي للضوء المنبعث من الأنظمة السماوية الثقيلة. لا تزال المشكلة، التي أكدت بشكلٍ تعليمي ضرورة التمييز الحاد بين الأشياء وأدوات القياس في فيزياء الكمِّ، حيث ظلَّت عدة سنوات مسألة جدلٍ حي، خاصة في الدوائر الفلسفية.

وكان آخر لقاء حضره أينشتاين، قبل أن تجبره التطورات السياسية في ألمانيا على الهجرة إلى الولايات المتحدة، قبل وقتٍ قصيرٍ من الاجتماع التالي في عام 1933، وصُدمنا جميعًا بنبأ وفاة (إهرنفست) المفاجئة، وتحدَّث (لانجفين) عن شخصيته الملهمة بعباراتٍ مؤثرة عندما اجتمعنا مرة أخرى.

VII

انعقد مؤتمر عام 1933، المخصَّص بشكلٍ خاص لبنية وخصائص النوى الذرية، في وقتٍ كان فيه هذا الموضوع في مرحلة التطور الأسرع والأكثر تطورًا. افتتح الاجتماع بتقريرٍ صادرٍ

عن (كوككروفت)، الذي وصف بالتفصيل -بعد الإشارة بإيجازٍ إلى الأدلة الغنية حول التفكك النووي بتأثير جسيمات ألفا التي حصل عليها رذرفورد وزملاؤه في السنوات السابقة- النتائج الجديدة المهمة التي حصل عليها مثل تسريع قصف النوى بالبروتونات بسرعات كبيرة باستخدام معدات الجهد العالي المناسبة.

كما هو معروف جيدًا، أعطت تجارب (كوككروفت) و(والتون) الأولية حول إنتاج جسيمات ألفا عالية السرعة عن طريق تأثير البروتونات على نوى الليثيوم، أوَّلَ تحقُّق مباشر من صيغة أينشتاين للعلاقة العامة بين الطاقة والكتلة، وهي التي منحت التوجيه المستمر في مجال البحوث النووية. علاوة على ذلك، وصف (كوككروفت) مدى قرب قياسات الاختلافات في المقطع العرضي للعملية بسرعة البروتون التي أكدت تنبؤات ميكانيكا الموجة، التي قادت (جامو) إليها فيما يتعلَّق بنظرية العفوية في اضمحلال ألفا الذي طوره بنفسه بمساعدة آخرين. في التقرير الذي يشتمل على الأدلة الكاملة المتاحة في ذلك الوقت فيما يتعلق بما يُسمَّى بالتفكك النووي الاصطناعي، قارن (كوككروفت) أيضًا نتائج التجارب في كامبريدج مع القصف بالبروتونات مع تلك التي حصل عليها في الوقت نفسه في بيركلي باستخدام الديوترونات المتسارعة في المسرع الدوراني الذي أنشئ حديثًا بواسطة (لورانس).

افتتح رذرفورد المناقشة التالية، وأعرب عن سعادته ببعض النتائج الجديدة المثيرة للاهتمام، التي حصل عليها للتوِّ هو و(أوليفانت) عن طريق قصف الليثيوم بالبروتونات والديوترونات. في الواقع، أسفرت هذه التجارب عن أدلة على وجود نظائر غير معروفة حتى الآن للهيدروجين والهيليوم مع الكتلة الذرية 3، التي جذبت خصائصها في السنوات الأخيرة الكثيرَ من الاهتمام.

كما قدَّم (لوران) -الذي وصف بمزيدٍ من التفصيل بناءَ المسرع الدوراني الخاص به- سردًا لآخر الدراسات التي أجرتها مجموعة بيركلي. تقدم آخر من النتائج القصوى كان اكتشاف (شادويك) للنيوترون، الذي مثَّل تطورًا مثيرًا للغاية، مما أدَّى إلى تأكيد توقُّع رذرفورد لمكونٍ محايدٍ ثقيلٍ داخل أنوية الذرة. بدأ تقرير (شادويك) من وصف البحث الهادف في كامبريدج عن الحالات الشاذة في أشعة ألفا، وانتهى الأمر ببعض الاعتبارات الأكثر صلة بالدور الذي يلعبه النيوترون في البنية النووية، فضلًا عن دوره المهم في التحولات النووية. قبل مناقشة الجوانب النظرية لهذا التطور في المؤتمر، أبلغ المشاركين عن تقدُّمٍ حاسمٍ آخر، ألا وهو اكتشاف ما يُسمَّى بالنشاط الإشعاعي الاصطناعي، الناتج عن التفكك النووي الخاضع للرقابة.

تمَّ تضمين سرد لهذا الاكتشاف، الذي أُجري قبل بضعة أشهر فقط من المؤتمر في تقريرٍ أعدَّه (فريدريك جوليو) و(إيرين كوري)، الذي يحتوي على مسحٍ للعديد من جوانب أبحاثهم المثمرة، حيث تتحلَّل عمليات أشعة جاما مع الانبعاث، كما أكدت وجودَ الإلكترونات الموجبة والسالبة. في المناقشة التي أعقبت هذا التقرير، روى (بلاكت) قصة اكتشاف البوزيترون من قبله وبمساعدة (أندرسون) في أبحاث الأشعة الكونية وتفسيرها من منظور نظرية الإلكترون النسبية لـ(ديراك). لقد واجه المرءُ هنا بالفعل بداية مرحلة جديدة في تطور فيزياء الكمِّ، تهتم بتكوين وتلاشي جسيماتٍ مادية مماثلة لعمليات انبعاث وامتصاص الإشعاع التي تتشكَّل فيها الفوتونات وتختفي.

كما هو معروفٌ جيدًا، كانت نقطة البداية لـ(ديراك) هي إدراكه أنَّ صياغته الثابتة نسبيًّا لميكانيكا الكم المطبقة على الإلكترونات تتضمن -إلى جانب احتمالات عمليات الانتقال بين الحالات الفيزيائية العادية- أيضًا توقعات التحولات من مثل هذه الحالات إلى حالات الطاقة السلبية. لتجنُّب مثل هذه النتائج غير المرغوبة، قدَّم الفكرة البارعة لِمَا يُسمَّى ببحر ديراك، حيث تمتلئ جميع حالات الطاقة السلبية إلى أقصى حدٍّ يمكن التوفيق بينها وبين مبدأ الاستبعاد للحالات الثابتة المكافئة. في هذه الصورة، تتكون الإلكترونات في أزواجٍ، حيث ترفع الإلكترونات المشحونة عادةً من البحر، بينما تمثل ذات الشحنة المعاكسة بفتحة في البحر، كان هذا المفهوم مناسبًا لتحضير فكرة الجسيمات المضادة ذات الشحنة المعاكسة والعزم المغناطيسي المعكوس بالنسبة لمحور الدوران، مما يثبت أنها خاصية أساسية للمادة.

في المؤتمر، نوقشت كذلك العديدُ من سمات العمليات الإشعاعية. وقدَّم (جامو) تقريرًا أكثر إفادة حول تفسير أطياف أشعة جاما، بناءً على نظريته عن الانبعاث التلقائي والمستحث لأشعة ألفا والبروتون وعلاقتهما بالتركيب الدقيق في أطياف الأشعة. كانت هناك نقطة خاصة، نوقشت بشغفٍ، وهي مشكلة أطياف أشعة جاما المستمرة. بدت تحقيقات (إليس) للتأثيرات الحرارية الناتجة عن امتصاص الإلكترونات المنبعثة بشكلٍ خاصٍّ غير قابلة للتوفيق مع الطاقة التفصيلية وتوازن القوى الدافعة في عملية انحلال أشعة بيتا. علاوة على ذلك، بدت الأدلة على دوران الأنوية المشاركة في العملية متناقضة مع الحفاظ على القوة الدافعة الزاوية. لتفادي مثل هذه الصعوبات، قدَّم (باولي) الفكرة الجريئة، التي ثبت أنَّها عظيمة الفائدة للتطور اللاحق، وهي أنَّ الإشعاعَ شديدَ الاختراق يتكوَّن من جسيماتٍ ذات كتلة سكونٍ متلاشية، وتدور نصفَ دورة تُسمَّى نيوترينوات، تنبعث في اضمحلال بيتا مع الإلكترونات.

عولجت المسألة الكاملة المتعلقة ببنية واستقرار النوى الذرية في تقرير (هايزنبرج) الأكثر أهمية. ومن وجهة نظر مبدأ عدم التأكُّد، فقد شعر بشدة بالصعوبات المتمثلة في افتراض وجود جسيماتٍ مثل الضوء أو مثل الإلكترونات داخل الامتدادات المكانية الصغيرة للنواة الذرية، لذلك فقد أدرك اكتشاف النيوترون كأساسٍ لوجهة نظر اعتبار النيوترونات والبروتونات فقط كمكوناتٍ نووية مناسبة، وعلى هذا الأساس طوَّر تفسيراتٍ للعديد من خصائص الأنوية الذرية.

على وجه الخصوص، أشار مفهوم (هايزنبرج) ضمنيًّا إلى اعتبار ظاهرة انحلال أشعة بيتا دليلًا على تكوين إلكترونات ونيوترينوات موجبة أو سالبة أثناء إطلاق الطاقة في التغيير المصاحب من نيوترون إلى بروتون، أو العكس. لقد أُحرِز تقدُّمٌ كبيرٌ في هذا الاتجاه بعد المؤتمر بفترة وجيزة والذي حقَّقه (فيرمي)، الذي طوَّر على هذا الأساس نظرية متسقة عن تحلُّل بيتا، والتي يجب أن تثبت في التطورات اللاحقة أنها أهم الإرشادات.

شارك رذرفورد -أكثر الشخصيات ثراءً مع عددٍ قليلٍ من النظراء في تاريخ العلوم الفيزيائية- بنشاطٍ معتادٍ في العديدِ من المناقشات، وكان بالطبع شخصية محورية في اجتماع سولفاي في عام 1933، الذي سيصبح آخر مؤتمر سيحضره قبل وفاته في عام 1937.

VIII

الأحداث السياسية التي أدَّت إلى الحرب العالمية الثانية أوقفتْ لسنواتٍ عديدة التتابعَ المنتظم لاجتماعات سولفاي، التي استؤنفت في عام 1948. في تلك السنوات المضطربة، لم يلين تقدُّم الفيزياء النووية بل أدَّى إلى تحقيق احتمالات تحرير الطاقة الهائلة المخزَّنة في النوى الذرية. على الرغم من أنَّ الآثار الخطيرة لهذا التطور كانت في أذهان الجميع، إلا أنَّها لم تُذكر في المؤتمر، الذي تناول مشكلة الجسيمات الأولية، وهو المجال الذي فُتِحت فيه آفاقٌ جديدة باكتشاف الجسيمات ذات الكتلة الساكنة بين ذلك، من الإلكترون والنكليونات.

كما هو معروفٌ، كان وجود مثل هذه الميزونات، قبل اكتشافها في الإشعاع الكوني بواسطة (أندرسون) في عام 1937، متوقعًا من قبل (يوكاوا) ككمياتٍ لمجالات القوة قصيرة المدى بين النيوكليونات، التي تختلف اختلافًا جوهريًّا عن المجالات الكهرومغناطيسية التي دُرِّست في أول نهجٍ لفيزياء الكمِّ.

كُشِف عن ثراء هذه الجوانب الجديدة من مشكلة الجسيمات قبل المؤتمر مباشرة من خلال الدراسات المنهجية التي أجراها (باول) ومعاونوه في بريستول للمسارات في لوحات فوتوغرافية معرضة للإشعاع الكوني، ومن خلال دراسة تأثيرات الطاقة العالية ظهرت تصادمات النكليون لأول مرة في المسرع الدوراني العملاق في بيركلي. لقد أصبح من الواضح أن مثل هذه التي تتحلَّل لاحقًا بسبب انبعاث π الاصطدامات تؤدي مباشرة إلى تكوين ما يُسمَّى بميزونات لا تظهر أي μ عثر على ميزونات ،π على النقيض من ميزونات .μ النيوترينو إلى ميزونات .اقتران قوي بالنيوكليونات وتتحلل نفسها في الإلكترونات تحت انبعاث اثنين من النيوترينوات

في المؤتمر، أعقب التقارير التفصيلية حول الأدلة التجريبية الجديدة تعليقات أكثر إثارة للاهتمام من العديد من الجهات حول تفسيرها النظري، وعلى الرغم من التقدُّم الواعد في مختلف الاتجاهات، كان هناك، فهمٌ عامٌّ بأننا نقف على بداية تطور حيث الحاجة إلى وجهات نظر نظرية .جديدة

كانت هناك نقطة خاصة نُوقشت وهي كيفية التغلُّب على الصعوبات المرتبطة بظهور الاختلافات في الديناميكا الكهربية الكمومية، التي تجلَّت على الأقل في مسألة الطاقة الذاتية للجسيمات المشحونة. محاولات حل المشكلة عن طريق إعادة صياغة نظرية الإلكترون الكلاسيكية، وهي أساسية للمعالجة بالمقاربة، كانت محبطة بشكلٍ واضحٍ بسبب اعتماد قوة التفردات على نوع الإحصائيات الكمومية التي يطيعها الجسيم المعني. لقد أوضح (فايسكوبف) لأول مرة تقليل التفردات في الديناميكا الكهربية الكمية إلى حدٍّ كبيرٍ في حالة الفرميونات، بينما في حالة البوزونات، تتباعد الطاقة الذاتية بقوة أكبر من الديناميكا الكهربائية الكلاسيكية، هذا ما أكَّد عليه بالفعل في مناقشات مؤتمر عام 1927، ضمن إطار استبعد التمييز بين الإحصائيات .الكمية المختلفة

على الرغم من الابتعاد الجذري عن الوصف التصويري الحتمي، الذي نهتم به هنا، فإنَّ السمات الأساسية للأفكار العرفية للسببية تدعم في نهج المقاربة من خلال إحالة العمليات الفردية المتنافسة إلى تراكب بسيط لوظائف الموجة المحددة ضمن امتداد مشترك للزمان والمكان. ومع ذلك، فإن إمكانية مثل هذا العلاج تكمن، كما أكدت المناقشات على الاقتران الضعيف نسبيًّا بين الجسيمات والمجالات التي يعبر عنها صغر الثابت غير البعدي $\alpha = e^2/kc$، مما يسمح بالتمييز بدرجة عالية من التقريب بين حالة نظام الإلكترونات وتفاعله الإشعاعي مع

المجال الكهرومغناطيسي. فيما يتعلق بالديناميكا الكهربية الكمومية، كان هناك تقدُّمٌ كبيرٌ في ذلك الوقت بدأه عمل (شفنجر) و(توموناجا)، مما أدَّى إلى ما يُسمَّى بإجراء إعادة التعادلية الذي ولا سيما في اكتشاف تأثير (لامب) ،α يتضمن تصحيحاتٍ من نفس الترتيب مثل.

إنَّ الاقتران القوي بين النيوكليونات وحقول البيون منع التطبيق المناسب لحجج المقاربة البسيطة، ودراسة عمليات الاصطدام على وجه الخصوص، التي يتم فيها إنشاء عددٍ كبيرٍ من البيونات، مما يشير إلى ضرورة الخروج من الخطية في أساس المعادلات وحتى، كما اقترح هايزنبرج، إدخال طول أوَّلي يمثل الحدَّ النهائي للتنسيق بين الزمان والمكان نفسه. من وجهة نظر المراقبة، قد تكون هذه القيود مرتبطة ارتباطًا وثيقًا بالقيود المفروضة على قياسات الزمان والمكان من خلال التكوين الذري لجميع الأجهزة. بالطبع، بعيدًا عن التعارض مع حجة الاستحالة في أي وصفٍ محددٍ جيدًا للتجربة المادية لأخذ التفاعل بين الأجسام الذرية قيد الدراسة وأدوات المراقبة في الاعتبار بشكلٍ صريحٍ، فإنَّ مثل هذا الموقف من شأنه أن يمنح هذه الحجة نطاقًا كافيًا من أجل الفهم المنطقي لمزيدٍ من الانتظامات.

