النظرية النسبيَّة الخاصة

ديفيد بوم

- المؤلف: ديفيد بوم
- العنوان: النظرية النسبيَّة الخاصة
- ترجمة: مصطفى العدوي
- الطبعة: الأولى 2023
- تصميم الغلاف: عمرو الكفراوي
- مستشار النشر: سوسن بشير
- المدير العام: مصطفى الشيخ

رقم الإيداع:

٢٠٢٢ / ١٧٠٣١

الترقيم الدولي : ISBN

978 - 977-765 - 345 - 9

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

ديفيد بوم

النظرية النسبيَّة الخاصة

ترجمة

مصطفى العدوي

آفاق للنشر والتوزيع

بطاقة الفهرسة

بوم، ديفيد
النظرية النسبيَّة الخاصة – ديفيد بوم
ترجمة: مصطفى العدوي
ط1 القاهرة – دار آفاق للنشر والتوزيع – 2023
336 ص، 21 سم.
رقم الإيداع 17031 / 2022
الترقيم الدولي 978 – 977 – 765 – 345 – 9
1 – علوم
2 – العنوان

هذه ترجمة كتاب:
The Special Theory of Relativity
By: David Bohm
Authorised translation from the English language edition published by Routledge, a member of the Taylor & Francis Group
All Rights Reserved

جميع الحقوق محفوظة

© آفاق للنشر والتوزيع

All rights reserved
© **Afaq** *Publishing House* 2023

تصدير

كانت محاضرات السنة الأخيرة الجامعية حول الفيزياء النظرية التي قدَّمها ديفيد بوم في كلية بيركبيك فريدة وملهمة. نظرًا إلى أن التجريبيين والمنظِّرين قد حضروها. لم تكن المحاضرات تهدف إلى جعل الطلاب يتمتعون بمستوى عالٍ من المهارة في الرياضيات، ولكن تهدف إلى استكشاف بنية المفاهيم والأفكار المادية التي تكمن وراء نظرياتنا، محاضراته حول النسبية الخاصة تشكِّل محتوى هذا الكتاب.

هذا ليس مجرد نصٍّ آخر حول هذا الموضوع، إنه يتعمَّق في تغييرات المفاهيم اللازمة لإجراء الانتقال من العالم الكلاسيكي إلى عالم النسبية. من أجل تقدير الطبيعة الكاملة لهذه التغييرات الجذرية، يقدِّم بوم ملحقًا فريدًا بعنوان «الفيزياء والإدراك» يوضح فيه عددًا من مفاهيمنا «البدهية» عن المكان والزمن، وهي في الحقيقة بعيدة كل البعد عن الوضوح ونتعلَّمها بالفعل من التجربة. يناقش في هذا الملحق كيف نطوِّر مفاهيمنا عن المكان والزمن في مرحلة الطفولة، مستخدمين بحرية عمل جان بياجيه، الذي كانت تجاربه رائدة في فهمنا لكيفية تطوير الأطفال للمفاهيم في المقام الأول.

يوضح بوم أيضًا كيف -من خلال الإدراك ونشاطنا في المكان- ندرك أهمية مفهوم العلاقة والنظام في هذه العلاقات؛ من خلال توليف هذه العلاقات، نقوم بتجريد فكرة الشيء أو الكائن كميزة ثابتة ضمن هذا النشاط الذي نفترض في النهاية أنه دائمٌ، من خلال العلاقة بين الأشياء نصل إلى مفهومنا الكلاسيكي عن المكان. في البداية، تكون هذه العلاقات طوبولوجية في الأساس، لكننا في النهاية نبدأ في فهم أهمية القياس والحاجة إلى تعيين علاقات هذه الكائنات على شبكة منسقة مع لعب الزمن دورًا فريدًا. إن تفسيره الواضح لكيفية وصولنا إلى مفاهيمنا الكلاسيكية عن المكان والزمن المطلق مذهلٌ ويشكِّل منصَّة للتطور اللاحق لنسبية أينشتاين.

بعد عرض الصعوبات مع ميكانيكا نيوتن والديناميكا الكهربية لماكسويل، أوضح كيف يمكن فهم تجربة ميكلسون ومورلي من حيث النظرة الموضوعية إلى الأثير التي قدَّمها لورنتز وفيتزجيرالد. قدمت مناقشة الصعوبات في هذا النهج، التي تفترض انكماشًا فعليًّا لقضبان المواد في أثناء تحركها عبر الأثير، قبل تقديم وصفٍ بارعٍ لمفهوم أينشتاين للزمكان. لا شكَّ في أن وضوح بوم بشأن هذا الموضوع ساعدته المناقشات العديدة التي أجراها مع أينشتاين في أثناء عمله في برينستون.

يقدم مبدأ النسبية من حيث مفهوم العلاقة وترتيب العلاقة الذي تطور في الملحق، ويجادل بأن القانون العام للفيزياء هو مجرد بيان بأن بعض العلاقات ثابتة على الطريقة التي نلاحظها بها. إن تطبيق هذه

الفكرة على المراقبين في حركة موحدة نسبيًّا ينتج على الفور تحول لورنتز وقوانين النسبية الخاصة.

متداخلًا مع الفصول المتعلقة بتطبيق تحويلات لورنتز، يوجد فصلٌ عن المفهوم العام لإثبات خطأ النظريات. هنا يجادل ضد التقليد البوبري بأن كل ما يهم هو مجرد إثبات الخطأ تجريبيًّا. على الرغم من أن التفسير الأولي قد يتناسب مع البيانات التجريبية، فإنه قد يؤدي في النهاية إلى الارتباك والغموض، وقد يؤدي هذا أيضًا إلى سقوطها والتخلي عنها في نهاية المطاف لصالح نظرية أخرى على الرغم من أنها لا تتعارض مع أي تجربة. تظهر فصوله الأخيرة عن الزمن الصحيح ومفارقة التوأمين الوضوح الذي يسري في جميع أنحاء الكتاب ويجعل هذا عرضًا فريدًا للنسبية الخاصة.

B J Hiley

مقدمة

الهدف العام من هذا الكتاب هو تقديم نظرية النسبية بشكلٍ موحدٍ، وتوضيح الأسباب التي أدَّت إلى اعتمادها، وشرح معناها الأساسي قدر الإمكان بعباراتٍ غير رياضية، وكشف الحقيقة المحدودة لبعضٍ من افتراضات «البديهة» الضمنية التي تجعل من الصعب علينا تقدير آثارها الكاملة. من خلال إظهار أن مفاهيم هذه النظرية مترابطة لتشكيل كل موحد، وهي تختلف تمامًا عن تلك الخاصة بنظرية نيوتن الأقدم، ومن خلال توضيح الدافع لتبني مثل هذه النظرية المختلفة، نأمل في بعض المقاييس أن نكمل وجهة النظر التي قدمناها في العديد من الدورات المتخصصة المدرجة في البرنامج النموذجي للدراسة، التي تميل إلى إعطاء الطالب انطباعًا مجزَّأ إلى حدٍّ ما عن البنية المنطقية وبنية المفهوم للفيزياء ككل.

يبدأ الكتاب بمراجعة موجزة لفيزياء ما قبل النسبية، وبعض الحقائق التجريبية الرئيسية التي قادت الفيزيائيين إلى التشكيك في الأفكار القديمة للمكان والزمن التي سادت منذ نيوتن وما قبله. نركز بشكلٍ كبيرٍ على بعض الجهود للاحتفاظ بمفاهيم نيوتن، خاصة تلك التي طوَّرها لورنتز من حيث نظرية الأثير. هذا الإجراء له ميزة، ليس

فقط في مساعدة الطالب على فهم تاريخ هذه المرحلة الحاسمة من تطور الفيزياء بشكلٍ أفضل، ولكن من خلال إظهار طبيعة المشاكل التي أدَّت إلى ظهور المفاهيم القديمة بوضوحٍ شديدٍ. فقط على خلفية هذه المشاكل يمكن للمرء أن يدرك تمامًا حقيقة أن مساهمة أينشتاين الأساسية كانت أقل في اقتراح الصيغ الجديدة منها في إدخال التغييرات الأساسية في مفاهيمنا الأساسية عن المكان والزمن والمادة والحركة.

إن تقديم مثل هذه الأفكار الجديدة من دون ربطها بشكلٍ صحيحٍ بالأفكار السابقة يعطي انطباعًا خاطئًا بأن نظرية النسبية هي مجرد نقطة ذروة للتطورات السابقة، ولا يبرز بشكلٍ صحيحٍ حقيقة أن هذه النظرية على خطٍّ جديدٍ جذري يتعارض مع مفاهيم نيوتن في نفس الخطوة التي يتوسع فيها القانون الفيزيائي في اتجاهاتٍ جديدة وفي مجالاتٍ جديدة غير متوقعة حتى الآن. لذلك، على الرغم من حقيقة أن دراسة المفاهيم الأساسية وراء نظرية الأثير تشغل وقتًا ثمينًا قد يتعرَّض فيه الطالب لضغوطٍ شديدة بسبب متطلبات مجموعة واسعة من الموضوعات، يشعر المؤلف أنه من المفيد تضمين ملخصٍ موجز لهذه المفاهيم في هذه محاضرات. كانت خطوة أينشتاين الجديدة أساسًا في تبني منهج علائقي للفيزياء؛ بدلًا من افتراض أن مهمة الفيزياء هي دراسة مادة أساسية مطلقة للكون (مثل الأثير)، اقترح أنها تهتم فقط بدراسة العلاقات بين جوانب مختلفة من هذا الكون، هذه العلاقات التي يمكن ملاحظتها من حيث المبدأ. من المهم أن ندرك في هذا الصدد أن مفاهيم نيوتن السابقة تتضمن مزيجًا من هذين النهجين، مثل أنه بينما كان يُنظر

إلى المكان والزمن على أنهما مطلقان فقد وجد أنهما يمتلكان عددًا كبيرًا من الخصائص «النسبية». في هذه المحاضرات، يبذل جهدًا كبيرًا لتحليل المفاهيم القديمة للمكان والزمن، إلى جانب مفاهيم «البديهة» التي تستند إليها، من أجل الكشف عن هذا المزيج من وجهات النظر العلائقية والمطلقة.

بعد إبراز بعض الافتراضات «المخفية» عادةً وراء المعنى المشترك ومفاهيم نيوتن للمكان والزمن، وهي افتراضاتٌ يجب إسقاطها إذا أردنا فهم نظرية النسبية، ننتقل إلى تحليل أينشتاين لمفهوم التزامن، حيث يعتبر الوقت نوعًا من «الإحداثيات» التي تعبِّر عن علاقة حدثٍ ما بعملية فعلية ملموسة يتم فيها قياس هذه الإحداثيات. على أساس الحقيقة المرصودة لثبات سرعة الضوء المقاسة فعليًّا لجميع المراقبين، يرى المرء أن المراقبين الذين يتحركون بسرعاتٍ مختلفة لا يمكنهم الاتفاق على إحداثيات الزمن الذي يُنسب إليه أحداثٌ بعيدة. من هذا الاستنتاج، يترتب على ذلك أيضًا أنهم لا يستطيعون الاتفاق على أطوال الأشياء أو معدلات الساعات. وبالتالي، فإن الآثار الأساسية لنظرية النسبية تُرى نوعيًّا، دون الحاجة إلى أي صيغٍ. ثم تبيَّن أن تحويلات لورنتز هي الوحيدة التي يمكن أن تعبِّر بشكلٍ دقيقٍ عن نفس الاستنتاجات التي حصلنا عليها في البداية من دون الرياضيات. بهذه الطريقة، من المأمول أن يرى الطالب أولًا بشكلٍ عام أهمية فكرة أينشتاين عن المكان والزمن، فضلًا عن المشكلات والحقائق التي دفعته إلى تبني هذه المفاهيم، وبعد ذلك يمكنه الانتقال إلى عرض أدق الجزئيات التي توفِّرها الرياضيات.

بعد ذلك نقدم شرحًا لبعض المضمون الرئيسي لتحويلات لورنتز، ليس فقط بهدف استكشاف معنى هذه التحويلات، ولكن أيضًا للتقدم بطريقة طبيعية إلى بيان مبدأ النسبية، أي أن المبدأ المادي الأساسي للقوانين هي العلاقات الثابتة، الشيء نفسه بالنسبة إلى جميع المراقبين. يتضح مبدأ النسبية في عددٍ من الأمثلة. يتضح بعد ذلك أن هذا المبدأ يؤدي إلى صيغ النسبية لأينشتاين، التي تعبر عن الكتلة والقوة الدافعة لجسمٍ من حيث سرعته. عن طريق تحليل هذه الصيغ، يصل المرء إلى علاقة أينشتاين الشهيرة، $E = mc^2$، بين طاقة الجسم وكتلته. سنقدم تطوير معنى هذه العلاقة بتفصيلٍ كبيرٍ، مع إيلاء اهتمامٍ خاص لمشكلة «طاقة السكون»، وتفسيرها من حيث الحركات ذهابًا وإيابًا في البنية الداخلية للجسم، التي تحدث في المستويات الأدنى. في هذا الصدد، وجد المؤلف من خلال التجربة أن العلاقة بين الكتلة والطاقة تثير العديدَ من الألغاز في أذهان الطلاب إلى حدٍّ كبيرٍ لأن هذه العلاقة تتعارض مع بعض الافتراضات «الخفية» المتعلقة بالبنية العامة للعالم، والتي تستند إلى «البديهة» وتطورها في ميكانيكا نيوتن، لذلك من المفيد الخوض في افتراضات البديهة الضمنية لدينا حول الكتلة لإظهار أنها ليست حتمية، ولإظهار كيف يختلف مفهوم أينشتاين عن الكتلة عند هؤلاء، بحيث يمكن ملاحظة عدم وجود مفارقة متضمنة في معادلة الكتلة والطاقة.

في جميع أنحاء الكتاب، نولي قدرًا كبيرًا من الاهتمام بشكلٍ عامٍّ إلى الاتجاه المعتاد لاعتبار أنماط التفكير القديمة أمرًا حتميًّا، وهو اتجاهٌ أعاق بشكلٍ كبيرٍ تطوير أفكار جديدة حول العلم. يُنظر إلى هذا الاتجاه

على أنه قائمٌ على الافتراض الضمني بأن القوانين العلمية تشكِّل حقائق مطلقة. سنقدم تحليلًا لفكرة الحقيقة المطلقة بشيء من التفصيل في هذا الكتاب، وسيتضح أنها تتطابق مع التطور الفعلي للعلم. كذلك يتضح أن الحقائق العلمية يُنظر إليها بشكلٍ أفضل على أنها علاقاتٌ قائمة في بعض المجالات المحدودة، التي لا يمكن تحديد نطاقها إلا بمساعدة الاكتشافات التجريبية والنظرية المستقبلية. في حين أن علمًا ما قد يكون له فترات طويلة من تطوير مجموعة معينة من المفاهيم الأساسية والتعبير عنها، فإنه يميل أيضًا، من وقتٍ لآخر، إلى مرحلة حرجة حيث تكشف المفاهيم القديمة عن الغموض والارتباك. إن حلَّ مثل هذه الأزمات يحتوي على تغييرٍ جذري في المفاهيم الأساسية، وهو ما يتعارض مع الأفكار القديمة، بينما يحتوي على سماتها الصحيحة كحالاتٍ خاصة أو حدودٍ أو تقريبية. وبالتالي، فإن البحث العلمي ليس عملية تراكم مطرد للحقائق المطلقة، التي بلغت ذروتها في النظريات الحالية، بل هو نوعٌ من العمليات الديناميكية التي لا توجد فيها مفاهيم نظرية نهائية صالحة في مجالاتٍ غير محدودة، يجب أن يكون تقدير هذه الحقيقة مفيدًا ليس فقط في الفيزياء ولكن في العلوم الأخرى التي تحتوي على مشاكل مماثلة.

تنتهي المحاضرات حول النسبية بمناقشة مخطط مينكوفسكي، نقدم ذلك بتفصيلٍ كبيرٍ بهدف توضيح معنى مبدأ النسبية بطريقة بيانية. في سياق هذا الرسم التوضيحي، نقدم حساب K للتفاضل والتكامل، الذي يبرز أيضًا معنى أفكار أينشتاين حول المكان والزمن، بالإضافة

إلى تقديم مقارنة بين الآثار المترتبة على هذه الأفكار وتلك الخاصة بنيوتن. في هذه المناقشة، نؤكد دور الحدث والعملية كأساسيات في الفيزياء النسبية، بدلًا من دور الجسم وحركته، وهما أساسيان في نظرية نيوتن. يقودنا هذا إلى الهندسة (القطع الزائد) لزمكان مينكوفسكي، مع تمييزها الثابت للأحداث داخل المخاريط الضوئية الماضية والمستقبلية عن تلك الموجودة بالخارج. على أساس هذا التمييز، يتضح أن الفشل النسبي للمراقبين المختلفين في الاتفاق على التزامن لا يخلط بأي حالٍ من الأحوال بين ترتيب السبب والنتيجة، شريطة عدم إرسال أي إشاراتٍ أسرع من الضوء.

ندرج في هذه المحاضرات كذلك نقاشًا شاملًا حول التوأم المتقدمين في السن بشكلٍ مختلفٍ، أحدهما لا يزال على الأرض بينما يقوم الآخر برحلة على متن سفينة صاروخية بسرعة تقترب من سرعة الضوء. تعمل هذه المناقشة على توضيح معنى «الزمن الصحيح»، وتوضح ببعض التفاصيل فقط كيف أن مفاهيم أينشتاين عن المكان والزمن تترك مجالًا لاثنين من المراقبين اللذين انفصلا لتجربة فترات مختلفة من «الزمن الصحيح» عندما يلتقيان مرة أخرى.

أخيرًا، هناك مناقشة ختامية للعلاقة بين العالم وخرائطنا المفاهيمية البديلة المختلفة، مثل تلك التي قدمتها على التوالي فيزياء نيوتن وفيزياء أينشتاين. تهدف هذه المناقشة إلى إزالة الالتباس الذي ينتج عندما يحدد المرء خريطة مفاهيمية بالواقع نفسه، وهو نوعٌ من الارتباك المسؤول عن الكثير من الصعوبة التي يميل الطالب إلى مواجهتها عندما يواجه

لأول مرة نظرية النسبية. بالإضافة إلى ذلك، فإن فكرة إعادة العلاقات من حيث رسم الخرائط هي فكرة أساسية في الرياضيات الحديثة، لذا فإن فهم مخطط مينكوفسكي كخريطة يجب أن يساعد في إعداد الطالب لنوعٍ أوسع من التقدير للعلاقة بين الفيزياء وقدرٍ كبيرٍ من الرياضيات.

المحاضرات يتبعها ملحقٌ، حيث ترتبط مفاهيم أينشتاين عن المكان والزمن والمادة بخصائص معينة للإدراك العادي. من الشائع أن مفاهيم نيوتن تتفق تمامًا مع الخبرة الإدراكية اليومية. ومع ذلك، فإن التطورات التجريبية والنظرية الحديثة في دراسة عملية الإدراك الفعلية توضح أن العديد من أفكار «البديهة» لدينا غير كافية ومربكة عند تطبيقها في مجال تصوراتنا كما هي في مجال الفيزياء النسبية. في الواقع، يبدو أن هناك تشابهًا ملحوظًا بين المفهوم النسبي للكون باعتباره هيكلًا للأحداث والعمليات مع قوانينه المكونة من العلاقات الثابتة، والطريقة التي ندرك بها العالم فعليًّا من خلال تجريد العلاقات الثابتة في الأحداث وعمليات المشاركة في اتصالاتنا المباشرة مع هذا العالم. قدمنا تطوير هذا القياس بتفصيلٍ كبيرٍ في الملحق، حيث نرى أخيرًا الاقتراح القائل بأن العلم هو أساسًا وسيلة لتوسيع اتصالنا الإدراكي بالعالم، بدلًا من تراكم المعرفة عنه. بهذه الطريقة، يمكن للمرء أن يفهم حقيقة أن البحث العلمي لا يؤدي إلى الحقيقة المطلقة، بل بالأحرى (كما يحدث في الإدراك العادي) وعي وفهم لجزءٍ متزايدٍ باستمرارٍ من العالم الذي نتواصل معه.

على الرغم من أن ملحق الإدراك ليس جزءًا من الدورة التدريبية، فإنه يجب أن يكون مفيدًا في جذب انتباه الطالب إلى جوانب معينة من

الخبرة اليومية، حيث يمكنه تقدير العلاقات الحدسية التي تشبه إلى حدٍّ ما تلك التي اقترحها أينشتاين للفيزياء. بالإضافة إلى ذلك، قد يكون من المأمول أن يوضح النهج العام للعلم، إذا اعتبره المرء مشروعًا إدراكيًّا في الأساس، وليس تراكمًا للمعرفة.

DAVID BOHM

London, England January, 1964

I. تمهيد:

إن نظرية النسبية ليست مجرد تطور علمي له أهمية كبيرة بذاتِها. بل هي أكثر أهمية باعتبارها المرحلة الأولى من تغييرٍ جذري في مفاهيمنا الأساسية، الذي سيبدأ في الفيزياء ثم سينتشر في مجالات العلوم الأخرى، ويمكن أيضًا اعتبارها قد غيَّرت في قدرٍ كبيرٍ من التفكير خارج العلم، لأنه كما هو معروف جيدًا، فإن الاتجاه الحديث في الفكر يبدو بعيدًا عن فكرة الحقيقة «المطلقة» المؤكدة (أي الحقيقة التي نحتفظ بها بشكلٍ مستقلٍّ عن جميع الظروف والسياقات والدرجات وأنواع التقريب، وما إلى ذلك) لكنه يقترب من فكرة أن أي مفهوم يكتسب أهميته فيما يتعلق بإطارٍ من المرجعية المناسبة، التي من خلالها يمكن إعطاء هذا المفهوم معناه الكامل.

بسبب اتساع مدلولاتها، فإن نظرية النسبية تميل إلى تأدية نوعٍ معينٍ من الالتباس بحيث لا تحدد الحقيقة إلا بما هو ملائمٌ ومفيدٌ. وبالتالي قد يشعر البعض أنه نظرًا إلى أن «كلَّ شيء نسبيٌّ»، فإن الأمر متروكٌ لاختيار كل شخص لتقرير ما سيقوله أو يفكر فيه بشأن أي مشكلة على الإطلاق. غالبًا ما انعكس هذا الاتجاه على الفيزياء إلى موقفٍ متشككٍ بل وساخرٍ من التطورات الجديدة. بالنسبة إلى الطالب، فهو يتدرَّب أولًا على القوانين القديمة لنيوتن وجاليليو وما إلى ذلك، باعتبارها «حقائق أبدية»، ثم فجأة، في نظرية النسبية (وأكثر من ذلك، في نظرية الكمِّ) سيلقَّن أن كل هذه النظريات (قديمة)، وهذا يعني أنه سيتلقَّى الآن مجموعة جديدة من «الحقائق الأبدية» لتحل

محل النظريات القديمة. ليس من المستغرب إذن أن يشعر الطلاب أن هناك لعبة اعتباطية إلى حدٍّ ما يلعبها علماء الفيزياء هدفهم الوحيد هو الحصول على مجموعة مناسبة من الصيغ التي ستتنبَّأ بنتائج عددٍ من التجارب. تساعد الأهمية الكبيرة نسبيًّا للرياضيات في هذه التطورات الجديدة على إضافة الانطباع، نظرًا إلى أن مفهوم الاستيعاب الأقدم لمعنى قوانين الفيزياء قد تم التخلي عنه الآن إلى حدٍّ كبيرٍ، ولم يُقَدم سوى القليل ليحل محله.

في هذه الملاحظات، سنبذل جهدًا لتوفير تفسيرٍ أكثر سهولة لفهم نظرية النسبية. تحقيقًا لهذه الغاية، سنذهب بشيء من التفصيل إلى خلفية المشكلات التي ظهرت منها نظرية النسبية، ليس في الترتيب التاريخي للمشكلات بقدر ما هو الترتيب الذي صمم لإنتاج العوامل التي دفعت العلماء إلى تغيير مفاهيمهم بطريقة جذرية. بقدر الإمكان، يجب أن نؤكد استيعاب مفاهيم النسبية في المصطلحات غير الرياضية، على غرار تلك المستخدَمة في الشرح المبسَّط لمفاهيم ميكانيكا نيوتن. ومع ذلك، سنقدم الحد الأدنى من الرياضيات المطلوبة التي من دونها سيصبح تقديم الموضوع غامضًا للغاية بحيث لا يمكن فهمه بشكلٍ صحيحٍ. (للحصول على معالجة رياضية أكثر تفصيلًا، نحيل الطالب إلى بعض المراجع ذات النصوص العديدة المتوفرة الآن حول هذا الموضوع).

لتوضيح المشكلة العامة المتمثلة في تغيير مفاهيم داخل العلم، سنناقش على نطاقٍ واسعٍ إلى حدٍّ ما العديد من المشكلات الفلسفية

الأساسية المتشابكة، كما أظهرتها في بنية نظرية النسبية ذاتها. تنشأ هذه المشكلات جزئيًّا من خلال نقد نظرية لورنتز القديمة عن الأثير Lorentz theory of the ether وجزئيًّا في اكتشاف أينشتاين لـمعادلة الكتلة والطاقة. بالإضافة إلى ذلك، من خلال استبدالها لميكانيكا نيوتن بعد عدة قرون من سيطرتها على الفيزياء، أثارت نظرية النسبية قضايا مهمة -أشرنا إليها بالفعل- عن نوع الحقيقة التي يمكن أن تمتلكها النظريات العلمية إذا كانت خاضعة لقواعد أساسية مما يؤدي إلى ثوراتٍ فكرية من وقتٍ لآخر، سنناقش هذا السؤال باستفاضة في عدة فصولٍ من الكتاب.

في الملحق، نقدِّم وصفًا لدور عملية الإدراك the process of perception في تطوير تفكيرنا العلمي نأمل أن يوضح بشكلٍ أكبر المعنى الضمني لوجهة نظر العلائقية relational (أو النسبية relativistic). سنضع في حسباننا مناقشة طريقة تطوير مفاهيمنا عن المكان والزمن كتجريدٍ لعملية الإدراك التي نقوم بها بشكلٍ اعتيادي يوميًّا؛ وسيتضح في هذه المناقشة أن مفاهيمنا عن المكان والزمن قد بُنيت في الواقع على تجربة مشتركة بطريقة معينة. وبالتالي، من المحتمل أن تكون هذه الأفكار صالحة فقط في مجالاتٍ محدودة ليست بعيدة عن الظروف التي نشأت فيها. وعندما ننظر إلى مجالات تجارِب جديدة فليس من المستغرب أن تكون هناك حاجة إلى مفاهيم جديدة، ولكن المثير للاهتمام هو أنه عندما تدرس حقائق عملية الإدراك العادي علميًّا، نكتشف أن طريقتنا المعتادة في النظر إلى تجارِبنا اليومية (والتي نجريها

مع بعض التحسينات في ميكانيكا نيوتن) سطحية إلى حدٍّ ما ومن نواحٍ كثيرة مضلِّلة للغاية. بعد ذلك، يُظهر الحساب الدقيق لعملية الإدراك أن المفاهيم اللازمة لاستيعاب الحقائق الفعلية للإدراك أقرب إلى النسبية منها إلى ميكانيكا نيوتن. بهذه الطريقة، قد يكون من الممكن إعطاء النسبية نوعًا معينًا من الأهمية البدهية المباشرة، التي تميل إلى الافتقار إلى الشكل الرياضي البحت. ونظرًا إلى أن التفكير الفعَّال في الفيزياء يتطلَّب عمومًا تكامل البدهية مع الجوانب الرياضية، فنأمل أن ترشدنا هذه الطريقة بشكلٍ أعمق وأكثر فاعلية إلى استيعاب النسبية (وربما نظرية الكمِّ).

* * *

II. مفاهيم النسبية قبل أينشتاين

من المعروف أن الاتجاه العام لمفهوم العلائقية (أو النسبية) لقوانين الفيزياء لم يبدأ مبكرًا في تطور العلم الحديث. نشأ هذا الاتجاه في مواجهة التقليد الأرسطي الأقدم الذي سيطر على التفكير الأوروبي في العصور الوسطى ولا يزال يمارس تأثيرًا قويًّا ولكن غير مباشرٍ في العصر الحديث. ربما يفضَّل ألا يُنسب هذا التقليد إلى أرسطو بقدر ما يفضَّل أن يُنسب إلى المدرسية أو السكولاستية Scholastics في العصور الوسطى، الذين جمَّدوا وثبَّتوا بعض المفاهيم التي ربما اقترحها أرسطو نفسه بطريقة مبدئية إلى حدٍّ ما كحلٍّ للعديد من المشاكل الفيزيائية والكونية والفلسفية التي شغلت المفكرين اليونانيين القدماء.

لقد غطَّت مذاهب أرسطو مجالاتٍ واسعة، ولكن فيما يتعلَّق بمناقشتنا الحالية، فإن مفهومه الكوني عن الأرض كمركزٍ للكون هو ما يثير اهتمامنا. واقترح أرسطو أن الكون كله مبني من سبع كرات تحتل الأرض منتصفها، في هذه النظرية يلعب مكان كل جسيم object في الكون دورًا رئيسيًّا. وهكذا من المفترض أن يكون لكل جسيمٍ مكانٌ طبيعي يسعى إليه، ويقترب منه بقدرٍ ما، ما دام لا تعوقه عقبات. كان يُنظر إلى «الأسباب النهائية –final causes» على أنها ما يحدد الحركة التي يسبِّب نشاطها «الأسباب الفعالة efficient causes». على سبيل المثال، بحسب أرسطو من المفترض أن يسقط جسيمٌ ما بسبب ميله لمحاولة الوصول إلى «مكانه الطبيعي natural place» في مركز الأرض، ولكن هناك حاجة إلى سببٍ «فعَّال» خارجي لتحرير الجسيم،

بحيث يمكن لـ«مبدأ السعي الداخلي internal striving principle» أن يدخل حيز التنفيذ.

من نواحٍ عديدة، قدَّمت أفكار أرسطو تفسيرًا معقولًا لنطاق الظواهر المعروفة لدى الإغريق القدماء، على الرغم من أنها بالطبع، كما نعلم، ليست كافية في المجالات الأوسع التي كُشِف عنها في الأبحاث العلمية الحديثة. على وجه الخصوص، ما ثبت أنه غير ملائمٍ هو مفهوم الترتيب الهرمي المطلق absolute hierarchial order للوجود، حيث يميل كلُّ شيء نحو مكانه المناسب في هذا الترتيب. وهكذا، كما رأينا، كان يُنظر إلى الفضاء بأكمله على أنه منظمٌ في نوعٍ من التسلسل الهرمي الثابت، في شكل «سبع كرات بلورية»، بينما منح السكولاستية الزمن لاحقًا تنظيمًا مشابهًا في العصور الوسطى بمعنى أنها أخذت لحظة معينة على أنها لحظة خلق الكون، وقد اعتبر فيما بعد أن الكون يتحرك إلى هدف معين، هو بمثابة نهايته. أدَّى تطوير مثل هذه المفاهيم إلى الأفكار التي اقتبست في مصطلحات قوانين الفيزياء، لعب المكان والزمن دورًا خاصًّا أو مفضلًا favored role، بحيث يجب إحالة خصائص المكان والزمن الأخرى إلى أماكن وأزمنة خاصة بطريقة فريدة، إذا ما أردنا أن نفهم قوانين الفيزياء بشكلٍ صحيحٍ. لقد طُبِّقت أفكارٌ مماثلة في جميع مجالات المساعي البشرية، مع إدخال الفئات الثابتة والخصائص وما إلى ذلك وكلها منظمة في تسلسلٍ هرمي مناسبٍ. في النظام الكوني الكلي، كان يُنظر إلى الإنسان على أنه يلعب دورًا رئيسيًّا لأنه أُعتبر الشخصية المركزية في دراما الوجود بأكمله، الذي من أجله خُلِق الجميع، وبناء على خياراته الأخلاقية تحوَّل مصير الكون.

كان جزءٌ من عقيدة أرسطو هو أن الأجسام في السماوات (مثل الكواكب) أكثر كمالًا من المادة الأرضية، وبالتالي يجب أن تتحرك في مدارٍ يعبِّر عن كمال طبيعتها. ونظرًا إلى أن الدائرة اُعتبِرت الشكل الهندسي الأكثر كمالًا، فقد استنتج أن الكواكب يجب أن تتحرك في دائرة حول الأرض. عندما فشلت الملاحظات في الكشف عن دائرية كاملة، استدرك هذا التناقض من خلال إدخال «أفلاك التدوير epicycles» أو «الدوائر داخل الدوائر». وبهذه الطريقة تطورت النظرية البطلمية التي كانت قادرة على «التكيُّف» مع أي مدارٍ على الإطلاق، عن طريق جلب العديد من أفلاك التدوير بطريقة معقدة للغاية، وهكذا حفظت مبادئ أرسطو، و«حفظت» شكل المدارات الفعلية.

كان كوبرنيكس أول من قدَّم كسرًا كبيرًا في هذا المخطط، أظهر أنه يمكن تجنُّب نظام التدوير المُعقَّد والاعتباطي، إذا افترض المرء أن الكواكب تدور حول الشمس وليس حول الأرض. كانت هذه بداية التغيير الكبير في الفكر البشري بأسره لأنه أظهر أن الأرض لا يجب أن تكون في مركز الأشياء. على الرغم من أن كوبرنيكس وضع الشمس في المركز، فإنها لم تكن خطوة كبيرة للغاية كي نرى لاحقًا أنه حتى الشمس قد تكون نجمًا واحدًا فقط من بين العديد من النجوم، لذلك لم يكن هناك مركزٌ للكون يمكن ملاحظته على الإطلاق. تطورت فكرة مماثلة عن الزمن بشكلٍ طبيعي للغاية، حيث اعتبر المرءُ الكونَ أبديًّا ولا نهائيًّا، من دون لحظة معينة للخلق، ولا «نهاية» معينة يتحرك إليها.

بدأت النظرية الكوبرنيكية ثورة جديدة في الفكر البشري لأنها أدَّت في النهاية إلى فكرة أن الإنسان لم يعُد يُنظر إليه على أنه شخصية مركزية في الكون، وكان للانكماش المروع إلى حدٍّ ما في دور الإنسان عواقب وخيمة في كل مرحلة من مراحل حياة الإنسان. لكننا هنا مهتمون أكثر بالآثار العلمية والفلسفية لمفاهيم كوبرنيكس، يمكن تلخيصها بالقول إنه بدأت تطورًا للمفاهيم أدَّت في النهاية إلى انهيار المفاهيم القديمة للمكان والزمن المطلقين، وتطوير فكرة أن أهمية المكان والزمن تكمن في العلائقية.

سنشرح هذا التغيير بإسهابٍ لأنه يقودنا إلى جوهر ما تعنيه نظرية النسبية. باختصارٍ، النقطة الرئيسية هي: نظرًا إلى عدم وجود أماكن مفضَّلة في الفضاء أو لحظاتٍ زمنية مفصلية، يمكن اعتبار أن قوانين الفيزياء تعمل بشكل متزن عند أي نقطة باعتبارها المركز، وستؤدي إلى نفس العلاقات. في هذا الصدد، يختلف الوضع تمامًا عن وضع النظرية الأرسطية التي أعطت -على سبيل المثال- مركز الأرض دورًا خاصًّا باعتباره المكان الذي تسعى إليه كل المادة.

الاتجاه نحو النسبية بهذا الشكل نفَّذته بشكلٍ أكبر قوانين جاليليو ونيوتن. قام جاليليو بدراسة متأنية لقوانين الأجسام الساقطة، حيث أظهر أنه في حين أن السرعة تختلف مع الزمن velocity فإن التسارع acceleration ثابتٌ. قبل جاليليو، لم يتطور مفهومٌ واضحٌ للتسارع. ربما كانت تلك إحدى العقبات الرئيسية أمام دراسة حركات الأجسام الساقطة، لأنه من دون هذه الفكرة، لم يكن في الإمكان صياغة الخصائص

الأساسية لحركاتها بوضوحٍ. ما أدركه جاليليو في الأساس هو أنه تمامًا كما أن السرعة المنتظمة هي معدل ثابت لتغيير الموضع، فإنه يمكن للمرء أن يتصور تسارعًا منتظمًا كمعدلٍ ثابتٍ لتغيُّر السرعة – أي

$$\frac{v(t + \Delta t) - v(t)}{\Delta t} = a = \text{constant} \qquad (2\text{-}1)$$

حيث t هو الزمن وΔt هو زيادة صغيرة في الزمن. [v (t)] هي السرعة خلال الزمن t، و$v(t + \Delta t)$ هي السرعة خلال الزمن [$t + \Delta t$] وهذا يعني أن الجسم الساقط يتميز بعلاقة معينة من خلال سرعاته المتغيرة، وهي علاقة لا تشير إلى نقطة ثابتة خارجية خاصة، ولكن إلى خصائص حركة الكائن نفسه.

ذهب نيوتن بعيدًا على هذا المنوال في صياغة قانونه للحركة:

$$m\mathbf{a} = m\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{F} \qquad (2 - 2)$$

حيث $\mathbf{a} = \dot{\mathbf{v}}$ هي عجلة الجسم وF هي القوة المؤثِّرة عليه. في هذه القوانين، فهم نيوتن نتائج جاليليو من خلال حقيقة أن قوة الجاذبية ثابتة بالقرب من سطح الأرض. في الوقت نفسه قام بتعميم القانون على علاقة تحمل أي قوة، ثابتة أو متغيرة. تضمَّنت أيضًا معادلات نيوتن للحركة قانون القصور الذاتي، أي أن أي جسمٍ تحت أي قوة سيتحرك بسرعة ثابتة (أو تسارع صفري) وسيستمر في القيام بذلك حتى تؤدي بعض القوة الخارجية إلى تغيير سرعته.

أحد الأسئلة المهمة التي أحدثتها قوانين نيوتن هو ما يُسمَّى بـ «إطار

القصور الذاتي inertial frame» للإحداثيات، وهي الإحداثيات التي تطبق القوانين فيها. بالطبع من الواضح أنه إذا كانت هذه القوانين صالحة في نظامٍ معينٍ S، فلن تكون قابلة للتطبيق في نظام متسارع S' من دون تعديلٍ. على سبيل المثال، إذا اعتمد المرء إطارًا دوَّارًا، فيجب على المرء إضافة قوى الطرد المركزي وقوى كوريوليس Coriolis forces. كتقريبٍ أوَّلي، إذا اعتبرنا أن سطح الأرض هو الإطار المرجعي للقصور الذاتي؛ ولكن لأن الأرض تدور -أي ليست ثابتة- يصبح هذا الافتراض غير صحيحٍ تمامًا. اقترح نيوتن أن «النجوم الثابتة» البعيدة يمكن اعتبارها أساسًا لإطارٍ دقيقٍ، وقد ثبت بالفعل أن هذا ممكنٌ، لأنه بموجب هذا الافتراض يمكن حساب مدارات الكواكب في النهاية بشكلٍ صحيحٍ باستخدام قوانين نيوتن. إن افتراض «النجوم الثابتة» كإطارٍ أو مرجعٍ لحساب القصور الذاتي كان جيدًا بما يكفي من وجهة نظر عملية، إلا أنه عانى من بعض التعسف أو الاعتراض النظري، الذي كان مخالفًا لمسار تطور الميكانيكا، أي للتعبير عن قوانين الفيزياء فقط كعلاقاتٍ داخل الحركة نفسها. في الواقع نُقل «الدور المفضل favored role» من مركز الأرض إلى النجوم الثابتة.

ومع ذلك، لقد تحقق مكاسب كبيرة من الفكرة السابقة، أي وجود نسبة قوانين الفيزياء إلى إطارٍ أو مرجعٍ ما «نسبية قوانين الفيزياء»، وبالتالي ستتوقف قوانين الفيزياء عن الإشارة إلى الجسيمات والأماكن والأزمنة المفضلة الخاصة، وما إلى ذلك. لم يعد هناك مركزٌ خاص للمكان وللزمن فحسب، بل لم يعد هناك أيضًا سرعة مفضَّلة للإطار المرجعي للإحداثيات.

على سبيل المثال، لنفترض أن لدينا إطارًا مرجعيًّا معينًا للإحداثيات x، يمكن اعتبار هذا الإطار هو النجوم الثابتة. تخيل الآن سفينة صاروخية تتحرك بسرعة ثابتة u نسبة إلى الإطار المرجعي الأصلي. الآن لدينا الإحداثيات X' و t' التي قيست بالنسبة إلى السفينة الصاروخية، يُفترض أن نتحصل عليها من خلال تحويلات جاليليو[1] كالتالي:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}' &= \mathbf{x} - \mathbf{u}t \\ \mathbf{v}' &= \mathbf{v} - \mathbf{u} \\ t' &= t \end{aligned} \qquad (2\text{-}3)$$

بمعنى آخر تعامل السرعات بشكلٍ خطي (وهو ما يتفق مع «البديهة»). لاحظ بشكلٍ خاصٍّ المعادلة الثالثة t=t' التي تؤكد أن الساعات لا تتأثَّر بالحركة النسبية.