كان تحقيق الآفاق التي تتضمن -كشرطٍ لاتساق النهج بأكمله- إمكانية تثبيت ثابت ألفا، وكذلك اشتقاق العلاقات معدومة الأبعاد الأخرى بين كتل الجسيمات الأولية وثوابت الاقتران، خلال وقت المؤتمر بالكاد كان هناك محاولات لذلك، كان هناك بحثٌ عن طريقة للتقدم في دراسة علاقات التماثل، ومنذ ذلك الحين ظهرت في المقدمة من خلال التتابع السريع لاكتشافات مجموعة متنوعة من المقالات التي تظهر سلوكًا غير متوقعٍ لدرجة تميزت بدرجات متفاوتة من «الغرابة». بالتفكير في أحدث التطورات، فقد بدأ تقدمٌ كبيرٌ من خلال الاقتراح الجريء الذي قدَّمه (لي ويانج) في عام 1957 للنطاق المحدود للحفاظ على التكافؤ، الذي تحقق من خلال التجارب الجميلة التي أجرتها السيدة (وو) ومعاونوها.

لقد كان عرض حلزونية النيوترينو مجددًا بالفعل لإثارة السؤال القديم المتمثل في التمييز بين اليمين واليسار في وصف الظواهر الطبيعية. ومع ذلك، فإن تجنُّب المفارقة المعرفية في هذا الصدد تحقَّق من خلال الاعتراف بالعلاقة بين تناظر الانعكاس في المكان والزمان والتماثلات بين الجسيمات والجسيمات المضادة.

بالطبع لا أعتزم بمثل هذه الملاحظات السريعة بأي شكلٍ من الأشكال توقُّع المشكلات التي ستشكل الموضوع الرئيس للمناقشات في المؤتمر الحالي، الذي يجري في وقت التطورات

التجريبية والنظرية الجديدة المهمة، والتي نحرص عليها جميعًا. للتعلُّم من المشاركين من جيل الشباب. ومع ذلك، فإننا غالبًا ما نفتقد مساعدة زملائنا وأصدقائنا المتوفين، مثل (كرامر) و(باولي) و(شرودنجر)، الذين شاركوا جميعًا في المؤتمر عام 1948، الذي كان آخر مؤتمر حضرتُه حتى الآن، وبالمثل فإني أعرب عن حزني بسبب المرض الذي حال دون وجود (ماكس بورن) بيننا.

في الختام، أود أن أعرب عن الأمل في أن تكون هذه المراجعة لبعض سمات التطور التاريخي قد أعطت مؤشرًا للدين الذي يدين به مجتمع علماء الفيزياء لمعهد سولفاي، والتوقعات التي نشاركها جميعًا بشأن نشاطه المستقبلي.

الفصل الثامن

مناقشة مع أينشتاين

حول مشكلات نظرية المعرفة

في الفيزياء الذرية

1949

المقال الثامن: مناقشة مع أينشتاين حول مشكلات نظرية المعرفة[26] في الفيزياء الذرية:

(26) نظريّة المعرفة (Epistemology): هي دراسة لطبيعة المعرفة، الشّرح والتبرير، وعقلانيّة الاعتقاد/ الإيمان. يوجد جدلٌ كبيرٌ حول مراكز نظريّة المعرفة التي تتفرَّع إلى أربع مناطق: التحليل الفلسفي لطبيعة المعرفة، ومدى ارتباطها بمفاهيم مثل الحقيقة، والمعتقد والتّبرير، مشاكل ومواضيع التّشكيك المختلفة. مصادر ومجالات المعرفة والمعتقدات المُبرّرة. معايير المعرفة والتّبرير. تتناول نظريّة المعرفة أسئلة مثل: «ما الذي يجعل المعتقدات المبرّرة مُبرّرة؟»، «ماذا يعني أن نقول إنّنا نعرف شيئًا ما؟»، وبشكلٍ أساسيّ ورئيسٍ: «كيف نعلم أنّنا نعلم؟».

عندما دعا محرر سلسلة «الفلاسفة الأحياء» لكتابة مقالٍ في هذا المجلد الذي يكرِّم فيه العلماء المعاصرون مساهمات ألبرت أينشتاين في تقدُّم الفلسفة الطبيعية، ويقرُّون بمديونية جيلنا بأكمله للإرشادات التي قدَّمتها لنا عبقريته، فكرتُ كثيرًا في أفضل طريقة لشرح مقدار الإلهام الذي أدين به لشخصه. إنَّ المناسبات العديدة خلال السنوات التي تشرَّفتُ فيها بمناقشة أينشتاين في المشكلات المعرفية التي أثارها التطور الحديث للفيزياء الذرية، شعرتُ أنَّه لا يمكنني أن أقدِّم ما هو أفضل من ذلك. قدَّمتُ سردًا لهذه المناقشات التي كانت ذات قيمة وحافزًا كبيرًا بالنسبة إليَّ، حتى لو لم يحدث اتفاقٌ كاملٌ في وجهات النظر. آمل أيضًا أن ينقل هذا النقاش انطباعًا عن مدى أهمية تبادُل الأفكار بذهنٍ منفتحٍ للتقدُّم في مجالٍ تطلَّبت فيه التجربة الجديدة مرة تِلْوَ الأخرى إعادة النظر في وجهات نظرنا.

منذ البداية، كانت النقطة الرئيسة قيد المناقشة هي الموقف الذي يجب اتخاذه للابتعاد عن المبادئ العرفية للفلسفة الطبيعية المميزة للتطور الجديد للفيزياء الذي بدأ في العام الأول من هذا القرن (القرن العشرين) من خلال اكتشاف بلانك للفعل الكمومي الكوني.

هذا الاكتشاف، الذي كشف عن سمة من سمات الذرة في قوانين الطبيعة تتجاوز بكثيرٍ العقيدة القديمة لقابلية المادة للتجزئة المحدودة، علِمنا بالفعل أنَّ النظريات الكلاسيكية للفيزياء هي

عملياتٌ مثالية يمكن تطبيقُها بشكلٍ لا لبسَ فيه في حدود الإجراءات الكبيرة مقارنة بالكمِّ. كان السؤال المطروح هو ما إذا كان التخلي عن الأسلوب السببي لوصف العمليات الذرية ينبغي اعتباره خروجًا مؤقتًا عن المُثُل العتيقة للفيزياء الكلاسيكية، أو ما إذا كنَّا نواجه خطوة لا رجعة فيها للحصول على الانسجام الصحيح بين تحليل وتفسير الظواهر الفيزيائية. لوصف خلفية مناقشاتنا، ولإبراز الحجج المؤيدة لوجهات النظر المتناقضة بأكبر قدرٍ ممكنٍ من الوضوح، شعرتُ أنَّه من الضروري أن أتذكر بعضَ السمات الرئيسة للتطور التي ساهم فيه أينشتاين بنفسِه بشكلٍ حاسمٍ.

كما هو معروفٌ جيدًا كانت العلاقة الحميمة -التي أوضحها (بولتزمان) في المقام الأول- بين قوانين الديناميكا الحرارية والانتظام الإحصائي الذي أظهرته الأنظمة الميكانيكية بدرجاتٍ عديدة من الحرية هي التي وجَّهت بلانك في معالجته البارعة لمشكلة الإشعاع الحراري، مما أدَّى إلى اكتشافه الأساسي. كان بلانك مهتمًّا بشكلٍ أساسي بالاعتبارات ذات الطابع الإحصائي بشكلٍ أساسي، وامتنع بحذرٍ شديدٍ عن الاستنتاجات التي تحدد معنى أنَّ الكمَّ يُعدُّ خروجًا عن أسس الميكانيكا والديناميكا الكهربية. مساهمة أينشتاين الأصلية العظيمة في نظرية الكمِّ عام (1905) كانت مجرد إدراكٍ لكيفية اعتماد الظواهر الفيزيائية مثل التأثير الضوئي بشكلٍ مباشرٍ على التأثيرات الكمية الفردية، اكتشف العلم بروحٍ أكثر جرأة السماتَ الذرية الجديدة التي نقلتنا إلى ما وراء الإطار الكامل للفيزياء الكلاسيكية.

وبحدسٍ لا يتزعزع، قاد أينشتاين خطوة بخطوة استنتاجًا مفاده: أنَّ أي عملية إشعاع تتضمن انبعاثًا أو امتصاصًا للكمات الضوئية الفردية أو «الفوتونات» بالطاقة والقوة الدافعة على الترتيب.

$$E = h\upsilon \text{ and } P = h\sigma \qquad (1)$$

هما عدد الاهتزازات لكل وحدة زمنية وعدد الموجات σ و υ هو ثابت بلانك، بينما h حيث لكل وحدة طول على التوالي. على الرغم من الفكرة الواعدة، فإن فكرة الفوتون تضمَّنت معضلةً غير متوقعة، حيث من الواضح أنَّ أيَّ صورة جسيمية بسيطة للإشعاع لا يمكن التوفيق بينها وبين تأثيرات التداخل، التي تقدِّم جانبًا أساسيًّا من الظواهر الإشعاعية، التي لا يمكن وصفُها إلا من منظور صورة موجة. يجب تأكيد حدة المعضلة من خلال حقيقة أنَّ تأثيرات التداخل توفِّر

وسيلتنا الوحيدة لتحديد مفاهيم التردد وطول الموجة التي تعبر عن الطاقة والقوة الدافعة للفوتون.

في هذه الحالة، لا شكَّ في محاولة تحليلٍ سببيّ للظواهر الإشعاعية، ولكن من خلال الاستخدام المشترك للصور المتناقضة، لتقدير احتمالات حدوث عمليات الإشعاع الفردية. ومع ذلك، من المهم للغاية إدراك أن اللجوء إلى قوانين الاحتمالات في ظل هذه الظروف يختلف اختلافًا جوهريًّا في الهدف عن التطبيق المألوف للاعتبارات الإحصائية كوسيلة عملية لحساب خصائص الأنظمة الميكانيكية ذات التعقيد الهيكلي الكبير. في فيزياء الكمّ لا نعرض تعقيداتٍ من هذا النوع، ولكن مع عدم قدرة الإطار الكلاسيكي للمفاهيم على تضمين السمة المميزة لعدم القابلية للتجزئة، أو «الفردية» التي تميز العمليات الأولية.

إنَّ فشلَ نظريات الفيزياء الكلاسيكية في تفسير الظواهر الذرية زاد من حدة التقدُّم الذي أحرزته معرفتنا ببنية الذرات. قبل كل شيء، كشف اكتشاف رذرفورد للنواة الذرية (1911) في الحال عن عدم كفاية المفاهيم الميكانيكية والكهرومغناطيسية الكلاسيكية لتفسير الاستقرار المتأصّل للذرة. هنا مرة أخرى، قدَّمت نظرية الكمّ دليلًا لتوضيح الموقف، وخاصة أنه وُجِد أنه من الممكن تفسير الاستقرار الذري -وكذلك القوانين التجريبية التي تحكم أطياف العناصر- بافتراض أنَّ أي تفاعل للذرة ينتج عن تغيير طاقته، اشتمل على انتقالٍ كاملٍ بين ما يُسمَّى بالحالات الكمومية الثابتة، وأنَّ الأطياف على وجه الخصوص تنبعث من عملية شبيهة بالخطوة يكون فيها كلُّ انتقالٍ مصحوبًا بانبعاث كمومية ضوئية أحادية اللون من الطاقة تساوي فقط تلك الخاصة بفوتون أينشتاين.

هذه الأفكار أكدَّتها تجارب فرانك وهيرتز (1914) حول إثارة الأطياف بتأثير الإلكترونات على الذرات، تضمنت نبذًا إضافيًّا للنمط السببي للوصف، حيث من الواضح أن تفسير القوانين الطيفية يعني ضمنًا أنَّ للذرة في حالة الإثارة بشكلٍ عامٍّ إمكانية التحولات مع انبعاث الفوتون إلى حالة أو أخرى من حالات الطاقة المنخفضة. لا تتوافق فكرة الحالات الثابتة مع أي توجيه للاختيار بين مثل هذه التحولات ولا تترك مجالًا إلا لمفهوم الاحتمالات النسبية لعمليات الانتقال الفردية. كان الدليل الوحيد في تقدير مثل هذه الاحتمالات هو ما يُسمَّى بمبدأ المطابقة الذي نشأ في البحث عن أقرب اتصالٍ ممكنٍ بين الحساب الإحصائي للعمليات الذرية والنتائج المتوقعة من

النظرية الكلاسيكية، التي يجب أن تكون صالحة في حدود الإجراءات المتضمنة في جميع مراحل تحليل الظواهر الكبيرة مقارنة بالكم الكوني.

لم تكن هناك نظرية كمومية عامة متسقة واضحة في الأفق، ولكن ربما يتضح الوضع السائد في ذلك الوقت من خلال المقطع التالي من محاضرة لنيلز بور عام 1913:

«آمل أن أكون قد عبَّرتُ عن نفسي بشكلٍ واضحٍ بما فيه الكفاية حتى تدرك مدى تعارض هذه الاعتبارات مع المفاهيم المتسقة ببراعة، والذي نسميه بالنظرية الكلاسيكية للديناميكا الكهربائية. من ناحية أخرى، حاولتُ أن أنقل إليكم الانطباع بأنَّه -فقط من خلال التأكيد بشدة على هذا الصراع- قد يمكن ترسيخ بعض الاتساق في الأفكار الجديدة بمرور الوقت.»

أحرز أينشتاين تقدُّمًا مهمًّا في تطوير نظرية الكمِّ في مقالته الشهيرة عن التوازن الإشعاعي في عام 1917، حيث أظهر أن قانون بلانك للإشعاع الحراري يمكن استنتاجه ببساطة من الافتراضات التي تتوافق مع الأفكار الأساسية لنظرية الكمِّ للقانون الأساسي للذرة. لهذا الغرض، صاغ أينشتاين قواعدَ إحصائية عامة بشأن حدوث انتقالاتٍ إشعاعية بين الحالات الثابتة، بافتراض أنه عندما تتعرَّض الذرَّة لمجال إشعاعٍ ستحدث عمليات الامتصاص، وكذلك أيضًا الانبعاث باحتمالية لكل وحدة زمنية تتناسب مع شدة التعرُّض للإشعاع، ولكن حتى في حالة عدم وجود اضطراباتٍ خارجية، فإنَّ عمليات الانبعاث العفوية ستحدث بمعدل يتوافق مع احتمالية معينة. فيما يتعلَّق بالنقطة الأخيرة، شدَّد أينشتاين على الطابع الأساسي للوصف الإحصائي بطريقة أكثر إيحائية من خلال لفت الانتباه إلى التشابُه بين الافتراضات المتعلقة بحدوث التحولات الإشعاعية التلقائية والقوانين المعروفة التي تحكم تحولات المواد المشعة.

فيما يتعلَّق بفحصٍ شاملٍ لمقتضيات الديناميكا الحرارية فيما يتعلَّق بمشاكل الإشعاع، شدَّد أينشتاين على المعضلة أكثر من خلال الإشارة إلى أنَّ الحجة تشير إلى أنَّ أي عملية إشعاع «غير موجَّهة»، بمعنى أنه ليس فقط قوة دافعة يتوافق مع الفوتون. مع اتجاه الانتشار المنقول إلى ذرة في عملية الامتصاص، ولكن سوف تتلقَّى الذرة المنبعثة دفعة مكافئة في الاتجاه المعاكس، على الرغم من عدم وجود تفضيلٍ لاتجاهٍ واحدٍ بعينه في الانبعاث معالجة. يمكن التعبير عن موقف أينشتاين الخاص تجاه هذه الاستنتاجات المذهلة على النحو التالي:

«يبدو أنَّ ميزات العمليات الأولية هذه تجعل تطوير المعالجة الكمومية المناسبة للإشعاع أمرًا لا مفرَّ منه. قد يضعف من النظرية حقيقة أنَّه لا يمكن الحصول على اتصالٍ أوثق

بمفاهيم الموجة وأنه -من ناحية أخرى- قد يترك للمصادفة وقت واتجاه العمليات الأولية؛ «لكن لديَّ ثقة كاملة في مصداقية الطريقة التي استخدمت.