بالعودة إلى معادلات الحركة من خلال التعبير عنها باستخدام الإطار المرجعي الجديد، تصبح المعادلة (2-2) كالتالي:

$$m\mathbf{a}' = m\frac{d^2\mathbf{x}'}{dt'^2} = m\frac{d^2\mathbf{x}}{dt^2} = m\frac{d\mathbf{v}}{dt} = m\mathbf{a} = \mathbf{F} \qquad (2\text{-}4)$$

هذا يعني أننا نحصل على القانون نفسه في الإطار المرجعي الجديد تمامًا كما في الإطار القديم. هذا مبدأ محدودٌ للنسبية، لأن القوانين الميكانيكية لها العلاقة نفسها في جميع الإطارات التي ترتبط بتحويلات جاليليو.

---

(1) يمكن اعتبار تحويلات جاليليو مجرد تقريبٍ صالح للسرعات الصغيرة مقارنة بسرعات الضوء، علاوة على ذلك، سنرى أنه عند السرعات العالية، يجب على المرء استخدام تحويل Lorentz بدلًا من ذلك.

ومع ذلك، لتوضيح التطورات اللاحقة، يجب الإشارة إلى أن نيوتن ومن تبعوه لم يدركوا تمامًا الآثار النسبية للديناميكيات التي طوروها. في الواقع، كان الموقف العام (الذي كان موقف نيوتن نموذجيًّا منه) هو أن هناك فضاءً مطلقًا، أي فضاءً موجودًا في ذاته، كما لو كانت مادة، بخصائص وصفات أساسية لا تعتمد على علاقتها بأي شيء آخر على الإطلاق (على سبيل المثال، المادة الموجودة في هذا الفضاء). وبالمثل، افترض أن الوقت «يتحرك» بشكلٍ مطلقٍ وموحدٍ ومتساوٍ، من دون علاقة بالأحداث الفعلية التي تحدث مع مرور الوقت. علاوة على ذلك، فقد افترض أنه لا توجد علاقة أساسية بين المكان والزمن، أي أن خصائص الفضاء تعرف وتحدد بشكلٍ مستقلٍّ عن حركة الجسيمات والكيانات بمرور الزمن، وأن تدفق الزمن مستقل عن الخصائص التي تميز هذه الأشياء والكيانات، لقد تحدَّد الإطار المرجعي للقصور الذاتي، بالطبع، في إطار من المكان والزمن المطلقين.

بمعنى ما، يمكن القول إن نيوتن استمرَّ في شكلٍ معدلٍ من تلك الجوانب من مفهوم أرسطو عن الفضاء المطلق التي كانت متوافقة مع الحقائق المادية المتاحة في ذلك الوقت. سنرى لاحقًا، أن المزيد من الحقائق التي أصبحت متاحة في القرن التاسع عشر كانت من شأنها أن تمنع الدفاع عن المفاهيم النيوتنية للمكان والزمن المطلقين، مما أدى بدلًا من ذلك إلى فكرة النسبية عند أينشتاين.

❊ ❊ ❊

III. مشكلة نسبية قوانين الديناميكا الكهربائية

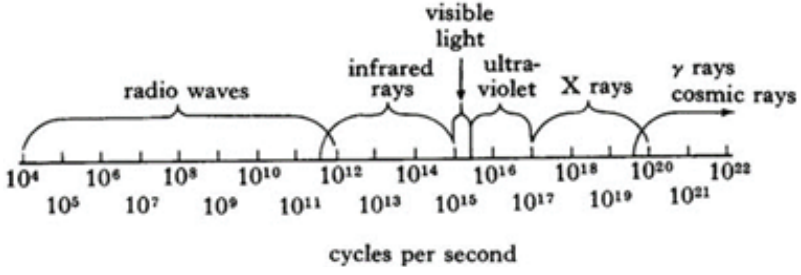
لقد رأينا أنه حتى في ميكانيكا نيوتن كان هناك عنصرٌ قوي في النسبية، لذلك لم يكن أينشتاين أول من أدخل المفاهيم النسبية إلى الفيزياء. ما فعله هو توسيع هذه المفاهيم لتشمل ظواهر الديناميكا الكهربية والبصريات، وبالتالي وضع الأساس لخطوة أكثر أهمية تتمثَّل في إبراز الفكرة القائلة بأن جميع القوانين الفيزيائية تعبِّر بشكلٍ صريحٍ وشاملٍ عن العلاقات الثابتة التي يمكن العثور عليها في التغييرات التي تحدث بالفعل في العمليات الطبيعية.

لماذا كان من الضروري توسيع المبادئ النسبية لظاهرة الديناميكا الكهربائية والبصريات؟ السبب في الأساس هو أن الضوء له سرعة انتشار محدودة $C \simeq 3 \times 10^{10}$ سم لكل ثانية. وقتها كان يُعتقد في الأصل أن الضوء يتكوَّن من جسيماتٍ تتحرك بهذه السرعة، ولكن لاحقًا اكتشف أنه موجة لها خصائص التداخل، وخصائص الانحراف الضوئي، وما إلى ذلك. معادلات ماكسويل لمتجهات المجال الكهرومغناطيسي وتوقَّعت بالفعل موجات من هذا النوع، بحيث تُحدَّد سرعتها من خلال نسبة الوحدات الكهروستاتيكية والكهرومغناطيسية.

تتفق السرعة المحسوبة مع سرعة الضوء المرصودة، مما يعطي مؤشرًا قويًّا على أن الضوء في الواقع هو شكلٌ من أشكال الموجات الكهرومغناطيسية. قدَّم الاتفاق حول الخصائص المحددة بالأقطاب المرصودة للضوء مع تلك التي تنبأت بها النظرية الكهرومغناطيسية تأكيدًا إضافيًّا لهذا الافتراض. بعد ذلك فسر الضوء والأشعة تحت

الحمراء والأشعة فوق البنفسجية، بالإضافة إلى العديد من أنواع الإشعاع الأخرى، على أنها إشعاعاتٌ كهرومغناطيسية ذات ترددٍ عالٍ جدًّا، تنبعث من الإلكترونات والذرات إلخ، تتحرك في مادة ساخنة ومستثارة. في وقتٍ لاحقٍ، أنتجت موجات كهرومغناطيسية منخفضة التردد من نفس نوع الـ(موجات راديوية) في المعامل. ظهر تدريجيًّا طيفٌ كاملٌ من الإشعاع الكهرومغناطيسي، كما هو موضحٌ في الشكل 1-3.

شكل 1-3



الآن، تمامًا كما تتكوَّن الموجات الصوتية من اهتزازات وسطٍ ماديٍّ مثل الهواء، يفترض أيضًا أن الموجات الكهرومغناطيسية تنتشر في وسطٍ منتشرٍ يتخلل كل شيء (يملأ الكون) يُسمَّى «الأثير ether»، الذي كان يُفترض أنه بالغ الدقة لدرجة أن الكواكب تمرُّ عبره من دون أي احتكاكٍ ملموسٍ. لقد اعتبر المجال الكهرومغناطيسي نوعًا معينًا من الانضغاط stress في الأثير، مشابهًا إلى حدٍّ ما للانضغاط الذي يحدث في المواد الصلبة والسائلة والغازية العادية التي تنقل درجات من الموجات

الصوتية والميكانيكية (على سبيل المثال، كان يُنظر إلى أن الأثير يدعم فكرة «أنابيب فاراداي ذات القوة المغناطيسية والكهربائية»).

إذا كان هذا الافتراض صحيحًا، فإن نسبية جاليليو للميكانيكا لا يمكن أن تصمد أمام الديناميكا الكهربائية، وخاصة بالنسبة إلى الضوء، لأنه إذا كان للضوء سرعة C بالنسبة إلى الأثير، فبموجب قانون جاليليو (3-2) لإضافة السرعات، ستكون سرعة الضوء C'=C-U تبعًا للإطار المرجعي للأثير الذي يتحرك بسرعة |U.

وبالتالي ستتغير قوانين ماكسويل تبعًا للأشكال المختلفة لقوانين جاليلو لكي تنتج سرعاتٍ مختلفة للضوء. سيكون لقوانين الديناميكا الكهربائية «إطارٌ مرجعي مفضل favored frame » هو الأثير.

هذه الفكرة بالطبع لا يمكن نفي الوجاهة عن جوهرها، ذلك أن الموجات الصوتية تتحرك بسرعاتٍ معينة بالنسبة إلى سرعة الهواء Vs، ولو حسبنا السرعة النسبية لصوت قطارٍ يسير بسرعة U ستبطئ سرعة موجات الصوت حيث ستصبح $V_s' = V_s - U$.

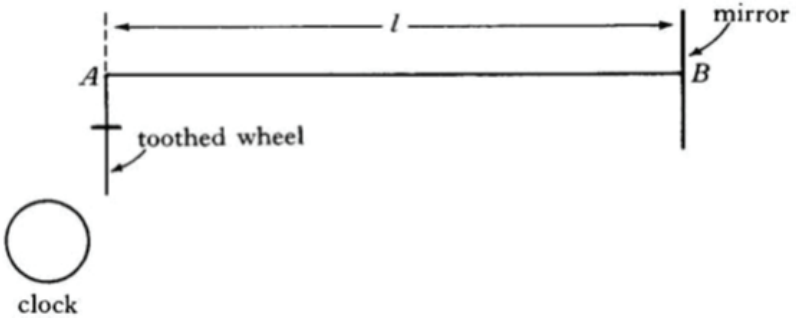
ولكن هنا يجب أن نتذكر أن الهواء هو وسيطٌ ماديٌّ مؤكدٌ جيدًا، ومعروفٌ بوجوده على العديد من الأسس المستقلة، لكنَّ الأثير فرضية غير مثبتة، قدمت فقط لشرح انتشار الموجات الكهرومغناطيسية، لذلك كان من الضروري الحصول على بعض الأدلة المستقلة على وجود وخصائص الأثير المفترَض.

كانت إحدى الأفكار الأوضح للتحقق من هذه النقطة هي قياس سرعة الضوء من خلال إطارٍ مرجعي متحرك، لمعرفة ما إذا كانت سرعته

C’ ، بالنسبة إلى الإطار المتحرك، قد تغيَّرت إلى C’-U، حيث U هي سرعة هذا الإطار المرجعي. على سبيل المثال، إليك تجربة فيزو Fizeau الموضحة بالشكل 3-2، حيث يمرُّ الضوء من خلال عجلة مسنَّنة (الترس) متحركة عند A عبر المسافة L وينعكس مرة أخرى بواسطة مرآة. تضبط سرعة العجلة بحيث يأتي الضوء المنعكس من خلال السن التالية. بمساعدة ساعة مناسبة، تقاس سرعة العجلة؛ ومن هذا، يعرف المرء الزمن T لسنة واحدة لتحل محل السن السابقة في موضع زاوية معين من العجلة، ثم يتحدد سرعة الضوء بواسطة المعادلة التالية:

$$C = \frac{2L}{T} \qquad (3\text{-}1)$$

شكل 3-2



الآن، نحن نعلم أن الأرض تتحرك عبر الأثير (الافتراضي) بسرعة متغيرة ولكنها غير معروفة V، ومع ذلك، من الواضح أن هذه السرعة

ستختلف في الصيف والشتاء. فعلى سبيل المثال، ستتغير بنحو 36 ميلًا في الثانية. دعونا الآن نرى ما إذا كان هذا الاختلاف سيظهر في سرعة الضوء كما لوحظ في المواسم المختلفة.

إذا كانت C هي سرعة الضوء بالنسبة إلى الأثير، فستكون C-U في المعمل في أثناء اتجاه الضوء نحو المرآة وC + V في أثناء عودته، وبالتالي فإن وقت الاجتياز T سيكون كما هو موضحٌ بالمعادلة التالية:

$$T = \frac{L}{C+V} + \frac{L}{C-V} = \frac{2LC}{C^2 - V^2}$$
$$= \frac{2L}{C} \frac{1}{1-(V^2/C^2)} \cong \frac{2L}{C}\left(1 + \frac{V^2}{C^2} + \cdots\right) \quad (3\text{-}2)$$

لقد قمنا بتوسيع النتيجة كمتسلسلة للكمية الصغيرة V / C مرفوعة للأس (القوى)، مع الاحتفاظ فقط بالأس الثانية (أس اثنين) كما هو موضح بالمعادلة.

لاحظ إذن أن التأثير الذي يمكن ملاحظته يكون فقط بترتيب V^2 / C^2، وهو في حدود 10^{-8}. في الوقت نفسه الذي بدأ فيه الفيزيائيون دراسة هذه المشكلة بجدية (قرب نهاية القرن التاسع عشر)، كان هذا التأثير صغيرًا جدًّا بحيث لا يمكن اكتشافه بالنسبة إلى أجهزة القياس المتوفرة (يمكننا الآن القيام بتلك التجربة باستخدام خلايا كير Kerr cells، مما سيعطينا نتائج ستُناقش لاحقًا).

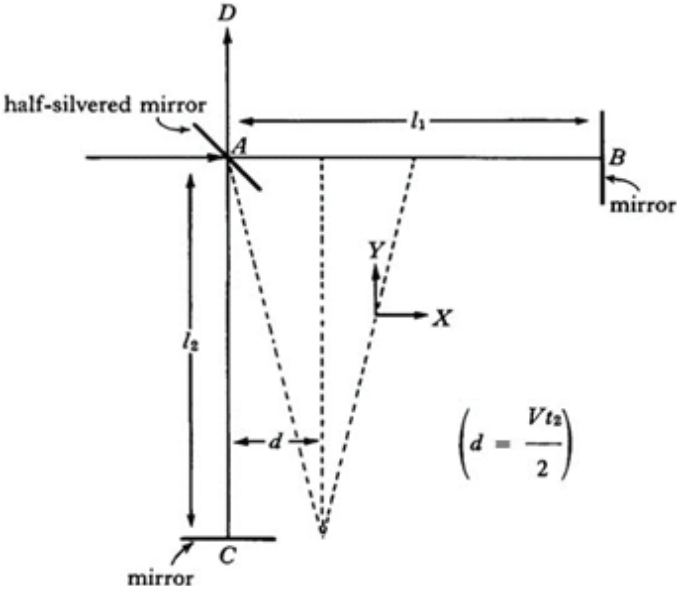
IV. تجربة ميكلسون ومورلي

كانت الصعوبة الرئيسية في التحقُّق من فرضية الأثير هي الحصول على قياساتٍ لسرعة الضوء بدقة عالية. قرب نهاية القرن التاسع عشر، طورت مقاييس التداخل interferometers التي أصبحت ذات دقة عالية. استفاد ميكلسون ومورلي من هذه الحقيقة لإجراء تجربة قياس بدقة شديدة، ليس سرعة الضوء نفسه، بل بالأحرى نسبة سرعات الضوء في اتجاهين متعامدين؛ أي نسبة من شأنها -كما سنرى- أن تعمل أيضًا من حيث المبدأ كوسيلة لاختبار فرضية الأثير.

يوضح ترتيبات التجربة بشكلٍ تخطيطي في الشكل 1-4. يدخل الضوء إلى مرآة نصف فضية عند A. يذهب جزءٌ من الشعاع إلى مرآة عند B، على مسافة l1 من A، مما يعكسه مرة أخرى. يذهب جزءٌ آخر إلى المرآة C عند l2، ليتم عكسه أيضًا. يتَّحد الشعاعان عند A مرة أخرى لينتقل إلى D كما هو موضح، مما يؤدي إلى ظهور نمط تداخلٍ. من خلال حساب الهوامش، من الممكن الحصول على قياساتٍ دقيقة للغاية للاختلاف بين المسارات الضوئية للشعاعين.

إذا كانت الأرض في حالة سكونٍ في الأثير، وإذا كانت l1 تساوي l2، فسيكون هناك تداخلٌ بنَّاءٌ في D. ولكن افترض أن $l_1 \neq l_2$ ، وأن الأرض تتحرك بسرعة U في الاتجاه X. يمكن حساب زمن انتقال الضوء من B إلى C والعودة مرة أخرى من خلال المعادلة (2-3) (كما في تجربة فيزو ذات العجلة المسننة):

شكل 4-1



$$t_1 = \frac{2l_1}{C}\frac{1}{1-(V^2/C^2)} \cong \frac{2l_1}{C}\left(1 + \frac{U^2}{C^2} + \cdots\right) \qquad (4\text{-}1)$$

بفرض أن t2 هو زمن انتقال الضوء من A إلى C والعكس، نلاحظ أنه بينما يمر الضوء من A إلى C، فإن المرآة عند C تتحرك بالنسبة إلى الأثير عبر مسافة $d = Ut_2 / 2$ في الاتجاه X. وبالمثل، في أثناء عودة الضوء، تتحرك المرآة A المسافة نفسها في الاتجاه X. ثم وفقًا لنظرية فيثاغورس، يكون إجمالي طول مسار شعاع الضوء (ذهابًا وإيابًا) كالمعادلة التالية:

$$L_2^2 = 2\sqrt{l_2^2 + \frac{U^2 t_2^2}{4}} \qquad (4\text{-}2)$$

بما أن سرعة الضوء في الأثير C، يصبح لدينا المعادلات التالية:

$$t_2 = \frac{2}{C}\sqrt{l_2^2 + \frac{U^2 t_2^2}{4}} \qquad (4\text{-}3)$$

$$t_2^2\left(1 - \frac{U^2}{C^2}\right) = \frac{4l_2^2}{C^2} \qquad (4\text{-}4)$$

$$t_2 = \frac{2l_2}{C}\frac{1}{\sqrt{1 \quad U^2/C^2)}} \cong \frac{2l_2}{C}\left(1 + \frac{U^2}{2C^2} + \cdots\right) \qquad (4\text{-}5)$$

فيصبح الفرق في الزمن كالتالي:

$$\Delta t = t_1 - t_2 = \frac{2}{C}\left(\frac{l_1}{1 - (U^2/C^2)} - \frac{l_2}{\sqrt{1 - (U^2/C^2)}}\right) \qquad (4\text{-}6)$$

إذا كان (كما هو الحال في التجربة الفعلية) l2 = l1، إذن:

$$\Delta t \cong \frac{2l}{C}\left(1 + \frac{U^2}{C^2} - 1 - \frac{U^2}{2C^2}\right) = \frac{l_1}{C}\frac{U^2}{C^2} \qquad (4\text{-}7)$$

وبالتالي فإن Δt تتناسب بالطبع مع انزياح الهوامش.

سنفترض الآن أن الجهاز تم تدويره بزاوية 90 درجة، بعد ذلك، يجب أن يتغير نمط الهامش، لذلك، من خلال تدوير الجهاز، يجب أن يكون المرء قادرًا على ملاحظة انزياح هامشي متغير بثباتٍ، مع الإشارة القصوى والدنيا إلى اتجاه سرعة الأرض عبر الأثير. من حجم الانزياح الهامشي، يجب أن يكون المرء قادرًا على حساب القيمة U للسرعة نفسها.

بالطبع، قد تحدث مصادفة أنه في اللحظة التي أُجريت فيها التجربة، ستكون الأرض في حالة سكونٍ في الأثير، مما يؤدي إلى عدم وجود تغييرات ملحوظة عند تدوير الجهاز. ولكن عند الانتظار لمدة 6 أشهر، يمكن للمرء أن يستنتج أن سرعة الأرض يجب أن تكون قرابة 36 ميلًا في الثانية، بحيث يمكن بعد ذلك ملاحظة الانزياح الهامشي.

نظرًا إلى أن الانزياح الهامشي المتوقع هو من الدرجة U^2 / C^2، فيجب أن يكون بالطبع صغيرًا جدًّا. ومع ذلك، كان جهاز ميكلسون ومورلي حسَّاسًا بدرجة كافية لاكتشاف التحولات المتوقعة. ومع ذلك، عند إجراء التجربة، كانت النتيجة سلبية ضمن الدقة التجريبية. لم يلاحظ أي انزياح هامشي في أي موسم من السنة. في وقتٍ لاحقٍ، استمرت التجارب الأكثر دقة من النوع نفسه في تأكيد نتائج ميكلسون ومورلي.

* * *

V. جهود حفظ فرضية الأثير

كانت تجربة ميكلسون مورلي بلا شكٍّ واحدة من أكثر التجارب أهمية في الفيزياء الحديثة، لأنها تتعارض مع بعض الاستدلالات المباشرة لفرضية أن الضوء يُحمَل بواسطة الأثير؛ أدَّى في النهاية إلى تغييراتٍ جذرية في مفاهيمنا عن المكان والزمن التي جلبتها نظرية النسبية. ومع ذلك، لا يجب الافتراض أن الفيزيائيين غيَّروا أفكارهم على الفور نتيجة لهذه التجربة، في الواقع، كما هو الطبيعي، جرت تجربة سلسلة طويلة من الفرضيات البديلة، بهدف إما إنقاذ الأثير بطريقة أو بأخرى، وإما على الأقل حفظ مفاهيم «البدهية» للمكان والزمن التي أنتجتها قوانين نيوتن للحركة وثباتها في ظل تحويلات جاليليو (3-2). ومع ذلك، فشلت كل هذه المحاولات في نهاية المطاف أو أدَّت إلى الارتباك الذي شعر به الفيزيائيون، في النهاية رأوا أنه من الحكمة عدم المضي قدمًا في هذا الاتجاه.

سنقدِّم هنا ملخصًا لبعض التسهيلات الرئيسية وتعديلات الأفكار التي أجريت من أجل الحفاظ على الأفكار القديمة عن المكان والزمن مع شرح النتائج السلبية لتجربة ميكلسون ومورلي. [للحصول على وصفٍ أكثر شمولًا لهذه الجهود، انظر:

W.Panofsky and M.Phillips, Classical Electricity and Magnetism, Addison-Wesley, Reading, Mass., 1955; also, C.Moller, The Theory of Relativity, Oxford, New York, 1952].

كان أحد أبسط هذه الأفكار هو اقتراح أن الأجسام مثل الأرض

تسحب الأثير معها إلى جوارها، كما تقوم الكرة التي تتحرك في الهواء بسحب طبقة من الهواء بالقرب من سطحها. نتيجة لذلك، لن تتغير السرعة المقاسة للضوء مع الفصول، لأنه ستُحدد دائمًا بالنسبة إلى طبقة الأثير التي تتحرك مع الأرض.

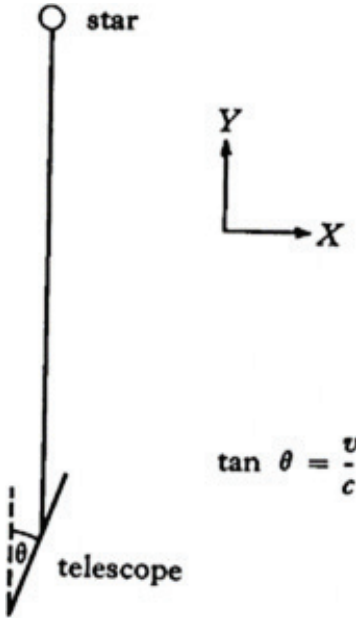
حاول السير أوليفر لودج Oliver Lodge اختبار هذا التأثير عن طريق تمرير شعاعٍ من الضوء بالقرب من حافة قرص سريع الدوران، إذا كان القرص يسحب طبقة من الأثير، فمن المتوقع حدوث تأثيراتٍ ملحوظة على شعاع الضوء، ومع ذلك، كانت نتائج هذه التجربة سلبية.

نشأت الفكرة بشكلٍ طبيعيٍّ: حيث إن الجسم الصغير لا يمكنه سحب كمية كبيرة من الأثير، فإن جسمًا أكبر مثل الأرض قد يمكنه فعل ذلك، لكن هذا التفسير استبعد من خلال ملاحظات انحراف الضوء.

لفهم هذه المشكلة، دعونا نعيد النظر مؤقتًا في افتراض أن الأرض لا تسحب الأثير معها. افترض أنها تتحرك بالنسبة إلى الأثير بسرعة U في الاتجاه X (انظر الشكل 1-5) وأن أحد علماء الفلك كان يوجه تلسكوبه إلى نجمٍ بعيدٍ، وللتبسيط سنعتبره في اتجاه عمودي على حركة الأرض (أي ، Y). ينتشر الضوء من النجم عبر الأثير في اتجاه Y. ومع ذلك، نظرًا إلى أن التلسكوب يتحرك مع الأرض، فيجب توجيهه بزاوية معينة θ (عادةً ما تكون صغيرة جدًّا) بالنسبة إلى الاتجاه Y، بحيث $\tan\theta \cong \theta = V/C$. نظرًا إلى أن سرعة الأرض تتغير بمقدار 36 ميلًا في الثانية بين الصيف والشتاء، فإن الموقع الزاوي للنجم يجب أن ينحرف بنحو $2x10^{-4}$، وهو ما يمكن ملاحظته باستخدام تلسكوبٍ جيدٍ، ولقد

عثر على الانحراف بالفعل.

شكل 1-5

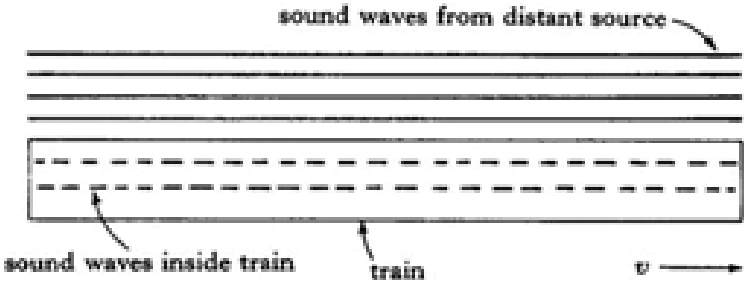


الآن، إذا سحبت الأرض طبقة من الأثير إلى جوارها، فلا يجب رؤية مثل هذا الانحراف (أو الشذوذ) في موضع النجم. المشكلة تشبه إلى حدٍّ بعيدٍ مشكلة الموجات الصوتية في قطار سكة حديدٍ متحرك. لتبسيط المشكلة، لنفترض مرة أخرى أن الموجات تتعامد مع الجدران الجانبية للقطار من مصدرٍ بعيدٍ جدًّا، كما هو موضحٌ في الشكل 2-5. ستعمل هذه الموجات على اهتزاز الجدران والنوافذ على التردد نفسه، وهذا بدوره سيؤدي إلى اهتزاز الهواء داخل القطار. من الواضح أنه نظرًا إلى أن الصوت الساقط هو موجة مستوية، فإن جدران القطار ستصدر

موجاتٍ مستوية مقابلة في الاتجاه نفسه، لذلك، فإن تغيير سرعة القطار لن ينتج عنه أي اختلاف مماثل في اتجاه الصوت داخل القطار. ومن الواضح بطريقة مماثلة أن موجات الضوء المستوية من سقوط نجمٍ بعيدٍ على طبقة متحركة من الأثير بالقرب من سطح الأرض لن تظهر ولن تعتمد في اتجاهها على سرعة الأرض.

يبدو أن تجربة السير أوليفر لودج، جنبًا إلى جنب مع الملاحظات حول انحراف الضوء، تستبعد بالتأكيد فرضية انجراف الأثير، بحيث لا يمكن استخدام هذا لشرح النتائج السلبية لتجربة ميكلسون ومورلي. في وقتٍ لاحقٍ أجريت تجربة اقتراح بديلٍ –ربما تتحدد بأن سرعة الضوء C لا تتعلق ببعض الأثير الافتراضي، ولكن تتعلق بمصدر الضوء.

شكل 2-5



بالطبع مصدر معظم الضوء على الأرض هو الشمس، ولكن عند استخدام هذا الضوء، فإنه سينعكس على الأجسام الموجودة على سطح الأرض. وفقًا لهذه النظرية، سيكون الانعكاس الأخير هو العامل الرئيسي الذي يحدد سرعة الضوء، لذا، سواء استخدمت مصباحًا أو

ضوء الشمس المنعكس، يتوقع المرء أن تكون سرعة الضوء C بالنسبة إلى الأرض، مما يفسر النتيجة السلبية لتجربة ميكلسون ومورلي.

كانت هذه الفرضية متوافقة مع العديد من الحقائق المتاحة (بما في ذلك ملاحظات انحراف الضوء)، لكنها واجهت صعوباتٍ خطيرة فيما يتعلق بالملاحظات على النجوم المزدوجة. لمعرفة ما هي هذه الصعوبات، دعنا نفترض -من أجل التبسيط- أن هناك (كما هو موضحٌ في الشكل 5-3) نجمين A وB، لهما كتلة متساوية ويتحركان على جانبين متقابلين من مدارٍ دائري حول مركز الكتلة المشترك C (يمكن بسهولة رؤية نتائج مماثلة لمتابعة المزيد من الحالات الشائعة). سنفترض وجود مراقب P، على مسافة كبيرة جدًّا d من مركز مدار النجوم، بحيث تكون الزاوية التي يقابلها مدارهما دائمًا صغيرة جدًّا. سنأخذ في الاعتبار فقط أشعة الضوء التي تنبعث بطريقة تصل في النهاية إلى النقطة P. دعونا نبدأ بتلك الأشعة التي تصل إلى P بعد انبعاثها بزمن t1، عندما يكون قطر المدار على طول الخط PC (وهو إذن خط البصر). عن طريق القليل من الجبر (بما في ذلك نظرية فيثاغورس)، يمكننا أن نرى أنه بسبب صغر V / C (حيث V هي سرعة الدوران في المدار)، يمكن اعتبار كلا الشعاعين مسافرين بالسرعة نفسها على طول اتجاه PC (سنهمل قسمة V^2 / C^2، والتي تعتبر صغيرة بالنسبة إلى قيمة V / C التي سيُنظر إليها على أنها ذات صلة في المناقشة اللاحقة).

شكل (5-3)

الزمن الذي سيستغرقه الضوء من أقرب نجم A ليصل إلى النقطة P سيكون:

$$T_{1A} = \frac{d - a}{C} \qquad (5\text{-}1)$$

(حيث **a** هو نصف قطر المدار) وسيكون الزمن الذي سيستغرقه الضوء من النجم الأبعد، B:

$$T_{1B} = \frac{d + a}{C} \qquad (5\text{-}2)$$

مع تطور مداري النجمين (حيث تكون سرعة الضوء دائمًا C بالنسبة إلى النجم الباعث)، تبدأ الأشعة التي تصل P من A وB في الحصول على سرعاتٍ مختلفة. في الواقع عند الزمن t2 عندما يكون قطر المدار متعامدًا على خط البصر، فإن الضوء الخارج من النجم A ليصل إلى الراصد P سيكون له سرعة C-V، بينما الضوء الخارج من B إلى الراصد P سيكون له سرعة C + V. (لقد استخدمنا هنا التصغير θ لإهمال قيمة θ^2 تبعًا لنظرية فيثاغورث). ستكون الأزمنة التي يستغرقها هذا الضوء للوصول إلى P (بالتقديرات التقريبية التي نستخدمها):

$$T_{2A} = \frac{d}{c - v} \qquad T_{2B} = \frac{d}{c + v} \qquad (5-3)$$

أخيرًا، عند الزمن t3، عندما تتحوَّل المدارات بمقدار 180 درجة (بحيث يكون القطر هو مرة أخرى على طول خط البصر)، يجب أن يكون:

$$T_{3A} = \frac{d + a}{C} \qquad T_{3B} = \frac{d - a}{C} \qquad (5-4)$$

لنحسب الآن مقدار التغيُّر في الزمن:

$$\Delta T = T_{2A} - T_{1A} = \frac{d}{c - v} - \frac{(d - a)}{C} \cong \frac{a}{c} - \frac{d\,v}{c\,c} \qquad (5-5)$$

v / c هي قيمة من الدرجة الأولى. علاوة على ذلك، نظرًا إلى أن d هو ترتيب فلكي للمسافة، فيمكن بسهولة حدوث ذلك (dv)/c2>a/c في مثل هذه الحالة، سيصل الضوء المنبعث من النجم A عند t2 إلى P قبل الضوء المنبعث من هذا النجم في الزمن t1.

ومن هنا يجب أن تكون الفترة الزمنية مماثلة عندما لا يصل أي ضوء من النجم A إلى P (والنتائج نفسها بالطبع بالنسبة إلى النجم B). قد ينتج عن هذا نوعٌ لافتٌ للنظر إلى حدٍّ ما، ويمكن ملاحظته بسهولة من التباين في شدة الضوء من النجم المزدوج، وهو ما لم يعثر عليه في الواقع. نستنتج، إذن، أن الفرضية القائلة بأن الضوء ينبعث بسرعة **C** تبعًا لمصدره لا يمكن الدفاع عنها.

VI. نظرية لورنتز للإلكترون

طوَّر لورنتز طريقة مختلفة تمامًا لمحاولة التوفيق بين فرضية الأثير ونتائج التجارب (كالتي ذُكرت في الفصلين الرابع والخامس). أدَّت نظرية لورنتز بالفعل إلى مثل هذه المصالحة؛ ولكن خلال القيام بذلك طرحت مشاكل جديدة ذات ترتيبٍ أعمق بكثيرٍ فيما يتعلق بمعنى قياسات المكان والزمن، التي أرست الأساس لمفاهيم أينشتاين الجديدة جذريًّا عن المكان والزمن.

على الرغم من أن نظرية لورينتز لم تعُد مقبولة بشكلٍ عامٍّ اليوم، فإن من المفيد دراستها بشيء من التفصيل، ليس فقط لأنها تساعد على تقديم تقديرٍ للسياق التاريخي الذي نشأت فيه نظرية النسبية، ولكن لأنها تساعدنا على فهم المحتوى الأساسي لنهج أينشتاين الجديد للمشكلة. في الواقع، يؤدي الفحص النقدي لنظرية لورنتز -على أساس المفاهيم المادية المألوفة والمقبولة بالفعل- إلى رؤية ما هو الخطأ في المفاهيم النيوتنية للمكان والزمن بوضوحٍ، بالإضافة إلى اقتراح عددٍ كبيرٍ من التغييرات المطلوبة من أجل تجنُّب الصعوبات التي تؤدي إليها هذه المفاهيم.

بدأ لورنتز بقبول فرضية وجود الأثير، ومع ذلك كانت خطوته الأساسية الجديدة هي دراسة اعتماد عملية قياس المكان والزمن على العلاقة بين التكوين الذري للمادة وحركة المادة عبر الأثير.

كان معروفًا -في ذلك الوقت- أن المادة تتكوَّن من ذراتٍ، التي

بدورها تتكوَّن من جسيماتٍ سالبة الشحنة (تُسمَّى الإلكترونات) وجسيمات موجبة الشحنة (التي أظهر رذرفورد أنها ربما تكون نوى صغيرة) وهي التي تجذب الإلكترونات. القوى بين الذرات المسؤولة عن ترابطها لتكوين الجزيئات، ومن ثم الأجسام الصلبة الميكروسكوبية، كان يُفترض لأسبابٍ معقولة أنها تنشأ من قوى الجذب بين الإلكترونات والجزء ذي الشحنة الموجبة من الذرة، وقوى التنافر بين الإلكترونات والإلكترونات. افترض مثلًا أن هناك شبكة بلورية، ستتحدد الأماكن التي تصل فيها هذه القوى الكهربائية إلى التوازن بالمسافة D بين الذرات المتتالية في الشبكة، بحيث يمكن في التحليل الأخير تحديد حجم مثل هذه البلورة التي تحتوي على عددٍ محددٍ من الخطوات الذرية إذا حسبناها في أي اتجاه.

لقد افترض لورنتز أن القوى الكهربائية في جوهرها حالات إجهاد وانضغاط في الأثير. باستخدام معادلات ماكسويل (التي يُفترض أنها تثبت الإطار المرجعي حين يكون الأثير في حالة سكون) من الممكن حساب المجال الكهرومغناطيسي المحيط بالجسيم المشحون.

بالنسبة إلى جسيمٍ ساكنٍ في الأثير، يمكن بعد ذلك أن نحسب المجال من جهد ϕ ، وهو دالة متناظرة مثل الكرة لمسافة R من الشحنة، أي أن $\phi = q/R$ (حيث q هي شحنة الجسيم)، عند إجراء حسابٍ مماثلٍ لشحنة تتحرك بسرعة v عبر الأثير، وجد أن مجال القوة لم يعد متناظرًا كرويًّا. بدلًا من ذلك، أصبح تناظره في شكل القطع الناقص لكل دورة مع وجود أقطارٍ غير متغيرة في الاتجاهات المتعامدة مع السرعة، ولكن

يحدث قصر في اتجاه الحركة بنسبة $\sqrt{1-(v^2/c^2)}$ من الواضح أن هذا القصر هو تأثر حركة الإلكترون خلال الأثير.

نظرًا إلى أن الجهد الكهربائي الناتج عن جميع ذرات البلورة هي مجموع الجهود الكهربائية لكل جسيم تتكون منها، فإن هذا يعني أن النمط الكامل لسطح متساوي الجهد ينكمش في اتجاه الحركة ويُترك من دون تغيير في الاتجاه العمودي، تمامًا كما يحدث مع مجال إلكترون واحد.

الآن يصبح مواضع التوازن للذرات عند نقاط الحد الأدنى من الجهد (حيث تلغى كل القوى الواقعة عليها). ويترتب على ذلك أنه عندما يتقلص نمطٌ لسطحٍ متساوي الجهد في اتجاه الحركة، سيكون هناك انكماشٌ مناظرٌ لصف الذرات بأكمله، مثلًا لقضيب (ما نود قياسه) في نفس الاتجاه، بحيث يحدث قِصَر في النسبة $\sqrt{1-(v^2/c^2)}$. نتيجة لذلك، إذا كان لدينا قضيب قياس طوله l_0 عند السكون، فعند الحركة بسرعة v على طول اتجاه طوله، يصبح طوله:

$$l = l_0\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} \qquad (6\text{-}1)$$

ولكن إذا كان القضيب عموديًّا على اتجاه الحركة، فلن يتغيَّر طوله بالطبع.

لنعد الآن إلى تجربة ميكلسون ومورلي، نظرًا إلى أن أذرع مقياس التداخل تتكوَّن من ذراتٍ، فإننا نتوقع أن تخضع لنفس التحول الذي قدمته المعادلة (1-6). ومع ذلك، سيحدث قصر للقضيب الذي يكون

طوله موازيًا لاتجاه الحركة؛ الآخر لن يتغير في الطول. نظرًا إلى أنه من المفترض أن يكون القضيبان متساويين في الطول عندما يكونان في حالة سكونٍ، باستخدام المعادلة (6-4):

$$l_1 = l_0\sqrt{1 - (v^2/c^2)} \qquad l_2 = l_0 \tag{6-2}$$

منها نحصل على قيمة التغيُّر في الزمن:

$$\Delta t = \frac{2l_0}{c}\left(\frac{1}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} - \frac{1}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}}\right) = 0 \tag{6-3}$$

بهذه الطريقة يمكننا أن نحسب أنه -بغض النظر عن سرعة الأرض- لن يكون هناك انزياحٌ هامشي، وبالتالي أمكن التوفيق بين نظرية الأثير ونتائج تجربة ميكلسون ومورلي. هذه التسوية هي بالطبع نتيجة مباشرة لما يُسمَّى منذ ذلك الحين بانكماش لورنتز لجسمٍ يتحرك عبر الأثير[1].

* * *

(1) كان فيتزجيرالد Fitzgerald قد اقترح في وقتٍ سابقٍ انكماشًا مشابهًا على أسسٍ مخصصة، لكن لورنتز كان أول من يبرره نظريًا.

VII. مزيد من التطوير لنظرية لورنتز

على الرغم من أن النتيجة الموصوفة في الفصل السادس معقولة إلى حدٍّ ما، فإنها لا تقدِّم في حد ذاتها وصفًا كاملًا لجميع العوامل ذات الصلة بهذه المشكلة. وهكذا، على الرغم من أن القياس المباشر لسرعة الضوء بالدقة المطلوبة لم يكن ممكنًا في زمن لورنتز، فمن الواضح أن من الضروري بالنسبة إليه أن يتنبَّأ بما سيحدث عندما تصبح هذه القياسات ممكنة (كما هي الآن). لأنه وقتها ربما لا يزال من الممكن قياس سرعة الأرض v بالنسبة إلى الأثير بواسطة تجربة فيزو الدقيقة للغاية، باستخدام الحد v^2 / c^2 من الدرجة الثانية في المعادلة (2-3) لحساب هذه السرعة.

لمعالجة المشكلة، كان على لورنتز أن يأخذ في الاعتبار ليس فقط أن مسطرة القياس سوف تنكمش عند التحرك خلال الأثير، ولكن أيضًا قد يكون هناك بعض التأثير المقابل على الساعات (نظرًا إلى أن كلًّا من المسطرة والساعة ضروريان لقياس سرعة الضوء بهذه الطريقة)، هذه المشكلة هي بالأحرى مشكلة معقدة يجب تحليلها، لذلك سنقوم فقط برسم بعض العوامل الرئيسية.