كانت تجربة رائعة أن أقابل أينشتاين للمرة الأولى خلال زيارة إلى برلين في عام 1920، شكَّلت هذه الأسئلة الأساسية موضوع محادثاتنا والمناقشات التي عدتُ إليها كثيرًا في أفكاري، أضافت إلى إعجابي بأينشتاين انطباعًا عميقًا عن موقفه المنفصل. من المؤكد أن استخدامه المفضَّل لمثل هذه العبارات الخلابة مثل «موجات الأشباح (غابة الأشباح) التي توجه الفوتونات» لم يدل على وجود ميلٍ إلى التصوف، بل ألقى الضوءَ على روح الدعابة العميقة وراء ملاحظاته الثاقبة. ومع ذلك، ظلَّ هناك اختلافٌ معينٌ في الموقف والنظرة منذ ذلك الحين، مع إتقانه للتنسيق الذي يبدو متناقضًا للتجربة من دون التخلي عن الاستمرارية والسببية، ربما كان أينشتاين أكثر تردُّدًا في التخلي عن مثل هذه المُثل العليا لأنه وجد أنَّ هذا التخلي هو السبيل الوحيد للمضي قدمًا في المهمة الفورية لتنسيق الأدلة المتباينة بين الظواهر الذرية، التي تراكمت من يومٍ لآخر في استكشاف هذا المجال الجديد من المعرفة.

في السنوات التالية، التي جذبت المشكلات الذرية خلالها انتباهَ دوائر الفيزيائيين المتزايدة بسرعة، كانت التناقضات الواضحة المتأصلة في نظرية الكمِّ محسوسة بشكلٍ أكثر حدَّة من أي وقتٍ مضى. يوضح هذا الموقف المناقشة التي أثارها اكتشاف تأثير (ستيرن جيرلاخ) في عام 1922. فمن ناحية، أعطى هذا التأثير دعمًا مذهلًا لفكرة الحالات الثابتة وخاصةً نظرية الكم لتأثير (زيمان) التي طورها (سومرفيلد)، من ناحية أخرى، كما كشف عن ذلك بوضوحٍ أينشتاين و(إهرنفيست)، فقد واجها صعوباتٍ لا يمكن التغلُّب عليها في أي محاولة لتشكيل صورة لسلوك الذرات في مجال مغناطيسي. أثيرت مفارقات مماثلة من خلال اكتشاف (كومبتون) (1924) للتغيير في طول الموجة المصاحب لتشتت الأشعة السينية بواسطة الإلكترونات. قدَّمت هذه الظاهرة، أكثر دليلٍ مباشرٍ على ملاءمة وجهة نظر أينشتاين فيما يتعلَّق بنقل الطاقة والقوى الدافعة في العمليات الإشعاعية، في الوقت نفسه، كان من الواضح أيضًا أنه لا توجد صورة بسيطة للتصادم الجسدي المباشر يمكن أن يقدم وصفًا شاملًا للظاهرة. تحت تأثيرٍ مثل الصعوبات، كانت الشكوك لفترة من الوقت مسلية فيما يتعلق بالحفاظ على الطاقة والقوى الدافعة في عرض عمليات الإشعاع الفردية، لكن سرعان ما كان يجب التخلي عنها في مواجهة المزيد من التجارب الدقيقة التي تبرز العلاقة بين انحراف الفوتون وارتداد الإلكترون المقابل.

كان الطريق لتوضيح الموقف، أولًا مهَّدته تطوير نظرية الكمِّ بشكلٍ أكثر شمولًا، كانت الخطوة الأولى نحو هذا الهدف هي إدراك (دي برولي) في 1925 أن ازدواجية الموجة والجسيم لم تقتصر على خصائص الإشعاع، ولكنها أيضًا كانت حتمية في حساب سلوك الجسيمات المادية.

هذه الفكرة، التي سرعان ما أكدتها بشكلٍ مقنعٍ التجارب على ظاهرة تداخل الإلكترون، استقبلها أينشتاين على الفور، الذي كان لديه تصورٌ عميقٌ بالفعل بين خصائص الإشعاع الحراري والغازات فيما يُسمَّى بالحالة المتدهورة. تمَّت متابعة الخط الجديد بأكبر قدرٍ من النجاح من قِبَل (شرودنجر) (1926) الذي أظهر كيف يمكن تمثيل الحالات الثابتة للأنظمة الذرية من خلال الحلول المناسبة لمعادلة موجية كانت قائمة أساسًا على القياس الذي يتبع هاملتون بين المشاكل الميكانيكية والبصرية. لكن لم تتحسَّن الجوانب المتناقضة لنظرية الكمِّ بأي حالٍ من الأحوال، بل تأكدت من خلال التناقض الواضح بين مقتضيات مبدأ التراكب العام لوصف الموجة وخاصية فردية العمليات الذرية الأولية.

في الوقت نفسه، (1925) وضع هايزنبرج أسسَ ميكانيكا الكمِّ العقلانية، التي تطورت بسرعة من خلال مساهمات مهمة من (بورن)و(جوردان) وكذلك من قِبَل (ديراك). قدمت في هذه النظرية صيغٌ رياضية، حيث تستبدل المتغيرات الحركية والديناميكية للميكانيكا الكلاسيكية برموزٍ تخضع لجبر غير تبادلي.

على الرغم من التخلي عن الصور المدارية، فإن معادلات هاميلتون الأساسية للميكانيكا تظل من دون تغييرٍ، ولا يدخل ثابت بلانك إلا في قواعد التبديل:

$$qp - pq = \sqrt{(-1)}\ h/2\pi \qquad (2)$$

من خلال تمثيل الرموز بواسطة p و q الاحتفاظ بأي مجموعة من المتغيرات المترافقة المصفوفات من العناصر التي تشير إلى التحولات بين الحالات الثابتة، أصبحت الصيغة الكمية لمبدأ التطابق لأول مرة ممكنًا. وتجدر الإشارة هنا إلى أنه تم الوصول إلى خطوة أولية مهمة نحو هذا الهدف من خلال إنشاء -لا سيما من خلال مساهمات (كرامر)- نظرية الكم للتشتُّت التي تستخدم بشكلٍ أساسي قواعدَ أينشتاين العامة لاحتمال حدوث عمليات الامتصاص والانبعاث.

سرعان ما أثبت شرودنجر هذه الصيغة الرياضية لميكانيكا الكمِّ لإعطاء نتائج متطابقة مع تلك التي يمكن الحصول عليها من خلال الطرق الأكثر ملاءمة من الناحية الرياضية لنظرية الموجات،

وفي السنوات التالية أعطى الأسلوب العام للوصف الإحصائي الأساسي للعمليات الذرية -التي تجمع بين ميزات الفردية ومتطلبات مبدأ التراكب- سمةً متوازنة لنظرية الكم تدريجيًّا. من بين التطورات العديدة في هذه الفترة، يمكن الإشارة بشكلٍ خاصٍّ إلى أنَّ الصيغة الرياضية أثبتت قدرتها على دمج مبدأ الاستبعاد الذي يحكم حالات الأنظمة مع العديد من الإلكترونات، والذي كان قد اشتق بالفعل قبل ظهور ميكانيكا الكمِّ من قِبَل (باولي) من خلال تحليل الأطياف الذرية. لا يمكن للفهم الكمومي لكمية هائلة من الأدلة التجريبية أن يترك أيَّ شكٍّ فيما يتعلَّق بخصوبة وكفاية الصيغ الرياضية لميكانيكا الكمِّ، لكنَّ طابعَها المجرد أدَّى إلى شعورٍ واسعِ النطاق بعدم الارتياح، في الواقع، يجب أن يتطلَّب توضيح الموقف اختبارًا شاملًا لمشكلة الملاحظة ذاتها في الفيزياء الذرية.

بدأت هذه المرحلة من التطور، في 1927 بواسطة (هايزنبرج)، الذي أشار إلى أنَّ المعرفة التي يمكن الحصول عليها عن حالة النظام الذري ستشمل دائمًا «عدم تحديد» غريب. وبالتالي، فإنَّ أي قياسٍ لموضع الإلكترون عن طريق جهازٍ ما، مثل المجهر، باستخدام إشعاعٍ عالي التردد، سيكون، وفقًا للعلاقات الأساسية المعادلة رقم (1)، مرتبطًا بتبادل القوى الدافعة بين الإلكترون وجهاز القياس، التي ستزيد كلما زادت دقة محاولة قياس الموضع. بمقارنة هذه الاعتبارات بمتطلبات الصيغة الرياضية للميكانيكا الكمومية، لَفَتَ هايزنبرج الانتباه إلى حقيقة أنَّ q و p قاعدة التبديل في المعادلة رقم (2) تفرض قيودًا متبادلة على تثبيت المتغيرين المترافقين معبرًا عنها بالعلاقة:

$$\Delta q.\Delta p \approx h \qquad (3)$$

بشكلٍ مناسبٍ في تحديد هذه المتغيرات. إنَّني أشير إلى العلاقة Δp و Δq حيث يتم تعريف الوثيقة بين الوصف الإحصائي في ميكانيكا الكمِّ والإمكانيات الفعلية للقياس، فهذا ما يُسمَّى بعلاقة اللا حتمية، كما أوضح هايزنبرج هي الأهم لتوضيح المفارقات التي تنطوي عليها محاولات تحليل التأثيرات الكمية باستخدام إشارة إلى الصور المادية المألوفة.

توالت التعليقات على التقدُّم الجديد في الفيزياء الذرية من جهاتٍ مختلفة في المؤتمر الفيزيائي الدولي الذي عُقِد في سبتمبر 1927، في كومو لإحياء ذكرى (فولتا). في محاضرة في تلك المناسبة، دافعتُ عن وجهة نظرٍ تُسمَّى «مبدأ المكاملة»، وهي مناسبة لاحتضان السمات المميزة لفردية الظواهر الكمومية، وفي الوقت نفسه لتوضيح الجوانب المميزة لمشكلة الرصد

والملاحظة في تجارب هذا المجال. لهذا الغرض، من الأهمية بمكان أن ندرك أنَّه مهما تجاوزت الظواهر نطاقَ التفسير الفيزيائي الكلاسيكي، يجب التعبير عن تفسير كل الأدلة بمصطلحات كلاسيكية. الحجة ببساطة هي أنه بكلمة «تجربة» نشير إلى موقفٍ يمكننا فيه إخبار الآخرين بما فعلناه وما تعلمناه، وبالتالي يجب أن يكون حساب الترتيب التجريبي ونتائج الملاحظات معبَّرًا عنه بلغة لا لبس فيها مع التطبيق المناسب لمصطلحات الفيزياء الكلاسيكية.

هذه النقطة الحاسمة، التي كان من المقرر أن تصبح موضوعًا رئيسًا للمناقشات المذكورة فيما يلي، تشير ضمنًا إلى استحالة أي فصلٍ حادٍ بين سلوك الأجسام الذرية والتفاعل مع أجهزة القياس التي تعمل على تحديد الظروف التي تظهر فيها الظواهر.

في الواقع، تجد فردية التأثيرات الكمومية النموذجية تعبيرها الصحيح في الظروف التي تتطلَّب أيُّ محاولة لتقسيم الظواهر تغييرًا في الترتيب التجريبي لإدخال احتمالاتٍ جديدة للتفاعل بين الجسيمات وأدوات القياس التي لا يمكن السيطرة عليها من حيث المبدأ. وبالتالي، لا يمكن فَهْم الأدلة التي حدثت في ظلِّ ظروفٍ تجريبية مختلفة في صورة واحدة، ولكن يجب اعتبارها تخضع لمبدأ المكاملة بمعنى أنَّ مجموع الظواهر فقط يستنفد المعلومات الممكنة حول الأشياء.

في ظلِّ هذه الظروف، يتدخل عنصرٌ أساسيٌّ من الغموض في إسناد الصفات الفيزيائية التقليدية للأجسام الذرية، كما يتضح في المعضلة المتعلقة بالخصائص الجسيمية والموجة للإلكترونات والفوتونات، حيث يتعيَّن علينا التعامُل مع الصور المتناقضة، كلٌّ منها يشير إلى جانبٍ أساسي من الأدلة التجريبية.

مثال توضيحي لكيفية إزالة المفارقات الظاهرة من خلال فحص الظروف التجريبية التي تظهر فيها الظواهر بمبدأ المكاملة، يظهر أيضًا من خلال تأثير (كومبتون)، الذي قدَّم لنا الوصف المتسق لمثل هذه الصعوبات التجريبية منذ البداية. وبالتالي، فإنَّ أي ترتيبٍ مناسبٍ لدراسة تبادل الطاقة والقوة الدافعة بين الإلكترون والفوتون يجب أن يكون له حدٌّ أو سقفٌ في وصف الزمن والتموضع للتفاعل الكافي لتعريف رقم الموجة والتردد اللذيْن يدخلان في العلاقة الموضحة في المعادلة (1).

على العكس من ذلك، فإن أي محاولة لتحديد موقع التصادم بين الفوتون والإلكترون بشكلٍ أكثر دقة من شأنه -على حسب التفاعل الذي لا مفرَّ منه مع المقاييس والساعات الثابتة التي تحدد الإطار المرجعي للمكان والتموضع- استبعاد جميع الحسابات الأقرب فيما يتعلَّق بتوازن

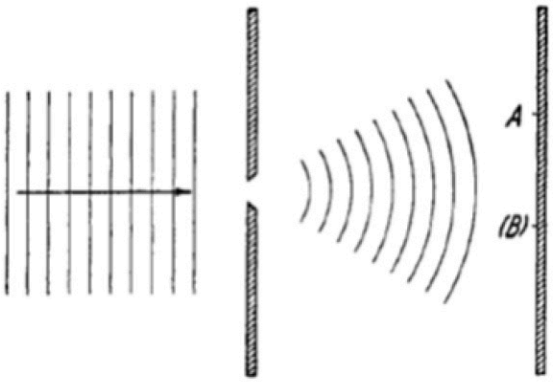
القوة الدافعة والطاقة. كما أكدتُ في المحاضرة، يتم تقديم أداة مناسبة لطريقة تخضع لمبدأ المكاملة للوصف بدقة من خلال الشكلية الميكانيكية الكمية التي تمثِّل مخططًا رمزيًّا بحتًا يسمح بالتنبؤات فقط، على خطوط مبدأ المطابقة، فيما يتعلَّق بالنتائج التي يمكن الحصول عليها في ظل الشروط المحددة بواسطة الوسائل الكلاسيكية، يجب أن أتذكر هنا أنه حتى في علاقة عدم التأكُّد الموضحة في المعادلة (3) فإننا نتعامل مع تداعيات الصيغ الرياضية التي تتحدَّى التعبير الواضح للكلمات المناسبة لوصف الصور المادية الكلاسيكية. وهكذا، فإنَّ جملة مثل «لا يمكننا معرفة كلٍّ من القوة الدافعة وموضع الجسم الذري» تثير في الحال أسئلة حول الواقع المادي لخاصيتين من هذا القبيل من سمات الجسيم، التي لا يمكن الإجابة عنها إلا من خلال الإشارة إلى شروطٍ لا لبس فيها إلى استخدام مفاهيم الزمن والتموضع من ناحية، وقوانين الحفظ الديناميكي من ناحية أخرى. في حين أن الجمع بين هذه المفاهيم في صورة واحدة لسلسلة سببية من الأحداث هو جوهر الميكانيكا الكلاسيكية، فإن مساحة الانتظام التي تتجاوز فهم مثل هذا الوصف توفِّرها فقط الظروف التي تتطلب دراسة الظواهر التي تخضع لمبدأ المكاملة في إجراء تجارب حصرية متبادلة الترتيبات.