الساعة النموذجية هي هزاز توافقي يحقق المعادلة $M\ddot{X} = -KX$

حيث M هي كتلة الهزاز وK هي ثابت قوة الزنبرك، ويصبح الفترة period الزمنية للساعة:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{M}{K}} \qquad (7\text{-}1)$$

الآن، دعونا نفترض أولًا ما يحدث لكتلة إلكترون متحرك. بينما نقوم بتسريع الإلكترون، فإننا نخلق مجالًا مغناطيسيًّا يتزايد باطرادٍ. كما هو معروفٌ جيدًا، فإن المجال المغناطيسي المتغير يستحث مجالًا كهربائيًّا، وتبعًا لقانون لينز Lenz's law، فإن هذا المجال الكهربائي يعارض القوة الدافعة الكهربائية التي أنتجت المجال المغناطيسي المتغير في المقام الأول. بمعنى آخر، العمليات الكهرومغناطيسية لها نوعٌ من القصور الذاتي، أو مقاومة التغيير، التي تظهر على سبيل المثال في خاصية حث ملف inductance of a coil. يظهر هذا القصور الذاتي مع الإلكترون كمقاومة للتسارع. يوضح الحسابات التفصيلية (الذي يتجاوزه إطار هذا العمل) أنه إذا تم إعطاء الإلكترون التسارع a، فهناك «قوة رجعية back force»، يمكن حسابها كالتالي:

$$\mathbf{F}_i = -\lambda \mathbf{a} \qquad (7\text{-}2)$$

حيث إن λ هو ثابتٌ يعتمد على حجم وشحنة الإلكترون. (بالنسبة إلى شحنة غلافٍ لكرة مشحونة بطيئة الحركة لها نصف قطر r_0 وشحنتها q، فإن $\lambda \cong q^2/r_0$)، ثم ستكون معادلة حركة الإلكترون:

$$m_m \mathbf{a} = -\lambda \mathbf{a} + \mathbf{F} \qquad (7\text{-}3)$$

حيث m_m هي الكتلة «الميكانيكية» العادية وF هي القوة المتبقية الواقعة على الإلكترون (علاوة على تفاعل الإلكترون المتسارع مع المجال الناتج الذي تنتجه شحنته الذاتية)، يمكن إعادة كتابة هذه المعادلة كـالآتي:

$$(m_m + \lambda)\mathbf{a} = \mathbf{F} \quad \text{or} \quad m\mathbf{a} = \mathbf{F} \qquad (7\text{-}4)$$

حيث $m = m_m + \lambda$ ، نلاحظ أنه في معادلات الحركة الفعلية توجد كتلة فعالة m يمكن أن تُسمَّى أيضًا الكتلة المرصودة. هذه الكتلة هي التي تُقاس عندما نلاحظ القوة اللازمة لتسريع الجسيم. من ناحية أخرى، تسمى «الكتلة الكهرومغناطيسية» التي من الواضح أنه يجب إضافتها إلى m_m لاكتساب الكتلة الفعالة.

نلاحظ هذه الكتلة الفعالة أيضًا في الديناميكا المائية، حيث يُظهر أن الكرة المتحركة تسحب السائل بالقرب منها، حيث تواجه بمقاومة أعلى للتسارع منها وهي في الفراغ. يمكن القول إن المجال الكهرومغناطيسي بالقرب من الإلكترون يساهم بالمثل في القصور الذاتي.

توضح الافتراضات المذكورة أعلاه أن معادلات الميكانيكا مرتبطة ارتباطًا وثيقًا بتلك الخاصة بالديناميكا الكهربائية. ستصبح هذه العلاقة ذات أهمية خاصة إذا تمكنَّا من إيجاد طريقة ما لتمييز m_m و λ . وفقًا لـلورنتز، يجب أن يكون هذا التمييز ممكنًا من حيث المبدأ. لإجراء حساب إضافي على أساس نظرية لورنتز، أظهر أن الكتلة الكهرومغناطيسية هي دالة في السرعة بالنسبة إلى الأثير.

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \qquad (7\text{-}5)$$

حيث إن λ_0 هي الكتلة الكهرومغناطيسية للإلكترون الساكن في الأثير. من ناحية أخرى، وفقًا لمفاهيم نيوتن، يجب أن تكون الكتلة الميكانيكية ثابتة ومستقلة عن السرعة، لذلك يمكننا أن نصيغ الكتلة الفعالة بالمعادلة التالية:

$$m = m_m + \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \qquad (7\text{-}6)$$

من خلال دراسات تباين الكتلة الفعالة مع السرعة، يمكن عندئذٍ التمييز بين الكتلة الميكانيكية m_m والكتلة الكهرومغناطيسية $\lambda_0/\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$. لقد أُجريت مثل هذه الدراسات في ذلك الحين باستخدام قياسات أشعة الكاثود لـ e / m. تكشف هذه التجارب أن الكتلة الفعالة تزداد في الواقع مع السرعة بهذه النسبة $1/\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$ ، وبالتالي، يبدو إما أن الكتلة كلها كهرومغناطيسية في الأصل وإما أن الكتلة غير الكهرومغناطيسية m_m تتناسب أيضًا لسببٍ غير معروف مع القيمة $1/\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$. فيما يتعلق بقوانين الميكانيكا، تؤدي كلتا الفرضيتين إلى النتائج نفسها، لذلك، في المناقشة الحالية، لا نحتاج إلى مزيدٍ من الاهتمام بمسألة أصل الكتلة، بالنسبة إلينا يكفي أن نلاحظ أن لدينا في الواقع هذه المعادلة:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \qquad (7-7)$$

حيث m_0 هي الكتلة المرصودة للجسيم الساكن في الأثير.

من الواضح إذن أنه نظرًا إلى أن كلَّ جسيمٍ يزداد ثقلًا في ساعة تتحرك عبر الأثير، يجب أن تتأرجح هذه الساعة بشكلٍ أبطأ. ومع ذلك، لحساب الفترة الزمنية، يجب أن نأخذ في الاعتبار ليس فقط تغيُّر الكتلة ولكن أيضًا التغيير في ثابت القوة K. هذا يتطلَّب تحقيقًا مفصلًا إلى حدٍّ

ما لتأثيرات الحركة عبر الأثير في القوى بين الذرية، وهي مناقشة طويلة للغاية لا يتسع لها المجال هنا.

تظهر الحسابات أن $K = K_0\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$ ، ونتيجة لذلك يصبح لدينا المعادلة:

$$T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \qquad (7\text{-}8)$$

حيث T_0 هي الفترة الزمنية للساعة في حالة السكون في الأثير و T هي الفترة الزمنية للساعة في أثناء تحركها عبر الأثير، وبالتالي، فإن الساعات التي تتحرك عبر الأثير تتباطأ بالنسبة إلى التي يُعبَّر عنها بالمعادلة التالية:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \qquad (7\text{-}9)$$

الآن الشخص الذي يتنقل في المختبر يتكون أيضًا من الذرات، لذلك سيقصر جسده بنفس نسبة مسطرة القياس التي يستخدمها، لذا فهو لن يدرك حدوث تغيير. وبالمثل، فإن عملياته الفيزيائية والكيميائية ستتباطأ بالنسبة نفسها مثل ساعاته. من المفترض أن عملياته العقلية ستتباطأ بنسبة متساوية، بحيث لا يرى أن ساعاته قد تغيرت. لذلك سوف ينسب إلى مسطرته الطول نفسه، l_0، القراءة نفسها التي كان سيحصل عليها إذا كان في حالة سكونٍ في الأثير، وبالمثل سوف ينسب الفترة الزمنية نفسها T_0 إلى ساعاته، عند تفسير نتائجه التجريبية، يجب أن نأخذ ذلك في الاعتبار.

لنعد الآن إلى قياس سرعة الضوء بطريقة فيزو. نظرًا إلى أن الساعات والمسطرة في المختبر المتحرك مع سطح الأرض قد تغيرت، فمن الأفضل وصف هذه التجربة من خلال تخيُّل أنفسنا في إطار حالة سكون بالنسبة إلى الأثير. ستكون سرعة الضوء حينئذٍ **c** في هذا الإطار. دع شعاع الضوء يدخل العجلة المسننة عند الزمن t = 0، كما قسناه في إطار الأثير (انظر الشكل 2-3). نفترض أن سطح الأرض (مع المختبر) يتحرك عبر الأثير بسرعة **v**. لنفترض أن t1 هو الوقت الذي يستغرقه شعاع الضوء للانتقال من A إلى المرآة عند B، التي سينعكس منها، تذكر حركة المختبر، يصبح لدينا هذه المعادلة:

$$l + vt_1 = ct_1 \qquad \text{or} \qquad t_1 = \frac{l}{c - v} \tag{7-10}$$

وبالمثل نحصل على شعاع الضوء في طريق عودته:

$$t_2 = \frac{l}{c + v} \qquad \text{and} \qquad T = t_1 + t_2 = \frac{2l}{c}\frac{1}{1 - (v^2/c^2)} \tag{7-11}$$

لكننا الآن نتذكر الطول الفعلي للمسطرة قد قصر إلى $l = l_0\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$، بينما زادت الفترة الزمنية للساعة إلى $T = T_0/\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$. وباستبدال هاتين القيمتين في المعادلة (7-11) يصبح لدينا المعادلة التالية:

$$\frac{T_0}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} = \frac{2l_0}{c}\frac{1}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \qquad \text{or} \qquad T_0 = \frac{2l_0}{c} \tag{7-12}$$

هذه النتيجة مستقلة عن سرعة معمل التجربة بالنسبة إلى الأثير. لكن إذا لم يدرك المراقب في المختبر ما يحدث للمساطر والساعات

الخاصة به، وقام بقياس سرعة الضوء على افتراض أنها لم تتغير، فسيقوم بالطبع بحساب هذه السرعة على أنها $2l_0 / T_0$. لقد أثبتنا أنه بسبب تقلص لورنتز وتباطؤ الساعات المتحركة، سيحصل جميع المراقبين على سرعة الضوء نفسها المقاسة بطريقة فيزو، إذا افترض كلٌّ منهم أن أجهزته الخاصة تسجل بشكلٍ صحيحٍ. هذا يعني، بالطبع، أن تجربة فيزو لا يمكن استخدامها لمعرفة سرعة الأرض بالنسبة إلى الأثير، لأن نتيجتها مستقلة عن هذه السرعة.

❊ ❊ ❊

VIII. مشكلة القياس التزامنية Measuring Simultaneity في نظرية لورنتز

تظهر النتائج في الفصلين السادس والسابع أنه لا تجربة ميكلسون ومورلي ولا تجربة فيزو يمكن أن تزودنا بمعرفة سرعة الأرض بالنسبة إلى الأثير، ومع ذلك، من الواضح أن هذه السرعة تلعب دورًا أساسيًّا في نظرية لورنتز. لأنه من دون معرفة ذلك، لا يمكننا تصحيح المساطر والساعات التي لدينا لمعرفة كيفية قياس «الطول الحقيقي» و«الزمن الحقيقي»، الذي يمكن أن يُشار إليه بواسطة المساطر والساعات التي في حالة السكون بالنسبة إلى الأثير.

كمحاولة أخرى لتقديم معلوماتٍ حول هذا السؤال، دعونا نفترض طريقة أخرى لقياس سرعة الضوء. ضع في اعتبارك النقطتين A وB، مفصولة بمسافة l_0، كما قسناها بالنسبة إلى إطار المعمل. افترض أن المعمل يتحرك بسرعة **v** بالنسبة إلى الأثير في اتجاه الخط AB. دعونا نرسل إشارة ضوئية من A إلى B ونقيس الزمن t_0 (كما هو مبين في ساعات المعمل) اللازمة لتمرير الإشارة من A إلى B. وستكون سرعة الضوء المقاسة بعد ذلك كالمعادلة التالية:

$$C_m = \frac{l_0}{t_0} \qquad (8\text{-}1)$$

إذا تمكَّنَّا من إظهار أن هذه السرعة المقاسة تعتمد بطريقة قابلة للحساب على سرعة المعمل بالنسبة إلى الأثير، فيمكننا حل مشكلتنا في إيجاد هذه السرعة، وبالتالي السماح بتصحيح المساطر والساعات

التي نستخدمها، وذلك للحصول على «أطوالٍ حقيقية» و«الأزمنة الحقيقية».

يمكننا من حيث المبدأ إجراء التجربة، إذا تمكنَّا من وضع ساعات متكافئة عند A وB، التي تمت مزامنتها بدقة. سيكون الفرق في قراءات الساعة عند A عند مغادرة الإشارة والساعة عند وصولها مساويًا لـ t_0. لكن كيف يمكننا مزامنة الساعات؟ من الطرق الشائعة استخدام إشارات الراديو.، لكن من الواضح أن هذا لن يحدث هنا لأن موجات الراديو تنتقل بسرعة الضوء، وهو بالطبع ما نحاول تحديده من خلال التجربة. لذلك سنقترح طريقة ميكانيكية بحتة أخرى لمزامنة الساعات. دعونا نبني ساعتين متشابهتين، ونضعهما جنبًا إلى جنب ونقوم بمزامنتهما. بعد أن نتحقق من أنها تعمل بالمعدل نفسه، دعونا نفصل بين الساعات ببطءٍ شديدٍ وبلطفٍ، حتى لا نزعج حركات آلياتها الداخلية عن طريق الهزات والتسارع. ثم، على الأقل وفقًا للمبادئ المقبولة عادة للميكانيكا النيوتنية، فضلًا عن «البدهية»، يجب أن تستمر الساعتان في العمل بالمعدلات نفسها في أثناء فصلهما، بحيث تظلَّان متزامنتين. للتحقق من ذلك، يمكننا جمعهما معًا مرة أخرى بطريقة مماثلة ومعرفة ما إذا كانا سيستمران في إظهار القراءات نفسها.

دعونا الآن نرى ما سيحدث لهاتين الساعتين، إذا كانتا في المعمل تتحركان بسرعة v بالنسبة إلى الأثير. مرة أخرى، نتخيل أنفسنا كمراقبين ثابتين في الأثير، بينما الساعتان مجتمعتان معًا في البداية ثم نقوم بمقارنتهما، يمكننا أن نرى أنها كانت تعمل بشكلٍ أبطأ من الساعات

المماثلة في حالة السكون في الأثير، وتحققا النسبة $\sqrt{1-(v^2/c^2)}$. الآن، بينما تظل الساعة A في المكان نفسه في المختبر. نحرك الساعة B، في أثناء تحركها، لها سرعة $v+\delta v$ متناسبة مع الأثير. سنفترض أن $\delta v \ll v$ للتأكد من أن الحركة لطيفة وتدريجية. إذا كان l هو الفصل النهائي (بين الساعتين) كما قسناه في إطار الأثير، وكان τ هو الوقت اللازم لهذا الفصل (أيضًا كما قسناه في إطار الأثير)، فيصبح لدينا المعادلة التالية:

$$l = \delta v \tau \qquad (8\text{-}2)$$

في أثناء فصل الساعتين، ستعملان بمعدلات مختلفة قليلًا. في الواقع، إذا كان $\nu_0 = 1 / T_0$ هو تردد الساعة عندما تكون في حالة سكون في الأثير، فإن التردد «الحقيقي» للساعة A، كما لوحظ خلال إطار الأثير سيكون:

$$\nu_A = \nu_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \qquad (8\text{-}3)$$

بينما سيكون التردد الحقيقي للساعة B هو:

$$\nu_B = \nu_0 \sqrt{1 - \frac{(v+\delta v)^2}{c^2}} \qquad (8\text{-}4)$$

إذا توسعنا في قوة (الأس) لـ δv واحتفظنا بالأس الأول فقط لـ δv ، سيمكننا حساب المعادلة التالية:

$$\nu_A - \nu_B \cong \frac{\delta v \nu_0 (v/c^2)}{\sqrt{1-(v^2/c^2)}} = \frac{\delta v \nu_A (v/c^2)}{1-(v^2/c^2)} \qquad (8\text{-}5)$$

إذا كان الزمن المطلوب لفصل الساعتين هو τ، فستكون اختلافات الأطوار phases بينهما:

$$\Delta\phi = (\nu_A - \nu_B)\tau = \frac{\nu_A \tau \delta v(v/c^2)}{1 - (v^2/c^2)} = \frac{\nu_A l(v/c^2)}{1 - (v^2/c^2)} \qquad (8\text{-}6)$$

وتبعًا لذلك سيصبح الاختلاف في قراءة الزمن بينهما:

$$t_A - t_B = \frac{\Delta\phi}{\nu_A} = \frac{l(v/c^2)}{1 - (v^2/c^2)} \qquad (8\text{-}7)$$

بالتعويض بالقيمة التالية $l = l_0[1 - (v^2/c^2)]^{\frac{1}{2}}$ يؤدي إلى المعادلة التالية:

$$t_A - t_B = \frac{l_0(v/c^2)}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \qquad (8-8)$$

نرى بعد ذلك أن الساعتين تخرجان عن الطور بمقدارٍ يتناسب مع فصلهما، l_0 إلى ν. حتى لو كانت δv صغيرة، بحيث تعمل الساعتان بالمعدل نفسه تقريبًا في أثناء فصلهما، يزداد الفاصل الزمني $\tau = l/\delta v$ في المقابل، بحيث يكون التحول النسبي الكلي للطور مستقلًّا عن δv. لاحظ أيضًا أنه من خلال حجة مماثلة، يمكن إثبات أنه إذا جُمعت الساعتان مرة أخرى فسوف تعودان إلى الطور نفسه وستظهران القراءات نفسها.

بالطبع، عندما تكون δv كبيرة، يجب أن يكون التوسع في الأس للقيمة δv أبعد من ذلك، ويصبح فرق الطور بين الساعتين وظيفة معقدة

إلى حدٍّ ما، التي لم تعد تقدمها المعادلات (6-8) إلى (8-8)، سنبيِّن ذلك لاحقًا (انظر الفصل 28).

عندما تقترب δv من C، لن تعرض الساعتان بالفعل القراءة نفسها إذا تم فصلهما ثم جمعهما معًا مرة أخرى. لكننا الآن سنعتبر أن قيمة δv صغيرة، بحيث تصمد المعادلات من(6-8) إلى (8-8).

توضح المناقشة أعلاه أنه حتى إذا تم إنشاء ساعتين بشكلٍ مكافئ وتشغيلهما بالمعدل نفسه في أثناء وجودهما جنبًا إلى جنب، فسوف يخرجان من التزامن ويقرءان زمنين مختلفين عند فصلهما، على الرغم من أنهما سيعودان إلى القراءات المتزامنة عندما يجتمعان معًا مرة أخرى (بشرط ألا تكون سرعتهما النسبية δv كبيرة أبدًا). من ناحية أخرى، فإن المراقب في إطار المعمل (الذي يتحرك عمومًا بالنسبة إلى الأثير)، الذي لا يدرك وجود تحول الطور هذا، سوف يستدعي حدثين متزامنين عندما تعطي ساعتاه A وB القراءات نفسها، وبالتالي، سوف يخطئ في ما هو متزامن وما هو غير متزامن.

دعونا نحاول إيجاد العلاقة بين الأزمنة التي يراجعها مراقب المعمل والأزمنة «الحقيقية»، كما قيست بواسطة الساعات في حالة سكون في الأثير [لاحظ أنه وفقًا لـلمعادلة (8-8)، عندما تكون $v = 0$، تظل الساعات النازحة متزامنة، بحيث تقيس مثل هذه الساعات الساكنة في الأثير الوقت «الحقيقي» حتى لو كانت في أماكن مختلفة] الآن يجب ألا تصحح قراءة ساعة المختبر وفقًا للصيغة $t' = t_0/\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$ فقط، ولكن يجب إزالة الخطأ في التزامن؛ من المعادلة (8-8) نرى أن

الساعة النازحة تقرأ أقل من الساعة غير النازحة، لذلك يجب إضافة (8-8) إلى t'، مما يعطينا المعادلة التالية:

$$t = \frac{t_0 + vl_0/c^2}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \qquad (8\text{-}9)$$

دعونا الآن نعود إلى مشكلة قياس سرعة الضوء عن طريق إصدار وميضٍ عند A وإيجاد الزمن اللازم للضوء ليقطع مسافة محسوبة حتى نستقبله عند B. لنفترض أن المسافة والزمن يقاسان بمساعدة معدات المعمل، على التوالي، l_0 و t_0، مما يعطينا سرعة الضوء المقاسة $c_m = l_0 / t_0$. لنفترض كذلك أن المعمل يتحرك بسرعة **v** بالنسبة إلى الأثير، في اتجاه الخط AB. لنفترض أن l هي المسافة «الحقيقية» بين A و B. ولكن نظرًا إلى أن المعمل يتحرك، يجب أن يسافر الضوء مسافة $l' = l + vt$، حيث إن t هو الزمن «الحقيقي» الذي يستغرقه الضوء للانتقال من A إلى B. بما أن $l' = ct$، يصبح لدينا المعادلة التالية:

$$l = (c - v)t$$

لكن باستخدام المعادلة (8-9) وحيث إن $l = l_0\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$، نصل إلى المعادلة التالية:

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}\, l_0 = \frac{(c - v)(t_0 + vl_0/c^2)}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}}$$

$$l_0 = ct_0 \qquad (8 - 10)$$

بالمقارنة بالمعادلة (8-1) نلاحظ أن المراقب المتحرك سيحسب القيمة نفسها للضوء C_m=C بغض النظر عن سرعته داخل الأثير.

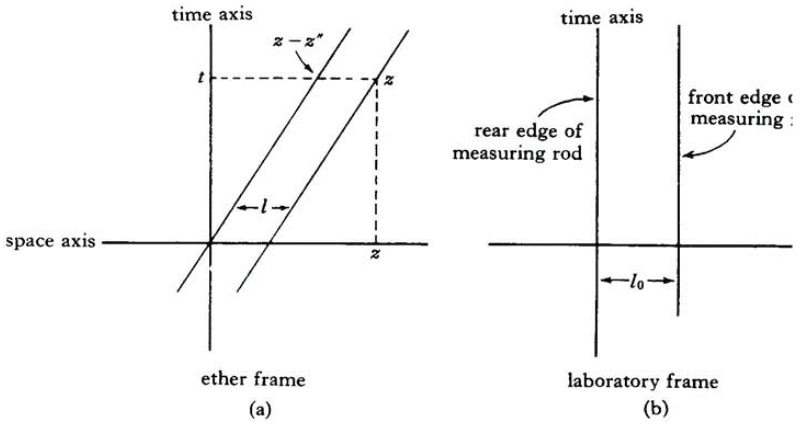
IX. تحويلات لورنتز

لقد رأينا في الفصول 6 و7 و8 أن نظرية لورنتز تشير إلى أن هناك عدة طرقٍ طبيعية لمراقبة سرعة الضوء بالنسبة إلى الأثير (تجربة ميكلسون ومورلي، وتجربة فيزو ذات العجلة المسننة، والقياس المباشر للزمن اللازم لانتشار الإشارة بين نقطتين) مما يؤدي إلى نتائج مستقلة عن سرعة الأدوات المعملية. السؤال الذي يطرح نفسه بعد ذلك هو ما إذا كانت هناك أي تجربة على الإطلاق حيث تعتمد النتائج على هذه السرعة، وبالتالي تسمح بقياسها. سنبيِّن في هذا الفصل أنه وفقًا لنظرية لورنتز فإن مثل هذه التجربة غير ممكنة في الواقع .

سنبدأ بإيجاد العلاقة بين الإحداثيات x' و y' و z' لحدثٍ ما مع الزمن t' الذي نقيسه بواسطة الأدوات التي تتحرك عبر الأثير داخل المعمل، والإحداثيات «الحقيقية» x, y, z مع الزمن «الحقيقي» t، كالذي نقيسه بواسطة الأدوات المقابلة في حالة السكون في الأثير (انظر الشكل 1-9).

من أجل تبسيط الفكرة، سنفترض أن إحداثيات الإطارات المرجعية التي يكون فيها الحدث بإحداثيات $x'=y'=z'=t'=0$ ذات توافقٍ واحدٍ مع $x = y = z = t = 0$. نفترض أن سرعة المعمل v في اتجاه z. إذا اعتبرنا قضيب القياس مثبتًا في إطار المختبر، تكون حافته الخلفية عند $z' = 0$ بينما تكون الحافة الأمامية عند $z' = l_0$، وبالتالي تعطينا المعادلة (8-9) تعطينا بالفعل التعبير المناسب للزمن t بالنسبة $z'=l0$.

شكل(1 – 9)



بالنسبة إلى الزمن $z' = l_0$ تصبح المعادلة:

$$t = \frac{t' + vz'/c^2}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \qquad (9 - 1)$$

وحيث إن قيمتي **x** و**y** تظلان من دون تغيير نتيجة أن الحركة في اتجاه **z** وبالتالي تصبح:

$$x = x' \qquad y = y' \qquad (9 - 2)$$

تبقى مشكلة إيجاد القيمة الرياضية المطابقة لـ **z** بدلالة z' و t'. في الواقع، من الأسهل البدء بحل z' بدلالة **z** و**t**، وليس العكس. للقيام بذلك، نتذكر أولًا أن المسطرة في إطار الأثير تتحرك بسرعة **v** في اتجاه طولها. لتبسيط المسألة، افترض أنه عند **t** = 0 فإن الحافة الخلفية للمسطرة تعطينا **z** = 0. وفقًا لاختيارنا لمراكز للإحداثيات

origins للإطارين، سيتوافق هذا مع $t' = 0$ ، $z' = 0$ بالنسبة إلى إطار المعمل. بعد ذلك، إذا وصلت الحافة الأمامية للمسطرة إلى النقطة z في الوقت t (المقابلة لـ t ، 'z' في إطار المعمل)، فسيكون الطول الفعلي للمسطرة هو $z'' = z - vt$ (آخذين في الاعتبار حركتها). من انكماش لورنتز، تصبح المعادلة $z'' = z'\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$ وهو ما يمكن التعبير عنه بالمعادلة التالية:

$$z' = \frac{z - vt}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \qquad (9-3)$$

وبالتعويض بقيمة الزمن t في المعادلة (9-1) في المعادلة السابقة، يصبح لدينا المعادلة:

$$z' = -\frac{v^2}{c^2}\frac{z'}{1 - (v^2/c^2)} - \frac{vt'}{1 - (v^2/c^2)} + \frac{z}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \qquad (9-4)$$

وبقليلٍ من التبسيط الجبري للمعادلة يصبح لدينا:

$$z = \frac{z' + vt'}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \qquad (9-5)$$

المعادلات (9-1) ، (9-2) و (9-5) تعبر عن x ، y ، z ، t كدوال في t ، 'z' ، 'y' ، 'x' ، وبالتالي تحديد التحويلات بين الإحداثيات الـ«صحيحة» وتلك التي يقيسها مراقبٌ يتحرك بالنسبة إلى الأثير بسرعة V، وهذا ما يُسمَّى بتحويلات لورنتز.

بدلًا من ذلك، بإمكاننا حذف z من (9-1) للحصول على المعادلة التالية:

$$t' = \frac{t - vz/c^2}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \qquad (9-6)$$

المعادلات (9-3) و(9-6) و(9-2) تعبر الآن عن x' و y'وz' و t' كدوال في x و y وz و t. هذا هو معكوس تحويلات لورنتز من x، y، z، t، إلى x'، y'، z'، t'. يجب ملاحظة أن معادلات التحويلات في اتجاه ما وعكس هذا الاتجاه متكافئة بالطبع لأنه يمكن اشتقاق إحداهما من الأخرى.

لنفترض الآن الموجة الضوئية المنبعثة من مركز الإحداثيات حيث (x = y = z = 0) عند t = 0. سوف تنتشر الموجة الضوئية عبر الأثير بسرعة C، بحيث تحدد مقدمة الموجة بالسطح:

$$c^2t^2 - x^2 - y^2 - z^2 = 0 \qquad (9-7)$$

الآن يمكننا التعبير عن المعادلة السابقة بدلالة القيم x' وy' وz' وt'، باستخدام المعادلات: (9-1)، (9-2)، و(9-5)، وبالتالي نحصل على هذه المعادلة:

$$c^2t'^2 - x'^2 - y'^2 - z'^2 = 0 \qquad (9-8)$$

نرى من خلال المعادلة (9-8) أن المقدمة ستكون أيضًا كرة (نلاحظ أن المعادلة الأخيرة هي معادلة الكرة في الهندسة الفراغية) في الإطار المرجعي x'، y'، z'، t' التي تمثل موجة تنتشر بـ«السرعة المقاسة» C. تُظهِر هذه النتيجة -بسبب تغيرات المساطر والساعات الناتجة عن الحركة عبر الأثير- أن نظرية لورنتز تشير إلى أن جميع

المراقبين المتحركين بشكلٍ موحدٍ سوف يحددون نفس السرعة C للضوء، بغض النظر عن سرعة حركتهم عبر الأثير. بهذه الطريقة نقوم بتعميم نتائج الفصول 6 و7 و8، حيث رأينا كيف أن طرقًا معينة لقياس سرعة الضوء تعطي قيمًا لا تعتمد على سرعة الإطار المرجعي داخل المعمل.

* * *

X. الغموض المتأصل في معاني قياسات الزمكان وفقًا لنظرية لورنتز

توضح الفصول 6 و7 و8 و9 أنه وفقًا لنظرية لورنتز، فإن كل قياسٍ لسرعة الضوء سيؤدي إلى النتيجة نفسها، بغض النظر عن سرعة المعمل بالنسبة إلى الأثير. ومع ذلك، فإن هذه النظرية تصوغ جميع قوانينها ومعادلاتها من حيث المسافات والأزمنة «الحقيقية»، مقاسة بالمساطر والساعات التي من المفترض أن تكون في حالة سكونٍ في الأثير. لذلك، يجب تصحيح المسافات التي قيست، لمراعاة تأثير حركة الأدوات قبل أن نعرف حقيقة ما تعنيه. ولكن إذا كانت نظرية لورنتز صحيحة، فلا يمكن أن تكون هناك طريقة لتصحيح المسافات والأزمنة المرصودة. وبالتالي، فإن المسافات والأزمنة «الحقيقية» غامضة بطبيعتها، لأنها تخرج من جميع العلاقات التي يمكن ملاحظتها التي يمكن العثور عليها في القياسات والتجارب الفعلية.

فماذا يمكن أن تكون حالة هذه المسافات والأزمنة «الحقيقية» -التي يُفترض أن تقاس بالمسطرات والساعات- في حالة السكون في الأثير؟ إذا تذكرنا أن الأثير هو في أي حالٍ كيانٌ افتراضي بحتٌ، ولم يثبت باستخدام أي دليلٍ آخر مستقل، تصبح المشكلة أكثر حدة. هل هذه المسافات والأزمنة «الحقيقية» تعني فعلًا أي شيء على الإطلاق؟ أم أنها ليست مجرد مفهومٍ مخترعٍ بحت، مثل الخطوط المنقطة التي نرسمها أحيانًا في تخيلاتنا عندما نطبق النظريات الهندسية من أجل استخلاص استنتاجات تتعلق بأشياء حقيقية؟

المشكلة ليست مجرد مشكلة نظرية بحتة تنشأ فقط نتيجة تحليل

نظرية لورنتز، إنها أيضًا مشكلة واقعية. لقد أعطت تجربة ميكلسون ومورلي في الواقع نتائج مستقلة عن سرعة الأرض، وفقًا لِمَا تقوله نظرية لورنتز. في عصر لورنتز، لم تكن تجربة فيزيو للعجلة المسننة مجدية بالدقة اللازمة لاختبار النظرية، ولكن منذ ذلك الحين، طُوِرت أساليبٌ كهربائية لضبط زمن نبضات الضوء أصبحت تتمتع بالدقة المطلوبة، وتعطي هذه التجارب أيضًا قياسًا دقيقًا لسرعة الضوء بشكلٍ لا يعتمد على سرعة الأرض. علاوة على ذلك، كما سنرى لاحقًا، فإن نظرية النسبية لأينشتاين، التي تستند إلى افتراض أن جميع المراقبين سيحصلون على سرعة الضوء المقاسة نفسها، قد وُجدت صحيحة في العديد من التجارب المختلفة التي يمكن اعتبارها تجارب أساسية قد أكدت بدقة. لذلك، فإن النظر في الأدلة التجريبية المتاحة يؤدي إلى المشكلة نفسها التي تثيرها نظرية لورنتز: «كيف يمكن قياس المسافات «الحقيقية» و«الأزمنة» التي تشير إلى إطار الأثير؟«.

في هذا الصدد، ربما يكون من الجدير بالذكر أنه لم يتم بعد إجراء قياسٍ مباشرٍ لسرعة انتشار الضوء بين نقطتين، ربما بسبب الصعوبات التقنية في مزامنة الساعات في أماكن مختلفة من دون استخدام الإشارات الكهربائية. مع الساعات الجديدة الدقيقة للغاية من السيزيوم المتوفرة الآن، ربما سيكون من الممكن قريبًا إجراء مثل هذه التجربة. ولكن بالنظر إلى الكم الهائل من الأدلة حول هذه النقطة التي جمعت بالفعل في تجارب أخرى، يبدو أنه لا يوجد سببٌ كافٍ لافتراض أن هذه التجربة لن تفشل أيضًا في الاعتماد على سرعة المعمل بالنسبة إلى الأثير الافتراضي.

XI. تحليل مفاهيم المكان والزمن من حيث الأطر المرجعية

رأينا في الفصل السابق أن المفاهيم القديمة للمكان والزمن، نظريًّا وتجريبيًّا، تؤدي إلى مشكلة حرجة عميقة جدًّا إلى حد أنها تضرب جذور المفاهيم الأساسية التي هي أساس الفيزياء، تمامًا كما ترتبط بجزءٍ كبيرٍ من أنشطتنا اليومية وأنشطتنا التقنية والصناعية. هذه المشكلة ذات طبيعة جديدة تمامًا. لأن الصعوبة لم تكن أن نظرية لورنتز لا تتفق مع التجربة، على العكس من ذلك، فقد كانت متوافقة مع كل ما لوحظ في عصر لورنتز، وفي الواقع، يتوافق أيضًا مع كل ما لوحظ منذ ذلك الحين. كانت المشكلة بالأحرى أن المفاهيم الأساسية التي دخلت في نظرية لورنتز، أي إحداثيات الزمن «الحقيقي» والمكان «الحقيقي» كما قيست بواسطة الجهاز الذي سيكون في حالة سكونٍ في الأثير- كانت في الواقع غامضة تمامًا لأنه، كما رأينا، استنتجت على أساس نظرية لورنتز نفسها أنه لا يمكن العثور على أي وسيلة على الإطلاق لتصحيح قراءات الأدوات المعملية لإعطاء قيم الإحداثيات والأزمان «الحقيقية». في الواقع، نظرًا إلى أن خصائص إطار إحداثيات «الأثير» تُلغى من جميع النتائج التي يمكن ملاحظتها، فلا فرق سواء افترضنا وجود مثل هذا الإطار أم لا.

بالطبع، إذا تبيَّن أن بعض خصائص الأثير يمكن ملاحظتها، فإن الأثير سيكون له أهمية فيزيائية أخرى. ولكن إذا لم تكن أيٌّ من خصائصها قابلة للملاحظة والرصد، فيمكن القول إن لها دورًا فقط في العمل كوسيلة لمفاهيم المكان والزمن المطلقين التي تعتبر أساسية في

ميكانيكا نيوتن. علاوة على ذلك، أدَّت محاولة تعديل هذه المفاهيم مع الحقائق المرصودة، كما رأينا، إلى حالة من الارتباك لم يعُد من الواضح فيها ما هو المقصود بمفاهيم المكان والزمن الأساسية لدينا أو ما يمكن فعله بها.

يبدو واضحًا أن المطلوب هنا هو نهجٌ جديدٌ لهذه المشكلة، بدءًا من الفرضية غير القابلة للاختبار بطبيعتها المتعلقة بالأثير، ولكن بقدر الإمكان من الحقائق المعروفة والفرضيات الأساسية الإضافية التي يمكن اختبارها من خلال التجربة على الأقل من حيث المبدأ. من أجل المساعدة في وضع الأساس لمثل هذا النهج، سنبدأ بتقديم تحليلٍ أولي لبعض الحقائق الرئيسية الكامنة وراء استخدامنا لإحداثيات المكان والزمن.

الحقيقة الأولى ذات الصلة في هذه المشكلة هي أن إحداثيات المكان والزمن تتكوَّن من علاقات الأشياء والأحداث ببعض أنواع أدوات القياس، التي أنشأها الفيزيائي نفسه. على سبيل المثال، لقياس طول شيء ما، يمكننا استخدام مسطرة صلبة بدرجة كافية، وإيجاد (تقريبًا) الأرقام الموجودة على المسطرة التي يتوافق معها طرفا الجسم. أو بدلًا من ذلك، يمكننا أن نلاحظ نهاياته باستخدام تلسكوب، ونقيس الزاوية التي يقابلها الجسم، بافتراض أن الضوء ينتقل في خطوطٍ مستقيمة. من الملاحظات التي سنجريها في عدة نقاطٍ مفصولة بمسافاتٍ معروفة، يمكننا بعد ذلك حساب طول هذا الشيء، بمساعدة الهندسة الإقليدية. فيما يتعلق بالزمن، نحتاج بالطبع إلى نوعٍ

من الساعات، قد تتكوَّن من بندولٍ أو مذبذبٍ توافقي. بدلًا من ذلك، يمكننا استخدام بعض العمليات الطبيعية المنتظمة كساعة، على سبيل المثال، فترة دوران الأرض كنصف عمرٍ لعناصر مشعة معينة.

بالطبع لا يكفي النظر فقط في نتائج القياسات الفردية بمعزلٍ عن غيرها. تبرز الأهمية الحقيقية لقياساتنا في حقيقة أنه يمكننا مراقبة المسافات والفترات الزمنية بعدة طرقٍ وباستخدام أنواعٍ مختلفة من الأدوات والإجراءات، ومع ذلك سنحصل على نتائج مكافئة. على سبيل المثال قياسات الطول التي نجريها باستخدام مساطر مختلفة تعطي القيمة نفسها، ضمن دقة تجريبية معينة أو أن هذا هو الخطأ الذي يميز المسطرة (أي عدم الدقة التجريبية). وإذا استخدمنا التثليث triangulation بمساعدة أشعة الضوء، أو باستخدام طريقة أخرى، فيمكننا الحصول على القيمة نفسها بشكلٍ أساسي لطول الجسم. قد تبدو هذه النتيجة واضحة وحتى تافهة، لكنها حقيقة ذات أهمية غير عادية، ليس فقط للعلم ولكن لكل شيء في حياتنا. على سبيل المثال، تعتمد إمكانية صنع آلاتٍ بأجزاءٍ قابلة للتغيير والإصلاح على حقيقة أن القياسات التي تحدد حجم جزءٍ ما ستنتج طولًا يعادل ذلك المُعطى من خلال القياسات التي تحدد حجمَ جزءٍ آخر، حيث يمكن أن تصلح الجزء الأول إذا تلف. يمكننا بسهولة تخيُّل عالمٍ لا توجد فيه أجسامٌ شبه صلبة (الغازات مثلًا)، وفي هذه الحالة لن تعني هذه القياسات بالطبع شيئًا تقريبًا، ولكن في العالم الذي نعيش فيه بالفعل هناك انتشارٌ واسعٌ بما يكفي للأجسام شبه الصلبة لجعل نتائج مثل هذه القياسات مهمة جدًّا.

في قياس الزمن المشكلة متشابهة جدًّا. من أجل أن يكون لهذه القياسات أهميتها المعتادة، من الضروري أن تكون الأدوات والإجراءات المختلفة قادرة على تحقيق نتائج مكافئة عند تطبيقها على نفس مجموعات الأحداث. مثلًا، قد يتفق شخصان يرتديان ساعاتٍ جيدة على الالتقاء في مكانٍ معينٍ؛ وإذا اتبعوا القراءات على ساعاتهم، فسوف يجتمعون في الواقع، بمعنى الوصول إلى ذلك المكان بطريقة لا يضطر أحدهما إلى انتظار الآخر. وبالمثل، يمكننا مشاهدة أحدهم في أثناء اللحاق بقطارٍ من المقرر أن يغادر في زمنٍ معينٍ، أو فيما يتعلق بالظواهر الطبيعية، يمكن للمرء أن يخطط للقيام بقدرٍ معينٍ من الأعمال قبل غروب الشمس، وإذا تمكَّن من ترتيب وتنظيم العمل وفقًا للساعة، فيمكنه بالفعل القيام بالعمل قبل أن يصبح الأمر مستحيلًا بسبب الظلام. ليس من الضروري التأكيد على أهمية مقياسٍ مشتركٍ للوقت في ترتيب وتنظيم حياتنا، سواء فيما يتعلق بالمجتمع أو فيما يتعلق بالظواهر الطبيعية.

يمكن تلخيص الانتظام والترتيب في خصائص المكان في مفهوم الإطار المرجعي، هذه في الأساس شبكة منتظمة من الإحداثيات، أُعدت لإتاحة التعبير عن نتائج القياسات المختلفة بلغة مشتركة، وبالتالي لتسهيل إقامة العلاقات بين هذه القياسات. على سبيل المثال، يمكن للمرء أن يتخيل مجموعة من الخطوط المتوازية المتباعدة بانتظامٍ، لنقل على مسافات كل 1 سم. ثلاث مجموعات مماثلة من هذا النوع مطلوبة للفضاء ثلاثي الأبعاد. عادة ما تؤخذ بشكلٍ عمودي بعضها على بعض،

على الرغم من أن أنظمة الخطوط غير المتعامدة تُستخدَم أيضًا في بعض الأحيان. وبالتالي ستحدد نقطة P ، بإعطائها ثلاثة إحداثيات ، y ، x z ، هي في جوهرها عدد الوحدات المطلوبة على طول كل مجموعة من مجموعات الخطوط الثلاثة (الإحداثيات الثلاثة) للوصول إلى تلك النقطة من نقطة الأصل O (التي يمكن اختيارها بشكلٍ عشوائي حسب التبسيط). إذا احتجنا إلى دقة أعلى في المواصفات، فيمكننا من حيث المبدأ دائمًا تقسيم الشبكة إلى أجزاء من الدرجة اللازمة من الدقة.