في الفيزياء الذرية، هناك ضرورة لفحصٍ متجددٍ لأساس الاستخدام الواضح للأفكار الفيزيائية الأولية تذكِّر بطريقة ما الحالة التي قادت أينشتاين إلى تنقيحه الأصلي على أساس كل تطبيقات مفاهيم الزمن والتموضع التي -من خلال التركيز على الأهمية الأساسية لمشكلة الرصد والملاحظة- قد أضفت هذه الوحدة على صورتنا عن الكون. على الرغم من كل حداثة النهج الذي يدعم الوصف السببي في النظرية النسبية في أي إطارٍ مرجعي معين، ولكن في نظرية الكمِّ، يجبرنا التفاعل غير القابل للسيطرة بين الجسيمات وأدوات القياس على التخلي عنها في هذا الإطار. ومع ذلك، فإنَّ هذا الاعتراف لا يشير بأي حالٍ من الأحوال إلى أي قيودٍ على نطاق وصف الميكانيك الكمومي، وكان اتجاه الحجة الكاملة المقدمة في محاضرة (كومو) هو إظهار أنَّ وجهة نظر مبدأ المكاملة يمكن اعتبارها تعميمًا عقلانيًّا للمثل العليا للسببية.

في المناقشة العامة لـ(كومو)، افتقدنا جميعًا حضورَ أينشتاين، ولكن بعد فترة وجيزة، في أكتوبر 1927، أتيحت لي الفرصة لمقابلته في بروكسل في المؤتمر الفيزيائي الخامس لمعهد سولفاي، الذي خُصِّص لموضوع «الإلكترونات والفوتونات». في اجتماعات سولفاي، كان أينشتاين منذ بدايتها شخصية بارزة، وقد حضر العديدُ منَّا المؤتمر بتوقعاتٍ كبيرة لمعرفة ردِّ

فعله على المرحلة الأخيرة من التطور، التي -في نظرنا- ذهبت بعيدًا في توضيح المشكلات التي كان قد أثارها بنفسه منذ البداية ببراعة. خلال المناقشات، رجع الموضوع بأكمله من خلال مساهماتٍ من العديد من الجهات وحيث قُدِّمت الحجج المذكورة في الصفحات السابقة مرة أخرى، أعرب أينشتاين عن قلقه العميق بشأن مدى التخلي عن التفسير السببي في التموضع والزمان في ميكانيكا الكمِّ.

لتوضيح موقفه، أشار أينشتاين في إحدى الجلسات إلى المثال البسيط، الموضح في (الشكل الأول)، لجسيم (إلكترون أو فوتون) يخترق ثقبًا أو فتحة ضيقة في الحجاب الحاجز الموضوعة على مسافة ما قبل لوحة فوتوغرافية. نظرًا لانحراف الموجة المرتبط بحركة الجسيم والمشار إليه في الشكل بالخطوط الرفيعة، فإنه في ظلِّ هذه الظروف لا يمكن التنبؤ على وجه اليقين عند أي نقطة سيصل الإلكترون إلى لوحة التصوير، ولكن فقط يمكن حساب احتمال وجود الإلكترون في أي تجربة داخل أي منطقة معينة من اللوحة. الصعوبة الواضحة في هذا الوصف التي شعر من (A) بها أينشتاين بشدة، هي حقيقة أنه إذا تمَّ تسجيل الإلكترون في التجربة عند نقطة واحدة على الرغم من ،(B) اللوحة، فهذا خارجٌ عن مسألة تأثير مراقبة هذا الإلكترون في نقطة أخرى أن قوانين انتشار الموجة العادية لا توفر مجالًا للارتباط بين حدثين من هذا القبيل.



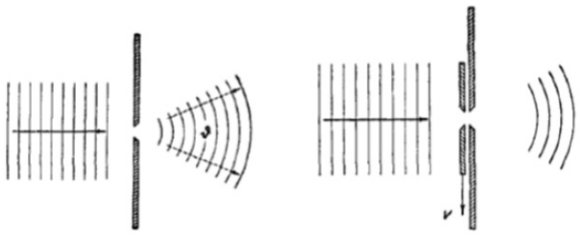
الشكل الأول

أدَّى موقف أينشتاين إلى ظهور نقاشاتٍ متحمسة داخل دائرة صغيرة، شارك فيها (إهرنفست)، الذي كان صديقًا مقرَّبًا إلينا على مرِّ السنين، بطريقة أكثر نشاطًا وإفادة. بالتأكيد، لقد أدركنا جميعًا، في المثال أعلاه، أنَّ الموقف لا يقدم أي نظيرٍ لتطبيق الإحصاء في التعامل مع الأنظمة الميكانيكية المعقدة، بل استدعى الخلفية لاستنتاجات أينشتاين المبكرة حول أحادية

الاتجاه لتأثيرات الإشعاع الفردية التي تتناقض بشدة مع صورة موجية بسيطة. ومع ذلك، ركَّزت المناقشات على مسألة ما إذا كان الوصف الميكانيكي الكمومي قد استنفد إمكانيات المحاسبة عن الظواهر التي يمكن ملاحظتها أو -كما أكد أينشتاين- يمكن مواصلة التحليل، وعلى وجه الخصوص، ما إذا كان الوصف الكامل للظواهر يمكن أن يكون كذلك. لقد حُصِل عليها من خلال مراعاة التوازن التفصيلي للطاقة والزخم في العمليات الفردية.

لشرح اتجاه حجج أينشتاين، نوضح هنا النظر في بعض الميزات البسيطة للقوة الدافعة وتوازن الطاقة فيما يتعلَّق بموقع الجسيم في التموضع والزمان. لهذا الغرض، يجب أن نفحص لفتح وإغلاق (shutter الغالق) الحالة البسيطة لجسيمٍ يخترق ثقبًا في الحاجز من دون أي الفتحة، كما هو موضح في الشكل الثاني (أ) و (ب) على التوالي. تشير الخطوط المتوازية المتساوية البعد إلى اليسار في الأشكال إلى قطار الموجات المستوية المقابلة لحالة حركة الجسيم في الثانية من σ متعلق بعدد الموجة p الذي -قبل الوصول إلى الحجاب الحاجز- لديه زخم المعادلة رقم (1) وفقًا لانحراف الموجات عند المرور عبر الفتحة، يمثل حالة حركة الجسيم على في حالة الشكل ،δ يمين الحاجز بواسطة قطار موجة كروي بفتحة زاوية محددة بشكلٍ مناسب Δp الثاني (ب)، مع امتدادٍ شعاعيٍ محدودٍ. وبالتالي، فإنَّ وصف هذه الحالة يتضمن خطًّا معينًا في مكون القوة الدافعة للجسيم الموازي للحاجز، وفي حالة الحاجز مع الغالق، هناك خطٌّ إضافي لـ الطاقة الحركية ΔE.

في موقع الجسيم في مستوى الحاجز يتم إعطاؤه بواسطة نصف Δq نظرًا لأن قياس خط للفتحة، وحيث إن $\delta \approx (1/a\sigma)$، نحصل، باستخدام المعادلة (1)، فقط على $\Delta p \approx \delta P \approx (h/\Delta q)$ a القطر وفقًا لعلاقة عدم التأكد في المعادلة (3). يمكن بالطبع الحصول على هذه النتيجة مباشرة من خلال ملاحظة أنه بسبب الامتداد المحدود لمجال الموجة في مكان الشق، فإنَّ مكون رقم الموجة $\Delta\sigma \approx (1/a) \approx (1/\Delta q)$. الموازي لمستوى الحاجز سيشمل خط



الشكل الثاني (ب) الشكل الثاني (أ)

وبالمثل، من الواضح أنَّ انتشار ترددات المكونات التوافقية في القطار الموجي المحدود في هو في الفاصل الزمني الذي يترك فيه الغالق الفتحة **Δt** الشكل الثاني (ب) هو $\Delta\upsilon \approx (1/\Delta t)$ ، حيث مفتوحة، وبالتالي يمثل خط وقت مرور الجسيم عبر الحاجز.

إذن، نستنتج من المعادلة (1) أن

$$\Delta E.\Delta t \approx h \qquad (4)$$

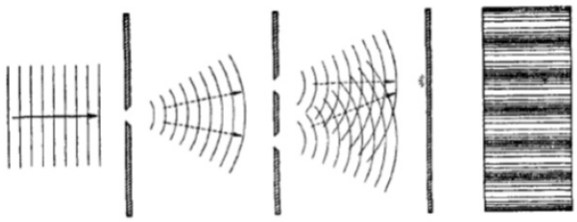
مرة أخرى وفقًا للعلاقة في المعادلة (3) للمتغيرين المترافقين

من وجهة نظر قوانين حفظ الطاقة، يمكن إرجاع أصل الخطوط التي تدخل في وصف **t.** و **E** حالة الجسيم بعد المرور عبر الفتحة إلى احتمالات القوة الدافعة وتبادل الطاقة مع الحاجز أو الغالق. في النظام المرجعي المدروس في الشكليْن الثاني (أ) و(ب)، قد نتجاهل سرعة الحاجز، بين الجسيم والحاجز. ومع ذلك، فإن **Δp** ويجب أن يؤخذ في الاعتبار فقط تغيير القوة الدافعة يتحرك بسرعة كبيرة $\upsilon \approx (a/\Delta t)$، وبالتالي فإن **Δt**، الغالق، الذي يترك الفتحة مفتوحة خلال الوقت يحتوي على تبادل للطاقة مع الجسيم، يصل إلى **Δp** نقل القوة الدافعة الموضح في ΔE $\upsilon\Delta p \approx (1/\Delta t)\Delta q\ \Delta p \approx (h/\Delta t)$، كونها من نفس الترتيب من حيث الحجم مثل الخط المعادلة (4)، وبالتالي السماح للقوة الدافعة والطاقة بالتوازن.

كانت المشكلة التي أثارها أينشتاين هي إلى أي مدى يمكن استخدام التحكم في القوى الدافعة ونقل الطاقة المتضمن في موقع الجسيم في التموضع والزمان، لمواصفاتٍ أخرى لحالة الجسيم بعد المرور عبر الثقب. يجب أن يُؤخذ في الاعتبار أنَّ موضعَ وحركة الحاجز والغالق يُفترض حتى الآن أنهما متسقان بدقة مع الإطار المرجعي للزمان والتموضع. يشير هذا الافتراض، في وصف حالة هذه الجسيمات، إلى خطٍّ أساسيٍّ فيما يتعلَّق بقوتها الدافعة وطاقتها التي لا تحتاج بالطبع إلى التأثير بشكلٍ ملحوظٍ على السرعات، إذا كان الحاجز والغالق ثقيلين بدرجة كافية. ومع ذلك، بمجرد أن نرغب في معرفة القوة الدافعة والطاقة لهذه الأجزاء من ترتيب القياس بدقة كافية للتحكُّم في القوة الدافعة وتبادل الطاقة مع الجسيم قيد التحقيق، فإننا وفقًا لعلاقات عدم التأكُّد، نفقد إمكانية تحديد موقعهم بدقة في التموضع والزمان، لذلك، علينا أن ندرس إلى أي مدى سيؤثر هذا الظرف على الاستخدام المقصود للترتيب بأكمله، وكما سنرى، فإن هذه النقطة الحاسمة تُبرز بوضوحٍ طابع الظاهرة الذي يخضع لمبدأ المكاملة.

بالعودة للحظة حالة الترتيب البسيط الموضح في الشكل الأول، لم يحدد الغرض منه حتى الآن. على افتراض أن الحاجز واللوحة لهما مواضع محددة جيدًا في الفراغ، فإنه من المستحيل ضمن إطار الصيغ الرياضية لميكانيكا الكم، إجراء تنبؤاتٍ أكثر تفصيلًا فيما يتعلق بالنقطة، ومع ذلك، نعترف بخطٍّ كبيرٍ بما فيه الكفاية بمعرفة موضع الحاجز، يجب أن يكون من الممكن -من حيث المبدأ- التحكم في نقل القوة الدافعة إلى الحاجز، وبالتالي تقديم تنبؤات أكثر تفصيلًا فيما يتعلَّق باتجاه مسار الإلكترون من ثقبٍ في نقطة التسجيل. فيما يتعلق بالوصف الميكانيكي الكمومي، علينا أن نتعامل هنا مع نظامٍ ثنائي الجسم يتكوَّن من الحاجز وكذلك من الجسيم، وهو مجرد تطبيقٍ صريحٍ لقوانين حفظ الطاقة على مثل هذا النظام الذي نهتم به، على سبيل المثال تأثير (كومبتون) حيث تسمح لنا مراقبة ارتداد الإلكترون عن طريق غرفة سحابية بالتنبؤ بالاتجاه الذي سيُلاحظ فيه الفوتون المبعثر في النهاية.

تجلَّت أهمية هذا النوع من الاعتبارات، في سياق المناقشات، بشكلٍ ممتعٍ أكثر من خلال فحص الترتيب حيث يتم إدخال الحاجز مع الشق ولوحة التصوير بغشاء آخر به شقَّان متوازيان، كما هو موضح في الشكل الثالث. إذا سقطت حزمة متوازية من الإلكترونات (أو الفوتونات) من اليسار على الحاجز الأول، فيجب علينا، في ظل الظروف المعتادة، أن نلاحظ على اللوحة نمطَ التداخل المشار إليه بواسطة تظليل اللوحة الفوتوغرافية الموضحة في المنظر الأمامي من الشكل. مع الحزم الثخينة (الثقيلة)، يُبنى هذا النمط من خلال تراكم عددٍ كبيرٍ من العمليات الفردية، كلٌّ منها يؤدي إلى ظهور بقعة صغيرة على لوحة التصوير، ويتبع توزيع هذه البقع قانونًا بسيطًا مشتقًا من تحليل الموجة. يجب أيضًا العثور على نفس التوزيع في الحساب الإحصائي للعديد من التجارب التي أجريت باستخدام حزمٍ باهتة جدًّا لدرجة أنه في تعريض واحد فقط إلكترون واحد (أو فوتون) سيصل إلى لوحة التصوير في مكانٍ ما كما هو موضح في الشكل كنجمٍ صغيرٍ. نظرًا لأنه كما هو موضح بواسطة الأسهم المكسورة، يجب أن تكون القوة الدافعة المنقولة إلى الحاجز الأول مختلفًا إذا كان من المفترض أن يمر الإلكترون عبر الفتحة العلوية أو السفلية في الحاجز الثاني، اقترح أينشتاين أن التحكم في نقل القوة الدافعة سيسمح بتحليل أعمق للظاهرة، وعلى وجه الخصوص لتحديد أي من الشقين قد مرَّ عبره الإلكترون قبل وصوله إلى اللوحة.



الشكل الثالث

ومع ذلك، أظهر الفحص الدقيق أنَّ التحكُّم المقترح في نقل القوة الدافعة سيشمل خطًّا في هي ω معرفة موضع الحاجز الذي يستبعد ظهور ظاهرة التداخل المعنية. في الواقع، إذا كانت الزاوية الصغيرة بين المسارات التخمينية لجسيمٍ يمرُّ عبر الشق العلوي أو السفلي، فإن hωσ الاختلاف في نقل القوة الدافعة في هاتين الحالتين، وفقًا للمعادلة(1)، سيكون مساويًا لـ ومع ذلك، أظهر الفحص الدقيق أن التحكم المقترح في نقل القوة الدافعة سيشمل خطًّا في معرفة موضع الحاجز الذي يستبعد ظهور ظاهرة التداخل المعنية. وأي عنصر تحكم سيشمل القوة الدافعة للحاجز بدقة كافية لقياس هذا الاختلاف، بسبب علاقة عدم التأكد، حدًّا أدنى لخط موضع إذا كان كما في الشكل، فإنَّ الحاجزَ ذا الفتحتين ستوضع .σω/الحاجز، يمكن مقارنته بـ 1 الشقوق في المنتصف بين الحاجز الأول ولوحة التصوير، وسوف يُلاحظ أنَّ عدد الأهداب لكل /وبما أن هناك عدم تأكد من موضع الحاجز الأول بمقدار 1 ،σω وحدة طول سيكون مساويًا لـ سيتسبب في عدم تأكد متساوٍ في مواضع الأطراف، ويترتب على ذلك أنه لا يمكن أن يظهر σω أيُّ تأثيرِ تداخلٍ. تظهر النتيجة نفسها بسهولة لأي وضعٍ آخر للحاجز الثاني بين الحاجز الأول واللوحة، ويمكن أيضًا الحصول عليها إذا استخدمت أجسامٌ أخرى من هذه الأجسام الثلاثة للتحكُّم في الغرض المقترح من نقل القوة الدافعة بدلًا من الحاجز الأول.

هذه النقطة لها نتيجة منطقية كبيرة، حيث إنها الظرف الوحيد فقط الذي يقدم لنا مع اختيار إما تتبُّع مسار الجسيم وإما مراقبة تأثيرات التداخل، مما يسمح لنا بالهروب من الضرورة المتناقضة لاستنتاج أن سلوك الإلكترون أو الفوتون يجب أن يعتمد على وجود شقٍّ في الحاجز يمكن إثبات عدم مروره من خلاله. علينا هنا أن نفعل بمثالٍ نموذجي لكيفية ظهور الظواهر التي تخضع لمبدأ المكاملة في ظل ترتيبات تجريبية متنافية، ونواجه للتوِّ -في تحليل التأثيرات الكمية- استحالة لرسم أي فصلٍ حادٍّ بين السلوك المستقل للأجسام الذرية وتفاعلها مع أدوات القياس التي تعمل على تحديد الظروف التي تحدث فيها الظواهر.

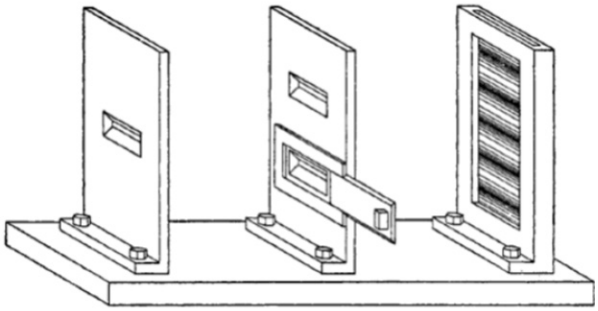
لقد تطرقت محادثاتنا حول الموقف الذي يجب اتخاذه في مواجهة موقفٍ جديدٍ فيما يتعلَّق بتحليل وتوليف التجربة بشكلٍ طبيعي إلى العديد من جوانب التفكير الفلسفي، ولكن على الرغم من جميع الاختلافات في النهج والرأي، فإنَّ الروح التي سادت كانت روح الدعابة وهي التي حركت المناقشات. من جانبه، سألنا أينشتاين ساخرًا عمَّا إذا كان بإمكاننا حقًّا أن نصدِّق أنَّ الله يلعب النرد

أجبته بالإشارة إلى الحذر الكبير، الذي دعا إليه بالفعل ،("obder Ziebe Gott wiirfelt .."
المفكرون القدامى، في إسناد الصفات إلى الله بلغة يومية (لا تملي على الله ماذا يفعل). أتذكر أيضًا كيف في ذروة المناقشة، ألمح (إهرنفست)، بأسلوبه الحنون في إغاظة أصدقائه، مازحًا إلى التشابه الظاهري بين موقف أينشتاين وموقف معارضي نظرية النسبية؛ ولكن على الفور أضاف (إهرنفست) أنه لن يكون قادرًا على الشعور بالراحة الذهنية قبل التوصل إلى اتفاق مع أينشتاين.

قدَّم قلق أينشتاين وانتقاده حافزًا أكثر قيمة إلينا جميعًا لإعادة فحص الجوانب المختلفة للموقف فيما يتعلَّق بوصف الظواهر الذرية. بالنسبة إليَّ كان حافزًا مرحبًا به لزيادة توضيح الدور الذي تلعبه أدوات القياس، ومن أجل إبراز الطابع الحصري المتبادل للظروف التجريبية التي تظهر فيها الظواهر التي تخضع لمبدأ المكاملة، حاولتُ في تلك الأيام رسمَ أشكالٍ مختلفة لجهازٍ بأسلوب الواقعية الزائفة، التي تمثل الأشكال التالية أمثلة عليه.

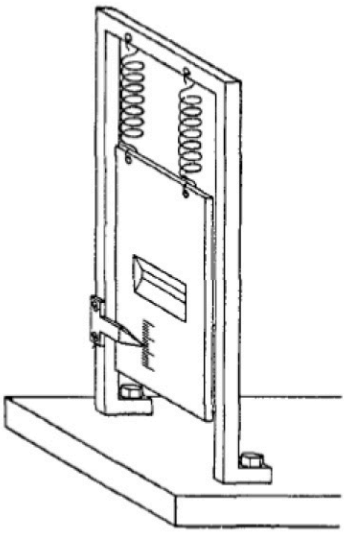
وبالتالي، من أجل دراسة ظاهرة التداخل (من النوع الموضح في الشكل الثالث) تقترح نفسها لاستخدام ترتيبٍ تجريبيٍّ مثل ذلك الموضح في الشكل الرابع، حيث تعمل الأجزاء الصلبة من الجهاز كأغشية وحاملٍ للوحة، مثبتة بقوة في دعمٍ مشتركٍ. في مثل هذا الترتيب، حيث يتم تأمين معرفة المواضع النسبية للأغشية ولوحة التصوير من خلال اتصالٍ صارمٍ، من الواضح أنه من المستحيل التحكُّم في القوة الدافعة المتبادلة بين الجسيم والأجزاء المنفصلة للجهاز. الطريقة الوحيدة التي يمكننا من خلالها، في مثل هذا الترتيب ضمان مرور الجسيم عبر أحد الشقوق في الحاجز الثاني هي تغطية الشق الآخر بغطاء، كما هو موضح في الشكل. ولكن إذا كان الشقُّ مغطى، فليس هناك بالطبع أي مسألة تتعلق بظاهرة تداخل، وعلى اللوحة سنلاحظ ببساطة توزيعًا مستمرًّا كما في حالة الحاجز الثابت المفرد في الشكل الأول.

في دراسة الظواهر التي نتعامل من خلالها مع توازن القوة الدافعة التفصيلية، يجب بشكلٍ طبيعيٍ إعطاء أجزاء معينة من الجهاز بأكمله حرية التحرُّك بشكلٍ مستقلٍ عن الآخرين، مثل هذا الجهاز مرسومٌ في الشكل الخامس، حيث يوجد حاجزٌ مع الشق يعلق بواسطة نوابض ضعيفة من نير صلب مثبت بمسامير إلى الدعم الذي يجب أيضًا تثبيت الأجزاء الثابتة الأخرى من الترتيب عليه.



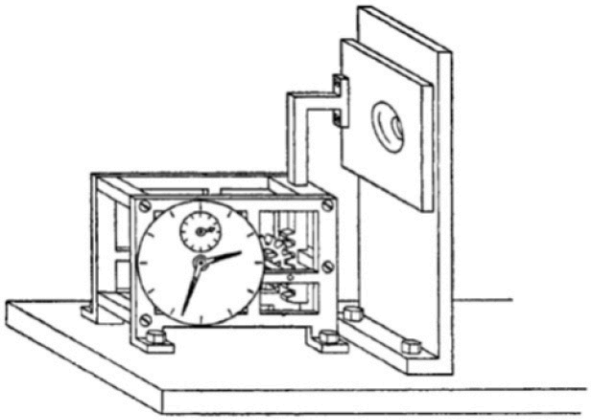
الشكل الرابع

يشير المقياس الموجود على الحاجز مع المؤشر الموجود على محامل النير إلى هذه الدراسة لحركة الحاجز، كما قد يكون مطلوبًا لتقدير القوة الدافعة المنقول إليها، مما يسمح للمرء باستخلاص استنتاجاتٍ فيما يتعلَّق بالانحراف الذي عانى منه بواسطة الجسيم في المرور عبر الشق. ومع ذلك، نظرًا لأن أيَّ قراءة للمقياس، بأي طريقة يتم إجراؤها، ستشمل تغييرًا لا يمكن السيطرة عليه في القوة الدافعة للحاجز، فستكون هناك دائمًا -وفقًا لمبدأ عدم التحديد- علاقة متبادلة بين معرفتنا بموقف شق ودقة التحكُّم في القوة الدافعة.



الشكل الخامس

في نفس النمط شبه الجاد، يمثِّل الشكل السادس جزءًا من ترتيبٍ مناسبٍ لدراسة الظواهر التي -على عكس تلك التي تمَّت مناقشتها للتوّ- تتضمن تنسيقًا زمنيًّا صريحًا. يتكون المغلاق من مغلاقٍ متصلٍ بشكلٍ صارمٍ بساعة قوية تستند إلى الدعم الذي يحمل الحاجز، التي يجب أيضًا إصلاح أجزاء أخرى من نفس الطابع، والتي تنظم بواسطة نفس عمل الساعة أو بواسطة ساعات أخرى موحدة نسبيًّا لها الهدف الخاص من الشكل هو التأكيد على أن الساعة هي قطعة من الآلات، لا يمكن أن يتأثر عملُها بقراءة موضع عقاربها ولا بالتفاعل بين ملحقاتها والجسيم الذري. في تأمين فتح الثقب في لحظة محددة، يمكن استخدام جهازٍ من هذا النوع، على سبيل المثال، لقياسٍ دقيقٍ للوقت الذي يستغرقه الإلكترون أو الفوتون للانتقال من الحاجز إلى مكانٍ آخر، ولكن من الواضح، لن يترك أي إمكانية للتحكُّم في نقل الطاقة إلى المغلاق بهدف استخلاص النتائج فيما يتعلق بطاقة الجسيم التي مرَّت عبر الحاجز. إذا كنَّا مهتمين بمثل هذه الاستنتاجات، فيجب علينا استخدام ترتيبٍ حيث لن تعمل أجهزة المغلاق كساعاتٍ دقيقة، ولكن حيث تتضمن معرفة اللحظة التي يكون فيها الثقب في الحاجز مفتوحًا سيكون خطًّا مرتبطًا بالدقة من قياس الطاقة بالعلاقة العامة في المعادلة (4).



الشكل السادس

لقد أثبت التفكير في مثل هذه الترتيبات العملية إلى حدٍّ ما واستخدامها الوهمي إلى حدٍّ ما أنه مفيدٌ للغاية في توجيه الانتباه إلى السمات الأساسية للمشكلات. النقطة الرئيسة هنا هي التمييز بين الأشياء قيد البحث وأدوات القياس التي تعمل على تحديد الظروف التي تظهر من خلالها الظواهر بالمصطلحات الكلاسيكية. بالمناسبة قد نلاحظ أنه لتوضيح الاعتبارات السابقة، ليس من

المناسب أن تكون التجارب التي تتضمن تحكُّمًا دقيقًا في القوة الدافعة أو نقل الطاقة من الجسيمات الذرية إلى الأجسام الثقيلة مثل الأغشية والمغاليق صعبة للغاية، إذا كان ذلك ممكنًا. من الحاسم فقط، على عكس أدوات القياس المناسبة، أن تشكِّل هذه الأجسام مع الجسيمات في مثل هذه الحالة النظامَ الذي يجب تطبيق الصيغ الرياضية الكمومية عليه. فيما يتعلَّق بتحديد الشروط لأي تطبيقٍ محددٍ جيدًا للصيغة الرياضية، من الضروري أيضًا أن يؤخذ في الحسبان الجزء التجريبي كاملًا. قد يشير إدخال أي قطعة أخرى من الجهاز -مثل المرآة- في طريق الجسيم إلى تأثيرات تداخلٍ جديدة تؤثِّر بشكلٍ أساسي في التنبؤات فيما يتعلَّق بالنتائج التي ستُسجل في النهاية.

إن المدى الذي يفترض فيه التخلي عن تصور الظواهر الذرية علينا من خلال استحالة تقسيمها يتضح بشكلٍ لافتٍ للنظر من خلال المثال التالي الذي لفت إليه أينشتاين الاهتمام مبكرًا، وغالبًا ما أعيد طرحه. إذا وضعت مرآة شبه عاكسة في طريق الفوتون، مما يترك احتمالين لاتجاه انتشاره، فيمكن تسجيل الفوتون إما على لوحٍ واحدٍ، وواحد فقط، من لوحين فوتوغرافيين يقعان على مسافاتٍ كبيرة في الاتجاهين في المسألة، وإلا فيمكننا من خلال استبدال الصفائح بالمرايا، ملاحظة التأثيرات التي تظهر تداخلًا بين قطاري الموجة المنعكسين. في أي محاولة لتمثيل تصويري لسلوك الفوتون، سنواجه الصعوبة التالية: أن نكون مضطرين إلى القول، من ناحية، أنَّ الفوتون يختار دائمًا إحدى الطريقتين، ومن ناحية أخرى، تتصرف كما لو كانت قد مرَّت في كلا الاتجاهين.

إنَّ مجرد حججٍ من هذا النوع هي التي تذكر باستحالة تقسيم الظواهر الكمية، وتكشف الغموض في عزو السمات الفيزيائية العادية للأجسام الذرية. على وجه الخصوص، يجب أن ندرك أنه -إلى جانب حساب وضع وتوقيت الأدوات التي تشكل الترتيب التجريبي- يقتصر كلُّ استخدامٍ لا لبس فيه لمفاهيم الزمن والتموضع في وصف الظواهر الذرية على تسجيل الملاحظات التي تشير إلى علاماتٍ على لوحة فوتوغرافية أو تأثيراتٍ تضخيم مماثلة عمليًّا لا رجعة فيها مثل بناء قطرة ماء حول أيون في غرفة سحابة. على الرغم من أنَّ وجود الفعل الكمومي هو المسؤول في النهاية عن خصائص المواد التي تُبنى عليها أدوات القياس التي يعتمد عليها عمل أجهزة التسجيل، فإنَّ هذا الظرف غير ذي صلة بمشكلات الكفاية واكتمال الوصف الميكانيكي الكمومي في جوانبه التي تمت مناقشتها هنا.

تمَّ التعليق على هذه المشكلات بشكلٍ توجيهي من جهاتٍ مختلفة في اجتماع سولفاي، في نفس الجلسة حيث أثار أينشتاين اعتراضاته العامة. في تلك المناسبة، نشأ أيضًا نقاشٌ مثيرٌ للاهتمام حول كيفية التحدُّث عن ظهور الظواهر التي لا يمكن من أجلها سوى التنبؤ بالطابع الإحصائي. كان السؤال هو ما إذا كان ينبغي، فيما يتعلَّق بحدوث التأثيرات الفردية، أن نتبنَّى مصطلحًا اقترحه (ديراك)، أنَّنا كنَّا معنيين باختيارٍ من جانب «الطبيعة» أو كما اقترح هايزنبرج: ينبغي أن نقول إنَّه يتعيَّن علينا القيام باختيار من جانب «المراقب» في بناء أدوات القياس وقراءة تسجيلاتها. ومع ذلك، فإنَّ أي مصطلحٍ من هذا القبيل قد يبدو مشكوكًا فيه لأنه، من ناحية، ليس من المعقول منح الطبيعة إرادة بالمعنى العادي، بينما من ناحية أخرى لا يمكن للمراقب بالتأكيد التأثير على الأحداث التي قد تظهر في ظل الظروف التي رتَّبها. في رأيي، لا يوجد بديلٌ آخر سوى الاعتراف بأننا في مجال التجربة هذا، نتعامل مع ظواهر فردية، وأن إمكانياتنا في التعامل مع أدوات القياس تسمح لنا فقط بالاختيار بين الأنواع التي تخضع لمبدأ المكاملة المختلفة للظواهر التي نتعامل معها والتي نرغب في دراستها.