من المهم تأكيد أن هذه الإحداثيات لا توجد في الواقع في الفضاء ولكنها مفهومٌ مخترعٌ بشكلٍ بحتٍ، وهو تجريد قدَّمناه لراحتنا. ومع ذلك، هي ذات محتوى موضوعي معين، لأنه من الممكن لأي عددٍ من المراقبين المختلفين الذين يستخدمون أنواعًا مختلفة من القياسات الاتفاق على هذه الإحداثيات. إن إمكانية الاتفاق على هذه الحقيقة المهمة للغاية تمثِّل نتائج اختبارات لا حصر لها لعدة أجيالٍ من البشر. (تذكر أنه في عالمٍ لا توجد فيه أجسامٌ شبه صلبة، لن تؤدي إجراءات القياس الحالية لدينا إلى مثل هذا الاتفاق المنتظم).

هناك بالطبع بعض التعسف في اختيار إطار الإحداثيات، بحيث يمكن أن يختار أحد المراقبين إطارًا غير متعامدٍ، بينما يختار مراقبٌ آخر إطارًا متعامدًا. حتى إذا اختار كلاهما إطاراتٍ متعامدة، فقد يكون لهما نقطة مركز مختلفة بالإضافة إلى اتجاهاتٍ مختلفة. لكن الحقيقة المهمة هنا هي أن هناك مجموعة من التحويلات بين أنظمة الإحداثيات المختلفة، تمكننا من معرفة كيفية ارتباط إحداثيات النقطة نفسها في أي

نظامٍ محددٍ بتلك الموجودة في نظامٍ آخر. على سبيل المثال، سنفترض أن إحداثيات النقطة P هي $\mathbf{z}_0$ ، $\mathbf{y}_0$ ، $\mathbf{x}_0$ ، في النظام A. في النظام B، الموازي لـ A، ولكن مركزه يتم إزاحته بواسطة متجه مكون من a ، b ، c، ستكون إحداثيات النقطة نفسها:

$$x = x_0 - a \qquad y = y_0 - b \qquad z = z_0 - c \quad (11-1)$$

وبالمثل، إذا كان لدينا إطاران للإحداثيات لهما المركز نفسه، مثل تدوير الإطار B بزاوية θ حول المحور Z بالنسبة إلى A، فإن إحداثيات نفس النقطة P في هذين الإطارين مرتبطة بالمعادلات:

$$x = x_0 \cos\theta + y_0 \sin\theta \qquad y = y_0 \cos\theta - x_0 \sin\theta \quad (11-2)$$

في كلا التحولين، يتضح بسهولة أن المسافة بين أي نقطتين P وQ، هي دالة ثابتة؛ أي أنها نفس الدالة التي لها العماد Argument الخاص بها في كل إطار إحداثيات مرتبط بهذه التحولات (الإزاحة والدوران)، لا نحتاج إلى تقديم الدليل (الذي يعتمد أساسًا على نظرية فيثاغورس) ولكننا نحتاج فقط إلى ذكر النتيجة.

إذا كانت $\mathbf{x}_1$ و$\mathbf{y}_1$ و$\mathbf{z}_1$ و$\mathbf{x}_2$ و$\mathbf{y}_2$ و$\mathbf{z}_2$ هي الإحداثيات الموجودة في الإطار B للنقطتين P وQ على التوالي، بينما (x'_1, y'_1, z'_1) و(x'_2, y'_2, z'_2) تمثلان إحداثيات النقاط المقابلة في الإطار A، فيصبح لدينا المعادلة التالية:

$$(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2 - (x'_1 - x'_2)^2 + (y'_1 - y'_2)^2 + (z'_1 - z'_2)^2 = \text{constant} = \text{invariant function}$$

(11-3)

من الممكن أيضًا العثور على تحويلات بين أنظمة الإحداثيات المتعامدة orthogonal وغير المتعامدة nonorthogonal، ولكن في إطاراتٍ غير متعامدة. المعادلة (3-11) لم تعد تنتج دالة ثابتة. ومع ذلك، توجد دوال ثابتة أكثر عمومية تنطبق على الإطارات غير المتعامدة وكذلك الإطارات المتعامدة، هذه مهمة بالنسبة إلى النظرية النسبية العامة لأينشتاين. لكن بالنسبة إلى نظريته النسبية الخاصة التي نناقشها هنا من المناسب النظر فقط في الأطر المتعامدة، حتى لا نشير فيما بعد إلى الأنظمة غير المتعامدة لإحداثيات المكان.

يوجد أيضًا إطارٌ زمني مرجعي، ولكن مقارنة بميكانيكا نيوتن، فإن هذا أبسط بكثيرٍ من إطار المكان. بمساعدة الساعة، يمكن للمرء بالطبع تحديد فترات زمنية منتظمة، تعد من حيث المبدأ دقيقة بقدر ما هو مطلوب في أي مشكلة معينة. عدد هذه الفواصل الزمنية بين حدثٍ معينٍ وأصلٍ افتراضي يساوي (على مقياس مختار بشكلٍ مناسبٍ) إحداثيات زمن ذلك الحدث. ولكن فيما يتعلق بالزمن، يُفترض أنه يوجد في جوهرها نظامٌ واحدٌ فقط للإحداثيات الزمنية (باستثناء إمكانية تغيير المقياس والإزاحة التي تحوِّل الأصل إلى أي لحظة مرغوبة). هذا يعني أنه بالنظر إلى أي حدثٍ مع إحداثيات الوقت **t**، إذا قيست بواسطة ساعة دقيقة، توجد مجموعة لا نهائية من الأحداث، وكلها تتواجد مع الحدث الأول المذكور. نتيجة لذلك، لن يجد أي مراقب يقوم بإجراءاتٍ مناسبة لقياس الزمن أن أيًّا من هذه المجموعة من الأحداث يقع قبل أو بعد الآخر. إذا كانت هذه هي الحالة، فمن المنطقي أن نعزو نفس

الإحداثيات الزمنية t إلى كل هذه الأحداث، وأن نقول إنها متزامنة.

بالطبع، لقد اختبرت هذه الافتراضات من خلال مجموعة هائلة من الملاحظات، سواء من خلال التجارب المشتركة وفي الملاحظات العلمية. وبالتالي من الشائع أن يوافق الأشخاص في أماكن مختلفة على القيام بأشياء في الزمن نفسه، وفقًا لقياس ساعاتهم. بعد ذلك، حتى لو كانوا في أماكن مختلفة، يمكن لبعضهم رؤية بعض في أثناء تنفيذ الإجراءات المخطط لها، إذا كان بعضهم في مرمى بصر بعض. أو يمكنهم استخدام الإشارات اللا سلكية أو الكهربائية ليُعلِم بعضهم بعضًا بما يحدث (على سبيل المثال، يمكن لشخصين على طرفي العالم أن يوافقا على اتصال أحدهما بالآخر عندما يكون لساعاتهما القراءة نفسها، من حيث متوسط الوقت جرينتش، وسيكتشفون في الواقع أنه عندما يتصل أحدهما أن الآخر جاهزٌ وينتظر الاستماع).

بالطبع تعتمد كل هذه الأفكار على الظروف التي تكون فيها سرعة الضوء وموجات الراديو وما إلى ذلك- عالية جدًّا لدرجة أنه على المقياس العادي الزمن والمسافة، يمكن اهمال الزمن الذي تستغرقه الإشارة للانتقال من مكانٍ إلى آخر، وهذا يعادل افتراض سرعة لا نهائية للضوء. عندما نأخذ السرعة المحدودة للضوء في الاعتبار، تظهر مشاكل جديدة في الواقع، وهي ما سنناقشها لاحقًا. لكن هنا نحن بالطبع مهتمون فقط بمفاهيم فيزياء ما قبل النسبية، بهدف توضيح خلفية الأفكار التي يجب أخذها في الاعتبار، من أجل التوصل إلى مفاهيم أكثر وضوحًا عن المكان والزمن، التي تطورت بحلول نهاية القرن التاسع عشر.

XII. مفاهيم «البدهية» للمكان والزمن

في الفصل السابق رأينا أن مفاهيم معينة عن المكان والزمن قد بُنيت في الفيزياء بالأساس. تأسست هذه المفاهيم بناء على قدرٍ هائلٍ من الخبرة العامة والملاحظة والتجربة على مدى أجيالٍ عديدة. يمكن تلخيصها في فكرة الإطار المرجعي للمكان والزمن، المحدد بواسطة الإحداثيات المناسبة x و yو zوt، التي وُجد أنه يمكن وضعها في إطارٍ فريدٍ (أي الواحد تلو الآخر) المتعلقة بمجموعة متنوعة جدًّا من الأحداث والأشياء الفعلية، كما لو لاحظها وراقبها أي مراقبٍ مؤهل، وبعدة طرقٍ ممكنة مختلفة. من خلال استخدام الإحداثيات المرتبطة بأطرٍ مرجعية، فإننا نفهم المحتوى الأساسي للحقائق الكامنة وراء مفاهيم المكان والزمن المستخدمة في الفيزياء. ومع ذلك، يُنظر إلى هذه الحقائق على أنها تستند إلى مجموعة هائلة من العلاقات المرصودة بين مجموعة متنوعة جدًّا من الظواهر وأنواع مختلفة من أجهزة القياس، التي تكون مجموعة العلاقات بأكملها بحيث يمكن ترتيبها وتنظيمها ودمجها في هيكلٍ يمكن وصفه بدقة من حيث هذه الأطر المرجعية.

إذا كانت جميع الحقائق تتكوَّن من علاقاتٍ قمنا برصدها كالنوع الموصوف أعلاه، فما هو إذن أصل الفكرة النيوتنية عن المكان والزمن المطلقين، المفترض أن يكونا مثل مادة موجودة بذاتها ومتدفقة، ومستقلة بشكلٍ أساسي عن جميع العلاقات؟ من الواضح أنها لا تأتي في المقام الأول من التجربة والملاحظة، بل بالأحرى -كما اقترح في الفصل 2 – هو مجرد استمرارٍ في شكل معدل لبعض جوانب المفاهيم

الأرسطية القديمة للمكان. وإذا سألنا أين وجد أرسطو أفكاره، فإن الإجابة ليست بعيدة المنال. بالنسبة إلى أرسطو كان يعبِّر فقط في شكلٍ منهجي ومنظمٍ وبشكلٍ إلى حدٍّ ما تخميني عن مجموعة من المفاهيم التي من المحتمل أن تكون في جوهرها قد احتفظ بها الجميع لعصورٍ عديدة قبل زمن الإغريق القدماء، وكانت وقتها وجهة نظرنا «البدهية» حول المكان. في هذا الرأي، يُنظر إلى الفضاء على أنه وعاءٌ ما، داخله يصبح لكل شيء مكانٌ وحجمٌ وشكلٌ معين، وبالتالي فإن المكان في الواقع «جوهري «substantialized ويعامل على أنه مطلقٌ.

سنناقش المشكلة بشيء من التفصيل في الملحق حيث سنبيِّن أن هناك قدرًا كبيرًا من الأدلة التي توضح أن فكرة المكان الموصوفة أعلاه تنبئ وتُعلَّم في السنوات الأولى من حياة كل إنسانٍ. منذ ذلك الحين، أصبح استخدام هذا المفهوم عادة، يعزِّزه بشكلٍ أكبر هيكل اللغة المشتركة، بطريقة تجعل من الصعب للغاية حتى التفكير أو قول شيء يقصد منه إنكاره أو مناقضته. بالطبع، ربما يكون مثل هذا الإجراء حتميًّا إلى حدٍّ كبيرٍ، وليس في نيَّتنا أن نقترح أنه في الحياة اليومية يمكننا الاستغناء عن مفاهيم «البدهية» للمكان. ومع ذلك، تظهر مشكلة خطيرة للغاية، لأننا لا ندرك عادةً هذه العملية لتعلم مفهومنا عن المكان وتعزيزه من خلال العادة ومن خلال بنية لغتنا. نتيجة لذلك، نميل إلى التفكير في الأمر على أنه ضروريٌّ وحتميٌّ، شيء لا يمكن أن يكون غير ذلك. ثم يدمج العلماء هذه الأفكار في نظرياتهم، وهي تقدَّم الآن على ما يبدو تأكيدًا علميًّا على حتمية هذه المفاهيم. لكن الحقيقة هي أن هذه

المفاهيم هي نتيجة لعملية طويلة، في الواقع، تجعلنا نعتقد بحتميتها في جميع السياقات وأنماط الوجود الممكنة لكل شيء، وليس مجرد استخدامها كفرضياتٍ مؤقتة، وبالتالي يمكن الاستغناء عنها عندما ندخل مجالاتٍ جديدة للدراسة. من هذا النوع من التكيُّف نشأ ما قد يكون المشكلة الرئيسية التي كان على الفيزياء الحديثة مواجهتها في مجالات جديدة مثل النسبية ونظرية الكمِّ – أي صعوبة التمتُّع بمفاهيم جديدة تتعارض مع المفاهيم القديمة التي نحتفظ بها بشكلٍ معتادٍ منذ الطفولة بطريقة تجعل تجاوز مثل هذه الأفكار يبدو أمرًا لا يمكن تصوره.

فيما يتعلق بمفهوم الزمن، ربما تكون مشكلة التكيُّف أخطر من مشكلة المكان. في الواقع، تمامًا كما اعتدنا على تصور المكان المطلق، الذي نفترض أنه يمثِّل المكان الحقيقي والحجم والشكل الحقيقي للأشياء، فنحن أيضًا معتادون منذ الطفولة على تصور تدفق العملية، سواء في الطبيعة أو في تجاربنا النفسية «الداخلية»، كما هي مرتَّبة في تسلسلٍ زمني فريدٍ ومطلقٍ. أساس هذا الترتيب واضحٌ. في أي لحظة نرى كل بيئتنا، كما هي موجودة في تصورنا- البصري، السمعي، الملموس، إلخ. في اللحظة التي نختبر فيها كلية الإدراك هذه، نشير إليها على أنه «الآن». نظرًا إلى أن سرعة الضوء كبيرة جدًّا، يمكننا بالطبع إهمال الزمن اللازم لوصول الضوء إلينا، على الأقل فيما يتعلَّق بالأشياء الموجودة في بيئتنا المباشرة، بينما بالنسبة إلى معظم الأسباب، يمكن حتى للزمن اللازم لوصول الصوت إلينا أن نهمله.

ضمن مجالٍ محدودٍ ومعينٍ، وجدنا أنه من الممكن بالفعل إسناد ترتيب زمني واحد وعالمي ومحدد جيدًا للأحداث، كما هو موضح ضمنيًّا في المفاهيم الموضحة أعلاه. ضمن هذا المجال، يتفق العديد من المراقبين المختلفين باستخدام أدوات وإجراءات مختلفة -ضمن خطأ تجريبي مناسب على الأحداث التي تحدث بشكلٍ متزامنٍ- وتلك التي تحدث قبل بقية الأحداث وتلك التي تحدث بعد ذلك. بعبارة أخرى، هناك أساسٌ واقعي جيدٌ لافتراض الترتيب الزمني للماضي والحاضر والمستقبل الفريد، وهو الشيء نفسه بالنسبة إلى جميع الأحداث من كل نوعٍ، بغض النظر عن مكان حدوثها وكيفية ملاحظتها.

كما في حالة أفكارنا عن المكان، من الواضح أن مشكلة مفهومنا المشترك للزمن ليست خاطئة تمامًا. إذا كان الأمر كذلك، فلن نكون على هذه الدرجة من الغباء لمحاولة التمسُّك به. تنشأ الصعوبة لأنه كافٍ في مجالٍ محدودٍ، ولكنه غير مناسبٍ -كما سنرى- عندما نتوسَّع خارج هذا المجال. ولكن نتيجة لحقيقة أن مجال الملاءمة هذا يتضمن قدرًا هائلًا من الخبرة المشتركة بدءًا من الطفولة، ولأن هذه الخبرة قد دُمِجت في بنية اللغة، فإننا نجد صعوبة بالغة في التخلُّص من هذه العادة فيما يتعلق بمفهومنا العادي عن الزمن وهو أمرٌ لا مفرَّ منه. في الواقع يمتد هذا الشعور بالحتمية إلى حد أننا لا ندرك العالم إلا من خلال مفهوم الزمن هذا. نتيجة لذلك، لا يبدو أننا قادرون في الواقع على تخيُّل أن الأشياء يمكن أن تحدث بشكلٍ مختلفٍ عن نظامٍ زمني فريدٍ ومطلقٍ، وهو الأمر نفسه بالنسبة إلى الكون بأسره. ومع ذلك، كما

سنرى حاليًّا، تتطلَّب نظرية النسبية أن يكون مثل هذا المفهوم هو ما يجب علينا مراعاته. يجب علينا القيام بذلك بمفهومٍ تجريدي فقط في البداية، حتى لو كان يتعارض مع مفاهيم «البدهية». ربما في وقتٍ لاحقٍ، عندما أصبحنا على دراية بمثل هذه الأفكار، قد نبدأ في استيعابها بطريقة أكثر «حدسية intuitive».

باختصارٍ، تستند مفاهيم المكان والزمن المطلقين فقط إلى استمرار أنماطٍ معينة من الإدراك والتصور والخبرة وغيرها، الناشئة في مجال الحياة اليومية والتي أصبحت الآن معتادة ولكننا تعلَّمناها من قبل حينما كنَّا أطفالًا. يبدو أن هذه العادات مناسبة في مجالها الصحيح، ولكن لا توجد أي حقائق مؤكدة جيدًا تدعم فكرة أن مثل هذه المفاهيم لا مفر منها. لقد رأينا أن الحقائق المادية المتعلقة بإحداثيات المكان والزمن تتكون فقط من مجموعات من العلاقات بين الظواهر وأدوات الرصد، التي لا يمكن فيها رؤية المكان والزمن بشكلٍ مطلقٍ. وبالمثل، كما سنبيِّن في الملحق، فإن الحقائق المتعلقة بالإدراك في الخبرة المشتركة تُظهر أنها تهتم دائمًا بالعلاقات، وأنه هنا أيضًا، لا يوجد في الواقع مكانٌ وزمنٌ مطلقان، هذا يعني أنه في مجال الفيزياء وفي مجال الخبرة اليومية، قد يكون من الضروري تنحية مفاهيم المكان والزمن المطلقين جانبًا، إذا أردنا فهم ما اكتشفناه في مجالاتٍ أوسع.

* * *

XIII. تقديم لمفاهيم أينشتاين عن المكان والزمن

بمجرد أن نصل إلى مجالٍ لا يمكن فيه تجاهل الزمن الذي يستغرقه الضوء للانتشار بين نقاطٍ مختلفة، تبدأ الأفكار العادية عن الزمن والمكان في إحداث صعوباتٍ ومشكلاتٍ لا يمكن حلُّها ضمن هذا الإطار المرجعي المحدود. لقد رأينا بالفعل، في دراسة نظرية لورنتز، أنه عندما نفصل الساعات المتكافئة التي تعمل معًا بشكلٍ متزامنٍ بمسافة l_0، فإن قراءات الزمن ستتغير بمقدار $(l_0v/c^2)/\sqrt{1-(v^2/c^2)}$، حيث v هي سرعة الساعات بالنسبة إلى الأثير الافتراضي. ولكن نظرًا إلى عدم وجود طريقة لقياس هذه السرعة، لا يمكننا أبدًا أن نعرف بدقة مقدار الساعات التي تُظهِر الزمن نفسه في أماكن مختلفة، والتي تنحرف فعليًّا عن كونها متزامنة «حقًّا». في التجربة العادية، تكون هذه التأثيرات بالطبع صغيرة جدًّا بحيث يمكن إهمالها، ومع ذلك، عند إجراء قياسات دقيقة للغاية، رأينا أنها تلعب دورًا مهمًّا.

حتى على مستوى التجربة المباشرة، فإن الغموض في المقصود بالتزامن سيصبح كبيرًا، عندما يتعلق الأمر بمسافات طويلة جدًّا. سنفترض مشكلة الاتصالات اللا سلكية والتلفزيونية التي ستنشأ عندما ينجح رواد الفضاء في الوصول إلى المريخ. لنفترض أن رجلًا على الأرض يسأل صديقه على سطح المريخ عمَّا يحدث «الآن». نظرًا إلى الوقت اللازم لوصول الإشارات إلى المريخ ووصول الإشارات من المريخ إلى الأرض، فلن يأتي الرد قبل مدة 10 دقائق أو أكثر، وبحلول وقت تلقي الإجابة، ستشير المعلومات، ليس إلى ما يحدث «الآن»،

ولكن إلى ما كان يحدث عندما غادرت الإشارة المريخ، لذلك لن نعرف ما يحدث «الآن» على سطح المريخ.

ربما يرغب المرء على الأقل في معرفة زمن حدوث هذا الحدث. للقيام بذلك، يمكن للمرء أن ينظر إلى الصورة التلفزيونية لساعة يحملها رائد الفضاء، وهي ساعة أنشئت بشكلٍ مكافئ لساعة في المعمل، وهي صُنعت بحيث تحافظ على الوقت بشكلٍ صحيحٍ حتى في أثناء تعرُّضها لتسارع سفينة الفضاء التي حملت رائد الفضاء من الأرض إلى المريخ. ولكن وفقًا لنظرية لورنتز، ستقيس هذه الساعة الزمن بشكلٍ مختلفٍ عن تلك الموجودة على الأرض، وستكون خارج التزامن مع الساعة الموجودة على الأرض بمقدار القيمة $(l_0 v/c^2)/\sqrt{1-(v^2/c^2)}$، حيث l_0 هي المسافة إلى المريخ، وv هي سرعة الساعة بالنسبة إلى الأثير. نظرًا إلى أن v غير معروفٍ، فإن الزمن «الحقيقي» لهذا الحدث على المريخ سيكون غامضًا بالنسبة إلينا.

ربما نحاول تصحيح زمن الحدث على سطح المريخ، ليس بالإشارة إلى الصورة التلفزيونية لساعة في سفينة الفضاء، ولكن من خلال «التصحيح» المباشرة للفاصل الزمني اللازم لوصول الضوء إلينا. ولكن لإجراء التصحيح بشكلٍ صحيحٍ، يجب علينا، وفقًا لنظرية لورنتز، معرفة المسافة «الحقيقية» l، بالإضافة إلى سرعة الأرض الحقيقية v بالنسبة إلى الأثير لإجراء التصحيح ذي القيمة $\Delta t = l/(c-v)$. مرة أخرى، نواجه الغموض نفسه بشكلٍ أساسي في محاولة اكتشاف بالضبط متى يقع حدثٌ ما على المريخ.

من الواضح إذن أن أفكارنا العادية حول معنى التزامن تصبح غامضة عندما تمتد إلى ما هو أبعد من المجالات التي نشأت فيها. كما رأينا في الفصل 11، تستند هذه الأفكار إلى فكرة بدهية مفادها أنه يمكن لحواسنا أن تدرك مجموعة من الأحداث بشكلٍ متزامنٍ في الزمن نفسه، وهو ما نسميه «الآن». ولكن بمجرد وصولنا إلى الأحداث البعيدة، كتلك التي تحدث على سطح المريخ، نرى أنه حتى عندما نستخدم أسرع وسائل الاتصال المتاحة لنا (موجات الراديو أو الضوء)، ما نراه، على سبيل المثال في الصورة التلفزيونية، لا يحدث في الوقت نفسه، ولكن كلما كان الحدث بعيدًا، يعني ذلك أنه حدث في وقتٍ أبكر. في الواقع، نحن نعلم أن الضوء المرئي الآن في التلسكوبات كان ينبعث من النجوم منذ ما يصل إلى ألف مليون سنة. وبالتالي، من الواضح أنه بالنسبة إلى المسافات الطويلة، لم يعُد الوجود المشترك لإدراكنا الحسي يعني الشيء نفسه مثل التزامن. وفي القياسات الدقيقة التي تتضمن مسافاتٍ أقصر، يتبع الاستنتاج نفسه بشكلٍ أساسي، بمعنى أن الأحداث المكتشفة على أنها موجودة في أداة معينة (على سبيل المثال، ما يظهر في صورة معينة) ليست بالضرورة كلها متزامنة.

ما هو أهم من عدم التكافؤ في فكرة الأحداث التي تحدث معًا في اللحظة نفسها، والتزامن الموصوف أعلاه هو حقيقة أنه لا توجد طريقة فريدة لإسناد حدثٍ معينٍ بشكلٍ لا لبس فيه إلى وقتٍ محددٍ جيدًا في الماضي. ويترتب على ذلك، إذن، أن مفهومنا الحدسي الكامل لما يُقصد بـ «الآن»، وكذلك عن الماضي والمستقبل، لم يعُد يشير بوضوحٍ إلى ما يمكننا بالفعل ملاحظته أو إدراكه أو تجربته أو قياسه.

في ضوء هذا الغموض العميق والأساسي الذي نشأ من تطبيق المفاهيم البدهية للزمن خارج مجالها الصحيح، يجب أن يكون نهجنا -كما أشرنا سابقًا- هو وضع هذا النمط من التفكير جانبًا والبدء من جديدٍ. بدلًا من الإشارة إلى لحظة مفترضة من التزامن لا يمكن ملاحظتها إلا إذا عرفنا ما لا يمكن معرفته، أي سرعتنا بالنسبة إلى الأثير الذي لا يمكن ملاحظته بشكلٍ جوهري، نبدأ بحثنا من خلال استنادنا إلى أقصى حدٍّ ممكنٍ على حقائق الحالة والفرضيات القابلة للاختبار من حيث المبدأ. ما هذه الحقائق؟ لقد ناقشنا بالفعل في الفصل العاشر جانبًا واحدًا من الحقائق ذات الصلة، أي أن كل معرفتنا الفعلية بإحداثيات المكان والزمن للأحداث الحقيقية تستند -على الأقل من حيث المبدأ- إلى العلاقات التي يمكن ملاحظتها للظواهر الفيزيائية بأدوات القياس المناسبة. من أجل تجنُّب الغموض في مفاهيمنا الأساسية عن المكان والزمن، من الضروري بالتالي التعبير عن المحتوى الكامل للقانون الفيزيائي من حيث هذه العلاقات، وليس من حيث الأثير الذي له خصائص جوهرية غير قابلة للاختبار وهي غامضة بطبيعتها.

نحن الآن على استعدادٍ للنظر في النقطة الأساسية لانطلاق أينشتاين، أي الإحداثيات القابلة للقياس بالفعل من النوع الموصوف أعلاه، فإن جميع المراقبين الذين يتحركون بشكلٍ موحدٍ (أي غير متسارعٍ) يحصلون على القياس نفسه لسرعة الضوء، وبشكلٍ مستقلٍّ عن السرعات الخاصة بهؤلاء المراقبين، إذا كان كلٌّ منهم يستخدم أدواتٍ مصمَّمة بشكلٍ متكافئ ويتبع إجراءات قياسٍ متكافئة فيما

يتعلق بالإطار المرجعي لمعمله الخاص. (النسبية الخاصة تقتصر على العلاقات القائمة بالنسبة إلى المراقبين المتحركين بسرعة منتظمة؛ أما للتعامل مع المراقبين المتسارعين، يجب علينا استخدام نظرية النسبية العامة، التي هي خارج نطاق المناقشة الحالية).

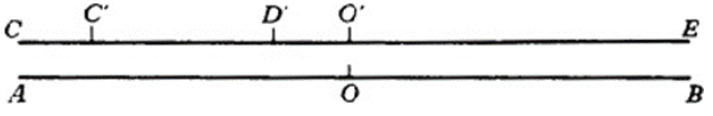
لم ينظر أينشتاين إلى النتيجة المذكورة أعلاه على أنها نتيجة لنظرية لورنتز، ولكن باعتبارها فرضية أساسية خاضعة بشكلٍ واضحٍ للاختبارات التجريبية التي تأكدت بالفعل في العديد من التجارب في الوقت الذي طور فيه أينشتاين نظريته لأول مرة (منذ ذلك الحين) تأكدت في مجموعة متنوعة من السياقات التجريبية، ولم تُدحَض أبدًا).

لنكتشف بشكلٍ أكثر وضوحًا ما تشير إليه هذه الفرضية فيما يتعلَّق بمعنى مفاهيم التزامن في الفيزياء، افترض أينشتاين تجربة بسيطة، إنها مجرد تجربة متخيَّلة بمعنى أننا لا نملك -على الأقل في الوقت الحاضر- أدواتٍ حسَّاسة بما يكفي للقيام بالمطلوب فيها. لكن هذه التجربة ممكنة من حيث المبدأ، ولها ميزة أن التفكير فيها يُبرِز بوضوحٍ الصعوبة الأساسية في المفاهيم القديمة لِمَا يشكِّله التزامن بين حدثين منفصلين.

لنفترض أن قطارًا يتحرك على جسرٍ للسكك الحديدية بسرعة v، لنفترض أن هناك مراقبًا مثبتًا على الجسر عند النقطة O، مجاورًا إلى حدٍّ إلى منتصف القطار. هذا المراقب لديه زميلان موجودان عند النقطتين A وB، يمتلكان ساعاتٍ متزامنة جيدًا بالنسبة إلى السد، كما هو موضح في الشكل 1-13. يُفترض أن تكون A وB على المسافة نفسها l

بالنسبة إلى O، كما قيست بواسطة المساطر في حالة السكون بالنسبة إلى الجسر. افترض أن زملاء O في A وB أطلقوا ومضاتٍ من الضوء، وأن هذه الومضات تصل إلى O في الوقت نفسه. من حقيقة رؤيتهم معًا، من الواضح أنه لا يعني بالضرورة أنهم نشأوا في الوقت نفسه. في الواقع، يجب أن يصحح O، مع الأخذ في الاعتبار الوقت الذي يستغرقه الضوء للوصول إليه من A وB. نظرًا إلى أن المسافات متساوية، وإلى أن سرعة الضوء هي نفسها في كلا الاتجاهين، يتبع ذلك في هذه الحالة أن المراقب عند O سوف يحسب أن الومضات حدثت في الوقت نفسه.

شكل 1–13



الآن سنفترض أن هناك مراقبًا O' في القطار المتحرك. لنفترض أن O' في المكان المقابل لـ O وذلك عندما يتلقَّى O ومضتين من A وB. بالطبع، سوف يرى المراقب O' أيضًا الومضتين في الزمن نفسه. لكن أيضًا يجب أن تحسب الأزمنة التي بدءا فيها إطلاق الوميض. للقيام بذلك، يجب أن تقاس المسافة بين المراقب O' وبين مصادر الضوء، بالشكل الذي تقيسه مسطرته التي تتحرك مع القطار، يمكنه تحقيق ذلك بسهولة بمساعدة العديد من زملائه في أجزاءٍ مختلفة من القطار.

سنفترض أن أحد هؤلاء الزملاء كان عند النقطة A عندما انبعث الفلاش هناك؛ سيسجل هذا المراقب القراءة عبارة عن المسافة C

على مسطرته وهي بالضبط النقطة المقابلة لـ A، حيث إنه في هذه اللحظة سيمرُّ عند A. الآن، يمرُّ الضوء من C إلى O’ (أو بشكلٍ مكافئ من A إلى O)، ويستغرق بعض الزمن للقيام بذلك. بالنظر إلى العملية من وجهة نظر المراقب الموجود على الجسر، نرى أنه عندما ينبعث الوميض لأول مرة، لا يمكن لمراقب القطار الأصلي، الذي سيكون لاحقًا في الجهة المقابلة لـ O، أن يصل بعد إلى O’ ولكنه سيصل فقط إلى النقطة D’، على يسار O’، بحيث يتم تغطية المسافة D‘O’ في أثناء انتقال الضوء من A إلى O (أو بدلًا من ذلك من C إلى O’). عندما يصل هذا المراقب إلى O’ ويرى الوميض، فإن النقطة C ستكون، وفقًا للمراقب الموجود على الجسر، قد انتقلت إلى C’، وهي مسافة تساوي D‘O’. نظرًا إلى أن مراقب القطار يعتبر نفسه في حالة سكون، فإنه لا يأخذ هذه الحركة في الاعتبار عندما يأتي لتسجيل المسافة بينه وبين مصدر وميض الضوء. بدلًا من ذلك، يقوم بتعيين المسافة كـ C’O’، وهي أقل من المسافة AO التي حدَّدها مراقب الجسر. وبطريقة مماثلة، سيخصص مسافة EO’، لكي ينتقل الضوء من E إلى O’، وهي أكبر من المسافة BO التي حدَّدها مراقب الجسر.

الآن، إذا كانت ميكانيكا نيوتن صحيحة، فسيمكن تعويض هذا التخصيص المختلف للمسافات من قبل المراقبين، لأن مراقب القطار سيخصص سرعة أقل للضوء (c − v) للوميض القادم من C، وسرعة أعلى (c + v) للوميض القادم من E. نتيجة لذلك، بالاتفاق مع مراقب الجسر (بالإضافة إلى ما تقودنا «البديهة» إلى توقُّعه)، ستشير الحسابات إلى أن الومضات عند C وE تنبعث عند الزمن نفسه.

في الواقع، يجب على جميع المراقبين -رغم ذلك- تخصيص السرعة نفسها للضوء، كما رأينا، تظهر التجارِب أن هذه هي الحالة، لذلك لم يعُد بإمكان مراقب القطار الموافقة على أن الومضتين متزامنتان، لأنهما يغطيان -أو يقطعان- مسافاتٍ مختلفة بالسرعة نفسها.

يعتبر هذا الأمر انفصالًا كبيرًا عن الأفكار القديمة، لأن المراقبين المختلفين لا يتفقان على ما هو الزمن نفسه للأحداث البعيدة. ومع ذلك، يجب التأكيد على أنه بالنسبة إلى الأحداث البعيدة، فإن إنشاء مفهوم التزامن يعتمد فقط على استنتاجٍ غير مباشرٍ indirect deduction، نتيجة لعملية حسابية تعبر عن تصحيح الزمن الذي تحتاجه إشارة ضوئية (أو إشارة راديو) لكي تمر من نقطة الرصد إلى النقطة التي تحدث فيها الملاحظة بالفعل. وبالتالي، لم يعُد التزامن حقيقة فورية تتوافق مع وجود حدثين مشتركين معًا في خبراتنا اليومية. لأنه يُنظر إليه الآن على أنه يعتمد -إلى حدٍّ كبيرٍ- على وسائل تقليدية بحتة للأخذ في الاعتبار زمن مرور الإشارة. يبدو هذا الاصطلاح طبيعيًّا وحتميًّا لـ «البديهة» لكنه يؤدي إلى نتائج لا لبس فيها، الشيء نفسه بالنسبة إلى جميع المراقبين، فقط في ظل الظروف التي تعمل فيها قوانين جاليليو بشكلٍ تقريبي جيدًا لإضافة السرعات؛ عندما لا يمكن اعتبار سرعة الضوء لا نهائية بشكلٍ فعَّالٍ، فإن الحقائق التجريبية للفيزياء توضح أن النتائج ستعتمد على سرعة أدوات المراقب.

يترتب على المناقشة أعلاه أن التزامن ليس صفة مطلقة للأحداث، التي تكون أهميتها مستقلة عن حالة حركة جهاز القياس. وبدلًا من ذلك، يجب أن يُفهم معنى التزامن على أنه متعلقٌ بأدوات المراقبة، بمعنى أن

المراقبين الذين ينفذون إجراءات مكافئة بأدواتٍ مُنشأة بشكلٍ مكافئ تتحرك بسرعاتٍ مختلفة سوف ينسبون خاصية التزامن إلى مجموعاتٍ مختلفة من الأحداث.

إذا كانت هناك طريقة ما للحصول على إشارة فورية بين حدثين (أي إشارة فورية من حدثٍ إلى آخر)، فلن تكون هناك حاجة إلى تصحيحاتٍ لوقت الانتشار (الإشارة)، ولن تكون هناك حاجة إلى ظهور نسبية التزامن الموصوفة أعلاه. لكن لا توجد إشارة معروفة يمكن أن تكون أسرع من الضوء. علاوة على ذلك، كما سنرى لاحقًا، تشير نظرية النسبية إلى أن مثل هذه الإشارة غير ممكنة، بمعنى أن الافتراض بأن مثل هذه الإشارة ممكنة يؤدي إلى تناقضٍ مع نظرية النسبية. لذلك، على الأقل بقدر ما نعرف الآن، وبقدر ما يتعلق الأمر بالنظريات الحالية للفيزياء، يجب دائمًا إجراء تصحيحٍ من أجل حساب أزمنة الأحداث البعيدة، بطريقة تقليدية تعتمد على مراعاة الزمن اللازم لانتشار الإشارات الضوئية بين نقاطٍ مختلفة، وباستخدام حقيقة أن جميع المراقبين يقيسون سرعة الضوء نفسها، في ظل هذه الظروف، ستكون نسبية التزامن ضرورة لا مفرَّ منها.

بمجرد أن نعترف بنسبية التزامن منسوبة إلى سرعة المراقب، فإن ذلك يتبع على الفور أن قياسات الطول والفترات الزمنية يجب أن يكون لها نسبية مقابلة. لإثبات ذلك فيما يتعلَّق بالطول، دعونا نعود إلى مثالِنا الخاص بالمراقبين، أحدهما مثبتٌ على جسر السكة الحديد والآخر يتحرك مع القطار. سنفترض أن المراقب على الجسر قد عدَّل وضع

المسطرة من A إلى B وعدل ساعة القياس في A وB بالتزامن مع ومضات الضوء. مصححة بالقاعدة t'=t–(l/c)، سيتبع المراقب في القطار الإجراء نفسه في إطاره المرجعي المتحرك، عن طريق ضبط عدَّاد المسطرة والساعات المقابلة بشكلٍ متزامنٍ باستخدام ومضات الضوء، مصححة بالصيغة $t_0^A=t_0-(l_0^A/c)$ و $t_0^B=t_0-(l_0^B/c)$ حيث l_0^A و l_0^B هما المسافتان من O إلى A ومن O إلى B كما تم قياسهما بواسطة مساطر تتحرك مع القطار.

الآن، طالما أن قضيبًا لا يتحرك بالنسبة إلى المراقب، يمكنه قياس طوله دون اعتبارٍ لقياسات الزمن. وبالتالي، يمكنه اعتبار أحد الطرفين، A، «الآن»، والنهاية الأخرى للقضيب B، «بعدها بقليلٍ»، وهذا لن يؤثِّر على النتيجة التي يحصل عليها. ولكن إذا كان قضيبٌ يتحرك بالنسبة إلى المراقب، فإنه يحدد أطوالها على أنها المسافة بين نقطتي نهايتها في الزمن نفسه. (وبالتالي، إذا قاس المراقب الموجود على الجسر موضع مؤخرة القطار في لحظة ما ومقدمة القطار بعد ساعة، فيمكنه أن يحسب طول القطار على أنه بطول 60 ميلًا أو أكثر، ومن الواضح أنها نتيجة خاطئة).

الآن، لنفترض أن زملاء المراقب الموجود في O عند A وB أطلقوا ومضات، في الوقت نفسه، كما قاسوها بساعاتهم، على الجسر، وأن هذه هي اللحظة التي يمر فيها القطار عند A وB على التوالي. افترض بالمثل أن المراقبين المتحركين المتوافقين في A' وB' عند طرفي القطار أطلقوا ومضاتٍ عندما أظهرت ساعاتهم القراءة نفسها. وفقًا

لمناقشاتنا حول التزامن، يترتب على ذلك أن المراقبين على الجسر سوف يستنتجون أن الومضات التي قيل إنها متزامنة من قِبَل المراقبين المتحركين تحدث في الواقع في أوقاتٍ مختلفة، كما حسبها مراقبو الجسر. بالعكس، سيحسب المراقبون في القطار أن الومضات التي قال مراقبو الجسر إنها متزامنة تحدث في الواقع في أوقاتٍ مختلفة.

سنفترض الومضات التي اعتبرها مراقب القطار متزامنة، ستكون بالنسبة إلى مراقب السد ذات فارقٍ زمني قدره δt. في هذا الوقت يتحرك القطار مسافة $v\delta t$. وبالتالي، سيستنتج مراقب السد أن مراقب القطار لا يقيس الطول «الحقيقي» للقطار، ولكنه يضيف تأثيرات الإزاحة بسبب حركته خلال الفترة δv. لذلك ليس من المستغرب أن يتوصل إلى نتيجة مختلفة. بطريقة مماثلة، يستنتج مراقب القطار أن مراقب الجسر لا يقيس الطول «الحقيقي» للقطارات، لذا فهو أيضًا لا يتفاجأ باختلاف نتائج المراقبين. لكننا في تحليل نتائج كلا المراقبين يمكننا أن نرى المزيد، أي أنه بما أن اتفاقيات المراقبين لتحديد التزامن ليس لها المعنى نفسه، فإن ذلك يترتب على وجود مشكلة مماثلة فيما يتعلق باتفاقيات تعريف الطول. بعبارة أخرى، على الرغم من أن كلَّ مراقبٍ يمر بالإجراء نفسه فيما يتعلق بإطاره المرجعي، باستخدام أدواتٍ مبنية بشكلٍ مكافئ، فإن الاثنين لا يشيران في الواقع إلى مجموعة الأحداث نفسها عندما يتحدثان عن طول شيء ما.