علمنا على المشكلات المعرفية التي تطرقنا إليها هنا بشكلٍ أكثر وضوحًا في مساهمتي في احتفالًا بعيد ميلاد (بلانك) السبعين في عام (Naturwissenschaften) -قضية (علوم الطبيعة 1929. في هذه المقالة، قارنتُ بين الدرس المستمدُّ من اكتشاف الفعل الكمومي الكوني والتطور الذي أعقب اكتشاف السرعة المحدودة للضوء الذي -من خلال عمل أينشتاين الرائد- أوضح بشكلٍ كبيرٍ المبادئ الأساسية للفلسفة الطبيعية.

في النظرية النسبية، فتح التركيز على اعتماد جميع الظواهر على الإطار المرجعي طرقًا جديدة تمامًا لتتبُّع القوانين الفيزيائية العامة ذات النطاق غير المسبوق. في نظرية الكمِّ، قيل إنَّ الفهم المنطقي للنظم الأساسية غير المتوقعة حتى الآن التي تحكم الظواهر الذرية يتطلَّب الاعتراف بأنه لا يمكن الفصل الحاد بين السلوك المستقل للأشياء وتفاعلها مع أدوات القياس التي تحدد الإطار المرجعي.

في هذا الصدد، قدَّمت لنا نظرية الكمِّ وضعًا جديدًا في العلوم الفيزيائية، لكنها وجهت الانتباه إلى التشابُه الوثيق للغاية مع الموقف فيما يتعلَّق بالتحليل وتوليف التجربة، والتي نلتقي بها في العديد من المجالات الأخرى للمعرفة البشرية. إن العديدَ من الصعوبات في علم النفس تنشأ من اختلاف وضع خطوط الفصل بين موضوع وموضوع في تحليل الجوانب المختلفة للتجربة

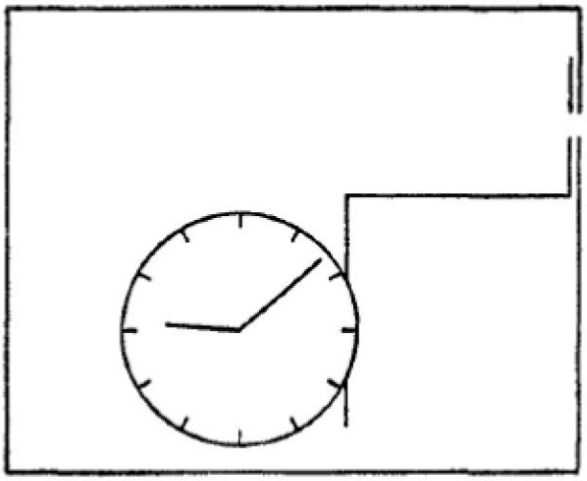
النفسية. في الواقع، تستخدم كلماتٌ مثل «الأفكار» و «المشاعر»، التي لا غنى عنها بنفس القدر لتوضيح تنوع نطاق الحياة الواعية، بطريقة خاضعة لمبدأ المكاملة مماثلة مثل تنسيق الزمن والتموضع وقوانين حفظ الديناميكا في الفيزياء الذرية. تتضمن الصياغة الدقيقة لمثل هذه المقارنات تعقيدات المصطلحات، وربما يكون من الأفضل الإشارة إلى موقف الكاتب في فقرة في المقالة، مما يشير إلى العلاقة الحصرية المتبادلة التي ستظل موجودة دائمًا بين الاستخدام العملي لأي كلمة ومحاولات تعريفها الدقيق. كان الهدف الرئيس من هذه الاعتبارات -التي كان أقلُّها إلهامًا الأمل في التأثير على موقف أينشتاين- هو الإشارة إلى منظور جلب المشكلات المعرفية العامة إلى التخفيف من خلال درس مستمدٍّ من دراسة جديدة ولكنها بسيطة أساسًا في التجربة الفيزيائية.

في الاجتماع التالي مع أينشتاين في مؤتمر سولفاي في عام 1930، اتَّخذت مناقشاتنا منعطفًا دراماتيكيًّا. كاعتراضٍ على الرأي القائل بأنَّ التحكُّم في تبادل القوة الدافعة والطاقة بين الأشياء وأدوات القياس قد استبعد إذا كان يجب أن تخدم هذه الأدوات غرضها المتمثِّل في تحديد إطار الزمن والتموضع للظاهرة، طرح أينشتاين الحجة القائلة بأنَّ هذا التحكُّم ممكنٌ عندما تتخذ مقتضيات نظرية النسبية في الاعتبار. على وجه الخصوص، يجب أن تسمح العلاقة العامة بين الطاقة والكتلة، المعبَّر عنها في صيغة أينشتاين الشهيرة، عن طريق الوزن البسيط، بقياس الطاقة الإجمالية لأي نظامٍ، وبالتالي، من حيث المبدأ، للتحكمُّ في الطاقة المنقولة إليه عندما يتفاعل مع جسيمٍ ذري.

$$E = mc^2 \qquad (5)$$

كترتيبٍ مناسبٍ لهذا الغرض، اقترح أينشتاين الجهاز المشار إليه في الشكل السابع، ويتألَّف من صندوقٍ به ثقبٌ في جانبه، الذي يمكن فتحه أو إغلاقه بواسطة مغلاقٍ يتحرك بواسطة ساعة عملٍ داخل الصندوق. إذا احتوى الصندوق، في البداية، على قدرٍ معينٍ من الإشعاع، وتمَّ ضبطُ الساعة على فتح المغلاق لفترة قصيرة جدًّا في وقتٍ محددٍ، فيمكن التحقق من أنَّ فوتونًا واحدًا قد أطلق من خلال الثقب في لحظة معروفة بدقة كبيرة حسب الرغبة. علاوة على ذلك، يبدو أنه من الممكن أيضًا، من خلال وزن الصندوق بالكامل قبل وبعد هذا الحدث، قياس طاقة الفوتون بأي دقة مطلوبة، في تناقضٍ واضحٍ مع عدم التحديد المتبادل للوقت وكميات الطاقة في ميكانيكا الكمِّ. كانت هذه الحجة بمثابة تحدٍّ خطيرٍ، وأدَّت إلى فحصٍ شاملٍ للمشكلة برمَّتها. في نتيجة

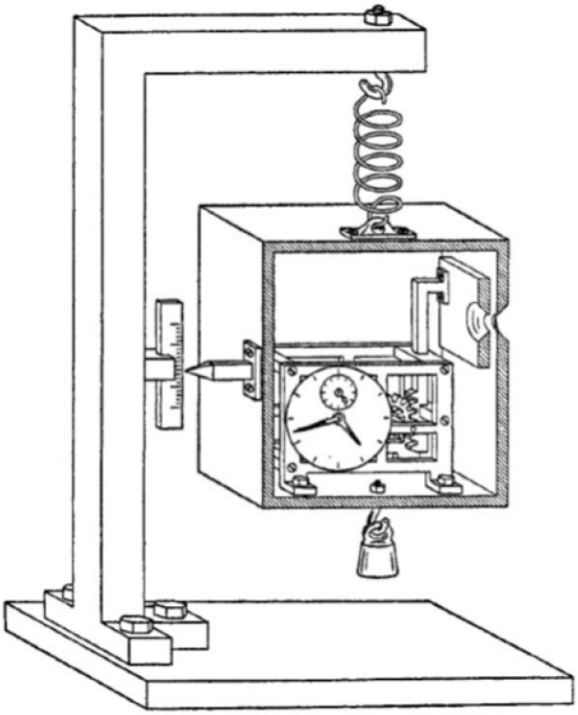
المناقشة، التي ساهم فيها أينشتاين نفسه بشكلٍ فعَّالٍ، أصبح من الواضح، أنَّ هذه الحجة لا يمكن دعمُها.



الشكل السابع

عند النظر إلى المشكلة، وجد أنه من الضروري النظر من كثبٍ إلى عواقبَ تحديد القصور الذاتي وكتلة الجاذبية المتضمنة في تطبيق العلاقة في المعادلة (5). على وجه الخصوص، كان من الضروري مراعاة العلاقة بين معدل الساعة وموقعها في مجال الجاذبية -المعروف جيدًا من التحول الأحمر للخطوط في طيف الشمس- الذي يتبع مبدأ أينشتاين للتكافؤ بين تأثيرات الجاذبية والظواهر التي لوحظت في تسريع الأطر المرجعية.

ركزَّت مناقشتُنا على التطبيق المحتمل لجهازٍ يتضمن جهاز أينشتاين والمرسوم في الشكل الثامن بنفس الأسلوب الواقعي الزائف مثل بعض الأشكال السابقة.



الشكل الثامن

الصندوق، الذي يظهر قسمٌ منه لعرض الجزء الداخلي منه، معلَّقٌ في ميزانٍ نابضٍ ومجهزٍ بمؤشر لقراءة موضعه على مقياسٍ مثبت على دعامة الميزان. وبالتالي يمكن إجراء وزن عن طريق ضبط الميزان إلى موضعه الصفري عن طريق الأحمال Δm الصندوق بأي دقة معينة سيشمل حدًّا Δq المناسبة. النقطة الأساسية الآن هي أنَّ أي تحديدٍ لهذا الموضع بدقة معينة بواسطة العلاقة الموضحة Δq في التحكم في القوة الدافعة للصندوق المتصل بـ Δp أدنى لخط في المعادلة (3). من الواضح أنَّ هذا الخط يجب أن يكون مرة أخرى أصغر من النبضة الكلية الكاملة لإجراء الموازنة، يمكن إعطاؤها بواسطة مجال الجاذبية لجسم كتلته T التي، خلال الفترة Δm ويمكن صياغتها في المعادلة:

$$\Delta p \approx \frac{h}{\Delta q} < T.g.\,\Delta m \qquad (6)$$

كلما توجب أن يكون فاصل q، هو ثابت الجاذبية. كلما زادت دقة قراءة المؤشر g حيث إذا حصلنا على دقة معينة من وزن الصندوق مع محتواه. الآن، وفقًا T، الموازنة الأطول ستغيَّر معدلُها Δq، لنظرية النسبية العامة، عند إزاحة الساعة في اتجاه قوة الجاذبية بمقدار تعطى بالعلاقة ΔT بمقدار T بحيث تختلف قراءتها خلال فترة زمنية:

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{1}{C^2} g \, \Delta q \qquad (7)$$

بمقارنة المعادلتين (6) و (7)، نرى أنَّه بعد إجراء الوزن سيكون هناك خط حسب معرفتنا لتعديل الساعة:

$$\Delta T > \frac{h}{\Delta m \, C^2}$$

بجمعها مع الصيغة في المعادلة (5) نحصل على المعادلة التالية:

$$\Delta T. \, \Delta E > h،$$

وفقًا لمبدأ عدم التأكد، فإنَّ استخدام الجهاز كوسيلة لقياس طاقة الفوتون بدقة سيمنعنا من التحكُّم في لحظة هروبه. إنَّ المناقشة، التي توضِّح قوة واتساق الحجج النسبية، أكدت مرة أخرى ضرورة التمييز، في دراسة الظواهر الذرية، بين أدوات القياس المناسبة التي تعمل على تحديد الإطار المرجعي، وتلك الأجزاء التي يجب النظر إليها كجسيماتٍ قيد التحقيق وفي حساب التأثيرات الكمية. لا يمكن تجاهله، على الرغم من التأكيد الأكثر إيحاءً لسلامة والنطاق الواسع لطريقة الوصف الميكانيكي الكمومي، إلا أن أينشتاين، في محادثة لاحقة معي، عبَّر عن شعوره بالقلق فيما يتعلَّق بالنقص الواضح في المبادئ الموضوعة بحزمٍ لـ «شرح الطبيعة»، حيث يمكن أن يتفق الجميع.

ومع ذلك، من وجهة نظري، لا يمكنني إلا أن أجيب عن أنَّه عند التعامُل مع مهمة تنظيم مجالٍ جديدٍ تمامًا من التجربة، يصعب علينا الوثوق بأي مبادئ معتادة، مهما كانت واسعة، بصرف النظر عن مطلب تجنُّب التناقضات المنطقية، ومن المؤكد أنَّ الشكلية الرياضية لميكانيكا الكمِّ يجب أن تلبي جميع المتطلبات.

كان اجتماع سولفاي في عام 1930 هو المناسبة الأخيرة للمناقشات المشتركة مع أينشتاين، يمكننا الاستفادة من التأثير المحفِّز والوسيط لـ(إهرنفست)، ولكن قبل وقتٍ قصيرٍ من وفاتِه المؤسفة للغاية في عام 1933، أخبرني أن أينشتاين كان بعيدًا عن الرضا، وقد حدّدت الحدة المعتادة جوانب جديدة من الموقف عزَّزت موقفه النقدي. من خلال مزيدٍ من الدراسة لإمكانيات تطبيق ترتيب التوازن، أدرك أينشتاين إجراءاتٍ بديلة -حتى لو لم تسمح بالاستخدام الذي كان يقصده في الأصل- والتي قد تبدو أنها تعزز المفارقات بما يتجاوز احتمالات الحل المنطقي. وهكذا، أشار أينشتاين إلى أنَّه بعد قياس الوزن الأوَّلي للمربع بالساعة، والهروب اللاحق

للفوتون، لا يزال المرء متروكًا لاختيار إما إعادة قياس الوزن وإما فتح الصندوق ومقارنة قراءة الساعة مع مقياس الوقت القياسي. وبالتالي، ما زلنا في هذه المرحلة أحرارًا في اختيار ما إذا كنَّا نريد استخلاص استنتاجات إما حول طاقة الفوتون وإما حول اللحظة التي غادر فيها الصندوق. من دون التدخل بأي شكلٍ من الأشكال في الفوتون بين هروبه وتفاعله اللاحق مع أدوات القياس المناسبة الأخرى، فنحن قادرون على إجراء تنبؤاتٍ دقيقة تتعلَّق إما بلحظة وصوله وإما بكمية الطاقة المحرَّرة من خلال امتصاصه. نظرًا لأنه، وفقًا للصيغة الرياضية لميكانيكا الكمِّ لا يمكن أن تتضمن مواصفات حالة الجسيم المعزول ارتباطًا محددًا جيدًا بمقياس الوقت وتثبيتًا دقيقًا للطاقة، فقد يبدو الأمر كما لو أنَّ هذه الصيغة الرياضية لا تقدِّم وسائلَ الوصف المناسب.

مرة أخرى، أثارت روح البحث لدى أينشتاين جانبًا غريبًا من الموقف في نظرية الكمِّ، الذي أوضح بطريقة مدهشة إلى أي مدى تجاوزنا هنا التفسير التقليدي للظواهر الطبيعية، ومع ذلك، لم أستطع أن أتفق مع اتجاه ملاحظاته كما أوردها (إهرنفست).

في رأيي، لا يمكن أن تكون هناك طريقة أخرى لاعتبار الشكليات الرياضية المتسقة منطقيًّا غير كافية من خلال إظهار خروج عواقبها عن التجربة أو من خلال إثبات أن تنبؤاتها لم تستنفد إمكانيات الملاحظة والرصد، ويمكن توجيه حجة أينشتاين إلى أيٍّ من هذه الغايات. في الواقع، يجب أن ندرك أننا في المشكلة المعنية لا نتعامل مع ترتيبٍ تجريبيٍّ واحدٍ محددٍ، لكننا نشير إلى ترتيبين مختلفين متعارضين. الأول، يستخدم الميزان مع قطعة أخرى من الجهاز مثل مقياس الطيف لدراسة نقل الطاقة بواسطة الفوتون؛ أما الأخير يستخدم مغلاقًا تنظمه ساعة معيارية مع جهازٍ آخر من نفس النوع، يتم توقيته بدقة نسبيًّا للساعة، لدراسة وقت انتشار الفوتون على مسافة معينة، في هاتين الحالتين، كما افترض أينشتاين أيضًا، من المتوقع أن تكون التأثيرات الملحوظة متوافقة تمامًا مع تنبؤات النظرية.

تؤكد المشكلة مرة أخرى ضرورة النظر في الترتيب التجريبي بأكمله، الذي يعد تحديده أمرًا ضروريًّا لأي تطبيقٍ محددٍ جيدًا للصيغة الرياضية لميكانيكيا الكمِّ. بالمناسبة، يمكن أن نضيف أنَّ المفارقات من النوع الذي تصوره أينشتاين توجد أيضًا في مثل هذه الترتيبات البسيطة كما هو موضحٌ في الشكل الخامس. في الواقع، بعد القياس الأوَّلي للقوة الدافعة للحاجز، عرض علينا مبدئيًّا الاختيار، عندما يمر إلكترون أو فوتون عبر الشق، إما لتكرار قياس القوة الدافعة وإما

للتحكم في موضع الحاجز، وبالتالي لعمل تنبؤات تتعلق بملاحظاتٍ بديلة لاحقة. قد يُضاف أنه من الواضح لا يمكن أن يحدث فرقًا فيما يتعلق بالتأثيرات التي يمكن ملاحظتها التي يمكن الحصول عليها من خلال ترتيبٍ تجريبيّ محددٍ، سواء أصلحت خططنا لبناء أو التعامل مع الأدوات مسبقًا أو ما إذا كنَّا نفضل تأجيل إكمال تخطيطنا إلى وقتٍ لاحقٍ للحظة التي يكون الجسيم في طريقه بالفعل من أداة إلى أخرى.

في الوصف الميكانيكي الكمومي تجد حريتنا في بناء ومعالجة الترتيب التجريبي تعبيرها الصحيح في إمكانية اختيار المعلمات المحددة بشكلٍ كلاسيكي التي تدخل في أي تطبيقٍ مناسبٍ للصيغ الرياضية. تُظهر ميكانيكا الكمِّ في جميع هذه النواحي تطابقًا مع الحالة المألوفة في الفيزياء الكلاسيكية، التي تكون أقرب ما يمكن عند النظر إلى الفردية المتأصلة في الظواهر الكمومية. فقط في المساعدة على إبراز هذه النقطة بوضوحٍ شديدٍ، كان اهتمام أينشتاين مرة أخرى حافزًا مرحبًا به لاستكشاف الجوانب الأساسية للموقف.

كان اجتماع سولفاي التالي في عام 1933 مخصَّصًا لمشاكل بنية وخصائص الأنوية الذرية، في أي مجال أحرز تقدُّمًا كبيرًا في تلك الفترة فقط بسبب الاكتشافات التجريبية، وكذلك التطبيقات المثمرة الجديدة لميكانيكا الكمِّ. في هذا الصدد، من الصعب أن نتذكر أن الأدلة التي حصلنا عليها من خلال دراسة التحولات النووية الرسمية أعطت اختبارًا مباشرًا لقانون أينشتاين الأساسي فيما يتعلق بتكافؤ الكتلة والطاقة، الذي كان لإثبات أنه دليلٌ مهمٌّ دائمًا للبحوث في المجال النووي الفيزيائي. يمكن الإشارة أيضًا إلى كيفية تأكيد إدراك أينشتاين البديهي للعلاقة الحميمة بين قانون التحولات الإشعاعية وقواعد الاحتمال التي تحكم تأثيرات الإشعاع الفردية من خلال التفسير الميكانيكي الكمومي للتفكك النووي العفوي. نحن هنا نتعامل مع مثالٍ نموذجي للوصف الإحصائي، والعلاقة التي تخضع لمبدأ المكاملة بين الحفاظ على القوة الدافعة للطاقة والتنسيق بين الزمان والتموضع تظهر بشكلٍ لافتٍ للنظر في المفارقة المعروفة لاختراق الجسيمات من خلال الحواجز المحتملة.

لم يحضر أينشتاين نفسه هذا الاجتماع، الذي عُقد في وقت أظلمته التطورات المأساوية في العالم السياسي والتي كان من المفترض أن تؤثر على مصيره بعمقٍ، وتضيف بشكلٍ كبيرٍ إلى أعبائه في خدمة الإنسانية. قبل بضعة أشهر، في زيارة إلى برينستون حيث كان أينشتاين حينها ضيفًا على معهد الدراسات المتقدمة الذي أُنشئ حديثًا، والذي انضم إليه بعد فترة وجيزة بشكلٍ

دائمٍ، ومع ذلك، أتيحت لي الفرصة للتحدث معه مرة أخرى حول الجوانب المعرفية للفيزياء الذرية، لكن الاختلاف بين طريقتنا في النهج والتعبير لا يزال يمثل عقباتٍ أمام التفاهم المتبادل. بينما شارك عددٌ قليلٌ نسبيًّا من الأشخاص في المناقشات المذكورة في هذه المقالة، فإن موقف أينشتاين النقدي تجاه وجهات النظر حول نظرية الكمِّ التي يلتزم بها العديدُ من الفيزيائيين قد لفت انتباه الجمهور بعد فترة وجيزة من خلال ورقة بحثية بعنوان «هل يمكن اعتبار وصف الميكانيكي الكمومي للواقع المادي مكتملًا؟»، المنشور في 1935 من قبل أينشتاين و(بودولسكي) و(روزين).

يستند الجدل في هذه الورقة البحثية إلى معيارٍ يعبِّر عنه المؤلفون في الجملة التالية: «إذن، من دون إزعاج نظام بأي شكلٍ من الأشكال، يمكننا أن نتنبَّأ على وجه اليقين (أي مع احتمال يساوي الوحدة) بقيمة كمية مادية، إذن يوجد عنصرٌ من الواقع المادي يتوافق مع هذه الكمية المادية».

من خلال العرض الأنيق لعواقب الصيغة الرياضية الكمومية فيما يتعلَّق بتمثيل حالة النظام، التي تتكوَّن من جزأيْن كانا متفاعليْن لفترة زمنية محدودة، يتضح بعد ذلك أنَّ الكميات المختلفة، تثبت تلك التي لا يمكن دمجها في تمثيل أحد الأنظمة الجزئية، يمكن مع ذلك التنبؤ بها من خلال القياسات المتعلقة بالنظام الجزئي الآخر. وفقًا لمعيارهم، استنتج المؤلفون أنَّ ميكانيكا الكم لا «تقدِّم وصفًا كاملًا للواقع المادي»، ويعبرون عن اعتقادهم أنَّه من الممكن تطوير تفسير أكثر ملاءمة للظواهر.

نظرًا للوضوح والطابع الذي لا جدال فيه على ما يبدو للحجة، أحدثت ورقة أينشتاين و(بودولسكي) و(روزين) ضجة بين علماء الفيزياء، ولعبت دورًا كبيرًا في المناقشة الفلسفية العامة، من المؤكد أنَّ القضية ذات طابعٍ دقيقٍ للغاية، ومناسبة للتأكيد على المدى الذي نتخذه، في نظرية الكمِّ، بعيدًا عن متناول التصور التصويري. ومع ذلك، سيتبيَّن أنَّنا نتعامل هنا مع مشاكل من النوع نفسه تمامًا مثل تلك التي أثارها أينشتاين في المناقشات السابقة، وفي مقالٍ ظهر بعد بضعة أشهر، حاولتُ إظهارَ ذلك من وجهة نظر مبدأ المكاملة، لإزالة التناقضات الظاهرة تمامًا.

كان اتجاه الجدل من حيث الجوهر هو نفسه الذي كُشِف عنه في الصفحات السابقة، لكن الهدف من التذكير بالطريقة التي نوقشت بها الحالة في ذلك الوقت قد يكون اعتذارًا عن

الاستشهاد بمقاطع معينة من مقالتي. وهكذا، بعد الإشارة إلى الاستنتاجات التي توصَّل إليها (أينشتاين) و(بودولسكي) و(روزين) على أساس معيارهم، كتبتُ:

«إنَّ مثل هذه الحجة لا تكاد تبدو مناسبة للتأثير على سلامة الوصف الميكانيكي الكمومي، الذي يعتمد على شكلياتٍ رياضية متماسكة تغطي تلقائيًّا أيَّ إجراء قياس مثل تلك المشار إليها. لا يكشف التناقض الواضح في الواقع إلا عن عدم ملاءمة أساسية لوجهة النظر التقليدية للفلسفة الطبيعية للتفسير العقلاني للظواهر الفيزيائية من النوع الذي نهتم به في ميكانيكا الكمِّ. في الواقع، يستلزم التداخُل المحدود بين الشيء وأجهزة القياس المشروط بوجود الفعل الكمومي ذاته -بسبب استحالة التحكُّم في رد فعل الجسم على أدوات القياس، إذا كانت تخدم غرضها- ضرورة وجود حلٍّ نهائي في نبذ النسق الكلاسيكي للسببية ومراجعة جذرية لموقفنا تجاه مشكلة الواقع المادي. في الواقع، كما سنرى، فإنَّ معيارًا للواقع مثل ذلك الذي اقترحه المؤلفون المسمون يحتوي على مدى توخي الحذر في صياغته - غموض أساسي عند تطبيقه على المشكلات الفعلية التي نهتم بها هنا.»

فيما يتعلَّق بالمشكلة الخاصة التي عالجها أينشتاين و(بودولسكي) و(روزن)، فقد تبيَّن بعد ذلك أنَّ عواقب الشكلية فيما يتعلق بتمثيل حالة نظامٍ يتكوَّن من جسميْن ذرييْن متفاعليْن تتوافق مع الحجج البسيطة المذكورة في السابق فيما يتعلق مع مناقشة الترتيبات التجريبية المناسبة من الفراغ ،pو q لدراسة الظواهر التي تخضع لمبدأ المكاملة. على الرغم من أن أي زوج المتقارن ومتغيرات القوى الدافعة يطيع قاعدة الضرب غير التبادلي المعبر عنه بواسطة المعادلة q1 (2)، وبالتالي لا يمكن إصلاحه إلا مع الخطوط المتبادلة المعطاة بواسطة المعادلة(3)، الفرق p1 + بين اثنين من إحداثيات الفضاء التي تشير إلى مكونات النظام سوف تنتقل مع مجموع q2 - q2 و p2 مع q1 لمكونات القوة الدافعة المقابلة، على النحو التالي مباشرة مع قابلية التبديل p2 لذلك، يمكن تثبيت كل من .pc مع

q2 إذا حددت pl أو q1 بدقة في حالة النظام المعقد، وبالتالي يمكننا التنبؤ بقيم pl + p2 و q1 - q2 على التوالي، عن طريق القياسات المباشرة. إذا أخذنا، بالنسبة إلى جزئي النظام، جسيمٍ ،p2 أو وغشاء، مثل ذلك الموضح في الشكل الخامس، نرى أن إمكانيات تحديد حالة الجسيم عن طريق القياسات على الحاجز تتوافق فقط مع الموقف الموصوف في ص 227 و228، ومزيد من المناقشة في ص 241، حيث ذُكر أنه بعد مرور الجسيم عبر الحاجز، لدينا من حيث المبدأ

اختيار قياس موضع الحاجز أو قوته الدافعة، وفي كل حالة، سنقوم بحساب تنبؤات بشأن الملاحظات اللاحقة المتعلقة بـالجسيم. كما تم التأكيد مرارًا وتكرارًا، فإن النقطة الأساسية هنا هي أن مثل هذه القياسات تتطلَّب ترتيباتٍ تجريبية متبادلة.

يمكن تلخيص المجادلة داخل المقال في المقطع التالي:

«من وجهة نظرنا، نرى الآن أنَّ صياغة المعيار المذكور أعلاه للواقع المادي الذي اقترحه أينشتاين و(بودولسكي) و(روزين) تحتوي على غموضٍ فيما يتعلَّق بمعنى التعبير « من دون الإخلال بأي شكلٍ من الأشكال بالنظام». بالطبع هناك في حالة كهذه لم ينظر فيها للتوِ لأي اضطرابٍ ميكانيكي للنظام قيد التحقيق خلال المرحلة الحرجة الأخيرة من إجراء القياس، ولكن حتى في هذه المرحلة، هناك أساسًا مسألة تأثير على الشروط ذاتها التي تحدد الأنواع المحتملة من الترتيبات فيما يتعلق بالسلوك المستقبلي للنظام. نظرًا لأن هذه الشروط تشكل عنصرًا متأصلًا في وصف أي ظاهرة يمكن ربط مصطلح «الواقع المادي» بها بشكلٍ صحيحٍ، فإننا نرى أنَّ حجة المؤلفين المذكورين لا تبرِّر استنتاجهم بأنَّ الوصف الميكانيكي الكمومي غير مكتمل أساسًا.

على العكس من ذلك، يمكن التعبير عن هذا الوصف، كما يظهر من المناقشة السابقة، بأنَّه استخدام عقلاني لجميع احتمالات التفسير الواضح للقياسات، المتوافق مع التفاعل المحدود وغير القابل للسيطرة بين الجسيمات وأدوات القياس في مجال نظرية الكمِّ. في الواقع، هو فقط الاستبعاد المتبادل لأي إجراءيْن تجريبيين، مما يسمح بتعريفٍ لا لبس فيه للكميات الفيزيائية التي تخضع لمبدأ المكاملة، الذي يوفر مجالًا لقوانين فيزيائية جديدة، قد يبدو للوهلة الأولى أن تعايشها غير قابلٍ للتوفيق مع المبادئ الأساسية للعلم. هذا هو الوضع الجديد تمامًا فيما يتعلق بوصف الظواهر الفيزيائية الذي يهدف مفهوم مبدأ المكاملة إلى توصيفه».

من خلال إعادة قراءة هذه المقاطع، أدرك تمامًا عدم كفاءة التعبير الذي لا بُدَّ أنَّه جعل من الصعب للغاية تقدير اتجاه الجدل الذي يهدف إلى إظهار الغموض الأساسي الذي ينطوي عليه الإشارة إلى السمات المادية للجسيمات عند التعامل مع الظواهر التي لا يمكن التمييز بين سلوك الجسيمات نفسها وتفاعلها مع أدوات القياس بشكلٍ حادٍ. آمل، مع ذلك، أن الرواية الحالية للمناقشات مع أينشتاين في السنوات السابقة، التي أسهمت بشكلٍ كبيرٍ في جعلنا على دراية

بالوضع في فيزياء الكمِّ، قد تعطي انطباعًا أوضح عن ضرورة مراجعة جذرية للمبادئ الأساسية التفسير المادي من أجل استعادة الترتيب المنطقي في هذا المجال من التجربة.

قُدِّمت وجهات نظر أينشتاين الخاصة في ذلك الوقت في مقال بعنوان «الفيزياء والواقع»، نُشر عام 1936 في جريدة معهد فرانكلين. بدءًا من العرض الأكثر توضيحًا للتطور التدريجي للمبادئ الأساسية في نظريات الفيزياء الكلاسيكية وعلاقتها بمشكلة الواقع المادي، يجادل أينشتاين هنا بأن الوصف الميكانيكي الكمومي يجب اعتباره مجرد وسيلة لحسابٍ يعبّر عن متوسط سلوك عددٍ كبيرٍ من الأنظمة الذرية، وموقفه من الاعتقاد بأنه يجب أن يقدِّم وصفًا شاملًا للظواهر الفردية بالكلمات التالية: «يمكن الاعتقاد بأن هذا ممكنٌ منطقيًا من دون تناقضٍ؛ لكنَّه يتعارض تمامًا مع غريزتي العلمية بحيث لا يمكنني التخلي عن البحث عن مفهومٍ أكثر اكتمالًا».