تظهر مشكلة مماثلة في قياس الفترات الزمنية. لتوضيح هذا الأمر، دعونا ننظر مرة أخرى إلى مثالنا الذي يمر فيه الطرف الأمامي للقطار

عند A والنهاية الخلفية عند B فيما تظهره ساعتا المراقب الموجود في O أن A وB في الوقت نفسه. (يمكن ملاحظة هذه الحقيقة، على سبيل المثال، بواسطة زملاء المراقب O في A وB).

الآن، سنفترض وجود ساعة داخل القطار، وهي توضح الوقت t'_1 الذي مرَّت عنده مقدمة القطار A وt'_2 عندما تمر عند B. سيقول مراقبٌ في القطار بعد ذلك إن هناك حاجة إلى فاصلٍ زمني $\Delta t' = t'_2 - t'_1$ لازم لواجهة القطار حتى يمكنها الانتقال من A إلى B. ومن ناحية أخرى، فإن المراقبين على الجسر سيقيسون وقت حدوث ذلك عن طريق اثنتين من ساعتيهم «المتزامنتين» عند A وB. إذا كان t_A هو الوقت الذي تكون فيه مقدمة القطار قد شوهدت من قبل المراقب A لتمرير هذه النقطة، وكان t_B هو الوقت الذي كان فيه مراقبٌ مماثلٌ يرى مقدمة القطار تمرُّ عبر B، ثم استنتج المراقبون على الجسر أن الفاصل الزمني هو $\Delta t' = t'_2 - t'_1$. ومع ذلك، كما رأينا، فإن المراقبين في القطار يعتبرون الساعات في A وB غير متزامنة؛ حتى يجادلوا بأن مراقبي الجسر لم يقيسوا فعليًّا الفاصل الزمني «الحقيقي» للقطار للانتقال من النقطة A إلى B. ومن خلال حجة مماثلة، كان مراقبو السد يجادلون بأن أولئك الموجودين في القطار لم يقيسوا أيضًا الفاصل الزمني «الصحيح» بشكلٍ صحيحٍ. ولكن، كما في حالة قياسات الطول، من الواضح أنه فيما يتعلق بالساعات المتحركة، فإن نسبية التزامن تعني أن تعريف الفترات الزمنية له أيضًا جانبٌ تقليدي معين؛ نتيجة لذلك لا توجد أهمية مطلقة للفترات الزمنية، ولكن بدلًا من ذلك فإن معناها يتعلَّق بسرعة الأجهزة التي يقاس الوقت بها.

نرى بعد ذلك أن هناك علاقة متبادلة وثيقة بين تعريفات التزامن والطول والفاصل الزمني، وأن حقيقة أن جميع المراقبين يحصلون على السرعة نفسها المقاسة للضوء تعني أن هذه المفاهيم الثلاثة يجب اعتبارها ليست مطلقة بل بالأحرى يمكن اعتبارها ذات معنى فقط إذا ارتبطت بإطارٍ مرجعي.

* * *

XIV. تحويلات لورنتز من وجهة نظر أينشتاين

يمكن مقارنة الطابع الأساسي لنسبية إحداثيات المكان والزمان كما هو موضحٌ في الفصل السابق بخاصية مماثلة مألوفة بالفعل في قياس إحداثيات المكان وحده. في مثل هذا القياس، يكون كل مراقب قادرًا على توجيه أجهزته في اتجاه مختلفٍ، بحيث لا يحصل جميع المراقبين على القيمة نفسها للإحداثيات x للنقطة نفسها. وهذا يعني أن إحداثيات x ليس خاصية «مطلقة» لنقطة ما ولكنها تحدد العلاقة بين تلك النقطة وإطار مرجعي معين. وبالمثل، لا يحصل المراقبون الذين يتحركون بسرعاتٍ مختلفة على القيم نفسها لـ «إحداثيات الزمن» لحدثٍ معينٍ، لذلك يجب أن تتوافق هذه الإحداثيات أيضًا مع بعض التناسب بإطارٍ مرجعي وليس بخاصية «مطلقة» لحدثٍ قيد الدراسة.

الآن، في هندسة المكان -أو الفراغ- وجد أنه على الرغم من هذه «النسبية» في معاني الإحداثيات، فإن هناك بعض التحولات، مثل التحويلات الموضحة في المعادلة (1-11) وصيغتها في حالة الدوران (2 - 11)، التي تمكِّننا من معرفة متى نتعامل مع نفس النقطة، على الرغم من إجراء القياسات على أساس أطرٍ مرجعية مختلفة التوجه والمركز، هل توجد تحولات مماثلة في إحداثيات المكان والزمن مجتمعة؟

في الفصل الثاني رأينا أنه في ميكانيكا نيوتن هناك تحول جاليليو، الموضح في المعادلة (3-2)، وهو ما يمكننا في الواقع من ربط إحداثيات المكان والزمن للحدث نفسه عند إجراء القياسات في أطرٍ

مرجعية تتحرك فيما يتعلق بعضها ببعض. ومع ذلك، كما رأينا، يشير قانون جاليليو الخاص بإضافة السرعات إلى أن سرعة الضوء يجب أن تختلف باختلاف سرعة معدات المراقبة. نظرًا إلى أن هذا الاختلاف المتوقع يتعارض مع الحقيقة، فمن الواضح أن تحويل جاليليو لا يمكن أن يكون هو التغيير الصحيح (باستثناء كونه ثابتًا تقريبيًّا في ظل ظروفٍ يمكن فيها اعتبار سرعة الضوء لا نهائية فعليًّا).

ما نسعى إليه هو التحويل بين مجموعة إحداثيات الفضاء **x** و**y** و**z** والزمن **t** لحدثٍ ما، كما أمكن قياسه في إطارٍ مرجعي معين A والمجموعة المقابلة x' و y' و z' و t' للحدث نفسه، كما أمكن قياسه في إطار مرجعي آخر B، يتحرك بالنسبة إلى الإطار A. لتبسيط الحجة، دعنا نفترض أن سرعة B بالنسبة إلى A هي **v**، في الاتجاه **z** (التعميم على اتجاهات عشوائية سيبدو بسيطًا تمامًا).

يجب أن يكون هذا التحول متوافقًا مع حقيقة أن السرعة المقاسة للضوء هي **c**، وهي نفسها في جميع الإطارات المرجعية المتحركة بشكلٍ منتظمٍ. للتعبير عن هذه الحقيقة، اختر أصل إحداثيات المكان والزمان O, origin، لكلا الإطارين، كحدثٍ يتوافق مع انبعاث شعاع ضوئي معين. ثم، في الإطار A، يجب أن يصل شعاع الضوء بعد فترة زمنية **t** إلى سطح كروي مُعطى بواسطة المعادلة:

$$c^2t^2 - x^2 - y^2 - z^2 = 0 \qquad (14-1)$$

بينما في الإطار B سيكون قد وصل أيضًا إلى السطح الكروي:

$$c^2t'^2 - x'^2 - y'^2 - z'^2 = 0 \qquad (14-2)$$

لذلك نحتاج إلى تحويل يترك العلاقة المذكورة أعلاه معبرة عن الانتشار الكروي لموجة ضوئية ثابتة.

لقد أظهرنا بالفعل في الفصل التاسع أن هناك تحولًا يترك سرعة الضوء ثابتة، أي تحويل لورنتز. لهذا، من الواضح أننا نضيف دورانًا عشوائيًّا في الفضاء، لأن هذا يجعل الدالة غير متغيرة $x^2 + y^2 + z^2 = x'^2 + y'^2 + z'^2$ بينما تجعل هذه المعادلة أيضًا الزمن ثابتًا (t=t') وهذا ينتج أن الدالة $c^2t^2 - x^2 - y^2 - z^2$ غير متغيرة أيضًا، إلى جانب ذلك، هناك انعكاسات في المكان والزمن، مثل: $x = -x'$ $t = -t'$ ، وما إلى ذلك، التي من الواضح أيضًا أنها تترك سرعة الضوء ثابتة.

هنا يبرز سؤالٌ منطقيٌّ حول ما إذا كانت هناك أي تحويلات أخرى تترك سرعة الضوء ثابتة. الإجابة هي أننا إذا جعلنا الشرط المعقول فيزيائيًّا بأن التحويلات لا تمتلك نقاطًا مفردة (بحيث تصبح منتظمة ومستمرة في كل مكانٍ)، فيمكن إثبات أن تحويلات لورنتز بالإضافة إلى الدوران بالإضافة إلى الانعكاسات هي الوحيدة الممكنة.

لا يمكن التأكيد بشدة على أنه في نهج أينشتاين لا يستنتج المرء تحويلات لورنتز نتيجة للتغييرات في أدوات المراقبة في أثناء تحركها عبر الأثير الافتراضي، وانطلاقًا من هذا يمكن استنتاج أن جميع المراقبين سيحصلون على السرعة المقاسة نفسها، بغض النظر عن سرعاتهم. بدلًا من ذلك، كما أشرنا بالفعل في فصولٍ سابقة، يبدأ المرء بفرضية مؤكدة تجريبيًّا جيدًا لثبات سرعة الضوء، كما أمكن قياسها بالفعل.

هذا لا يحتاج إلى تفسيرٍ (على سبيل المثال، من حيث التغييرات في الأدوات في الأثير المفترض)، ولكنه مجرد نقطة انطلاقٍ أساسية في عملٍ إضافي (كما هو الحال في ميكانيكا نيوتن، نبدأ من قوانين نيوتن كفرضية مؤكدة جيدًا، وفي الكهرباء الديناميكية (المتحركة) electro-dynamics نبدأ بقوانين فاراداي وأمبير). مع نقطة البداية هذه، يستمر أينشتاين في إظهار -بالطريقة الموصوفة أعلاه- أن تحويلات لورنتز هو التحويل الفيزيائي الوحيد المسموح به ماديًّا، وهو الذي يتوافق مع فرضيتنا الأساسية.

دعونا الآن نكتب تحويلات لورنتز (الذي يعبر عن الإحداثيات في النظام B بدلالة تلك الموجودة في النظام A) مرة أخرى [راجع المعادلات (1-9)، (2-9)، (3-9)، (5-9)]:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \qquad t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \qquad (14-3)$$
$$y' = y \qquad z' = z$$

التحويل العكسي (التعبير عن الإحداثيات في النظام A بدلالة تلك الخاصة بالنظام B) هو

$$x = \frac{x' + v't'}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \qquad t = \frac{t' + vx/c^2}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \qquad (14-4)$$
$$y = y' \qquad z = z'$$

لاحظ أنه يمكن الحصول على التحويل العكسي من التحويل الأصلي عن طريق استبدال $\mathbf{v}$ بـ $-\mathbf{v}$، هذا أمرٌ متوقعٌ بالطبع، لأنه إذا

كانت سرعة B بالنسبة إلى A هي **v**، فإن سرعة A بالنسبة إلى B هي v–. لذلك، في الواقع، يمكن استخدام دالة السرعة الفعلية نفسها عندما يحوِّل المرء B إلى A كما يحدث عندما يحوِّل المرء A إلى B.

لاحظ أيضًا أنه نظرًا إلى أن $\mathbf{v} / \mathbf{c} \to 0$ (وهو ما يعادل السماح لـ $\mathbf{c} \to \infty$)، فإن تحويلات يمكن اختزالها إلى الصيغة التالية:

$$x' = x - vt \qquad t' = t$$
$$x' = x \qquad y' = y \qquad (14-5)$$

وهو مجرد تحويلٍ بصيغة تحويلات جاليليو. بهذه الطريقة نرى بشكلٍ قاطعٍ أن المفاهيم القديمة للمكان والزمن موجودة أيضًا عند أينشتاين، كحالاتٍ محدودة خاصة، قابلة للتطبيق عندما لا تكون نسبة v / c كبيرة جدًّا.

من الواضح أن تحويل لورنتز يتضمن نسبية التزامن والطول والفترات الزمنية، كما هو موضحٌ في الفصل السابق. على سبيل المثال، إذا أخذنا في الاعتبار مجموعة من الأحداث التي وصفها المراقب B بأنها متزامنة، بحيث تكون $t' = 0$ لكلٍّ منهم، ثم وفقًا لـلمعادلة (14–4) سيقول المراقب A إن هذه الأحداث تحدث في زمن $t = vz / c^2$؛ من الواضح أن مثل هذه الأحداث ليست متزامنة. وبالمثل، إذا كان المراقب A يقيس طول جسمٍ يتحرك في اتجاه **z** بسرعة **v**، فيجب عليه مراعاة طرفي هذا الجسم في الوقت نفسه، كما قام بقياسه من خلال إطاره الذي ينتمي إليه (على سبيل المثال، $t = 0$). من خلال المعادلة (14–3) نحسب القيم التالية $z' = z/\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$ أو $z = \sqrt{1 - (v^2/c^2)}z'$. نظرًا إلى أننا اخترنا **v** كسرعة لهذا الجسم،

فمن الواضح أن z' هو طول الجسم في إطارٍ يكون فيه في حالة سكونٍ، لذلك فقد حصلنا على انكماش لورنتز (تقلص الأطوال Lorentz contraction).

لدراسة التغير في معدلات الساعات، دعونا نبدأ بالنظر إلى B باعتباره الإطار الذي تكون فيه الساعة في حالة ثباتٍ (على سبيل المثال عند $z' = 0$). نفترض أن فترتها الزمنية ستكون t'، ثم تبعًا للمعادلة (4-14) نحصل على الصيغة $t = t'/\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$ وهي مجرد صيغة لحساب تباطؤ الساعات التي في حالة حركة.

نظرًا إلى أن التحويل بين B وA هو نفسه بين A وB، مع استبدال v بـ v -، فإنها تتبع الاستنتاجات التي توصل إليها A حول تغيير علاقة أدوات B إلى ما يتم قياسه بالفعل، وكذلك سيرى المراقب B فيما يتعلق بأدوات A. وهكذا، على سبيل المثال، سيرى المراقب A أن مساطر B تنكمش، بينما سيقول المراقب B إنه يرى مساطر A تنكمش.

كيف يمكن أن يرى كلٌّ منهما تقلصًا من النوع نفسه في مسطرة الآخر؟ أي: إذا قال مراقب A إن مساطر B أقصر، فلماذا لا يقول مراقب B إن مساطر A أطول؟ الجواب، كما رأينا بالفعل، أن A وB لا يشيران إلى مجموعة الأحداث نفسها عندما يقيسان طول الجسم. نظرًا إلى اختلافهما حول مفهوم التزامن، يقول A إن B يسمح للمسطرة بالتحرك في أثناء إجراء قياساته، وبالتالي فهو يقيس شيئًا مختلفًا عن الطول الحقيقي، بينما يقول B الشيء نفسه عن A.

ربما يقارن المرء هذا الموقف بما يحدث عندما ينفصل شخصان

A وB، بينما لا يزال كلٌّ منهما في نطاق رؤية الآخر. يقول A إن B يبدو أصغر، بينما يقول B إن A يبدو أنه أصبح أصغر. لماذا إذن لا يقول B إن A يبدو أنه يكبر؟ والجواب إن كلًّا منَّا يرى شيئًا مختلفًا، أي صورة العالم على شبكية عينه. لا يوجد تناقض في حقيقة أن صورة A على شبكية العين B تصبح أصغر في الوقت نفسه الذي تصبح فيه صورة B على شبكية العين A أصغر. وبالمثل، لا يوجد تناقضٌ في القول بأن A سوف ينسب انكماشًا إلى مسطرة B، بينما B ينسب انكماشًا إلى A، وذلك ببساطة لأن كلًّا منهما يشير إلى شيء مختلفٍ عندما يتحدث عن طول الجسم.

* * *

XV. إضافة السرعات

لقد رأينا سابقًا تحويلات جاليليو بين الإحداثيات x' وy' وz' وt' من خلال الإطار B الذي يتحرك بسرعة **v** في اتجاه **z** وأن إطار A ثابتٌ بإحداثيات **x** و**y** و**z** و**t** هو:

$$z' = z - vt \qquad x = x',\ y = y',\ t = t' \quad (15-1)$$

إذا كان أحد المراقبين داخل الإطار A يراقب جسمًا يتحرك في الاتجاه X بسرعة u، فسوف يرى هذا الكائن يتحرك في الخط المعطى بواسطة $z = ut + z_0$. من أجل التبسيط، دعنا نفترض أن $z_0 = 0$. تصبح $u = z / t$. لحساب ما يراه المراقب داخل B، نطبق تحويلات جاليليو التي تنتج المعادلة:

$$z' = z - vt = (u - v)t = (u - v)t' \quad (15-2)$$

إذن، سيحسب المراقب داخل B السرعة إلى الجسم المتحرك بالمعادلة التالية:

$$w = z'/t' = u - v \quad (15-3)$$

هذا بالطبع هو قانون جاليليو المعروف لإضافة السرعات، المعطى في المعادلة (3-2)، التي استنتجناها مرة أخرى بمزيدٍ من التفصيل من أجل تسهيل المقارنة مع ما قام به أينشتاين.

إذا كان التحويل الصحيح بين A وB هو تحويل لورنتز بدلًا من جاليليو، فإننا نبدأ بالتعبير عن المعادلة (3-14) لإحداثيات B من خلال الحدود الرياضية الخاصة بـ A:

$$z' = \frac{z - vt}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \qquad (15-4)$$

كما في حالة تحويل جاليليو، تكتب z = ut كمعادلة لمسار الجسم المتحرك، معبرًا عنه في إطار A وهذا يؤدي إلى:

$$z' = \frac{(u - v)t}{\sqrt{1 - (u^2/c^2)}} \qquad (15-5)$$

من خلال المعادلة (14-3) نحصل على:

$$t' = \frac{t - (vz/c^2)}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} = \frac{t[1 - (uv/c^2)]}{\sqrt{1 - (u^2/c^2)}} \qquad (15-6)$$

وكذلك المعادلة:

$$w = \frac{z'}{t'} = \frac{u - v}{1 - (uv/c^2)} \qquad (15-7)$$

هذا هو القانون النسبي لجمع السرعات. لاحظ أنه عندما تقترب **v / c** من الصفر فإنها تؤول إلى قانون جاليليو حيث **W = u − v**. بشكلٍ عامٍّ من الواضح أنه يختلف تمامًا عن قانون جاليليو. يمكن ملاحظة بسهولة أنه من المستحيل إضافة سرعاتٍ أقل من سرعة الضوء **c** لتتجاوز السرعة **c**. لإثبات ذلك، دعونا ننظر في حالة نحول فيها، ليس بين A وB، ولكن بين B وA. كما يتضح من المعادلات (14-3) و (14-4) هذا ينطوي فقط على استبدال **v** بـ v-، يظهر انعكاسٌ بسيطٌ أن حجَّتنا حول إضافة السرعات ستؤدي بعد ذلك إلى المعادلة التالية:

$$W = \frac{u + v}{1 + (uv/c^2)} \qquad (15-8)$$

هنا نستخدم حرفًا كبيرًا كرمزٍ للتفريق بين المعادلتين (15-8) و(15-7). من الواضح إذن أنه إذا كان **u** و **v** موجبين فإن W <u + v، بحيث إذا أخذنا جسمًا بسرعة **u**، ثم نظرنا إليه من إطار بسرعة v-، فلن يكون لهذا الجسم فكرة «بدهية» تقودنا إلى توقع ما هو مجموع السرعتين. مع اقتراب **v** / **c** من الواحد الصحيح، تصبح التأثيرات الجديدة أكثر وضوحًا، لمعرفة ما يؤدي إليه هذا، ضع في اعتبارك هذه القيمة:

$$c^2 - w^2 = c^2 - \frac{(u+v)^2}{[1+(uv/c^2)]^2} = \frac{c^2[1-(u^2/c^2)][1-(v^2/c^2)]}{[1+(uv/c^2)]^2} \quad (15-9)$$

حيث إن $u^2/c^2<1$ و $v^2/c^2<1$ إذن تصبح قيمة c^2-w^2 موجبة وتصبح $|w|<c$. إذن، يصبح من المستحيل إضافة سرعتين أقل من **c** من أجل حساب سرعة تساوي سرعة الضوء.

على سبيل المثال نفترض أن **v**=0.9**c**، **u**=0.9**c**، وبالتالي تصبح

$$w/c = 1.8/(1 + 0.9 \times 0.9) = 1.8/1.81 < 1$$

على الجانب الآخر، لو أن **u**=**c** يصبح لدينا $w = (v + c)/[1 + (v/c)] = c$، وبالتالي نتحقق من أن سرعة الضوء هي نفسها في الإطار الجديد كما كانت في الإطار القديم.

تشير المناقشة أعلاه إلى أن سرعة الضوء هي حدٌّ يمكن للأشياء المادية الاقتراب منه ولكن لا تصل إليه أو تتجاوزه أبدًا. لذلك، تخيَّل أن لدينا سفينة داخل صواريخ، وافترض أنه تم إطلاق سلسلة من الانفجارات، بحيث يؤدي كلُّ انفجارٍ في إطار السفينة الصاروخية إلى

تغيير في السرعة Δv. من القانون النسبي لإضافة السرعات، يترتب على ذلك أنه بغض النظر عن المدة التي استمرت فيها السفينة في التسارع بهذه الطريقة، فإنها لن تصل أبدًا إلى سرعة الضوء، أي عن طريق حرق أي كمية محدودة -مهما كانت كبيرة- من الوقود. (في فصلٍ لاحقٍ سنصل إلى النتيجة نفسها بطريقة مختلفة، سيتضح أن السفينة لا يمكنها الوصول إلى سرعة الضوء لأن كتلتها ستقترب من اللا نهاية، بحيث يصبح تسريعها أصعب وأصعب مع اقترابها من سرعة الضوء).

لقد ناقشنا حتى الآن إضافة السرعات عندما تكون متوازية فقط، بحيث تختزل المشكلة إلى الحالة أحادية البعد. لكن من السهل جدًّا توسيع النتائج إلى ثلاثة أبعاد. لذلك، لنفترض أنه في الإطار A، يكون للجسم سرعة بمكوناته uz،uy ، ux، بحيث يُعطى مساره بواسطة= x = uxt ، y = uyt ، z = uzt. لنفترض أن تحويل لورنتز يتم بسرعة v (التي يمكن دائمًا اعتبارها في اتجاه z، إذا افترضنا أن أنظمة الإحداثيات لدينا موجهة بشكلٍ مناسبٍ)، إذن يصبح لدينا المعادلات التالية:

$$u'_z = \frac{z'}{t'} = \frac{u_z - v}{1 - (u_z v/c^2)}$$

$$u'_x = \frac{x'}{t'} = \frac{\sqrt{1-(v^2/c^2)}\,u_x}{1-(u_z v/c^2)} \qquad u_y = \frac{y'}{t'} = \frac{\sqrt{1-(v^2/c^2)}\,u_y}{1-(u_z v/c^2)} \tag{15-10}$$

يمكن كتابة هذه المعادلة بشكلٍ متجهي كالآتي:

$$\mathbf{u}' = \frac{\sqrt{1-(v^2/c^2)}}{1-(\mathbf{u}\cdot\mathbf{v}/c^2)}(\mathbf{u} - (\mathbf{u}\cdot\hat{v})\hat{v}) + \frac{(\mathbf{u}\cdot v)v}{1-(\mathbf{u}\cdot\mathbf{v}/c^2)} \tag{15-11}$$

حيث $\hat{v}$ هو متجه الوحدة unit vector في اتجاه $\mathbf{v}$.

كما أنه من الممكن كتابة تحويل لورنتز نفسه بشكلٍ اتجاهي، وهذا يؤدي إلى المعادلة التالية:

$$\mathbf{x}' = x - (\hat{v}\cdot\mathbf{x})\hat{v} + \frac{(\hat{v}\cdot\mathbf{x})\hat{v} - \mathbf{v}t}{\sqrt{1-(u^2/c^2)}}$$

$$t' = \frac{t - \mathbf{v}\cdot\mathbf{x}/c^2}{\sqrt{1-(v^2/c^2)}} \qquad (15-12)$$

* * *

XVI. مبادئ النسبية

منذ زمن أرسطو والمدرسية (السكولاستية) في العصور الوسطى، تطورت الفيزياء نحو وجهة نظر أكثر علائقية أو «نسبية». وهكذا، وضع كوبرنيكس الأساس لإسقاط فكرة أن هناك أماكن خاصة في الفضاء ولحظات من الزمن، لها أهمية مطلقة، بمعنى أنه يجب منحها دورًا فريدًا للحصول على مركزٍ متميزٍ في التعبير عن قوانين الفيزياء. إلى جانب هذا ذهب بالطبع إلى إدراك أنه لا يوجد «اتجاهٌ مطلقٌ» مفضَّل في الفضاء، بحيث تأخذ قوانين الفيزياء الشكل نفسه، بغض النظر عن كيفية تدوير نظام الإحداثيات. ثم جاء اكتشاف أن قوانين الميكانيكا ثابتة لتحويلات جاليليو، بحيث تعبِّر معادلات نيوتن عن علاقاتٍ من الشكل نفسه، بغض النظر عن سرعة الإطار المرجعي.

واجه هذا التطور نحو وجهة نظر علائقية صعوباتٍ ومشكلاتٍ جديدة، عندما أمكن التحقيق في خصائص الضوء وظواهر الديناميكا الكهربائية. نظرًا إلى أن الضوء له سرعة محدودة c، فقد كان من الواضح، وفقًا لتحويلات جاليليو، أن سرعته بالنسبة إلى المراقب يجب أن تعتمد على إطاره المرجعي. وبالمثل، فإن معادلات ماكسويل للمجال الكهرومغناطيسي، التي فسَّرت انتشار الضوء وغيره من الإشعاع الكهرومغناطيسي، بالإضافة إلى خصائص الاستقطاب، كان يُنظر إليها أيضًا على أنها ليست ثابتة في الشكل في ظل تحويلات جاليليو. بعبارة أخرى، يجب أن يكون هناك إطارٌ مفضلٌ تنطبق فيه معادلات ماكسويل بشكلٍ دقيقٍ، وتكون فيه سرعة الضوء c في جميع الاتجاهات. ثم

افترض علماء الفيزياء في القرن التاسع عشر الأثير، وهي الفكرة التي كان لها سببٌ فيزيائي، لقد كانت وظيفتها المقترحة هو ضرورة وجود مثل هذا الإطار المفضل.

عندما فشلت التجارب اللاحقة، مثل تجربة ميكلسون ومورلي، في تأكيد تنبؤات نظرية الأثير البسيطة المتعلقة بهذا الإطار المفضل، اقترح لورنتز نظرية بديلة، وشرح النتائج السلبية لهذه التجربة كنتيجة للتغييرات في أدوات المراقبة في أثناء تحركها من خلال الأثير. ومع ذلك، أدَّت هذه النظرية إلى صعوباتٍ في الفهم، حيث إن القيم الدقيقة للمسافات والأوقات «الحقيقية» التي تشير إلى إطار الثبات داخل الأثير أصبحت غامضة ولا سبيل إلى معرفتها.

لقد كان جوهر نهج أينشتاين هو إسقاط فكرة المكان والزمن المطلقين، كما تجسدت في فرضية الأثير، بدلًا من ذلك استخدم النهج العلائقي «النسبي» في ظاهرة الكهرباء الديناميكية وانتشار الإشعاع الكهرومغناطيسي. نظرًا إلى أن قوانين نيوتن للحركة كان يُنظر إليها على أنها تشكِّل العلاقات نفسها في كل إطارٍ متحركٍ بشكلٍ موحدٍ مرتبطٍ بتحويلات جاليليو، يُنظر إلى قانون ثبات رصد سرعة الضوء على أنه يشكِّل العلاقة نفسها في كل إطارٍ متحركٍ بشكلٍ موحدٍ مرتبط بتحويلات لورنتز. وكما تظهر دراسة أكثر تفصيلًا، فإن معادلات ماكسويل ثابتة بالمثل في ظل تحويلات لورنتز، بمعنى أن هذه المعادلات تأخذ الشكل نفسه عندما يعبر عنها في أي مجموعة من الإطارات المرتبطة بهذا التحول (سنناقش هذا بمزيدٍ من التفصيل

في الفصل الحادي والعشرين). حتى هذه النقطة، كان أينشتاين يلخص الحقائق الواضحة، أن الإشعاع الكهرومغناطيسي يلاحظ كميًّا عن طريق العلاقات المناسبة بين الظواهر الكهرومغناطيسية وأدوات معينة، وأن قوانين الديناميكا الكهربية المعروفة بالتجربة تشير إلى علاقاتٍ ثابتة بين الكميات التي رصدت على هذا النحو. من خلال هذا الثبات في العلاقات التي تشكِّل قوانين الديناميكا الكهربائية (أي معادلات ماكسويل)، تشير إلى أنها تتخذ الشكل نفسه بشكلٍ مستقلٍّ عن المكان أو الزمن الذي رُصدت فيه الظواهر الكهرومغناطيسية، وعن أصل وتوجه وسرعة الأطر المرجعية (التي ترتبط بعضها ببعض عن طريق عمليات الإزاحة والدوران وتحويلات لورنتز).

ولكن من الواضح الآن أنه إذا كانت قوانين نيوتن ثابتة في تحويلات جاليليو، فلا يمكنها أيضًا أن تكون ثابتة في تحويلات لورنتز. لرؤية هذا بالتفصيل، دعونا أولًا نكتب معادلات نيوتن $F = m(du'/dt')$ في إطار مرجعي معين B يتحرك بسرعة **v** بالنسبة إلى إطار مرجعي آخر A. نحن نعتبر أن الجسيم يتحرك فقط في الاتجاه **z**، الذي يعتبر أيضًا في اتجاه السرعة **v**. ثم إذا كان B وA مرتبطين بتحويل لورنتز، ومن خلال المعادلة (7-15) هذا يؤدي إلى

$$u' = (u - v)/[1 - (uv/c^2)]$$

علاوة على ذلك، فإن dt’ هي مجرد فترة زمنية، كما أمكن قياسها في الإطار المرجعي B، وهي مقدار الوقت اللازم للجسيمات لتحريك المسافة dz’ = u’ dt’. وفقًا لـلمعادلة (4–14) فإن الفاصل الزمني

المقابل dt ، كما تم قياسه في الإطار A، سيكون:

$$\frac{dt' + v dx'/c^2}{\sqrt{1-(v^2/c^2)}} = \frac{dt'[1 + (u'v/c^2)]}{\sqrt{(1-(v/c^2)}}$$
$$= \frac{dt'}{\sqrt{1-(v^2/c^2)}}\left[\frac{1 + (uv/c^2) - (v^2/c^2)}{1-(uv/c^2)}\right] = dt'\frac{\sqrt{1-(v^2/c^2)}}{1-(uv/c^2)} \qquad (16-1)$$

تؤول قوانين نيوتن للحركة (مع ملاحظة أن dv / dt = 0) إلى المعادلة التالية:

$$\frac{m[1-(uv/c^2)]}{\sqrt{1-(v^2/c^2)}}\frac{a}{dt}\left[\frac{(u-v)}{1-(uv/c^2)}\right]$$
$$= \frac{m}{\sqrt{1-v^2/c^2)}}\frac{1-(uv/c^2)-(u^2/c^2)}{1-(uv/c^2)}\frac{du}{dt} = F \qquad (16-2)$$

من الواضح أن شكل قوانين نيوتن للحركة ليس ثابتًا في ظل تحويلات لورنتز. وبما أن الحقائق التجريبية التي نوقشت (وغيرها) توضح أن التحول الفعلي بين إطارات الإحداثيات يجب أن يكون من خلال تحويلات لورنتز وليس من خلال تحويلات جاليليو، وكذلك فإن قوانين الميكانيكا ثابتة بغض النظر عن تغيير سرعة الإطار المرجعي، يترتب على ذلك أن قوانين نيوتن لا يمكن أن تكون قوانين الميكانيكا الصحيحة، (باستثناء الحالة التقريبية عندما تقترب نسبة v / c من الصفر).

لقد استند نهج أينشتاين في التعامل مع هذه المشكلة مرة أخرى إلى دراسة متأنية لمعاني كل هذه الحقائق. الآن، بحكم التعريف، يجب أن يكون قانون الفيزياء علاقة قائمة من دون استثناء. إذا كانت لها استثناءات، فنحن بحاجة إلى قانونٍ أوسع، يحدد متى ستكون هناك استثناءات، ولماذا يجب توقعها، وإلا لا يمكننا الاعتماد على

هذا القانون على الإطلاق (على سبيل المثال، إذا فشل في التحقق في الأماكن العشوائية أو عدة مراتٍ أو تحت شروطٍ معينة). بعبارة أخرى، القانون العام للفيزياء هو مجرد بيانٍ بأن بعض العلاقات يمكن ملاحظتها من حيث المبدأ في الطبيعة ثابتة، بغض النظر عن المكان والزمن والأطر المرجعية أو الظروف الأخرى (على سبيل المثال، درجة الحرارة، الضغط، إلخ) التي يمكن اختبارها بموجبها.

الآن، إذا كان التحول الصحيح بين الأطر المرجعية المختلفة هو ذلك الخاص بـتحويلات لورنتز، فسيترتب على ذلك أن ينظر فعليًّا من جديدٍ إلى السؤال عن ماهية قوانين الميكانيكا، في ضوء الأفكار الجديدة. عند القيام بذلك، يجب أن نسترشد بما أسماه أينشتاين مبدأ النسبية، الذي ينصُّ في جوهره على ما قيل أعلاه، أي أن قوانين الفيزياء يجب أن تفي بمتطلبات: (أن تكون العلاقات لها الشكل نفسه في كل إطارٍ مرجعي). هذا المبدأ له شكلان، النسبية المقيدة أو الخاصة، التي تشير فقط إلى الإطارات ذات السرعة المنتظمة، والنسبية العامة، التي تشير إلى أي إطارٍ (الذي، على سبيل المثال، يمكن تسريعها). في هذا الكتاب، سنهتم بالطبع بمبدأ النسبية المحدود.

يمكن تلخيص مبدأ النسبية من منظور مفاهيم أكثر بدهية، من خلال النظر في سفينة صاروخية تتحرك عبر مساحة فارغة من دون نوافذ أو اتصالاتٍ أخرى بالبيئة الخارجية. وفقًا لمبدأ النسبية، فإن الظواهر التي يلاحظها مراقبٌ داخل مثل هذه السفينة يجب ألا تعتمد على الإطلاق على سرعة السفينة. من الواضح أن نظرية الأثير لن تلبي هذا المطلب،

لأنه وفقًا لها، سيتحرك الضوء بسرعة c بالنسبة إلى الأثير، بحيث تعتمد سرعة الضوء المرصودة على سرعة السفينة. بشكلٍ عامٍّ، تختلف جميع الظواهر الكهرومغناطيسية (التي تحددها معادلات ماكسويل الصالحة فقط في إطار الأثير) وفقًا لسرعة السفينة.

كان لمبدأ النسبية قيمة إرشادية هائلة. أي أنه لا غنى عنه في المساعدة على اقتراح قوانين وعلاقات جديدة، ليس فقط في مجال الميكانيكا ولكن أيضًا في العديد من المشكلات الأخرى. في الواقع، كلما علمنا بعلاقة تحملها مجموعة محدودة من الأطر المرجعية، يمكن لمبدأ النسبية أن يقودنا عادةً إلى تعميمٍ يكون مستقلًّا عن الأطر المرجعية وله محتوى جديدٌ في هذه المجموعة الأوسع من الأطر، التي يمكن بعد ذلك اختبارها من خلال تجارب أخرى. في الفصول القليلة القادمة سوف نوضح هذه القيمة الاسترشادية لمبدأ النسبية في عددٍ من التطبيقات الخاصة.

* * *

XVII. بعض تطبيقات النسبية

من أجل إبراز معنى مبدأ النسبية في شكلٍ أكثر واقعية، سنقدم الآن بعض التطبيقات التي توضح قدرة هذا المبدأ على إبراز نتائج جديدة ناشئة يتفوق بها على التعميم الثابت للعلاقات التي كانت معروفة سابقًا في بعض سياقات أكثر محدودية.

أولًا، لنأخذ في الاعتبار قياس سرعة الضوء في الماء الجاري[1]. لفترة طويلة كان هذا السؤال سؤالًا رئيسيًّا يجب أن تواجهه فيزياء ما قبل النسبية، مما أدى في الواقع إلى العديد من الالتباسات والنقاط غير الواضحة، على سبيل المثال، مدى قدرة الماء المتحرك على تحريك الأثير المحيط به. (لمزيدٍ من المناقشة راجع C.C. Moller, The Theory of Relativity).

إذا كان n هو مؤشر انكسار الضوء في وسطٍ مائعٍ عند السكون، فإن طور سرعة الضوء في هذا الوسط هي $u_0 = c / n$. ، تكمن المشكلة في حساب سرعة المرحلة u عندما يتحرك السائل بسرعة v. من الواضح أن مبدأ النسبية يوفر إجابة مباشرة لا لبس فيها عن هذا السؤال، من دون الحاجة إلى أي افتراضاتٍ أخرى. وفقًا لهذا المبدأ، يجب أن تكون خصائص السائل كما لوحظ في الإطار الذي يكون فيه في حالة سكون مستقلة عن سرعة هذا الإطار بالنسبة إلى المختبر. لذلك، كلُّ ما نحتاج إلى القيام به، لحساب ما سيتم ملاحظته في إطار المختبر، هو إجراء

(1) فقط في الفراغ سرعة الضوء تساوي الثابت الكوني C، بينما في وسط مادي، ستختلف سرعة الضوء بشكل عام عن C.

تحويل لورنتز على ما يتم ملاحظته في الإطار الذي يتحرك مع السائل. لذا، إذا كانت طور سرعة الضوء في إطار المائع هي c / n، فيمكننا استخدام قانون النسبية لإضافة السرعات من خلال المعادلة (5-18) (التي تتبع تحويلات لورنتز)، هذا يؤدي إلى المعادلة:

$$u = \frac{u_0 + v}{1 + (u_0 v/c^2)} = \frac{(c/n) + v}{1 + (v/cn)} \simeq \left(\frac{c}{n} + v\right)\left(1 - \frac{v}{cn} + \frac{v^2}{c^2 n^2} + 0\right) \quad (17-1)$$

نرى أن الماء «يسحب» الضوء بشكلٍ فعالٍ إلى حدٍّ ما، ولكنه لا يضيف سرعة الماء الكاملة v إلى سرعة الطور c / n للضوء. هذه الصيغة، في الحقيقة متوافقة مع جميع التجارب التي أجريت حتى الآن، يمكن استخدام هذه التجارب لتأكيد الصيغة النسبية لإضافة السرعات.

التجربة الثانية التي سننظر فيها هي اضمحلال (التحلل) الميزونات the decay of mesons. كما هو معروف جيدًا، فإن الميزونات عبارة عن جسيماتٍ غير مستقرة، يتم اكتشافها لتُشكل عندما يُسمح للأشعة الكونية أو الجسيمات عالية الطاقة المتسارعة في المختبر بقذف كتلٍ من المادة. كلُّ هذه الجسيمات تتحلل وتتحوَّل إلى جسيماتٍ أخرى. يوجد توزيعٌ إحصائي لأزمنة الاضمحلال لمجموعة من الجسيمات، ولكن متوسط وقت الاضمحلال τ من نوعٍ معينٍ من الميزونات يمكن قياسه، واعتمادًا على نوع الجسيم، قد يكون من 10^{-6} إلى 10^{-10} ثوانٍ أو أقل.

لنفترض الآن τ_0 متوسط الزمن الذي يستغرقه الميزون في حالة الاستقرار (أو بسرعة منخفضة) في أثناء الاضمحلال.

يمكن حساب متوسط زمن الاضمحلال لجسيمٍ يتحرك بالسرعة v. فوفقًا لمبدأ النسبية، فإن زمن الاضمحلال في الإطار الذي يكون فيه

الميزون في حالة سكونٍ مستقلٍّ عن سرعة الميزون بالنسبة إلى المختبر. في هذه الحالة من السهل جدًّا حساب نتيجة تحويل لورنتز بمرجعية إطار المختبر، لأن زمن الاضمحلال τ_0 يعمل كنوعٍ من الساعة أو مقياس طبيعي للوقت. ثم يتم إعطاء زمن الاضمحلال في نظام المختبر من خلال الصيغة المعروفة المتعلقة بفترات الساعات في الإطارين:

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \qquad (17-2)$$

نتيجة لذلك، يجب أن تستغرق الميزونات المتحركة وقتًا أطول حتى تتحلل أكثر من الميزونات الساكنة، من خلال النسبة $\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$. تم اختبار هذا التنبؤ سواء بالنسبة إلى الميزونات المنتَجة في المختبر أو تلك التي تنتجها الأشعة الكونية. في جميع الحالات، يتم تأكيد التباطؤ المتوقع في معدل تحلل الميزون. بالنسبة إلى بعض ميزونات الأشعة الكونية ذات سرعة **v** تكون قريبة جدًّا من **c**، بحيث تصبح النسبة $1/\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$ كبيرة تقترب من 1000؛ وحتى في هذه الحالة القصوى، يتم التحقق من الصيغة النسبية. وبالتالي فإن التنبؤ النسبي للمعدلات المختلفة للساعات التي تتحرك بسرعاتٍ مختلفة يتم التحقق منه جيدًا.