حتى لو بدا مثل هذا الموقف متوازنًا جيدًا في حد ذاته، فإنه مع ذلك يعني رفضًا للحجج الكاملة التي تم الكشف عنها في السابق، بهدف إظهار أننا في ميكانيكا الكمِّ لا نتعامل مع نبذٍ تعسفي لتحليلٍ أكثر تفصيلًا للظواهر الذرية، ولكن مع الاعتراف بأن مثل هذا التحليل هو مبدأ استبعاده. تقدم لنا الفردية الغريبة للتأثيرات الكمومية، فيما يتعلق بفهم الأدلة المحددة جيدًا، موقفًا جديدًا غير متوقعٍ في الفيزياء الكلاسيكية وغير قابلٍ للتوفيق مع الأفكار التقليدية المناسبة لتوجيهنا والتكيُّف مع التجربة العادية. في هذا الصدد، دعت نظرية الكم إلى مراجعة متجددة لأساس الاستخدام الواضح للمفاهيم الأولية، كخطوة أخرى في التطور الذي كان من سمات العلم الحديث منذ ظهور النظرية النسبية.

في السنوات التالية، أثارت الجوانب الفلسفية للوضع في الفيزياء الذرية اهتمامَ دوائر أكبر، ونوقشت على وجه الخصوص في المؤتمر الدولي الثاني لوحدة العلوم في كوبنهاجن في يوليو 1936. في هذه المناسبة قدمتُ محاضرة عن هذا، لقد حاولتُ بشكلٍ خاصٍّ تأكيدَ التشابُه في النواحي المعرفية بين القيود المفروضة على الوصف السببي في الفيزياء الذرية والمواقف التي واجهتها مجالات المعرفة الأخرى. كان الغرض الأساسي من مثل هذه المتوازيات هو لفت الانتباه إلى ضرورة مواجهة مشاكل من نوعٍ مماثلٍ لتلك التي نشأت في نظرية الكمِّ، وبالتالي إعطاء خلفية مألوفة لطريقة التعبير الثمينة على ما يبدو التي طورها علماء الفيزياء للتعامل مع صعوباتهم الشديدة.

إلى جانب سمات مبدأ المكاملة الواضحة في علم النفس التي تم التطرُّق إليها بالفعل، يمكن أيضًا تتبُّع أمثلة على هذه العلاقات في علم الأحياء، خاصة فيما يتعلق بالمقارنة بين وجهات النظر الميكانيكية والحيوية. فقط فيما يتعلَّق بمشكلة الملاحظة، كان هذا السؤال الأخير في السابق موضوع خطابٍ أمام المؤتمر الدولي للعلاج بالضوء الذي عُقِد في كوبنهاجن عام 1932، حيث أشير بالمصادفة إلى أنَّه حتى التوازي النفسي الجسدي كما تصوره (لايبنيز) و(سبينوزا) قد حدث على نطاقٍ أوسع من خلال تطوير الفيزياء الذرية، الأمر الذي يجبرنا على اتخاذ موقفٍ تجاه مشكلة التفسير مع التذكير بالحكمة القديمة، أنَّه عند البحث عن الانسجام في الحياة يجب على المرء ألا ينسى أبدًا أنه في دراما الوجود نحن أنفسنا الممثلون والمتفرجون.

من الطبيعي أن تثير أقوالٌ من هذا النوع داخل العديد من الأذهان الانطباعَ بوجود تصوف أساسي غريبٍ عن روح العلم؛ في المؤتمر المذكور أعلاه في عام 1936، حاولتُ بالتالي أن أوضح سوءَ الفهم هذا، وأن أوضح أنَّ السؤال الوحيد كان محاولة لتوضيح الظروف، في كل مجالٍ من مجالات المعرفة، لتحليل التجربة وتوليفها. ومع ذلك، فإنني أخشى أنني لم أحقِّق سوى القليلِ من النجاح في هذا الصدد في إقناع المستمعين، الذين كان الاختلاف بين الفيزيائيين أنفسهم سببًا طبيعيًّا للشك في ضرورة المضي قدمًا في التخلي عن المطالب العرفية فيما يتعلَّق بشرح الظواهر الطبيعية. على الأقل من خلال مناقشة جديدة مع أينشتاين في برينستون في عام 1937، حيث لم نتجاوز مسابقة روح الدعابة فيما يتعلق بالجانب الذي كان (سبينوزا) سيتخذه إذا كان قد عاش ليرى تطورَ أيامنا، فقد تم تذكيرنا بشدة بأهمية توخي أقصى درجات الحذر في جميع مسائل المصطلحات والمنطق.

نوقشت جوانب الموقف هذه بشكلٍ خاصّ في اجتماعٍ عُقد في وارسو عام 1938، ونظَّمه المعهد الدولي للتعاون الفكري التابع لعصبة الأمم. الاكتشافات المتعلقة بتكوين وخصائص النوى الذرية، وكذلك بسبب التطورات المهمة للشكلية الرياضية مع مراعاة متطلبات النظرية النسبية. في الجانب الأخير، قدمت نظرية الكم العبقري لـ(ديراك) للإلكترون توضيحًا صارخًا لقوة وخصوبة طريقة الوصف العامة لميكانيكا الكم. في ظواهر تكوين وفناء أزواج الإلكترونات، لدينا في الواقع علاقة بالسمات الذرية الأساسية الجديدة، التي ترتبط ارتباطًا وثيقًا بالجوانب غير الكلاسيكية للإحصاءات الكمومية المعبر عنها في مبدأ الاستبعاد، والتي تطلبت مزيدًا من نبذ بعيد المدى للتفسير من حيث التمثيل التصويري.

في غضون ذلك، جذبت مناقشة المشكلات المعرفية في الفيزياء الذرية قدرًا كبيرًا من الاهتمام كما كان دائمًا، وفي التعليق على آراء أينشتاين فيما يتعلق بعدم اكتمال نمط الوصف الميكانيكي الكمومي، دخلت بشكلٍ مباشرٍ في أسئلة المصطلحات. في هذا الصدد، حذَّرتُ بشكلٍ خاصٍّ من العبارات، التي غالبًا ما توجد في الأدبيات الفيزيائية، مثل «إزعاج الظواهر بالملاحظة» أو «إنشاء سمات مادية للأجسام الذرية عن طريق القياسات». مثل هذه العبارات، التي قد تعمل على تذكير المفارقات الظاهرة في نظرية الكم، هي في الوقت نفسه عرضة للتشويش، حيث تُستخدم كلماتٌ مثل «الظواهر» و«الملاحظات»، تمامًا مثل «السمات» و«القياسات» بطريقة لا تكاد تتوافق مع اللغة الشائعة والتعريف العملي.

كطريقة أكثر ملاءمة للتعبير، دافعتُ عن تطبيق ظاهرة الكلمة حصريًّا للإشارة إلى الملاحظات التي حصلنا عليها في ظل ظروفٍ محددة، بما في ذلك وصف للترتيب التجريبي بأكمله. في مثل هذه المصطلحات، تكون مشكلة الملاحظة خالية من أي تعقيدٍ خاصٍّ لأنه في التجارب الفعلية تعبر عن جميع الملاحظات بعباراتٍ لا لبسَ فيها تشير على سبيل المثال إلى تسجيل النقطة التي يصل عندها الإلكترون إلى لوحة فوتوغرافية. علاوة على ذلك، فإنَّ التحدُّث بهذه الطريقة مناسبٌ فقط للتأكيد على أنَّ التفسير الفيزيائي المناسب للصيغة الرياضية للميكانيكية الكمومية يرقى فقط إلى التنبؤات ذات الطابع المحدد أو الإحصائي المتعلقة بالظواهر الفردية التي تظهر في ظل ظروفٍ محددة بواسطة المفاهيم الفيزيائية الكلاسيكية.

على الرغم من جميع الاختلافات بين المشاكل الفيزيائية التي أدت إلى تطور نظرية النسبية ونظرية الكم، على التوالي، فإن المقارنة بين الجوانب المنطقية البحتة للحجج النسبية ومبدأ المكاملة تكشف عن أوجه تشابه مذهلة فيما يتعلق بالتخلي عن الأهمية المطلقة للسمات الفيزيائية التقليدية. كما أنَّ إهمال التكوين الذري لأدوات القياس نفسها، في حساب التجربة الفعلية، هو سمة مماثلة لتطبيقات النسبية ونظرية الكم. وبالتالي، فإن صغر مقدار الفعل مقارنة بالأفعال التي تنطوي عليها التجربة المعتادة، بما في ذلك ترتيب ومعالجة الأجهزة الفيزيائية، هو أمرٌ أساسي في الفيزياء الذرية مثل العدد الهائل من الذرات التي يتكوَّن منها العالم في النظرية العامة للنسبية، التي -كما أشير في كثير من الأحيان- تتطلَّب أبعادًا لجهاز قياس الزوايا صغير مقارنة بنصف قطر انحناء الفضاء.

في محاضرة وارسو، علَّقتُ على استخدام رمزية غير مرئية بشكلٍ مباشرٍ في النسبية ونظرية الكم بالطريقة التالية:

«حتى الصيغ الرياضية التي تقدم في كلتا النظريتين ضمن نطاقهما تعد وسائل مناسبة لفهم كل التجارب التي يمكن تصورها التي تظهر تشابهات عميقة. في الواقع، فإن البساطة المذهلة لتعميم النظريات الفيزيائية الكلاسيكية، التي نحصل عليها من خلال استخدام الهندسة متعددة الأبعاد والجبر غير التبادلي، على التوالي، تستند في كلتا الحالتين بشكلٍ أساسي إلى إدخال الرمز التقليدي $\sqrt{-1}$.

إن الطابع المجرد للصيغ الرياضية المعنية هو كنموذجٍ للنظرية النسبية كما هو الحال لميكانيكا الكم، وفي هذا الصدد يعتبر مجرد مسألة تقليد إذا كانت النظرية السابقة تعتبر استكمالًا للفيزياء الكلاسيكية بدلاً من الخطوة الأساسية الأولى في المراجعة الشاملة لوسائلنا المفاهيمية لمقارنة الملاحظات، والتي فرضها علينا التطور الحديث للفيزياء».

صحيح أنَّنا في الفيزياء الذرية نواجه عددًا من المشكلات الأساسية التي لم تُحل، خاصة فيما يتعلق بالعلاقة الحميمة بين الوحدة الأولية للشحنة الكهربائية والعمل الكمومي الشامل، لكن هذه المشاكل ليست أكثر ارتباطًا بالنقاط المعرفية التي نوقشت هنا أكثر من كفاية الجدل النسبي مع قضية مشاكل علم الكونيات التي لم تُحل حتى الآن. في كل من النسبية والنظرية الكمومية، نحن مهتمون بجوانبَ جديدة من التحليل العلمي والتوليف، وفي هذا الصدد، من المثير للاهتمام ملاحظة أنَّه حتى في العصر العظيم للفلسفة النقدية في القرن السابق (القرن التاسع عشر)، كان هناك سؤالٌ حول «إلى أي مدى يمكن تقديم حججٍ مسبقة لمدى كفاية التنسيق بين المكان والزمان والعلاقة السببية للتجربة»، ولكن لا يمكن أبدًا طرح مسألة التعميمات العقلانية أو القيود المتأصلة في مثل هذه الفئات من التفكير البشري.

على الرغم من أنَّه في السنوات الأخيرة كان لديَّ عدة مناسبات للقاء أينشتاين، فإن المناقشات المستمرة، التي تلقيتُ منها دائمًا دوافعَ جديدة، لم تؤدِّ حتى الآن إلى وجهة نظر مشتركة حول المشكلات المعرفية في الفيزياء الذرية، وربما تكون وجهات نظرنا المتعارضة أوضح ما تم ذكره في العدد الأخير من دورية علم المنطق، فقد طرحت مناقشة عامة لهذه المشاكل، ومع ذلك، إدراكًا للعقبات العديدة التي تعترض التفاهم المتبادل فيما يتعلق بمسألة يجب أن يؤثر فيها النهج والخلفية على موقف الجميع، فقد رحبت بهذه الفرصة لعرض أوسع للتطور

الذي كان أزمة حقيقية في العلوم الفيزيائية. يبدو أن الدرس الذي تلقيناه هنا قد أوصلنا خطوة حاسمة إلى الأمام في النضال الذي لا ينتهي من أجل الانسجام بين المحتوى والشكل، وعلمنا مرة أخرى أنه لا يمكن استيعاب أي محتوى من دون إطارٍ رسمي، وأنَّ أي شكلٍ، مع ذلك وقد ثبت أنه مفيدٌ حتى الآن في كونه إضافة جيدة لفهم تجربة جديدة.

بالتأكيد، في مثل هذا الموقف، حيث كان من الصعب الوصول إلى تفاهمٍ متبادلٍ ليس فقط بين الفلاسفة والفيزيائيين ولكن أيضًا بين علماء الفيزياء من مدارس مختلفة، فإن جذور الصعوبات ليس نادرًا في تفضيل استخدامٍ معينٍ للغة توحي بنفسها من الخطوط المختلفة للنهج. في المعهد كوبنهاجن، حيث اجتمع خلال تلك السنوات عددٌ من الفيزيائيين الشباب من مختلف البلدان لإجراء مناقشات، استخدمنا -عندما نكون في مأزقٍ- في كثير من الأحيان لتهدئة أنفسنا بالمداعبات، من بينها القول القديم لنوعي الحقيقة، تنتمي العبارات إلى نوعٍ واحدٍ في غاية البساطة والوضوح، بحيث لا يمكن الدفاع عن التأكيد المعاكس بشكلٍ واضحٍ. النوع الآخر، ما يُسمَّى بـ «الحقائق العميقة»، عبارة عن تصريحاتٍ يحتوي فيها العكس أيضًا على حقيقة عميقة. الآن، عادة ما يمر التطور في مجالٍ جديدٍ بمراحلَ يتم فيها استبدال الفوضى تدريجيًّا بالنظام، ولكن ليس أقلها في المرحلة المتوسطة حيث تسود الحقيقة العميقة «أن العمل مثيرٌ حقًّا، ويلهم الخيال للبحث عن سيطرة أقوى». بالنسبة إلى مثل هذه المساعي للبحث عن التوازن المناسب بين الجدية والفكاهة، فإن شخصية أينشتاين هي مثالٌ رائعٌ، وعند التعبير عن إيماني أنه من خلال التعاون المثمر بشكلٍ فردي لجيلٍ كاملٍ من الفيزيائيين، نقترب من الهدف حيث الترتيب المنطقي إلى حدٍّ كبيرٍ يسمح لنا بتجنب الحقيقة العميقة، آمل أن تؤخذ في روحه، ويمكن أن تكون بمثابة اعتذار عن عدة أقوال في الصفحات السابقة.

امتدت المناقشات مع أينشتاين التي شكَّلت موضوعَ هذه المقالة على مدى سنواتٍ عديدة، شهدت تقدُّمًا كبيرًا في مجال الفيزياء الذرية. وسواء كانت اجتماعاتنا الفعلية قصيرة أو طويلة، فقد تركت دائمًا انطباعًا عميقًا ودائمًا في ذهني، وعند كتابة هذا التقرير، كنت أجادل أينشتاين طوال الوقت حتى في المواضيع بعيدة كل البعد عن المشاكل الخاصة بهذه المناقشة في اجتماعاتنا. فيما يتعلق بسرد المحادثات، فأنا أدرك أنني أعتمد فقط على ذاكرتي الخاصة، تمامًا كما سأكون مستعدًّا لاحتمال وجود العديد من ميزات تطوير نظرية الكم، التي لعب فيها أينشتاين

دورًا كبيرًا جدًّا، ومع ذلك، فإنني على ثقة بأنني لم أفشل في نقل انطباعٍ مناسبٍ عن مقدار ما يعنيه لي أن أكون قادرًا على الاستفادة من الإلهام الذي نستمده جميعًا من كل اتصالٍ بأينشتاين.