أخيرًا، نودُّ أخذ تحول دوبلر للضوء المنبعث من جسمٍ متحركٍ Doppler shift of light emitted by a moving body (مع الأخذ في الاعتبار الشذوذ الحاصل في اتجاهه، الذي يرتبط به ارتباطًا وثيقًا). كما في الحالات السابقة، نبدأ من خلال الإطار الذي يكون فيه الجسم في حالة سكونٍ، وفي هذه الحالة نعرف بالتجربة ما سيحدث، ثم نقوم

بتحويلات لورنتز لنرى ما سيحدث من وجهة نظر إطار المختبر.

الآن نفترض أن الجسم في حالة سكونٍ يشعُّ ضوءًا في اتجاه ما θ_0 ، بالنسبة إلى محور z_0. تفترض أن تردد الضوء يكون v_0. نعلم أن سرعة الضوء هي c، أي أن الطول الموجي يساوي $\lambda_0 = c/\nu_0$.

الآن، سنفترض أن الجسم يتحرك في الاتجاه z بسرعة v، ودعنا نلاحظ ضوءه من خلال إطار المختبر. وفقًا لمبدأ النسبية، فإن ما يمكن رصده داخل الإطار الذي تكون فيه الذرة في حالة سكون سيكون مستقلًّا عن سرعة هذا الإطار بالنسبة إلى المختبر، لذلك نحتاج فقط إلى إجراء تحويل لورنتز لمعرفة ما سيتم رصده في إطار المختبر.

الآن، لقد رأينا بالفعل أنه في تحويلات لورنتز، ستكون سرعة الضوء هي نفسها في كلا الإطارين، لكن اتجاه شعاع الضوء وتردده سيختلفان عمومًا في الإطارين.

لحساب اتجاه شعاع الضوء، كما رصدناه من خلال إطار المختبر، دعنا نفترض أن شعاعًا ضوئيًّا يمر عبر النقطة O، التي نعتبرها أصل نظام الإحداثيات لدينا. ثم، سنفترض مثلًا أن الشعاع في المستوى $x_0 - z_0$، فسيكون عند الزمن t_0 يصل عند النقطة ذات الإحداثيات $z_0 = \cos\theta_0\, ct_0$ ، $x_0 = \sin\theta_0\, ct_0$ ، y_0، لنرى كيف سيبدو هذا الشعاع في إطار المختبر، نقوم بتطبيق تحويل لورنتز الوارد في المعادلة. (4-14)، لنحصل على المعادلة التالية :

$$z = \frac{\cos\theta_0\, ct_0 + vt_0}{\sqrt{1-(u^2/c^2)}} = \frac{ct_0[\cos\theta_0 + (v/c)]}{\sqrt{1-(u^2/c^2)}}$$
$$x = \sin\theta_0\, ct_0 \qquad (17-3)$$
$$t = \frac{t_0 + (v/c)\cos\theta_0\, t_0}{\sqrt{1-(u^2/c^2)}} = \frac{t_0}{\sqrt{1-(u^2/c^2)}}\left(1 + \frac{v}{c}\cos\theta_0\right)$$

يحدد اتجاه شعاع الضوء في إطار المختبر بواسطة المعادلة:

$$\tan\theta = \frac{x}{z} = \frac{\sin\theta_0\sqrt{1-(v^2/c^2)}}{\cos\theta_0 + (v/c)} \qquad (17-4)$$

تشير هذه الصيغة إلى أن الزاوية $\theta_0 \leqslant \pi/2$ في المختبر تكون دائمًا أصغر مما هي عليه في النظام الأصلي. عندما تقترب v / c من الواحد الصحيح [بحيث تقترب قيمة $\sqrt{1-(v^2/c^2)}$ من الصفر]، يصبح هذا التأثير مهمًّا بشكلٍ خاص. في واقع الأشعة الكونية، هناك بعض الجسيمات شديدة النشاط لدرجة أنها عندما تصطدم بجسيماتٍ أخرى، يكون v / c قريبًا جدًّا من الواحد الصحيح لنظام مركز الكتلة للجسيمين. بعد ذلك، على الرغم من أن توزيع الجسيمات على زاوية الاصطدام θ_0 قد يكون موحدًا إلى حدٍّ ما في نظام مركز الكتلة، فإنه يتحول إلى مخروطٍ ضيقٍ في نظام المختبر [يكون العرض متناسبًا مع القيمة $\sqrt{1-(v^2/c^2)}$] نلاحظ هذه المخاريط الضيقة في بعض زخات الأشعة الكونية ذات الطاقة العالية جدًّا التي تنشأ عن تصادم جسيمات مفردة مع النوى. [على الرغم من أن سرعة الجسيمات الخارجة لا تصل إلى سرعة الضوء، فإنها تقترب جدًّا من هذه السرعة،

وكما يتضح من المعادلة (17-4) فإنها تنطبق على هذه الجسيمات كتقريبٍ جيدٍ].

يتوافق العرض المرصود لهذه الأقماع بشكلٍ جيدٍ مع ما يمكن حسابه وفقًا للحجة أعلاه، من سرعة نظام مركز الكتلة، التي يمكن الحصول عليها من طاقة الجسيم الساقط، وهي ما يمكن ملاحظتها بوسائل مستقلة. وبالتالي يمكن القول إن المعادلة (17-4) تحققت جيدًا عن طريق التجربة.

سنقوم الآن بحساب الطول الموجي للضوء كما رُصد في إطار المختبر، يمكن الحصول عليه أساسًا من صيغة طور الموجة المستوية في الاتجاه θ_0:

$$\Phi = 2\pi\left(\nu_0 t_0 - \frac{\cos\theta_0\, z_0 + \sin\theta_0\, x_0}{\lambda_0}\right) \qquad (17-5)$$

في وجود القيمة $\lambda_0\nu_0 = c$. إذا طبقنا تحويل لورنتز (14-3) نحصل على المعادلة التالية:

$$\Phi = \frac{2\pi}{\sqrt{1-(v^2/c^2)}}\left[\nu_0\left(t - \frac{vz}{c^2}\right) - \frac{\cos\theta_0}{\lambda_0}(z - vt) - \frac{\sin\theta_0}{\lambda_0}x\right] \qquad (17-6)$$

الآن ومن خلال إطار المختبر تصبح صيغة طور الموجة المستوية المقابلة هي:

$$\Phi = 2\pi\left(\nu t - \frac{\cos\theta}{\lambda}z - \frac{\sin\theta}{\lambda}x\right) \qquad (17-7)$$

في وجود القيمة $\lambda\nu = c$ وبمقارنة المعادلتين (17-3) و(17-6) نستنتج المعادلات التالية:

$$\nu = \frac{\nu_0}{\sqrt{1-(v^2/c^2)}} + \frac{v}{\lambda_0}\frac{\cos\theta_0}{\sqrt{1-(v^2/c^2)}} = \frac{\nu_0}{\sqrt{1-(v^2/c^2)}}\left(1 + \frac{v}{c}\cos\theta_0\right) \qquad (17-8)$$

$$\frac{\cos\theta}{\lambda} = \frac{\cos\theta_0}{\lambda_0\sqrt{1-(v^2/c^2)}} + \frac{v}{c^2}\frac{\nu_0}{\sqrt{1-(v^2/c^2)}} \qquad (17-9)$$

$$\frac{\sin\theta_0}{\lambda_0} = \frac{\sin\theta}{\lambda} \qquad (17-10)$$

باستخدام القيمة $\lambda_0\nu_0 = c = \lambda\nu$ نحصل على المعادلة التالية:

$$\frac{\sin\theta}{\sin\theta_0} = \frac{\nu_0}{\nu} \qquad \cos\theta = \frac{\nu_0}{\nu\sqrt{1-(v^2/c^2)}}\left(\cos\theta_0 + \frac{v}{c}\right) \qquad (17-11)$$

$$\tan\theta = \frac{\sin\theta_0\sqrt{1-(v^2/c^2)}}{\cos\theta_0 + (v/c)}$$

المعادلات الأخيرة هي نفسها المعادلة (17-4)، التي أمكن الحصول عليها من خلال النظر في اتجاهات أشعة الضوء (وهي عادية الموجة إلى مقدمات الموجة). من الواضح أن وجهتي النظر تؤديان إلى نتائج مكافئة فيما يتعلق باتجاه الضوء كما يجب، حيث تحدد اتجاهات الأشعة على أنها عادية الموجة[1] wave normal إلى مقدمة الموجة wave fronts (أسطح الطور الثابت surfaces of constant phase Φ)

(1) عادية الموجة wave normal هو اتجاه انتشار الضوء عموديًا على سطح مقدمة الموجة.

من المعادلتين (8-17) و(11-17) نستنتج المعادلات التالية:

$$\cos\theta_0 = -\frac{v}{c} + \frac{\nu}{\nu_0}\cos\theta\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

$$\nu = \frac{\nu_0}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}}\left(1 + \frac{v}{c}\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}\cos\theta\right) \qquad (17-12)$$

$$\frac{\nu}{\nu_0} = \frac{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}}{1 - (v/c)\cos\theta}$$

حينما تقترب قيمة **v / c** من الصفر، من الواضح أن صيغ المعادلات الأخيرة تقترب من الصيغة غير النسبية المعروفة لانزياح دوبلر، المعروف بالمعادلة التالية:

$$\frac{\nu}{\nu_0} = \frac{1}{1 - (v/c)\cos\theta}$$

بشكلٍ أكثر عمومية، من الواضح أن هناك تصحيحًا نسبيًّا آخر للقيمة $\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$. في حالة أن شعاع الضوء متعامدٌ على اتجاه حركة الجسم الذي ينبعث منه (كما قسناه في إطار المختبر)، فإن هذه الصيغة تقل إلى المعادلة:

$$\frac{\nu}{\nu_0} = \sqrt{1 - (v^2/c^2)} \quad \text{or} \quad \frac{T}{T_0} = \frac{1}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \qquad (17-3)$$

حيث T هي فترة تذبذب الموجة الضوئية.

بالنسبة إلى السقوط العمودي، يتلاشى انزياح دوبلر في النظرية غير النسبية. السبب في أنها لا تختفي في النظرية النسبية هو أن فترة الضوء يمكن اعتبارها نوعًا من «الساعة»، بحيث يصبح التغيير من إطارٍ مرجعي

إلى إطارٍ مرجعي آخر يتحرك بسرعة v، منسوبًا إلى الإطار المرجعي الأول، لا يزال هناك زيادة في هذه الفترة بنسبة $1/\sqrt{1-(v^2/c^2)}$.

التجارب على انزياح دوبلر من تحريك الذرات المشعة عند السقوط العمودي تتحقق من الصيغة النسبية، وبالتالي يمكن اعتبارها تأكيدًا إضافيًّا للتنبؤ النسبي بتغير معدل الساعات، عند ملاحظتها في نظام نسبي تتحرك فيه الساعات.

* * *

XVIII. قوة الدفع Momentum والكتلة من خلال النسبية

لقد رأينا بالفعل من المعادلة (2-16) أن قوانين نيوتن للحركة ليست ثابتة بالنسبة إلى تحول لورنتز، وأن مبدأ النسبية يعني بالتالي أنه (باستثناء حين تقترب النسبة **v / c** من الصفر)، لا يمكن أن تكون هذه هي القوانين الصحيحة للميكانيكا. وفقًا للمفهوم الذي نُوقش موافق في الفصلين الخامس عشر والسادس عشر، فإن مشكلتنا الأولى فيما يتعلَّق بهذه القوانين هي تعميمها للحصول على مجموعة جديدة من المعادلات الثابتة بالنسبة إلى تحويل لورنتز.

عند تنفيذ التعميم الموصوف أعلاه، سيكون من الملائم كتابة قوانين نيوتن من حيث قوة الدفع **p** للجسم، لتأخذ هذه القوانين الشكل التالي:

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = \mathbf{F} \qquad (18-1)$$

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v} \qquad (18-2)$$

(حيث إن الكتلة ثابتة)

$$\frac{dm}{dt} = 0 \qquad (18-3)$$

حينما يكون لدينا منظومة من الأجسام، يمكن التعبير عن القوة الدافعة الكلية P والكتلة الكلية M من خلال المعادلة:

$$\mathbf{P} = \sum_{i=1}^{N} m_i v_i \qquad M = \sum_{i=1}^{N} m_i \tag{18-4}$$

حيث m_i كتلة الجسم i وv_i هي سرعته، وبالتالي تصبح سرعة مركز الكتلة هي:

$$\mathbf{V} = \frac{\mathbf{P}}{M} \tag{18-5}$$

إنها نظرية معروفة في ميكانيكا نيوتن، فبالنسبة إلى نظامٍ معزولٍ تتبع القوة الدافعة الكلية المعادلة dP / dt = 0 وP = متجه ثابت. وبالمثل، يتبين من المعادلة (18-3) أنه في مثل هذا النظام تكون الكتلة الكلية أيضًا ثابتة.

من الواضح أن هذه القوانين، أي الحفاظ على القوة الدافعة والحفاظ على الكتلة، هي أبسط بكثيرٍ في الشكل من معادلات نيوتن، وبالتالي يجب أن يكون التعميم أسهل في المقابل. بعد القيام بذلك، ننتقل إلى الفصل الحادي والعشرين من أجل تعميم قوانين نيوتن نفسها.

الفكرة الأساسية وراء هذا الإجراء هي أنه من الضروري في النظريات الفيزيائية أن تكون قادرًا على تحليل نظامٍ كاملٍ إلى أجزاءٍ أو مكوناتٍ، وهكذا في نظرية الوسيط المستمر continuous medium، مثل الديناميكا المائية، نعتبر السائل مكونًا من عناصر صغيرة في الحجم، وفي النظرية التي تفسر المادة على أنها ذات بنية ذرية منفصلة، يُنظر إلى النظام بأكمله على أنه مكونٌ من العناصر الصغيرة، تُؤخذ

الآن لتكون الذرات. في كلا النوعين من النظريات، يمكننا التعامل مع القوة الدافعة الكلية للنظام على أنه مجموع القوى الدافعة لأجزائه، وبالمثل مع الكتلة الكلية والطاقة الكلية. علاوة على ذلك، على الأقل في المجال الذي تنطبق فيه نظرية نيوتن، تُعرف هذه الأنظمة بالتجربة (وكذلك بالنظرية) لتلبية قوانين الحفاظ على القوة الدافعة، والحفاظ على الكتلة، والحفاظ على الطاقة.

بسبب قوانين الحفظ هذه، يمكن اعتبار القوة الدافعة والكتلة بالكامل (وكذلك الطاقة) للنظام ليس فقط كمجموع الخصائص المقابلة لمجموع أجزائه ولكن أيضًا ككلٍّ متكاملٍ مع قيم هذه الكميات الإجمالية التي تظل ثابتة ما دام النظام معزولًا. في الواقع، من الواضح أن هذه القيم الإجمالية مستقلة عن التغييرات التي تحدث في كل جزءٍ من الأجزاء، لأنها تشارك في تفاعلاتٍ معقدة للغاية. هذه الحقيقة هي أساس إمكانية معالجة كتلة من المادة ككيانٍ مجهري واحدٍ، مع تجاهل التفاصيل غير المعروفة والمعقدة بشكلٍ هائلٍ لحركات جزيئاتها.

من الواضح أن الخاصية التي تمتلكها المادة المتراكمة bulk matter– كونها قادرة بالتناوب على التحليل إلى أجزاء أو معالجتها ككلٍّ– هي سمة عامة للعالم. لذلك يجب أن تكون هذه الميزة ضمنية من قبل أي مجموعة مقترحة من قوانين الميكانيكا، إذا كانت مناسبة تمامًا لجميع الحقائق التجريبية المتاحة.

أمكن تحقيق الخصائص الموصوفة أعلاه لأول مرة في النظريات غير النسبية، ولكن وفقًا لمبدأ النسبية، لا تعتمد الخصائص الفيزيائية

الأساسية لأي نظامٍ على سرعته بالنسبة إلى مراقبٍ. لذلك، من الضروري أن يستمر النظام على هذا النحو حتى يمكن التعامل معه ككلٍّ أو عن طريق التحليل إلى أجزاءٍ، مع تطبيق قوانين الحفظ نفسه، حتى لو كان يتحرك بسرعة عالية بالنسبة إلى المختبر. سنرى أن هذا المطلب، بالإضافة إلى تحويل لورنتز بين إطاراتٍ مختلفة، كافٍ لتحديد الصيغ النسبية المناسبة للقوة الدافعة والكتلة والطاقة.

لتجسيد المفاهيم الموصوفة أعلاه من حيث النظرية الرياضية، نشير أولًا إلى أنه إذا كانت vi هي سرعة الجسيم **i** في نظامٍ من جسيمات N، وإذا كانت mi هي كتلته، فإن الأفكار التي ناقشناها في الفقرات السابقة تدل على تلك القوى الدافعة الكلية للنظام P هو مجموع العزم = pi mivi للجسيمات المكونة له من خلال المعادلة:

$$\mathbf{P} = \sum_{i=1}^{N} m_i \mathbf{v}_i \qquad (18-6)$$

ونعبِّر عن الكتلة الكلية، بالطبع بالمعادلة التالية:

$$M = \sum_{i=1}^{N} m_i \qquad (18-7)$$

إذا أردنا الاستمرار في تنفيذ الإجراء المتعلِّق بأي مجموعة من الجسيمات على أنها تشكِّل وحدة واحدة شاملة، فمن الضروري أن يكون لهذه الوحدة «سرعة نظام عامة»، نشير إليها بواسطة V، وذلك يمكن التعبير عن قوتها الدافعة الإجمالية كـ P = MV، لذلك يصبح لدينا المعادلة التالية:

$$V = \frac{\mathbf{P}}{M} = \frac{\sum_{i=1}^{N} m_i v_i}{\sum_{i=1}^{N} m_i} \qquad (18-8)$$

من الواضح أنه يتوافق مع متوسط السرعة، حيث يساهم كل جسيمٍ في هذا المتوسط وفقًا لكتلته.

في الميكانيكا غير النسبية، تكون V هي أيضًا سرعة مركز الكتلة. ومع ذلك، اتضح أنه في النسبية يكون مفهوم مركز الكتلة مفهومًا معقدًا نوعًا ما، وليس له أهمية فيزيائية مباشرة كما هو الحال مع المفهوم غير النسبي (أساسًا لأنه في النسبية لا توجد «نقطة مركز كتلة» فريدة من نوعها والذي يعتمد في الواقع على الإطار المرجعي[1]). ومع ذلك، يتضح من التعريف أعلاه لـ V كمتوسط مرجح مناسب أنه سيظل لديه الخصائص المناسبة لتمثيل سرعة النظام العامة.

سنبدأ الآن في استنتاج الصيغ النسبية للكتلة والقوة الدافعة كدوال في السرعة. يمكن القيام بذلك بسهولة من خلال النظر في نظامٍ من جسيمين يُفترض أنهما رصدا لأول مرة في الإطار B حيث تكون سرعة نظامهما العام صفرًا. في الوقت الحاضر، نقصر أنفسنا على الحالة أحادية البُعد (ستتم مناقشة التعميم على ثلاثة أبعاد لاحقًا). إذا كانت m_1 وm_2 كتلتي هذه الجسيمات، وv_1 و v_2 سرعتهما، إذن لدينا، بالنسبة إلى القوة الدافعة الكلية للنظام المعادلة التالية:

$$P = m_1 v_1 + m_2 v_2 = 0 \qquad (18-9)$$

(١) ناقش هذه النقطة .C.C.Moller, Ann. Inst. Henri Poincaré, 11, 251 (1949)

نعبِّر عن الكتلة الكلية بالمعادلة التالية:

$$M = m_1 + m_2 \qquad (18-10)$$

بينما نعبِّر عن سرعة النظام العامة بطبيعة الحال بحكم التعريف بالمعادلة التالية:

$$V = \frac{P}{M} = 0 \qquad (18-11)$$

دعونا الآن نلقي نظرة على هذا النظام المكوَّن من جسيمين من إطارٍ آخر A، بحيث تكون سرعة النظام العامة في هذا الإطار V' (أيضًا في اتجاه z). لنفترض m'_1 وm'_2 كتل الجسيمين في هذا الإطار الجديد وسرعاتهما v'_1 وv'_2. ثم وفقًا لمبدأ النسبية، الذي يتطلَّب إمكانية تحليل النظام إلى أجزاءٍ مكونة في الإطار A وكذلك في الإطار B، يجب أن تكون القوة الدافعة الكلية للجسيمات قابلة للكتابة كمجموعٍ من خلال المعادلة التالية:

$$P' = m'_1 v'_1 + m'_2 v'_2 \qquad (18-12)$$

وبالمثل، يجب أن نكون قادرين على التعبير عن الكتلة الكلية كمجموعٍ من خلال المعادلة التالية:

$$M' = m'_1 + m'_2 \qquad (18-13)$$

ولكن نظرًا إلى أنه في الإطار B، حيث تكون سرعة النظام العامة صفرًا، يمكننا أيضًا اعتبار النظام ككلٍّ واحدًا بكتلته $M = m_1 + m_2$ وسرعة النظام العامة V (في هذه الحالة، صفرًا)، يتبع ذلك من مبدأ النسبية أن نفس الاحتمال يجب أن يكون موجودًا عندما يُنظر إلى النظام

من الإطار A، لذلك، يجب أن يكون لدينا المعادلة التالية:

$$P' = M'V' \qquad (18-14)$$

من المعادلة (18-9) نحصل على المعادلة التالية:

$$\frac{m_1}{m_2} = -\frac{v_2}{v_1} \qquad (18-15)$$

من المعادلات (18-12) و(18-13) و(18-14) نحصل على المعادلة التالية:

$$m_1'v_1' + m_2'v_2' = (m_1' + m_2')V' \qquad (18-16)$$

والمعادلة:

$$\frac{m_1'}{m_2'} = -\frac{(V' - v_2')}{(V' - v_1')} \qquad (18-17)$$

نشير الآن إلى قانون النسبية (8-15) لإضافة السرعات، وهو ما يعطي المعادلة التالية:

$$v_1' = \frac{v_1 + V'}{1 + (v_1V'/c^2)} \qquad v_2' = \frac{v_2 + V'}{1 + (v_2V'/c^2)} \qquad (18-18)$$

بالتعويض بالمعادلة الأخيرة في المعادلة (18-17) نحصل على المعادلة التالية (بعد القليل من الحسابات الجبرية):

$$\frac{m_1'}{m_2'} = -\frac{1 + (v_1V'/c^2)}{1 + (v_2V'/c^2)}\frac{v^2}{v} \qquad (18-19)$$

وبمساعدة المعادلة (18-15) من الممكن الاختزال إلى المعادلة التالية:

$$\frac{m_1'}{m_2'} = \frac{1 + (v_1 V'/c^2)}{1 + (v_2 V'/c^2)} \frac{m_1}{m_2} \qquad (18-20)$$

من الممكن التعبير عن المعادلات الواردة أعلاه بسهولة أكبر من خلال المعادلة التالية:

$$\frac{m_1'/m_1}{m_2'/m_2} = \frac{1 + (v_1 V'/c^2)}{1 + (v_2 V'/c^2)} \qquad (18-21)$$

لكن الآن يمكننا بسهولة الحصول على تعبيرٍ آخر للجانب الأيمن من المعادلة أعلاه. للقيام بذلك، دعونا أولًا نكتشف كيف يمكن تحويل الكمية $\beta = \sqrt{1 - (v_1'^2/c^2)}$، للقيام بذلك نصيغ المعادلة التالية:

$$\begin{aligned} \beta = \sqrt{1 - \frac{v_1'^2}{c^2}} &= \sqrt{1 - \frac{(v_1 + V')^2}{c^2[1 + (v_1 V'/c^2)]^2}} \\ &= \frac{\sqrt{1 - (V'^2/c^2)}\sqrt{1 - (v_1^2/c^2)}}{1 + (v_1 V'/c^2)} \end{aligned} \qquad (18-22)$$

وبالتالي نحصل على المعادلة التالية:

$$\frac{m_1'/m_1}{m_2'/m_2} = \frac{\sqrt{1 - (v_1^2/c^2)}/\sqrt{1 - (v_1'^2/c^2)}}{\sqrt{1 - (v_2^2/c^2)}/\sqrt{1 - (v_2'^2/c^2)}} = \frac{R(v_1 v_1')}{R(v_2, v_2')} \qquad (18-23)$$

حيث:

$$R(v_1, v_1') = \frac{\sqrt{1 - (v_1^2/c^2)}}{\sqrt{1 - (v_1'^2/c^2)}} \qquad R(v_2, v_2') = \frac{\sqrt{1 - (v_2^2/c^2)}}{\sqrt{1 - (v_2'^2/c^2)}} \qquad (18-24)$$

الآن المعادلة (18-23) يجب أن تكون صالحة للاستخدام عشوائيًّا $\mathbf{v}_1$ و$\mathbf{v}_2$ و$\mathbf{v}_1$ و$\mathbf{v}_2$، لمعرفة ما يعنيه هذا، احسب لوغاريتم كلا الجانبين، لتنتج المعادلة:

$$\ln\left(\frac{m_1'}{m_1}\right) - \ln\left(\frac{m_2'}{m_2}\right) = \ln R(v_1, v_1') - \ln R(v_2, v_2')$$

أو:

$$\ln\left(\frac{m_1'}{m_1}\right) - \ln R(v_1, v_1') = \ln\left(\frac{m_2'}{m_2}\right) - \ln R(v_2, v_2') \quad (18-25)$$

على جانبٍ واحدٍ من المعادلة أعلاه تظهر فقط الكميات التي تشير إلى الجسيم الأول، بينما على الجانب الآخر تظهر فقط الكميات التي تشير إلى الجسيم الثاني. لأن سرعات الجسيمين يمكن تغييرها بشكلٍ عشوائي فيما يتعلَّق بأحدهما بالآخر المعادلة (18-25) يمكن أن يكون لها حلٌّ فقط إذا كان كلا الطرفين متساويين مع ثابت مستقل αعن جميع الكميات في المعادلات، يمكن التعبير عن ذلك بالمعادلة التالية:

$$\begin{aligned} \ln\left(\frac{m_1'}{m_1}\right) - \ln R(v_1, v_1') &= \alpha \\ \ln\left(\frac{m_2'}{m_2}\right) - \ln R(v_2, v_2') &= \alpha \end{aligned} \quad (18-26)$$

بالتعويض عن أس المعادلات أعلاه بالقيمة $l^{\alpha} = K$ نحصل على المعادلة التالية:

$$\frac{m_1'}{m_1} = KR(v_1, v_1') = \frac{K\sqrt{1-(v_1^2/c^2)}}{\sqrt{1-(v_1'^2/c^2)}}$$
$$\frac{m_2'}{m_2} = KR(v_2, v_2') = \frac{K\sqrt{1-(v_2^2/c^2)}}{\sqrt{1-(v_2'^2/c^2)}} \qquad (18-27)$$

ضع في اعتبارك الآن الحالة الخاصة حيث $v_1 = 0$، سنحصل على المعادلة التالية:

$$\frac{m_1'}{m_1} = \frac{K}{\sqrt{1-(v_1'^2/c^2)}} \qquad (18-28)$$

في هذه الحالة، m_1 هي كتلة الجسيم عندما يكون في حالة سكونٍ، ومع ذلك، فهذه هي الكتلة العادية التي تظهر بشكلٍ غير نسبي في معادلات نيوتن للحركة (التي تنطبق، بالطبع، في النهاية عندما تقترب نسبة v / c من الصفر). دعونا نشير إلى كتلة السكون هذه بـ $m_{1,0}$، فيصبح لدينا المعادلة التالية:

$$m_1' = \frac{Km_{1,0}}{\sqrt{1-(v_1'^2/c^2)}} \qquad (18-29)$$

دعونا ننتقل الآن إلى الحالة الأكثر خصوصية التي لا يزال فيها $v_1' = 0$. هنا، يجب أن يكون لدينا $m_1' = m_{1,0}$ مما يؤدي إلى $K = 1$. من الواضح أن نتيجة مماثلة تنطبق على الجسيم الثاني، لذلك، يمكننا كتابة صيغة صالحة لكلا الجسيمين بالمعادلة التالية:

$$m(v) = \frac{m_0}{\sqrt{1-(v^2/c^2)}} \qquad (18-30)$$

ويمكن التعبير عن القوة الدافعة بالمعادلة التالية:

$$p = mv = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \qquad (18-31)$$

ما سبق هو الصيغة النسبية للكتلة والقوة الدافعة على التوالي، لاحظ أن الكتلة أصبحت تعتمد الآن على السرعة ولم تعد ثابتة كما في نظرية نيوتن.

يمكن أن تمتد هذه النتائج بسهولة إلى نظامٍ مكونٍ من N من الجسيمات. يمكننا أولًا تطبيقها على أي اثنين، ثم اعتبار هذين النظامين نظامًا كاملًا، حيث الكتلة الكلية $M = m_1 + m_2$، والقوة الدافعة الكلية $P = p_1 + p_2$، وسرعة النظام العامة $V = P / M$. يمكن بعد ذلك التعامل مع هذا النظام بأكمله كجسيمٍ واحدٍ، ويمكن اعتباره جنبًا إلى جنبٍ مع جسيمٍ ثالث، لتشكيل زوجٍ جديدٍ تنطبق عليه جميع الاستنتاجات التي توصلنا إليها في هذا الفصل. يمكننا بعد ذلك اعتبار الجسيمات الثلاثة كوحدة واحدة والسير بهذه الطريقة، عن طريق الاستقراء، حتى نقوم بتضمين كل الجسيمات الموجودة في النظام. ليس من الصعب بهذه الطريقة أن نبيِّن أنه إذا كان من الممكن اعتبار المعادلات (18-30) و(18-31) قابلة للتطبيق لكل جسيم، ثم يمكن تحليل النظام إلى أي مجموعاتٍ مرغوبة من الأجزاء بطريقة ثابتة نسبيًّا، أي، بحيث يمكن إجراء نفس التحليل في جميع الإطارات المرجعية المتصلة بتحويل لورنتز.

من هذا يترتب على أنه في كل إطار من هذا القبيل لدينا علاقات الدوال نفسها للكتلة الكلية والقوة الدافعة الكلية، كما يظهر في المعادلة التالية:

$$M = \sum_{i=1}^{N} \frac{m_{0i}}{\sqrt{1 - (v_i^2/c^2)}} \qquad P = \sum_{i=1}^{N} \frac{m_{0i} v_i}{\sqrt{1 - (v_i^2/c^2)}} \quad (18-32)$$

إذا سُمح للجسيمات بالتفاعل، فإن القوة الدافعة والكتلة لكل من الجسيمات المأخوذة على حدة ستتغير بشكلٍ عام. الآن، كما رأينا في الميكانيكا غير النسبية، يجب الحفاظ على الزخم الكلي للنظام وكتلته الإجمالية، حتى عندما تتغير خصائص الأجزاء المختلفة نتيجة لمثل هذه التفاعلات. يمكن بسهولة ملاحظة أن هذه الخصائص يمكن تعميمها نسبيًّا، بمعنى أنه إذا حفظت الكتلة الكلية والقوة الدافعة الكلية في أي إطارٍ واحدٍ للورنتز، فسيتم حفظهما في كل إطارٍ مرجعي آخر من هذا النوع. لتوضيح ذلك، نشير إلى المعادلة (18-22) سنفرض كتلة الجسيم رقم ith في نظام الإحداثيات «الرئيسي primed»:

$$m_i' = \frac{m_{0i}}{\sqrt{1 - (v_i^2/c^2)}} = \frac{m_{0i}(1 + v_i V'/c^2)}{\sqrt{1 - (v_i^2/c^2)}\sqrt{1 - (V'^2/c^2)}}$$

$$= \frac{m_i + p_i V'}{\sqrt{1 - (V'^2/c^2)}} \quad (18-33)$$

$$M' = \sum_i m_i = \frac{1}{\sqrt{1 - (V'^2/c^2)}} \sum_i (m_i + p_i V'/c^2)$$

حيث m_i هي كتلة الجسيم ith في نظام الإحداثيات «غير الرئيسي unprimed» وpi هي قوتها الدافعة. إذا أمكن الحفاظ على الكتلة الكلية $\Sigma_i m_i$ والقوة الدافعة الكلية $\Sigma_i p_i$ في النظام غير المحدد، فعندئذٍ (بما أن 'V ثابت)، فسيمكن حفظ الكتلة الكلية $\Sigma_i m_i'$ في النظام «المحدد».

ومن المعادلة (18-14) يترتب على ذلك أن الزخم الكلي P' = M'V' محفوظٌ أيضًا في النظام الأخير.

لنرى بمزيدٍ من تفصيل ما تعنيه قوانين الحفظ النسبية، دعونا نفترض، على سبيل المثال، اصطدام جسيمين.

سنفترض أن كتلتي وسرعتي الجسيمين قبل الاصطدام هي $m_1^A, m_2^A, v_1^A, v_2^A$ وبعد الاصطدام هي $m_1^B, m_2^B, v_1^B, v_2^B$، إذا كانت الجسيمات بطيئة جدًّا بحيث يمكن تطبيق النظرية غير النسبية، فنحن نعرف المعادلة التالية:

$$m_1^A v_1^A + m_2^A v_2^A = m_1^B v_1^B + m_2^B v_2^B \qquad (18-34)$$

(حفظ القوة الدافعة الكلية)

$$m_1^A = m_1^B \qquad m_2^A = m_2^B \qquad (18-35)$$

(حفظ الكتلة لكل جسيمٍ)

الآن، إذا تم عرض هذا الاصطدام في إطارٍ آخر تكون فيه سرعة النظام العامة للذرتين عالية، تظهر النتائج في هذا الفصل أن قانون الحفظ (18-34) للقوة الدافعة الكلية سيظل صامدًا في الإطار الجديد، بشرط أن المعادلات (18-30) و(18-31) يمكن اعتمادهما للكتلة والقوة الدافعة للجسيمات في النظام الجديد. ومع ذلك، بدلًا من المعادلة (18-35)، التي تعبِّر عن ثبات كتلة كل جسيمٍ، يجب أن يكون لدينا المعادلة التالية:

$$m_1^A + m_2^A = m_1^B + m_2^B \qquad (18-36)$$

مما يعني أنه يمكن الحفاظ على الكتلة الكلية للنظام فقط، بينما ستتغير كتلة جسيماتها المنفصلة بشكلٍ عام [كما يجب وفقًا لـ (30-18)، لأن هذه الكتلة تعتمد على سرعة الجسيم، التي تحدث نتيجة تبدل التصادم في الحقيقة].

لقد توصلنا إلى نتائجنا حتى الآن على افتراض أن الحركة كلها في اتجاه واحد، وهو z. ومع ذلك، عندما ينظر في المشكلة من خلال ثلاثة أبعاد، يمكن الحصول على نفس الخصائص بشكلٍ أساسي، كما يمكن إظهارها بسهولة من خلال حساب أكثر تفصيلًا لن نعطيه هنا. لا تزال الكتلة تُعطى بمعادلة مشابهة لـلمعادلة (30-18)، باستثناء أنه يجب علينا اعتبار **v** كقيمة مطلقة لمتجه السرعة للجسيم (v_x, v_y, v_z) وبالتالي يصبح لدينا $v^2=v_x^2+v_y^2+v_z^2$

بالطبع، هناك الآن ثلاثة مكونات للقوة الدافعة، يمكن كتابة المتجه بالمعادلة التالية:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \qquad (18-37)$$

$$p = m\mathbf{v} = \frac{m_0\mathbf{v}}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \qquad (18-38)$$

يمكن الآن الحفاظ على كل عنصر من القوة الدافعة الكلية لنظامٍ معزولٍ، جنبًا إلى جنبٍ مع كتلته الإجمالية.

إن تباين الكتلة مع السرعة، بالطبع، هو بالضبط ما تنبَّأت به نظرية لورنتز، التي تعتبرها نتيجة «القوة الدافعة العكسية back emf» التي تؤثِّر على الإلكترون الناتج عن المجال المغناطيسي المتغير الذي ينتجه الإلكترون كلما تسارع (انظر الفصل السادس).

من وجهة نظر أينشتاين، لا ننكر أن جزءًا، أو ربما كل كتلة الإلكترون قد تكون بالتالي كهرومغناطيسية في الأصل. ومع ذلك، فإننا لا نعتبر أن تحديد العلاقة بين الكتلة والسرعة يعتمد على نماذج معينة من الإلكترون، مثل تلك التي اقترحها لورنتز. بدلًا من ذلك، نرى أنه بغض النظر عن أصل الكتلة، يجب أن يكون لها هذا الاعتماد الخاص على السرعة، إذا كانت السمات العامة لقوانين الفيزياء الموصوفة في هذا القسم ثابتة من وجهة نظر نسبية، أي أنها هي نفسها في جميع الأطر المرجعية ذات الصلة بتحويل لورنتز.

* * *

XIX. معادلة الكتلة والطاقة

لقد وصلنا الآن إلى خطوة أخرى حاسمة قام بها أينشتاين، عظمت إلى حدٍّ كبيرٍ التأثير الثوري لوجهة نظره النسبية، أي إظهار معادلة الكتلة والطاقة من خلال الصيغة المعروفة جدًّا الآن $E = mc^2$.

لعرض تطور هذه الفكرة، نبدأ بالمعادلة (18-37) لكتلة جسمٍ متحركٍ $m = m_0/\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$، بالنسبة إلى قيمة v/c صغيرة، يمكننا تعظيم قيمة m كسلسلة مرفوعة للأس v/c، مع الاحتفاظ حتى قيمة v^2 / c^2، النتيجة هي المعادلة التالية:

$$m \cong m_0\left(1 + \frac{v^2}{2c^2} + \cdots\right) \qquad (19-1)$$

إذا ضربنا هذه المعادلة في c^2، نحصل على المعادلة التالية:

$$mc^2 = m_0c^2 + \frac{m_0v^2}{2} + \cdots \qquad (19-2)$$

لكن $m_0v^2/2$ هو مجرد تعبيرٍ غير نسبي عن الطاقة الحركية T لجسمٍ يتحرك بسرعة **v** وm_0c^2 هو مجرد ثابت، وبالنسبة إلى هذا الجسم يصبح لدينا المعادلة التالية:

$$mc^2 - m_0c^2 = T \qquad (19-3)$$

يصبح الحفاظ على الكتلة الكلية للنظام، كما أمكن حسابه في الفصل السابق، معادلًا لقانون الحفاظ على الطاقة الإجمالية لمجموعة من الأجسام، على الأقل في الحدود غير النسبية. لكن مبدأ النسبية

يتطلَّب أنه إذا استمر مثل هذا القانون في إطارٍ واحدٍ، فسيظل ثابتًا في جميع الإطارات، ويترتب على ذلك أن المعادلة (19-3) يجب أن تمثل الطاقة الحركية للجسيم في أي إطارٍ، حتى عندما يصبح التوسع في قيمة الحد v^2 / c^2 غير متاح تقريبيًّا.

يمكن رؤية أهمية هذه النتيجة بشكلٍ أكثر وضوحًا إذا قمنا بنقل m_0c^2 إلى الجانب الآخر من المعادلة، ثم نكتب المعادلة المعبرة عن طاقة الجسم:

$$E = m_0c^2 + T = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \qquad (19-4)$$

يمكننا دائمًا القيام بذلك، لأنه في النظرية غير النسبية، تكون الطاقة على أي حالٍ غير محددة داخل ثابت عشوائي. من الناحية الحسابية، فإن إجراء أينشتاين هنا يعادل تحديد هذا الثابت العشوائي، بحيث يمكن حساب طاقة الجسيم في حالة السكون بالمعادلة التالية:

$$E_0 = m_0c^2 \qquad (19-5)$$

فيزيائيًّا، هذا يتوافق مع افتراض أنه حتى الجسيم غير المتحرك لديه الطاقة سكون rest energy المعطاة في المعادلة (19-5).

ما معنى طاقة سكون؟ ربما يمكننا إبراز ذلك من خلال ملاحظة أن الجسم النموذجي الذي يكون مرئيًّا في حالة السكون يتكوَّن من أجزاء (مثل الجزيئات، والذرات، والنواة، وما إلى ذلك) هي في الواقع في حالة من الحركة العنيفة، مثل تلك التأثيرات في المتوسط تلغي الحركة عند ملاحظتها في نطاق العين المجردة. ومع ذلك، ووفقًا للحجج المقدمة

في الفصل السابق، فإن كل هذه الحركات تساهم في كتل الجسيمات المكونة، وفقًا لصيغة المعادلة التالية:

$$m_i = \frac{m_{0i}}{\sqrt{1-(v_i^2/c^2)}} \cong m_{0i} + \frac{m'_{0i}v_i^2}{2c^2} = m_{0i} + \frac{T_i}{c^2} \quad (19-6)$$

يمكن التعبير عن الكتلة الكلية للنظام بالمعادلة التالية:

$$M = \sum_i \left(m_{0i} + \frac{T_i}{c^2}\right) = \sum_i m_{0i} + \frac{T}{c^2} \quad (19-7)$$

حيث T هي طاقة الحركة الكلية للجسيمات المختلفة، بضرب المعادلة في c^2 يصبح لدينا المعادلة التالية:

$$Mc^2 = \sum_i m_{0i}c^2 + T \quad (19-8)$$

الآن، هل هناك أي طريقة للتحقق تجريبيًّا مما إذا كانت الحالة الداخلية للحركة تساهم في الكتلة؟ الجواب هو أن هناك عدة طرق ممكنة للقيام بذلك. الفكرة الأكثر وضوحًا هي رفع درجة حرارة الجسم ومعرفة ما إذا كان زاد الوزن بمقدار Q/c^2، حيث Q هي الطاقة الحرارية التي يمتصها الجسم.

تكمن الصعوبة في أنه مع التغيرات في درجات الحرارة المتاحة Q/c_u^2 (بضعة آلاف من الدرجات المئوية على الأكثر)، تكون كمية صغيرة جدًّا بحيث لا يمكن اكتشافها بالطرق المتاحة الآن. (هذا أساسًا لأن c^2 عددٌ كبيرٌ جدًّا) وبالمثل، إذا سمحنا لنظامين بالاتحاد كيميائيًّا وإعطاء الطاقة ΔE، فيجب أن يكون مجموع الكتل أقل من قيمته

الأصلية بمقدار $\Delta E/c^2$. ولكن، مرة أخرى، هذه القيمة صغيرة جدًّا بحيث لا يمكن اكتشافها تجريبيًّا.

بعد فترة من إثبات أينشتاين معادلة الكتلة والطاقة نظريًّا، أجريت دراسات تجريبية للتحولات النووية، حيث أطلقت كميات كبيرة كافية من الطاقة، بحيث يكون الفرق بين مجموع الكتل الناتجة وتلك الخاصة بـالمواد المتفاعلة الأولية قابلة للقياس في الواقع باستخدام المعدات التي كانت متاحة في ذلك الوقت. أُجريت العديد من هذه القياسات؛ كل هذا أكد تنبؤات أينشتاين بأن التغيير في كتلة النظام بأكمله يساوي Q/c^2.

تُظهر التجارب المذكورة أعلاه أنه يمكن إرجاع جزء على الأقل من الكتلة الساكنة لجسمٍ ما إلى الحركات الداخلية، بحيث تنخفض كتلة النظام بمقدار Q/c^2 عندما تتغير هذه الحركات وتعطي طاقة Q. لكن هل يمكننا التحقق من الحالة التي اقترحها أينشتاين بأن الكتلة الساكنة من جسم ما يمكن أن ترتبط بطريقة مماثلة بالطاقة؟

بعد بضع سنواتٍ من التحقيق في التحولات النووية الأولى، اُكتشِفت جسيماتٌ جديدة تسمى البوزيترونات، لها نفس كتلة الإلكترون، ولكنها معاكسة الشحنة. لقد وجد أنه عندما يلتقي الإلكترون بالبوزيترون، يمكن للجسيمين أن يقضي أحدهما على الآخر دون ترك أي جزيئات على الإطلاق، ولكنهما يطلقان أشعة جاما مع الطاقة الإجمالية $Q = 2m_ec^2$ (التي تتحول في النهاية إلى حرارة نتيجة اصطدام أشعة جاما مع الإلكترونات والذرات). وبهذه الطريقة، تبين

أن كل الطاقة الساكنة للإلكترون يمكن تحويلها إلى أشكالٍ أخرى من الطاقة، مثل الحرارة.

منذ اكتشاف البوزيترون، عُثِر على جسيمات تسمى «البروتونات المضادة» (ذات الشحنة السالبة وكتلة البروتون)، وهي يمكنها بالمثل إبادة البروتونات. في الواقع، من المعروف الآن أنه يوجد لكل نوعٍ من الجسيمات الأساسية جسيمٌ مضادٌ، له نفس الكتلة والخصائص ذات الصلة بالتأكيد (مثل الشحنة واللف المغزلي spin)، التي تتحد مع الجسيم ولا تنتج أي شيء سوى الطاقة، بشكلٍ أو بآخر. بالعكس، فقد ثبت أنه يمكن امتصاص أشعة جاما التي تصطدم بنواة، وتتحول طاقتها إلى الطاقة الساكنة، على سبيل المثال، زوج إلكترون–بوزيترون، الذي يتم إنشاؤه في هذه العملية، في ظل ظروفٍ لم تكن هذه الجسيمات موجودة من قبل. لذلك كان هناك دليلٌ تجريبي قاطعٌ على أنه يمكن تحويل جزء أو كل «الطاقة الساكنة» للجسم إلى أشكالٍ أخرى من الطاقة، وأن العملية العكسية لتحويل أشكال أخرى من الطاقة إلى طاقة سكون ممكنة أيضًا.

السبب الوحيد لعدم ملاحظة معادلة الكتلة والطاقة سابقًا، كما بيَّنَّا في السابق، هو أنه قبل اكتشاف العمليات النووية، كانت الكتلة Q/c^2، المرتبطة بالطاقة Q، صغيرة جدًّا بحيث لا يمكن اكتشافها. بالمقابل، هذا يعني بالطبع أن باقي الاحتياطيات الهائلة «محبوسة» في باقي طاقة المادة. هذه الاحتياطيات يمكن تحريرها جزئيًّا عن طريق الانشطار النووي في الكميات الذرية، وكذلك من خلال عمليات «الاندماج» التي تحدث تلقائيًّا في الشمس وفي النجوم.

لقد أعطى أينشتاين طريقة فيزيائية بسيطة لمعرفة كيفية ارتباط الكتلة والطاقة بالصيغة $E = mc^2$. للقيام بذلك، افترض أن هناك صندوقًا له كتلة M_B، ثابتة في المختبر. افترض أن هذا الصندوق يحتوي على توزيع للطاقة الكهرومغناطيسية المشعة في توازن ديناميكي حراري مع الجدران، رمز لطاقة هذا الإشعاع بالقيمة E_R.

الآن، من المعروف أن الطاقة الكهرومغناطيسية تسبِّب ضغطًا إشعاعيًّا على جدران الصندوق، مشابهًا للضغط الناتج عن الغاز. عندما يكون الصندوق في حالة سكونٍ أو في حركة منتظمة، تُلغى القوة الكلية الواقعة على أي جدارٍ بواسطة تلك التي تقع على الجدار المقابل. ولكن إذا أعطيت الصندوق تسارعًا a، فعند حدوث التسارع، سيكتسب الإشعاع الذي ينعكس عن الجدار الخلفي قوة دافعة أكبر مما يفقده الإشعاع الذي ينعكس عن الجدار الأمامي.

إذا قمنا بحسابٍ مفصَّلٍ للتغيُّرات الناتجة عن الضغط على الجدران المتحركة، سنكتشف أن الإشعاع يمارس قوة صافية على الصندوق بمقدار $F_R = -E_R a/c^2$، يكون اتجاهها في عكس اتجاه التسارع، ستكون معادلة حركة النظام بعد ذلك كما في المعادلة التالية:

$$m_B a = -\frac{E_R a}{c^2} + F \qquad (19-9)$$

حيث F هي القوة الواقعة، هذا يختزل المعادلة إلى الشكل التالي:

$$\left(M_B + \frac{E_R}{c^2}\right) a = F \qquad (19-10)$$

لذا فإن الطاقة المشعة E_R تضيف «كتلة فعالة» E_R/c^2 بمعنى أنها تساهم بنفس الطريقة التي تساهم بها هذه الكتلة في القصور الذاتي

أو مقاومة التسارع، وهو أحد المظاهر المميزة لتلك الخاصية المادية المسماة باسم «الكتلة».

يمكن ملاحظة أن الحالة التي نظر فيها أينشتاين تشبه إلى حدٍّ بعيدٍ الحالة التي نوقشت في الفصل السابق، حيث درسنا تأثيرات حركات الجزيئات المختلفة الداخلية على كتلتها الكلية. يشير أينشتاين بدلًا من ذلك إلى تأثيرات الحركات الداخلية للإشعاع الكهرومغناطيسي، مما يساعد على توضيح النقطة التي مفادها أن المساهمة في الكتلة مستقلة عن طبيعة الطاقة.

❊ ❊ ❊

XX. قانون التحول النسبي للطاقة والقوة الدافعة.

لقد رأينا في فصول سابقة أن القوة الدافعة والطاقة لجسمٍ معينٍ (جنبًا إلى جنبٍ مع كتلته، التي تتناسب مع طاقته) يعتمدان على سرعة ذلك الجسم، وفقًا للمعادلات التالية:

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} = \frac{E_0}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \qquad (20-1)$$

$$\mathbf{p} = \frac{m_0 \mathbf{v}}{\sqrt{1 - (\mathbf{v}^2/c^2)}} \qquad (20-2)$$

افترض الآن أن E وp معروفان في إطارٍ معينٍ A. هل يمكننا إيجاد تحويل مشابه لتحويل لورنتز لـ x وt، التي تعطي القيمتين E' وp' إذا أمكن قياسهما في إطارٍ آخر B، ويتحركان بسرعة V بالنسبة إلى A؟

لتبسيط المشكلة، نبدأ بافتراض الحالة أحادية البُعد (التي نعتبرها في اتجاه **z**). لنفترض أننا حصلنا على E وp في الإطار A، نرغب بعد ذلك في حساب المقابلين E' وp' في الإطار B. لنفترض أن سرعة الجسم v في الإطار A وv' في الإطار B.

للقيام بذلك، يمكننا أن نبدأ بـالمعادلة (22-18). لاحظ، مع ذلك، أنه في المعادلات (15-18) و(17-18) و(19-18) يشير الرمز v' إلى سرعة الجسم كما أمكن قياسه في إطارٍ يتحرك بسرعة V' = –V، بالنسبة إلى الإطار A، بأخذ مقلوب طرفي المعادلة، والتعويض عن v' = –V، نحصل على المعادلات التالية:

$$\frac{1}{\sqrt{1-(v_2'^2/c^2)}} = \frac{(1-v_1V/c^2)}{\sqrt{1-(v_1^2/c^2)}\sqrt{1-(V^2/c^2)}} \qquad (20-3)$$

وحيث إن $E' = m_0c^2/\sqrt{1-(v^2/c^2)}$ و $E = m_0c^2/\sqrt{1-(v^2/c^2)}$ و $p = m_0v/\sqrt{1-(v^2/c^2)}$ فهذا يؤدي إلى المعادلة التالية:

$$E' = \frac{E - Vp}{\sqrt{1-(V^2/c^2)}} \qquad (20-4)$$

علاوة على ذلك، من خلال قانون النسبية لإضافة السرعات $v' = \dfrac{v-V}{1-(vV/c^2)}$ يصبح لدينا المعادلة التالية:

$$p' = \frac{m_0v'}{\sqrt{1-(v^2/c^2)}} = \frac{m_0(v-V)}{\sqrt{1-(V^2/c^2)}\sqrt{1-(v^2/c^2)}} = \frac{p - VE/c^2}{\sqrt{1-(V^2/c^2)}} \qquad (20-5)$$

إن المعادلات (20-4) و(20-5) هي أساسًا نفس العلاقة مثل تحويل لورنتز في المعادلة (14-3)، حيث تحل p محل x و E/c^2 محل t.

لذلك، يمكن حساب الطاقة والقوة الدافعة لجسمٍ ما في إطارٍ معينٍ من خلال إطارٍ آخر من خلال تحويل مماثل كذلك الموجود في تحويل لورنتز.

يمكن تمديد هذه الحجة بسهولة إلى ثلاثة أبعاد، كما يحدث مع x وy ويصبح لدينا المعادلة التالية:

$$p'_x = p_x \qquad p'_y = p_y \qquad (20-6)$$

إذا كتبنا المعادلة بالشكل الاتجاهي يصبح لدينا المعادلات التالية:

$$E' = \frac{E - (\mathbf{V}\cdot\mathbf{p})}{\sqrt{1 - (V^2/c^2)}} \qquad (20-7)$$

$$\mathbf{p}' = \mathbf{p} - (\mathbf{p}\cdot\hat{V})(\hat{V}) + \frac{(\mathbf{p}\cdot\hat{V})\hat{V} - \mathbf{V}E/c^2}{\sqrt{(1 - (V^2/c^2)}} \qquad (20\text{-}8)$$

حيث $\hat{V}$ هو متجه الوحدة في اتجاه V.

ويترتب على ما سبق أن الدليل نفسه الذي يوضح أن المعادلة (1-7) $s^2 = c^2t^2 - x^2 - y^2 - z^2$ عن الفترة الزمنية ثابت في ظل تحويل لورنتز يكفي لإثبات ثوابت مماثلة للقيمة $E^2–c^2p^2$.

لمعرفة ما تعنيه هذه الكمية، دعونا نقيِّمها في إطارٍ يكون فيه الجسم في حالة سكونٍ، بحيث يكون $p = 0$. ثم $E_0^2 - c^2p^2 = E_0^2 = M_0^2c^4$ ، لكن القيمة $E^2–c^2p^2$ ثابتة، ولذا يجب أن يكون لها نفس القيمة في كل إطارٍ، وهي ما يمكن التعبير عنه في المعادلة التالية:

$$E^2 - c^2p^2 = m_0^2c^4 \qquad (20-9)$$

تنشأ حالة ذات أهمية خاصة عندما تكون الكتلة الساكنة صفرًا، فيصبح لدينا المعادلة التالية:

$$E^2 - c^2p^2 = 0 \qquad (20-10)$$

إذا اخترنا اتجاه المحور **z** على أنه اتجاه القوة الدافعة **p**، فسيصبح المعادلة التالية:

$$E = \pm cp_z \qquad (20-11)$$

النقطة المثيرة للاهتمام هي أن نظرية النسبية تشير إلى أن الجسيم

الساكن ذا الكتلة الصفرية يمكن أن يكون له طاقة وقوة دفعٍ غير صفرية. لمعرفة ما يعنيه هذا دعونا نفكر في جسيمٍ صغيرٍ جدًّا في حالة السكون m_0، ثم لنفترض أن m_0 تقترب من الصفر، إذا كانت سرعته **v**، فإن طاقته وطاقة حركته يكونان:

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \qquad p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \quad (20-12)$$

إذا تم تثبيت قيمة النسبة **v/c** بقيمة أقل من الواحد الصحيح، تقترب E وp من الصفر عندما تقترب m_0 من الصفر. لكن إذا تركنا **v/c** تقترب من الواحد الصحيح، بينما تقترب m_0 من الصفر، بطريقة تظل $m_0/\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$ مساوية لـثابت وليكن R، فإننا نحصل على المعادلة التالية:

$$E \to RC^2 \qquad p \to RC \qquad E^2 - c^2p^2 \to 0 \quad (20-13)$$

الذي يتفق مع المعادلة (10-10). لذلك، يمكن أن يمتلك الجسم طاقة وقوة دافعة لا تساوي صفرًا، على الرغم من أن كتلة ثباته تساوي صفرًا، لا ممكن -إذا وفقط- إذا كان يتحرك بسرعة الضوء.

هناك طريقة أخرى للنظر إلى هذه المشكلة وهي ملاحظة أنه إذا $m_0 \neq 0$، كجسيم يتسارع باتجاه سرعة الضوء، وطاقته $E = m_0c^2/\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$، وقوته الدافعة $p = m_0v/\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$ تقترب من اللا نهاية. نظرًا إلى أنه في الواقع، تتوفر فقط مصادر محدودة للطاقة والقوة الدافعة، لا يمكن لمثل هذا الجسيم أن يصل في الواقع

إلى سرعة الضوء. ولكن إذا كانت $m_0 = 0$ كما رأينا، يمكن أن تتحرك بسرعة الضوء c بطاقة وقوة دافعة محددين.

الاستنتاج القائل بأنه لا يمكن لأي جسمٍ أن يكون بسرعة الضوء ينطبق بشكلٍ واضحٍ فقط على شيء له كتلة سكون غير صفرية. ومع ذلك، فإن الشيء الذي ليس له كتلة سكون لا يمكن أن يوجد إلا في حالة حركة بسرعة الضوء. وبالتالي، يمكن القول إنه بينما لا يمكن تسريع أي شيء إلى سرعة الضوء، يمكن أن تكون هناك أشياء تتحرك بسرعة الضوء، ليس نتيجة لتسارعٍ سابقٍ، بل لأن هذه هي الحالة الوحيدة التي يمكن أن توجد فيها.

سنناقش لاحقًا المعنى المادي للحركة بسرعة الضوء.

❊ ❊ ❊

XXI. الجسيمات المشحونة في المجال الكهرومغناطيسي

لقد رأينا بالفعل أن التعبيرات النسبية للقوة الدافعة والكتلة والطاقة تختلف تمامًا عن تلك المطبقة في نظرية نيوتن، حيث تؤول إليها فقط في حينما تقترب النسبة من الصفر $v/c \rightarrow 0$. بالنسبة إلى نظامٍ معزولٍ، تأخذ قوانين الحركة الشكل النسبي:

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = 0 \qquad \mathbf{p} = m\mathbf{v} = \frac{m_0\mathbf{v}}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \qquad (21-1)$$

يجب أن نضيف إليها قانون حفظ الكتلة. في نظرية نيوتن كان هذا ضمنيًّا في افتراض أن m_i، كتلة الجسم ith ثابتة، أو ما عبرنا عنه في المعادلة [(18-3)] $dm_i / dt = 0$. ومع ذلك، في نظرية أينشتاين، يمكن أن تختلف كتلة جسم معين. ومع ذلك، فإن الكتلة والطاقة متساويتان، وفقًا للعلاقة $E = mc^2$. لذلك، فإن الحفاظ على الكتلة الكلية $M = \Sigma_i m_i$، والحفاظ على الطاقة الإجمالية $E = \Sigma_i E_i = \Sigma_i m_i c^2$ لنظامٍ معزولٍ هما في الأساس نفس القانون، بمعنى أن أحدهما يتبع الآخر.

قانون الحفظ $dM / dt = 0$، أو، بدلًا من ذلك، $dE / dt = 0$، يحل الآن محل القانون غير النسبي $dmi / dt = 0$، وكذلك التعبير غير النسبي للحفاظ على الطاقة الإجمالية للنظام.

سنقوم الآن بتعميم هذه القوانين على نظامٍ غير معزولٍ، أي على نظام تعمل عليه قوة صافية net force F. لتبسيط المشكلة، دعونا نفكر في نظامٍ يتكوَّن من جسمٍ واحدٍ، بسرعة **v**، ثم نقترح مبدئيًّا قوانين النسبية المناسبة الموضحة كالتالي:

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = \mathbf{F} \qquad (21-2)$$

$$\frac{dE}{dt} = \mathbf{F}\cdot\mathbf{v} \qquad (21-3)$$

هذان لهما نفس الشكل مثل التعبيرات الرياضية المقابلة في نظرية نيوتن. ومع ذلك، فإن معناها المادي مختلف، لأن p وE يمكن تعريفهما الآن بالتعبير النسبي $p = mv$ ، $E = mc^2$، مع $m = m_0/\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$، بدلًا من التعبير الرياضي في نظرية نيوتن.

من الواضح، مع ذلك، أنه للحصول على معادلات الحركة التي تظل ثابتة في الشكل (أي التي تشكِّل نفس العلاقات) في كل إطارٍ من إطارات لورنتز، لا يكفي إعطاء P و E تعريفًا نسبيًّا مناسبًا، بل من الضروري أيضًا تحديد القوة F بطريقة تعبِّر عن نفس النوع من العلاقة، بغض النظر عن سرعة الإطار المرجعي. الآن، لا يمكن فعل ذلك في الواقع حتى يكون لدينا بعض التعبيرات المحددة للقوة، مثل تلك الناتجة عن المجال الكهرومغناطيسي أو الجاذبية أو القوى الأخرى (على سبيل المثال، تلك التي تنشأ في التفاعلات النووية). هنا سنناقش فقط القوى الكهرومغناطيسية، ونبيِّن بالتفصيل أنها تؤدي بالفعل إلى علاقاتٍ ثابتة لمعادلات الحركة. ومع ذلك، يمكن الإشارة إلى أنه يمكن التعبير عن جميع القوى ذات الخصائص المعروفة بطريقة تؤدي إلى معادلاتٍ ثابتة مماثلة للحركة، لكن إثبات العبارة يتجاوز هذا الكتاب[1].

(1) هناك قوى أخرى (لا سيَّما القوى الموجودة بين النوى الذرية)، التي لم يتم فهمها بشكلٍ جيدٍ حتى الآن بحيث لا يمكن قول الكثير عنها في هذا الصدد، ومع ذلك، لا يوجد في الوقت الحالي سببٌ لافتراض أنها تؤدي إلى معادلات حركة ليست ثابتة في ظل تحويلات لورنتز.

القوة المؤثرة على جسم مشحون q واقع تحت تأثير مجال كهربائي $\mathscr{E}$ ومجال مغناطيسي $\mathscr{H}$ تساوي:

$$\mathbf{F} = q\left(\mathscr{E} + \frac{\mathbf{v}}{c} \times \mathscr{H}\right) \qquad (21-4)$$

مع ملاحظة أن $\mathbf{v}\cdot(\mathbf{v} \times \mathscr{H}) \equiv 0$، يمكننا الحصول على معادلات لورنتز المعروفة للحركة لمثل هذا الجسم بالمعادلات التالية:

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = q\left(\mathscr{E} + \frac{v}{c} \times \mathscr{H}\right) \qquad (21-5)$$

$$\frac{dE}{dt} = q(\mathscr{E}\cdot\mathbf{v}) \qquad (21-6)$$

للوصول إلى ما نبحث عنه، يمكن التعبير عن المعادلات السابقة بسهولة أكبر في شكلٍ تفاضلي باستخدام $d\mathbf{x}/dt = \mathbf{v}$ ما يؤدي إلى المعادلات التالية:

$$d\mathbf{p} = q\left(\mathscr{E}\, dt + \frac{d\mathbf{x}}{c} \times \mathscr{H}\right) \qquad (21-7)$$

$$dE = q(\mathscr{E}\cdot d\mathbf{x}) \qquad (21-8)$$

حيث dx هو متجه للمسافة التي يقطعها الجسم في الفترة الزمنية dt.

لقد لوحظت القوانين المذكورة أعلاه لأول مرة في إطارات مرجعية بحيث تكون السرعة v للإلكترون صغيرة مقارنة بـ c. ومع ذلك، نحن الآن بصدد التحقيق في الظروف التي ستسري هذه القوانين في ظلِّها، بغض النظر عن سرعة الإطار المرجعي. بمعنى آخر، إذا كانت المعادلتان (21-7) و (21-8) تحدثان داخل الإطار A، فإننا

نرغب في معرفة كيف يجب أن ترتبط الكميات $\mathscr{E}'$ و$\mathscr{H}'$ إذا رصدت في إطار آخر B لا بُدَّ أن تكون متناسبة مع $\mathscr{E}$و$\mathscr{H}$، ومن أجل أن يكون للمعادلات في الإطار B نفس الشكل، عند التعبير عنها من حيث المتغيرات الجديدة ستعطينا المعادلات التالية:

$$d\mathbf{p}' = q\left(\mathscr{E}'\,dt' + \frac{d\mathbf{x}'}{c} \times \mathscr{H}'\right) \qquad (21-9)$$

$$dE' = q(\mathscr{E}' \cdot d\mathbf{x}') \qquad (21-10)$$

نعبر الآن عن dp' و'dE بدلالة dp وdE بواسطة تحويلات لورنتز في المعادلات (7-20) و(8-20) ونعبر عن dx' و'dt بدلالة dx وdt من خلال التحويل المماثل (12-15). عند القيام بذلك، نأخذ تفاضلات المعادلات المتناظرة، مع ملاحظة أن V و$\hat{V}$ ثوابت، نحصل على المعادلات التالية [مع الأخذ في الاعتبار القيمة $[\gamma = 1/\sqrt{1 - (V^2/c^2)}$

$$d\mathbf{p} + (\gamma - 1)(\hat{V} \cdot d\mathbf{p})\hat{V} - \frac{\gamma \mathbf{V}}{c^2} dE = q\gamma\mathscr{E}'\left(dt - \mathbf{V} \cdot \frac{dx}{c^2}\right) + \frac{q}{c}(\gamma - 1)(\hat{V} \cdot d\mathbf{x})(\hat{V} \times \mathscr{H}') + \frac{q}{c}\gamma\, dt(\mathbf{V} \times \mathscr{H}') \qquad (21-11)$$

$$\gamma(dE - \mathbf{V}\,d\mathbf{p}) = q\mathscr{E}' \cdot d\mathbf{x} + q(\gamma - 1)(\mathscr{E}' \cdot \hat{V})(\hat{V} \cdot d\mathbf{x}) - \gamma(\mathscr{E}' \cdot \mathbf{V})\,dt \qquad (21-12)$$

بالتعويض بالقيم dE وdp في المعادلتين (7-21) و(8-21) يظهر لنا المعادلتان:

$$d\mathbf{p} + (\gamma - 1)(\hat{V} \cdot d\mathbf{p})\hat{V} - \frac{\gamma \mathbf{V}\,dE}{c^2} = q\left(\mathscr{E}\,dt + \frac{d\mathbf{x}}{c} \times \mathscr{H}\right) + q(\gamma - 1)\left[\hat{V} \cdot \mathscr{E}\,dt + \hat{V} \cdot \left(\frac{d\mathbf{x}}{c} \times \mathscr{H}\right)\right]\hat{V} - \frac{\gamma}{c^2}\mathbf{V}(\mathscr{E} \cdot d\mathbf{x}) \qquad (21-13)$$

$$\gamma(dE - \mathbf{V}\cdot d\mathbf{p}) = q\gamma\left[\mathscr{E}\cdot d\mathbf{x} - (\mathbf{V}\cdot\mathscr{E})\,dt - \frac{\mathbf{V}}{c}\cdot(d\mathbf{x}\times\mathscr{H})\right] \quad (21-14)$$

وحيث إن $\mathbf{V}\cdot(d\mathbf{x}\times\mathscr{H}) = -(\mathbf{V}\times\mathscr{H})\cdot d\mathbf{x}$ تؤدي المعادلتان (21-11) و(21-12) إلى المعادلة التالية:

$$\left[\mathscr{E}' + (\gamma-1)(\mathscr{E}'\cdot\hat{V})\hat{V} + \gamma\mathscr{E} + \gamma\left(\frac{\mathbf{V}}{c}\times\mathscr{H}\right)\right]\cdot d\mathbf{x} + \gamma(\mathscr{E}' - \mathscr{E})\cdot\mathbf{V}\,dt = 0 \quad (21-15)$$

الآن، يجب أن تكون المعادلة أعلاه صحيحة بالنسبة إلى سرعة الجسيم العشوائية $v = dx / dt$. ومن ثم يجب أن يكون مستقلًّا عن dx وdt. سيتحقق القارئ بسهولة من أن هذا ممكنٌ فقط إذا كان معاملا dx وdt صفرًا بشكلٍ منفصلٍ، أو إذا:

$$(\mathscr{E}' - \mathscr{E})\cdot\mathbf{V} = 0$$
$$\mathscr{E}' - \gamma\mathscr{E} - (\mathscr{E}'\cdot\hat{V})(\hat{V}) + \gamma(\mathscr{E}'\cdot\hat{V})\hat{V} + \gamma\left(\frac{\mathbf{V}}{c}\times\mathscr{H}\right) = 0 \quad (21-16)$$

سيكون من الملائم الآن التعبير عن كميات المجال $\mathscr{E}, \mathscr{H}$، $\mathscr{E}', \mathscr{H}'$ من حيث المكونات $\mathscr{E}_1, \mathscr{E}_1'; \mathscr{H}_1, \mathscr{H}_1'$، الموازية لـ V وحيث إن $(\mathscr{E}' - \mathscr{E})\cdot V = 0$ تتبع $\mathscr{E}_1' - (\mathscr{E}_1'\cdot\hat{V})(\hat{V}) = 0$. وحيث إن $\mathscr{E}_1' = \mathscr{E}_1$ و$\mathscr{E}_2'\cdot\hat{V} = 0$ [باستخدام القيم $\mathscr{E}_1'\cdot\hat{V} = \mathscr{E}'\hat{V}$ و$\mathscr{E}_1 = (\mathscr{E}_1'\cdot\hat{V}(\hat{V})$] يصبح لدينا المعادلة التالية:

$$\mathscr{E}_2' = \gamma\left(\mathscr{E}_2 + \frac{\mathbf{V}}{c}\times\mathscr{H}_2\right) \quad (21-17)$$

من خلال تتبُّع الإجراء المماثل مع المعادلات (11-21) و(13-21) يمكن للقارئ التحقُّق من حصولنا على المعادلات المقابلة:

$$\mathscr{H}'_1 = \mathscr{H}_1 \qquad (21-18)$$

$$\mathscr{H}'_2 = \gamma\left(\mathscr{H}_2 + \frac{V}{c} + \mathscr{E}_2\right) \qquad (21-19)$$

يمكن دمج معادلات $\mathscr{E}'$ و$\mathscr{H}'$ في مجموعة المعادلات التالية:

$$\mathscr{E}' = (\mathscr{E}\cdot\hat{V})(\hat{V}) + \gamma\left[\mathscr{E} - (\hat{V}\cdot\mathscr{E})\hat{V} + \frac{\mathbf{V}}{c}\times\mathscr{H}\right] \qquad (21-20)$$

$$\mathscr{H}' = (\mathscr{H}\cdot\hat{V})(\hat{V}) + \gamma\left[\mathscr{H} - (\hat{V}\cdot\mathscr{H})\hat{V} - \frac{\mathbf{V}}{c}\times\mathscr{E}\right] \qquad (21-21)$$

تحدد المعادلات أعلاه قوانين التحول من أجل $\mathscr{E}$و$\mathscr{H}$ التي ستؤدي إلى معادلات الحركة نفسها [من (7-21) إلى (10-21)] لجسيم مشحون، بغض النظر عن سرعة الإطار المرجعي.

تجدر الإشارة إلى أن علاقات التحويل (20-21) و(21-21) يمكن أن تظهر أيضًا على أنها تؤدي إلى شكلٍ ثابتٍ لمعادلات ماكسويل. (للقيام بذلك خارج نطاق الكتاب الحالي، ولكن لمزيدٍ من المناقشة حول هذه النقطة، انظر: C.C.Moller, The Theory of Relativity, and W.Panofsky and M.Phillips, Classical Electricity and Magnetism.). لذلك، ما تم تحقيقه هو إثبات أن قوانين الديناميكا الكهربية (معادلات ماكسويل) وقوانين حركة الجسيم المشحون في المجال الكهرومغناطيسي يمكن التعبير عنها في شكلٍ ثابتٍ (أي مثل مجموعة العلاقات نفسها في كل الأطر المرجعية المتصلة بتحولات لورنتز).

أخيرًا، تجدر الإشارة إلى أن قوانين التحويل لـ $\mathscr{E}$ و $\mathscr{H}$ تعطي نوع النتائج التي يمكن توقعها من النظر في قوانين الديناميكا الكهربائية. وبالتالي فإن قانون فاراداي للحث Faraday's law of induction يعني أن السلك الذي يمر عبر مجال مغناطيسي $\mathscr{H}$ بسرعة V سيكون له قوة دافعة كهربية emf متناسبة مع V والمجال $\mathscr{H}$ ولكن عموديًّا على كليهما. تعبِّر المعادلتان (20-21) و(21-21) عن النتيجة نفسها بشكلٍ أساسي. وبالتالي إذا كان لدينا داخل الإطار A $\mathscr{E} = 0$ و $\mathscr{H} \neq 0$، ثم انتقلنا إلى الإطار B، وحدث تحرُّك بسرعة V حيث يكون السلك في حالة سكون، فسنحصل على $\mathscr{E}' = \gamma[(\mathbf{V}/c) \times \mathscr{H})]$. ستكون القوة الدافعة الكهربية (كما هو مذكور في الإطار الذي يكون فيه السلك في وضع السكون) متناسبة مع $\mathscr{E}'$.

وبالمثل، إذا كان لدينا داخل الإطار A $\mathscr{H} \neq 0$ و $\mathscr{E} = 0$، وبتطبيق المعادلتين (18-21) و(19-21) ستشير إلى أنه في إطار يتحرك بسرعة V بالنسبة إلى A، سينتج مجال مغناطيسي $\mathscr{H}' = -\gamma(\mathbf{V}/c) \times \mathscr{E}]$. يمكن إثبات أن هذا يؤدي إلى نتائج مكافئة لـ «تيار الإزاحة displacement current» الخاص بـ ماكسويل $\mathbf{j}_d = (c/4\pi)(\partial\mathscr{E}/\partial t)$، مما يعني أن الجسم الذي يمر عبر مجال كهربائي ثابت، في الإطار الذي يكون فيه في حالة سكون، سيتأثر بمجال مغناطيسي مطابق (الذي بيَّناه في المقاطع السابقة، على سبيل المثال، إذا كان الجسم عبارة عن مغناطيس ثنائي القطب سيميل إلى توجيه نفسه تأثرًا بهذا المجال المغناطيسي «المستحث»).

XXII. الإثبات التجريبي لنظرية النسبية

سنقدم هنا مراجعة موجزة للأدلة التجريبية التي تؤكد نظرية النسبية الخاصة. هنا يجب أن نضع في اعتبارنا أن النظرية الخاصة تعتمد بشكلٍ حاسمٍ على نقطتين.

1. مبدأ النسبية The principle of relativity الذي يؤكد أن قوانين الفيزياء هي دائمًا ترتبط بنفس العلاقات بغض النظر عن سرعة الإطار المرجعي.

2. التعبير عن النسبية The expression of the relationship بين إطارين مرجعيين يتحركان بسرعاتٍ مختلفة ولكن منتظمة كما في تحويلات لورنتز.

إن الأدلة التجريبية التي تؤكد مبدأ النسبية هي في الواقع مؤكدة، بمعنى أنه لم يكتشف أحدٌ في أي مجالٍ أي اعتمادٍ لأشكال قوانين الفيزياء على سرعة الإطار المرجعي، لذلك سنقتصر هنا على مناقشة الأدلة التي تؤكد تحويلات لورنتز.

في مناقشتنا لنظرية الأثير (انظر الفصل التاسع) رأينا أن تحويل لورنتز يكافئ تمامًا مجموعة من ثلاثة تأثيرات:

1. انكماش لورنتز لجسمٍ متحركٍ والذي يتبع النسبة $\sqrt{1-(v^2/c^2)}$.

2. إطالة فترة الساعة المتحركة والذي يتبع النسبة $1/\sqrt{1-(v^2/c^2)}$.

3. التغيير في قراءة ساعتين متحركتين متساويتين متباعدتين بالمسافة $\mathbf{x}$ والذي يتبع النسبة $\Delta t = (\mathbf{v}\cdot\mathbf{x}/c^2)/\sqrt{1-(v^2/c^2)}$.

هذا يعني أن ساعتين متحركتين من هذا القبيل تفشلان في تسجيل الوقت نفسه بعد فصلهما، حتى لو كانتا في تزامنٍ تامٍّ حينما كانتا متجاورتين.

كما هو موضحٌ في الفصل السادس، يمكن اعتبار تجربة ميكلسون ومورلي بمثابة تأكيدٍ ممتازٍ لانكماش لورنتز. تعتمد القياسات الأكثر حداثة ودقة لسرعة الضوء بطريقة مكافئة لطريقة فيزو، كما نوقش في الفصل السابع، على مزيجٍ من تقلص لورنتز وتغيير فترات الساعات. نظرًا إلى أن تحويلات لورنتز نفسها قد تم التحقُّق منها بالفعل بواسطة تجربة ميكلسون ومورلي، فيمكن اعتبار طريقة فيزو تأكيدًا لتباين معدلات الساعات، مع سرعتها، كما تنبَّأ به تحويل لورنتز. ومع ذلك، يوجد المزيد من التحقق المباشر من تباين معدل الساعات. وهكذا في الفصل السادس عشر، ناقشنا الرصد حول متوسط تضاؤل الوقت للميزونات سريعة الحركة وانزياح دوبلر للضوء الذي يُنظر إليه بشكلٍ عمودي بالنسبة إلى اتجاه حركة المصدر، وكلاهما قدَّم تأكيدًا دقيقًا للغاية للتنبؤات بتحويلات لورنتز بشأن زيادة الفترة التي يجب مراعاتها لتحريك الساعات.

من الصعب الحصول على التأكيد التجريبي المباشر للتنبؤ المتبقي المتعلق بعدم توافق الساعات المنفصلة. للوهلة الأولى، يبدو أنه يمكن للمرء أن يختبر هذا من خلال النظر في القانون النسبي لإضافة السرعات كما في المعادلات (7-15) و(8-15)، التي يعتمد اشتقاقها على صيغة المعادلة (6-15)، معبرًا فقط عن خاصية عدم الالتزام بهذه الساعات التي هي قيد المناقشة.

أكد هذا القانون بدقة، على سبيل المثال، من خلال قياس سرعة الضوء في المياه المتدفقة، الموصوفة في الفصل السابع عشر. لسوء الحظ، مثل هذا الاختبار ليس واضحًا في أهميته، لأنه كما يمكن يتضح (انظر، على سبيل المثال CC Moller، The Theory of Relativity) أن النظريات غير النسبية للظواهر الكهرومغناطيسية تعطي نفس نتائج النظريات النسبية بسبب ترتيب التجارب المتاح. ونتيجة لذلك، فإن اتفاق التجارب التي تقيس سرعة الضوء في تدفق المياه مع تنبؤات النسبية لا يثبت بشكلٍ قاطعٍ أن صيغ عدم تزامن الساعات المتحركة صحيحة، لأن الافتراضات الأخرى المتعلقة بالعمليات الكهرومغناطيسية قد تؤدي إلى نفس النتيجة بشكلٍ أساسي.

يمكن الحصول على مسارٍ آخر، يقدم تأكيدًا قاطعًا عمليًّا حول هذه النقطة، من خلال إعادة النظر في نتائج الفصل الثامن، عندما أثبتنا المعادلة (8-8) أنه بمجرد قبول الصيغة $T = T_0/\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$ من أجل إبطاء الساعات، يترتب على ذلك بالضرورة أنه عندما تنفصل ساعتان متزامنتان مبدئيًّا (ببطءٍ ومن دون حركاتٍ متنافرة)، فإنهما سيخرجان من التزامن. هذا الاستنتاج هو مجرد نتيجة لحقيقة أنه حين تنفصل الساعات، فإنها تخرج عن إطار التزامن بمقدار القيمة $[l_0 v/c^2]/[\sqrt{1 - (v^2/c^2)}]$. هذا الاستنتاج هو مجرد نتيجة لحقيقة أنه بينما تنفصل الساعات، فإنها تعمل بمعدلاتٍ مختلفة؛ ومن الواضح أنه يتبع بشكلٍ مستقلٍّ تمامًا عن فرضيات الأثير. منذ أن أكدت التجربة بالفعل الصيغة $T = T_0/\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$، يمكن اعتبار التنبؤ

بتحويلات لورنتز الذي ستخرج فيه الساعات المكافئة عن الطور بقدار $[I_0 v/c^2]/[\sqrt{1-(v^2/c^2)}]$ على أنه تم التحقق منه بشكلٍ أساسي.

تم بالفعل اقتراح طريقة أكثر مباشرة للتحقق من التنبؤ أعلاه في نهاية الفصل العاشر، أي قياس سرعة الضوء على أساس الزمن t_A-t_B المطلوب حتى يمر الضوء بين النقطتين A وB، وهي الأزمنة التي تتم فيها قراءة t_A و t_B من ساعات السيزيوم المكافئة التي تمت مزامنتها أولًا ثم فصلها. ربما تكون هذه التجربة مجدية تقنيًّا قريبًا، كما هو موضح في الفصل العاشر، مع ذلك، يبدو أنه لا يوجد سببٌ كافٍ لافتراض أن النتائج ستختلف عن تلك المتوقعة بمساعدة تحويلات لورنتز.

لقد تم التحقق بدقة من تنبؤات نظرية أينشتاين فيما يتعلق بمعادلة الكتلة والطاقة لدرجة أن المزيد من النقاش حول هذه النقطة يبدو غير ضروري. في هذا الصدد، حتى العلاقات التفصيلية في المعادلات (4–20)، (5–20)، (6–20)، التي تعبِّر عن تحول لورنتز للطاقة والقوة الدافعة، تم التحقق منها في دراسة تصادمات الجسيمات ذات الطاقة العالية جدًّا. مثل تلك التي تنتج في مسرعات المختبر التي نواجهها بشكلٍ طبيعي في الأشعة الكونية.

وبالمثل، تم التحقق من ثبات معادلات لورنتز (2–21) و(3–21) لجسيمٍ مشحونٍ متحركٍ، حتى عندما تكون النسبة **v**/**c** قريبة من الواحد الصحيح، بينما قوانين التحول، (20–21) و(21–21)، للمجال الكهرومغناطيسي أيضًا تم التحقق منها بشكلٍ جيدٍ تجريبيًّا.

الأدلة التجريبية التي ذكرناها لتأكيد النظرية النسبية الخاصة تبدو قوية جدًّا بالفعل. إلى جانب ذلك، هناك قدرٍ كبيرٍ من الأدلة الإضافية،

التي لم نناقشها هنا. علاوة على ذلك، يجب أن يؤخذ في الاعتبار أن جزءًا كبيرًا من هذه الأدلة جاء، خاصة في الأيام الأولى عندما كانت النظرية جديدة وليست مقبولة بشكلٍ عامٍّ، من التجارب المصممة على الأقل لسبر واختبار النظرية -وإذا أمكن- دحضها. نظرًا إلى قدرتها على تحمُّل مثل هذه التحقيقات والانتقادات، فضلًا عن تحقيق نتائج مثمرة، كثيرٍ منها غير متوقع، يمكن القول إن نظرية النسبية قد تم تأكيدها الآن كما هو الحال مع أي جانبٍ من جوانب الفيزياء المعروفة اليوم.

ومع ذلك، كما هو الحال في أي نظرية في العلم، لا يجب الافتراض أن النسبية هي يقينٌ مكسوٌّ بالحديد، ولا يجب التشكيك فيه، ولا يمكن أبدًا إثبات خطئه في بعض النواحي، وهو تقريب للحقائق، أو ذات صلاحية محدودة لأسبابٍ أخرى. على سبيل المثال، يوجد الآن عددٌ كبيرٌ من العلماء الذين يميلون إلى الشك في أن نظرية النسبية (الخاصة والعامة) قد تكون خاطئة عند تطبيقها في مجال مسافات صغيرة جدًّا (أقل بكثيرٍ من الحجم المفترض للجسيمات الأولية elementary). بالإضافة إلى ذلك، يبدو أن هناك أسبابًا للاشتباه في أن النسبية قد لا تكون كافية عند تطبيقها على مسافاتٍ كبيرة جدًّا تقترب من «الحجم» المفترض للكون (حين يصبح «الانزياح الأحمر red shift» خارج نطاق للإدراك). بالإضافة إلى ذلك، قد تنهار نظرية النسبية بطرقٍ أخرى، لذلك من الضروري، خاصة عندما ندخل في مجالاتٍ جديدة للظواهر، أن نطبِّق نظرية النسبية بطريقة مؤقتة، وأن نكون متيقظين وجاهزين لنقدها، وإذا لزم الأمر استبدالها بنظرية أكثر صحة تقريبًا، التي قد تختلف اختلافًا جذريًّا عن النسبية كما تختلف النسبية عن ميكانيكا نيوتن.

XXIII. المزيد عن معادلة الكتلة والطاقة

إن معادلة الكتلة والطاقة التي تتبع نظرية النسبية، تتعارض كثيرًا مع المفاهيم الكلاسيكية القديمة بحيث يبدو أنه من المفيد مناقشة الآثار العامة لهذه الحقيقة بشيء من التفصيل. في الواقع، تُظهر التجربة أن الطلاب غالبًا ما يواجهون صعوبة كبيرة في فهم الآثار الكاملة لمفاهيم أينشتاين عن الكتلة والطاقة. الأسئلة النموذجية التي تظهر هي: «هل الكتلة هي نفسها الطاقة؟» «هل العالم مكون من طاقة فقط؟» «ما هي الكتلة، إذا كان من الممكن تحويلها إلى طاقة والعكس صحيح؟» وفي نفس السياق: «ما هي الطاقة؟».

دعونا نبدأ بالتفكير في (من أين يأتي المفهوم الاعتيادي لجسمٍ ذي كتلة ثابتة ومحددة جيدًا). من الواضح أن هذه الفكرة تستند إلى ملاحظة أن العالم يحتوي على عددٍ كبيرٍ من الأشياء والكيانات، يمكن مقارنتها من حيث الحجم والشكل والوزن وما إلى ذلك، ويمكن اعتبارها مكونة من كمياتٍ أو كتلٍ محددة المواد، مثل الصخور والتربة والماء والمعادن والخشب وما إلى ذلك؛ نجد بالطبع أن هذه المواد تتآكل وتتحلَّل وتذوب وتتآكل وتتحلل وتتبخر وتحترق إلى غازاتٍ فقط. لذلك من الواضح أنها ليست دائمة بشكلٍ فردي أو ثابتة في الكتلة، على الرغم من أنها قد تخضع لتغييراتٍ مرئية ضئيلة في هذه الخصائص، بعضها لفتراتٍ قصيرة من الزمن والبعض الآخر على مدى فتراتٍ زمنية أطول.

ومع ذلك، فإن أسلوب تفكيرنا يجعلنا نعتقد بطريقة ما، أنه يجب أن يكون هناك في مكانٍ ما، أساسٌ دائمٌ تمامًا لكل شيء.

افترض العلماء الأوائل، على سبيل المثال، أنَّ الذرات كانت كياناتٍ دائمة تمامًا، وهي «اللبنات الأساسية» للكون، لذلك لم يُنظر إلى المظاهر المتغيرة باستمرارٍ للمادة على نطاقٍ واسعٍ إلا على أنها عواقب للحركات الأساسية للذرات الدائمة. ولكن بعد ذلك ظهر أن الذرات تتكوَّن من هياكل متحركة من «الجسيمات الأولية» (الإلكترونات والبروتونات والنيوترونات) مما أدى إلى إمكانية تغيير الذرات وتحويلها إلى ذراتٍ أخرى، وتكوينها وتفتيتها وما إلى ذلك. يفترض مع ذلك أن هناك شيئًا آخر دائمًا تمامًا، هو الجسيمات الأولية، ولكن كما رأينا، اكتشفت العمليات النووية وغيرها، حيث تتحول حتى هذه الجسيمات بعضها إلى بعض، وتفنى وتتشكَّل، مع تحرير وامتصاص كمياتٍ مماثلة من الطاقة. مرة أخرى، أحبط البحث عن كياناتٍ وموادٍ دائمة تمامًا. بدلًا من ذلك، من الواضح أنه في كلٍّ من التجربة المشتركة وفي التحقيقات العلمية، فإن الأشياء والكيانات والمواد، وغيرها التي نختبرها بالفعل أو ندركها أو نلاحظها أظهرت دائمًا (حتى الآن) أنها ثابتة نسبيًّا فقط في خصائصها، هذا الثبات النسبي غالبًا ما يحدث خلطٌ بينه وبين الدوام المطلق.

إذن، لم يسبق للبشرية أن واجهت أيَّ شيء دائم تمامًا، فمن أين تأتي هذه الفكرة، فكرة المثابرة الكبيرة التي تعود دائمًا في مواجهة التجارب والملاحظات الجديدة، التي تظهر مرارًا وتكرارًا أنها تتعارض مع الحقائق المتاحة؟ يمكن إلقاء بعض الضوء على هذه المسألة من خلال النظر في تحقيقات تطوير مفهوم الكائن عند الرضع والأطفال

الصغار. (أجريت هذه التحقيقات جنبًا إلى جنب مع دراسات حول تطوير مفاهيمهم عن المكان والزمن، ونوقشت بمزيدٍ من التفصيل في الملحق). تشير الأدلة الموجودة إلى أن الأطفال الصغار جدًّا لا يبدو أنهم يمتلكون في الواقع فكرة الشيء الدائم. بدلًا من ذلك، فإن سلوكهم فيما يتعلَّق بالأشياء يشبه الإشارة إلى أنهم يعتبرونها قد ظهرت إلى الوجود عندما يرونها لأول مرة وتختفي من الوجود (بالنسبة إليهم) عندما تختفي من مجال إدراكهم. فقط بشكلٍ تدريجي يقوم الرضيع بتكوين فكرة عن الشيء الموجود حتى عندما لا يدركه. تطورت فكرة الكمية الدائمة من المادة لاحقًا، وحتى الأطفال من سن ثلاث أو أربع سنوات غالبًا ما يختلط عليهم هذا السؤال. لكن مع مرور الوقت، يتشكَّل المفهوم، ويصبح في النهاية أمرًا معتادًا، بحيث نميل تلقائيًّا في كل مجالٍ إلى البحث عن أجسامٍ أو كياناتٍ أو موادٍ ذات خصائص ثابتة، وحتى نبدأ في الشعور بأنه لا يمكننا التخلي عن فكرة تخيل عالم مبني من بعض أنواع الكيانات أو المواد الدائمة.

إن الفكرة القائلة بوجوب وجود بعض أنواع الكيانات الدائمة تمامًا لا تستند فقط إلى عادات الفكر التي تبدأ في الطفولة المبكرة بالطريقة الموضحة أعلاه. ولكن أيضًا كما يحدث مع المفاهيم المماثلة للمكان والزمن المطلقين، فإنه ينشأ أيضًا -على الأقل جزئيًّا- في بنية لغتنا المشتركة. وهكذا عندما نرى شيئًا ما بخصائص ثابتة نسبيًّا، فإننا نطلق عليه اسمًا، لكن هذا الاسم يظل كما هو، على الرغم من تغيُّر الكائن. نظرًا إلى أنه يحمل نفس الاسم، فإننا نميل إلى التفكير فيه على أنه نفس

الشيء. المثال الواضح على ذلك هي حالة الإنسان. كل شخص لديه الاسم نفسه الذي كان لديه قبل 10 أو 20 أو 30 عامًا. ومع ذلك، من الواضح أنه شخصٌ مختلفٌ تمامًا، جسديًّا وعقليًّا، في الواقع، هو مختلفٌ عمَّا كان عليه بالأمس أو حتى قبل دقيقة. وبالمثل، فإن كتلة من المعدن تتغيَّر دائمًا وذراتها تتحرك وتتأكسد وتتعرض للإجهاد وهكذا. في بعض السياقات المحدودة ولفتراتٍ زمنية قصيرة، يمكن إهمال هذه التغييرات، لذا فإن ثبات اسم شيء ما يؤدي إلى تصور مناسبٍ له فقط في مجالٍ محدودٍ معين. تنشأ صعوباتنا بسبب عادة تعود إلى بداية استخدام اللغة من قبل الجنس البشري (بالإضافة إلى بداياتها في طفولة كل فردٍ)، نحدد الأشياء؛ أي أننا نفترض دون وعي أن كل ما يحمل نفس الاسم هو على الأقل نفس الشيء من حيث الجوهر.

لنعد الآن إلى مشكلة الكتلة والطاقة في الفيزياء. لقد أطلقنا اسم «الكتلة» على خصائص معينة لوحظت في التجربة المشتركة، ومنذ ذلك الحين منحت هذه الخصائص معاني أكثر دقة في الفيزياء. بالإضافة إلى الإشارة إلى المفهوم الشائع لـ «كمية المادة الدائمة quantity of the permanent substance of matter»، تشير الكتلة في الفيزياء إلى خاصيتين محددتين بدقة أكبر، أحدهما هو القصور الذاتي، أو مقاومة التسارع، والآخر هو الجاذبية.

سنبدأ بمناقشة جانب القصور الذاتي للكتلة. في ميكانيكا نيوتن، تشير المعادلة F=ma إلى أن القوة اللازمة لإعطاء جسم ما تسارعًا محددًا يتناسب مع كتلته، لكن هذه الكتلة لن يكون لها أهميتها

المعتادة إذا لم تكن ثابتة. بمعنى آخر، لا يمكن تعريف معادلات نيوتن (1-18) و(2-18) من دون المعادلة (3-18)، أي (dm/dt) = 0، وأن m = ثابت. غالبًا ما يتم تجاهل أهمية هذه المعادلة الأخيرة، فقط بسبب عادتنا اليومية في التفكير في الكتلة على أنها خاصية «دائمة» للمواد. لكن واقعيًّا ليس من فكرتنا الشائعة عن الكتلة أن نعرف ثبات عامل التناسب m بين القوة والتسارع لجسمٍ معينٍ. بدلًا من ذلك، من الحقائق الملحوظة أن عامل التناسب هذا ثابتٌ في جميع التجارب التي تتم تحت مظلة ميكانيكا نيوتن.

المظهر الثاني المهم لكتلة شيء ما في الفيزياء هو أنها تحدث كعاملٍ تناسبي ثابتٍ يحدث في قانون قوة الجاذبية بينها وبين جسم آخر $F = Gm_1m_2/r^2$، حيث r هي المسافة بين الأجسام وG هي ثابت الجاذبية. هناك حقيقة أخرى مهمة وهي أنه في جميع التجارب المتاحة حتى الآن، كانت الكتلة التي تظهر في المعادلة أعلاه دائمًا متناسبة مع كتلة القصور الذاتي التي تظهر في معادلات الحركة. بسبب هذا الثبات في النسبة بين كتل الجاذبية والقصور الذاتي، يميل المرء إلى التعرُّف عليها؛ وهذا يعني أنه يتم توجيه المرء لمنحهم الاسم نفسه، وبالتالي، اعتبارهم الشيء نفسه. عند القيام بذلك، من المحتمل جدًّا أيضًا أن نستبدل من دون وعي المعاني الفيزيائية الدقيقة للكتل الثقالية والقصور الذاتي بالمفهوم الشائع للكتلة على أنها «كمية المادة الدائمة».

تحت مظلة النسبية، وعندما تكون نسبة v/c كبيرة، نجد (كما رأينا في الفصل العشرين) أن قوانين نيوتن للحركة يجب استبدالها بقوانين أينشتاين، التي هي:

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = \mathbf{F} \qquad \text{with} \qquad \mathbf{p} = \frac{m_0\mathbf{v}}{\sqrt{1-(v^2/c^2)}} = m\mathbf{v}$$

من خلال النظرة الأوسع لم تعد الكتلة ثابتة، لذلك من الواضح أن الكتلة هي في الواقع مجرد ثابتٍ نسبي، بمعنى أن تغيراتها يمكن إهمالها فقط تحت مظلة قوانين نيوتن.

مشكلة نظرة الجاذبية إلى الكتلة لا يمكن التعامل معها في نظرية النسبية الخاصة، تتطلب النظرية العامة. ولكن يكفي هنا أن نذكر بإيجازٍ أنه في النظرية العامة ينظر أينشتاين إلى التناسب الدقيق بين كتل الجاذبية والقصور الذاتي، الذي أمكن رصده حتى الآن، إلى أنه يشير إلى أن هذين النوعين من الكتلة يمثِّلان جوانب مختلفة ولكنها مرتبطة ببعضها بمجموعة واحدة أوسع من المفاهيم والقوانين، تشمل كلًّا من ظاهرة القصور الذاتي وظاهرة الجاذبية. يجسد هذه الفكرة في «مبدأ التكافؤ principle of equivalence» بين تأثيرات تسارع إطار الإحداثيات وتلك الخاصة بمجال الجاذبية. هنا مفهوم التكافؤ له معنى مشابه لذلك الذي نشأ في «تكافؤ/ معادلة» الكتلة والطاقة؛ أي أنه يشير إلى علاقة متأصلة بين كميتين مختلفتين، مما يعني أن إحداهما تتناسب بالضرورة مع الأخرى. على هذا الأساس، نجح أينشتاين في تطوير نظرية متماسكة وموحدة، تشرح الجاذبية والكتلة بالقصور الذاتي كجوانب مختلفة لعملية أساسية واحدة، يمكن التعامل معها من خلال قوانين النسبية العامة، التي تعتبر النسبية الخاصة بالطبع أحد جوانبها كحالة لها حدودٌ خاصة وتقريبية إلى حدٍّ ما، وحيث إن ميكانيكا نيوتن هي حالة تقييد وتقريبية مقابلة للنسبية الخاصة.

يبدو واضحًا أننا كنَّا نطبق نفس الاسم «الكتلة» على الخصائص التي أصبحت مختلفة تمامًا، مع خروجنا من مظلة قوانين نيوتن. نظرًا إلى أن كتلة الجسم ليست ثابتة تحت المظلة النسبية، يترتب على ذلك أن المفهوم النسبي للكتلة يتناقض مع المفهوم الشائع للكتلة على أنها «كمية المادة الدائمة». نظرًا إلى أنه لا يمكن تطبيق هذه الفكرة الشائعة بشكلٍ صحيحٍ إلا تحت مظلة قوانين نيوتن، فإنه يترتب على ذلك في نظرية النسبية أننا نستخدم كلمة «كتلة» بمعنى لا يتوافق مع معناها اليومي المشترك. بدلًا من ذلك، تشير الكتلة في النسبية إلى عوامل تناسب معينة تدخل في قوانين القصور الذاتي والجاذبية.

في هذا الصدد، من المهم أن نتذكر أن المفهوم العام للكتلة ليس مفهومًا حتميًّا، ولكنه نشأ من خلال تطور الجنس البشري، وتعلَّمه كلُّ طفلٍ، لدرجة أنها تصبح فكرة معتادة ثم تبدو ضرورية، وهي لا يمكن أن تكون غير ذلك. كما في حالة المفاهيم العادية للمكان والزمن، يبدو أن عادات التفكير هذه مناسبة في مجالٍ محدودٍ معينٍ. ومع ذلك، من المهم عدم الاستمرار في هذه العادات خارج المجال الذي تكون فيه مناسبة.

دعونا نفكر الآن في معنى الطاقة. في الفيزياء، كانت الطاقة تُعرَّف في الأصل على أنها «كمية الحركة quantity of motion». لكن هذا أدَّى إلى قدرٍ كبيرٍ من الجدل في الأيام الأولى حول الكمية «الحقيقية» للحركة أو الطاقة أو القوة الدافعة. منذ ذلك الحين، لوحظ أن هذه الحجة لا طائل من ورائها، لأنه لا يوجد «كمية فريدة من الحركة unique

quantity of motion». بدلًا من ذلك، تعد كلٌّ من الطاقة والقوة الدافعة من الدوال الثابتة، بمعنى أن إجمالي هذه الكميات، مجمعة على جميع الأجزاء المكونة للنظام المعزول، لا تتغير بمرور الوقت.

عندما تتفاعل أجزاءٌ مختلفة من النظام، هناك عملية تبادل للطاقة (والقوة الدافعة) بينها. في هذه العملية، تُحفظ الكمية الإجمالية، لكن طاقة كل جزء ستتغير بالطبع. لهذا السبب وحده، فإن الطاقة الإجمالية للنظام ليست سوى دالة ثابتة نسبيًّا، تكون ثابتة عندما يكون النظام المعني معزولًا، ولكن ليس عندما يتفاعل مع بيئته.

لا تشمل التفاعلات فقط التبادلات الميكانيكية، ولكن أيضًا تغييرات الطاقة في أشكالٍ مختلفة. وبالتالي، يمكن تحويل الطاقة الميكانيكية إلى كمية مكافئة من الطاقة الكهربائية والعكس صحيح، بينما توجد إمكانية مماثلة للتحول المتبادل بين هذين النوعين من الطاقة والكميات المكافئة للحرارة (وهي طاقة الحركة الجزيئية العشوائية، وهي الحركة التي أمكن تجاهلها على المستوى الأكبر). هذا التحول بين الأشكال المختلفة بكمياتٍ مكافئة هو في الواقع أكثر ما يميِّز الطاقة في الفيزياء.

نظرًا إلى الحفاظ على الطاقة الإجمالية لنظامٍ معزولٍ، فهناك ميلٌ إلى التفكير فيه على أنه مادة دائمة، مثل السائل الذي يتدفق من جزءٍ من النظام إلى آخر، لكن لم يسبق لأحدٍ أن أدرك أو لاحظ مثل هذه المادة. بدلًا من ذلك، تظهر الطاقة دائمًا كدالة ثابتة نسبيًّا في الحركة، وبالتالي، بالنسبة إلى جسمٍ معزولٍ، فإن الدالة $mv^2/2$ ثابتة، بمعنى أنها

تظل ثابتة ما دام الجسم معزولًا، وأنه في نظام من هذه الأجسام القادرة على التفاعل، يكون مجموع طاقات الأجسام ثابتة (بينما، على سبيل المثال، لن يكون للدالة $m_2v^5/2$ هذه الخصائص). وبالمثل، فإن التيار الكهربائي الذي يتدفق عبر ملف حث L له طاقة $LI^2/2$، والتي يمكن الحفاظ عليها إذا لم تكن هناك مقاومة، وهي التي يمكن تحويلها إلى كمية مناظرة من الطاقة الميكانيكية بمساعدة محرك، وإلى طاقة حرارية بمساعدة المقاومة. نؤكد إذن أن الطاقة هي دائمًا جانب ودالة ثابتة، ولكنها قابلة للتحويل إلى نوعٍ من الحركة ولا تظهر أبدًا على أنها مادة موجودة بشكلٍ مستقلٍّ. حتى الطاقة الكامنة تُعرَّف على أنها القدرة على القيام بالشغل work، أي لإنشاء حركة مقابلة، مقاسة من حيث الطاقة الميكانيكية أو الكهربائية أو الحرارية أو غيرها من أشكال الطاقة.

في المراحل المبكرة من تطور الفيزياء، كان من الممكن من حيث المبدأ التفكير في كل حركة على أنها صفة أو خاصية لبعض أنواع الجسيمات. مع اكتشاف أن الكتلة (وحتى الجسيمات نفسها) يمكن «إفناؤها annihilated» بتحرير كمياتٍ مكافئة من الطاقة، لم تعد طريقة التفكير هذه قابلة للاستمرار، ولكن إذا كانت الطاقة لا تنتمي إلى مثل هذه الجسيمات، فكيف نتصورها إذن؟ إذا كانت الطاقة لها معنى فقط كدالة ثابتة نسبيًّا في الحركة، وإذا لم تكن هناك مكوناتٌ أساسية ودائمة للكون تمتلك هذه الحركة، فماذا نعني بمصطلحي «طاقة» و«حركة»؟

للإجابة عن هذه الأسئلة، سيكون من المفيد البدء بإدخال تمييزٍ بين نوعين من الطاقة. فمن ناحية، توجد طاقة الحركة الخارجية التي

تحدث على نطاقٍ واسعٍ، على سبيل المثال، عندما يغيِّر الجسم موضعه أو اتجاهه ككل. ومن ناحية أخرى، هناك طاقة الحركة الداخلية، على سبيل المثال، الحركات الحرارية للجزيئات المكوِّنة لهذا الجسم، التي تُلغى حين النظر إلى هذا الجسم على نطاقٍ واسعٍ. من سمات الحركة الداخلية أنها تميل إلى أن تتأرجح، وتعكس حركتها ذهابًا وإيابًا، وما إلى ذلك. (في مثال أينشتاين عن الصندوق الذي يحتوي على إشعاع، الذي ناقشناه سابقًا، يمكن اعتبار الضوء المنعكس ذهابًا وإيابًا بمثابة حركة داخلية).

من الواضح أن المصطلحين «داخلي» و«خارجي» لهما علاقة بطبيعتهما في معانيهما، وبالتالي، بالنسبة إلى المستوى الكبير، فإن الحركة الجزيئية «داخلية»، لأن آثارها الخارجية الشاملة تُلغى على نطاقٍ واسعٍ. ومع ذلك، بالنسبة إلى المستوى الجزيئي، فهو «خارجي»، لأن الجزيئات تخضع بالفعل لإزاحة عبر الفراغ وهذا أمرٌ مهمٌّ على هذا المستوى. من ناحية أخرى، لا تزال الحركات الإلكترونية والنووية «داخلية» بالنسبة إلى المستوى الجزيئي، على الرغم من أنه يجب اعتبارها «خارجية» عندما ننتقل إلى مستوياتٍ أعمق، حيث تؤدي حركاتها إلى إزاحة كبيرة في الفراغ.

مع وضع هذه المفاهيم في الاعتبار، دعونا نعود الآن إلى السؤال «ما هي الكتلة؟» نشير أولًا إلى أنه في نظرية أينشتاين، لا يُنظر إلى الكتلة والطاقة على أنهما نشأتا بطرقٍ مختلفة جوهريًّا. بدلًا من ذلك، يجب اعتبارهما جانبين مختلفين ولكن مرتبطين بعملية كاملة واحدة للحركة.

في مثل هذه الحركة، توجد قدرة ثابتة نسبيًّا على القيام بالشغل، والتفاعل مع الأنظمة الأخرى، وأن تقوم بالحركة، على حساب الحركة في النظام الأصلي، هذا يُسمَّى الطاقة. بالإضافة إلى ذلك، فإن مثل هذا النظام لديه بعض القصور الذاتي، أو مقاومة التسارع، بالإضافة إلى جاذبية معينة للأجسام الأخرى، كلاهما متناسبٌ مع خاصية تُسمَّى باسم «الكتلة». الآن، لقد رأينا بالفعل أنه إذا كانت هناك حركة داخلية في الجسم (حركة جزيئية عشوائية أو حركة أشعة الضوء تنعكس ذهابًا وإيابًا)، فإن هذه الحركة تساهم بمقدار Δm، في كتلة القصور الذاتي، طبقًا للصيغة $\Delta m = \Delta E/c^2$، حيث ΔE هي الطاقة المرتبطة بهذه الحركة. علاوة على ذلك، كما أشرنا أيضًا، في النظرية العامة للنسبية، يوضح أينشتاين أن هذه الطاقة تساهم في كتلة الجاذبية بنفس الطريقة. نظرًا إلى أن النسبية تتطلَّب منَّا أن نضع مفهوم الكتلة جانبًا باعتباره «كمية المادة الدائمة»، فإننا نتابع من خلال نظرية أينشتاين أنه كلما امتلك نظامٌ ما نوعًا معينًا من الطاقة فإنه يساهم بجزءٍ من طاقته ΔE في الطاقة الكلية E، لها جميع الخصائص (أي بالقصور الذاتي والجاذبية) التي تنسبها الفيزياء إلى مساهمة مقابلة في كتلتها $\Delta m = \Delta E/c^2$، والتي تعد جزءًا من الكتلة الكلية $m=E/c^2$.

في هذا السياق، يجب ملاحظة أن كل شكلٍ من أشكال الطاقة (بما في ذلك الطاقة الحركية وكذلك طاقة الوضع) يساهم بنفس الطريقة في الكتلة. ومع ذلك، فإن «طاقة السكون» للجسم لها معنى خاص، بمعنى أنه حتى عندما لا يكون للجسم حركة مرئية ككل، فإنه لا يزال

يخضع لحركاتٍ داخلية (مثل الطاقة المشعة، والجزيئية، والإلكترونية، والنووية، وغيرها). تتمتع هذه الحركات الداخلية ببعض «طاقة السكون E_0» وتساهم بكمية مقابلة، $m_0 = E_0/c^2$ في «كتلة السكون». طالما أن الطاقة «داخلية» فقط، تظل الكتلة الباقية ثابتة بالطبع. ولكن كما رأينا، فإن التحولات الداخلية التي تحدث على المستويات الجزيئية والذرية والنووية يمكن أن تغيِّر بعضًا من هذا الاتجاه ذهابًا وإيابًا، مما يعكس الحركة «الداخلية» إلى أشكالٍ أخرى من الطاقة تكون آثارها مرئية «خارجيًّا» على المستوى الكبير. عندما يحدث هذا، فإن «طاقة السكون» ومعها «كتلة السكون»، تخضع لانخفاضٍ مماثلٍ. لكن مثل هذا التغيير في الكتلة لا يُنظر إليه على أنه غامضٌ إلى حدٍّ ما، إذا تذكرنا أن كتل القصور الذاتي والجاذبية هي مجرد جانبٍ واحدٍ من جوانب الحركة بأكملها، وجانب آخر منها هو طاقة مكافئة، معروضة كالقدرة على القيام بشغلٍ على نطاقٍ واسعٍ. بعبارة أخرى، فإن تحويل «المادة» إلى «طاقة» هو مجرد تغييرٍ من شكلٍ واحدٍ من أشكال الحركة (داخليًّا، الانعكاس، الحركة المتأرجحة) إلى شكلٍ آخر (على سبيل المثال، الإزاحة إلى الخارج عبر الفراغ).

من المفيد بشكلٍ خاص النظر في كيفية فهم المرء، من وجهة النظر هذه، إمكانية وجود أجسامٍ لا تتمتع بكتلة ثابتة، بشرط أن تتحرك بسرعة الضوء. لأنه إذا كانت كتلة الثبات هي حركة «داخلية» تحدث حتى عندما يكون (جسمٌ ما في حالة سكون) مرئيًّا على مستوى معين، فهذا يعني أن (شيئًا ما) من دون «كتلة سكون» ليس له مثل هذه الحركة الداخلية، وأن

كل حركته تكون خارجية، بمعنى أنه يتحرك بإزاحة عبر الفراغ. لذلك يمكن اعتبار الضوء (وكل شيء آخر يسافر بنفس السرعة) شيئًا ليس «في حالة سكون» على أي مستوى، بحكم إلغاء الحركات «الانعكاسية reflecting» الداخلية، لأنه لا يمتلك أي حركاتٍ داخلية من هذا القبيل. نتيجة لذلك يمكن أن توجد فقط في شكل حركة «للخارج» بسرعة c. وكما نتذكر، فإن خاصية التحرك بسرعة الضوء ثابتة في ظل تحويلات لورنتز، بحيث لا تعتمد جودة الحركة على أنها «خارجية» بشكلٍ بحتٍ على الإطار المرجعي الذي رصدت فيه. (من ناحية أخرى، يمكن دائمًا تحويل الحركات بسرعات أقل من c إلى سرعة ثابتة عن طريق تغيير إطار مرجعي بسرعة تساوي سرعة الجسم قيد الدراسة).

* * *

XXIV. نحو نظرية جديدة للجسيمات الأولية

إن التطور الكامل لوجهة النظر الموضحة في الفصل السابق، فيما يتعلَّق بالتحول بين «طاقة السكون» وأشكالٍ أخرى من الطاقة، يعني أنه يتعيَّن علينا في النهاية أن نفهم ما يُسمَّى بالجسيمات «الأولية» على أنها هياكل تنشأ في حالة ثباتٍ نسبيًّا إذا قارناها بأنماط الحركة التي تحدث عند مستوى أقل من تلك الخاصة بهذه الجسيمات. في مثل هذه الهياكل، حتى «طاقة السكون» لجسيمٍ أولي يمكن التعامل معها على أنها نوعٌ من الحركة «الداخلية» التي تعكس الحركة المتذبذبة (ذهابًا وإيابًا)، على مستوى أقل حتى من المستوى الذي تحدث فيه التحولات النووية.

في الوقت الحاضر، تُعَد دراسة بنية الجسيمات «الأولية» أحد الاهتمامات الرئيسية للبحث الفيزيائي. أمكن تجميع العديد من القرائن، مما يشير إلى وجود مستوى جديدٍ من النوع المذكور أعلاه، الذي من الممكن أن يُفهم من خلاله مثل هذا الهيكل في النهاية. ومع ذلك، يبدو من المحتمل أن تكون قوانين هذا المستوى جديدة بالنسبة إلى تلك الخاصة بالمستويين النووي والذري مثل تلك الخاصة بالمستوى الأخير فيما يتعلق بالمستوى الواسع النطاق. ربما يمكن مقارنة الوضع الحالي في فيزياء الجسيمات الأولية بالوضع الموجود في الفيزياء الذرية قبل عصر نيلز بور، بمعنى أنه قد جُمِعت قدرٌ كبيرٌ من المعلومات الواقعية المنهجية، مما يشير إلى الحاجة إلى مجموعة جديدة بشكلٍ أساسي من المفاهيم النظرية، والتي لم تطور بعد. ومع ذلك، فمن الواضح بالفعل أن «تكوين» الجسيم يجب أن يتوافق مع إنشاء نوعٍ من الحركة المميزة الثابتة نسبيًّا في مستوى أقل من مستوى الجسيمات الأولية، بمساعدة

الكمية الضرورية من الطاقة، و«فنائها» إلى نهاية هذا النمط من الحركة، مع تحرير كمية مماثلة من الطاقة. ما يبدو ضروريًّا هنا هو تنحية فكرة الجسيمات «الأولية» جانبًا باعتبارها «كمية المادة الدائمة»، واعتبارها أنواعًا ثابتة نسبيًّا من الكيانات تنشأ عند حدوث أنواعٍ معينة من الحركة، وتنتهي عندما تتوقف هذه الأنواع من الحركة.

في هذه المرحلة، تظهر الأسئلة بشكلٍ طبيعي. الأول هو: «هل لا يمكننا أن نجد أنواعًا جديدة من الكيانات تحت مستوى الجسيمات الأولية التي تشكِّل في الواقع كمية المادة الدائمة؟» بالطبع، ليس لدينا طريقة في الوقت الحالي لمعرفة ما سيتم اكتشافه في البحث المستقبلي حول هذه المشكلة، ولكن قد يكون من المفيد إبداء بعض الملاحظات هنا، التي يمكننا تنفيذها على أساس ما نعرفه بالفعل. بطبيعة الحال، يجب أن تكون هذه الملاحظات تخمينية إلى حدٍّ ما، لكن من المأمول أن تساعد في توضيح معنى هذا السؤال.

نبدأ بالسؤال: «هل يقدم افتراض الاستمرار المطلق للكيانات أو المواد مساهمة حقيقية في قوانين الفيزياء، أم أنه ليس مثل التدوير البطلمي ونظرية الأثير، بمعنى أنه ليس ضروريًّا في الواقع؟ وإذا تعلق الأمر بالنظرية، هل هو مصدر ارتباك؟» لإثبات أن هذا السؤال له أسسٌ جيدة، سنبدأ بالنظر في الحياة اليومية، حيث كما رأينا من تصوراتنا الفورية المتغيرة باستمرارٍ، تمكنَّا من تجريد بعض الأشياء والكيانات وما إلى ذلك التي لها خصائص ثابتة إلى حدٍّ ما، مثل الشكل والحجم والصلابة وغيرها من الصفات. مع العلم أن كل هذه الأشياء يمكن أن تنكسر أو تتآكل أو تذوب أو تحترق أو أنها عرضة للتحلل، فليس من

الأفضل الإشارة إليها على أنها ثابتة أو أنها ثابتة نسبيًّا، بدلًا من الإشارة إليها على أنها كياناتٌ ذات خصائص دائمة تمامًا؟ في الواقع، إذا فعلنا ذلك، يمكننا بعد ذلك التفكير في حركاتها وتحولاتها المختلفة، الخارجية والداخلية، دون تناقض الحقائق المذكورة أعلاه، لأننا لم نفترض خطأ أنه نظرًا إلى أن الكائنات لها اسمٌ ثابتٌ، يجب أن تظل دائمًا في الأساس نفس أنواع الأشياء. وبالتالي، من الواضح أنه على مستوى التجربة العادية، تكتسب التجربة الوضوح وتقليل الارتباك إذا اعترفنا منذ البداية أن الأشياء والكيانات تحتاج فقط إلى خصائص ثابتة نسبيًّا، وأن أوصافنا لأفعالِها ليست سوى تقريبية، بمعنى أننا نتجاهل جميع الحركات في المستويات الذرية والنووية والأقل من ذلك (بشكلٍ صحيحٍ لهذا المستوى). عندما تؤخذ هذه الحركات في الاعتبار، يمكن فهم التحولات التي يتم فيها تكوين وتدمير «المواد» مثل السوائل والمواد الصلبة والمعادن والغازات، على أنها نتيجة للحركات «الداخلية» على المستويات الأدنى.

ولكن بعد ذلك عندما نصل إلى المستويات الجزيئية والذرية و«الأولية» للجسيمات، نلاحظ مرة أخرى عملية مماثلة. وهكذا، فإن الذرة، التي هي كيانٌ ثابتٌ على مستواها الخاص (كلمة «ذرة» تعني «غير قابل للتجزئة» في اللغة اليونانية) وُجد أنها قادرة تمامًا على التحولات الأساسية التي تنتج عن الحركات «الداخلية» لإلكتروناتها والبروتونات والنيوترونات كما هي الكيانات على المستوى الكبير. وبالفعل، لم نواجه في أي مكانٍ كياناتٍ لا تتمتع بهذه الخصائص.

لا يمكننا إذن الامتناع ببساطة عن وضع افتراضات تتعلق بالبقاء

المطلق لما هو مجهول في طبيعة الحالة؟ كما يمكن القيام به في تجربة واسعة النطاق، يمكننا بدلًا من ذلك اعتبار الكيانات والهياكل التي وجهناها على المستويات الأدنى على أنها ثابتة نسبيًّا أو ثابتة في خصائصها. في المجال الذي تكون فيه هذه الكيانات أو الهياكل ثابتة نسبيًّا، قد نشير إلى تحركاتها وتحولاتها بطريقة مشابهة إلى حدٍّ ما لتلك المعتمدة فيما يتعلق بأشياء التجربة اليومية. من الواضح أنه لا نفقد شيئًا عندما نستبدل فكرة الاستمرار المطلق بمفهوم الثبات النسبي.

بالإضافة إلى ذلك، فإن الفكرة القائلة بأن الشيء دائمٌ تمامًا هي فكرة لا يمكن أبدًا إثباتها تجريبيًّا،لأنه لا يمكن لأحدٍ أن يكون متأكدًا من أنه حتى لو لم تتغير أشياء معينة في مجالٍ معينٍ من التجربة، فلن تتغير أبدًا، حيث يتوسع مجال تجربتنا (كما حدث بالفعل مع كل شيء كان يُعتقد أنه دائمٌ تمامًا).

من الواضح إذن أنه من خلال النظر إلى الكيانات والهياكل على أنها ثابتة نسبيًّا، مع مجالٍ غير معروف حتى الآن من الثبات، فإننا نتجنب وضع افتراضاتٍ غير ضرورية وغير قابلة للإثبات فيما يتعلَّق بثباتها المطلق. مثل هذا الإجراء له مزايا هائلة في البحث، لأن أحد المصادر الرئيسية للصعوبة في تطوير مفاهيم جديدة -ليس فقط في الفيزياء، ولكن أيضًا في العلم بأكمله- هو الميل إلى التمسُّك بالمفاهيم القديمة خارج مجال صلاحيتها؛ من الواضح أن هذا الاتجاه محسّن من خلال عادتنا فيما يتعلق بالكيانات والهياكل التي نعرف أنها دائمة تمامًا في خصائصها.

XXV. إثبات خطأ النظريات

يمكن توضيح هذه المفاهيم بشكلٍ أكبر من خلال النظر في نقطة أكدها بشدة البروفيسور بوبر Professor Karl Popper، وهي أن إثبات خطأ النظرية، من نواحٍ كثيرة، أكثر أهمية من التحقُّق منها. على سبيل المثال، فإن إثبات خطأ تحويلات جاليليو أدَّى في النهاية إلى التغييرات الثورية المصاحبة لتطور نظرية النسبية. وبالمثل، فإن التجارِب التي أظهرت خطأ تنبؤات الفيزياء الكلاسيكية للأطياف الذرية، والتأثير الكهروضوئي، وتوزيع إشعاع الجسم الأسود أدَّت إلى المزيد من التغييرات الثورية التي أحدثتها النظرية الكمومية. والأدلة الأحدث التي تشير إلى أن الأفكار المتعلقة بوجود جسيماتٍ أولية «دائمة» تبدو خاطئة، تضع الأساس لتغيير مفاهيمنا الأساسية التي ستجعل حتى التغييرات التي أدخلتها النسبية ونظرية الكم تبدو صغيرة نسبيًّا.

من الواضح أن إثبات خطأ النظريات القديمة كان له بالفعل دورٌ رئيسي في تطوير الفيزياء (وفي الواقع العلم بأكمله). ومع ذلك، فإن القليل من التفكير في هذه المشكلة يُظهِر أن مثل هذه العملية هي جزءٌ ضروري من تطور العلم، وأنه من أجل السماح لهذا التطور أن يحدث بشكلٍ صحيحٍ، فمن الضروري بالفعل أن تكون النظريات العلمية قابلة للدحض[1].

سنفترض مثلًا النظرية البطلمية، التي سمحت بإضافة مجموعات

(1) لمناقشة أكثر تفصيلاً لوجهة نظر البروفيسور بوبر حول هذا السؤال، راجع KR Popper، Conjectures and Refutations، Routledge and Kegan Paul، London، 1963.

عشوائية من التدوير بطريقة تجعلها قادرة على استيعاب أي مجموعة من الملاحظات التي يمكن تصورها. لا يمكن دحض هذه النظرية من خلال أي مجموعة من التجارب على الإطلاق، لكن النظريات التي لا يمكن دحضها لا تقول في الحقيقة أيَّ شيء جديدٍ عن العالم لقدرتها على تكييف ذاتِها على أي اكتشافاتٍ واقعية مهما كانت. مما يعني أنه لا تستبعد أي احتمالٍ على الإطلاق، وبالتالي ليس لديها آثارٌ محددة جيدًا فيما يتعلق بما هو غير معروفٍ حتى الآن. في أحسن الأحوال، فإنها تشكِّل طريقة مفيدة لتلخيص الحقائق الموجودة. من ناحية أخرى، لا يمكن تعديل نظرية مثل نظرية نيوتن أو أينشتاين لتلائم النتائج التجريبية العشوائية، وبالتالي فهي قادرة على أن تؤدي إلى تنبؤاتٍ محددة حول الظواهر التي لم تكن معروفة عند صياغة النظرية لأول مرة. إذا كانت هذه النظرية خاطئة، فيمكن بالتالي التحقُّق منها وإثبات أنها خاطئة. هذا الاحتمال لا ينفصل عن قدرتِها على قول شيء جديدٍ عن العالم، وبالتالي تكوين نظرية علمية حقيقية (حقيقية بمعنى أنها توفر معرفة صحيحة تتجاوز الحقائق التجريبية التي ساعدت في اقتراحها).

النظرية التي تحتوي على محتوى تنبؤي حقيقي فإنها «تضع المشنقة حول رقبتها»، ولكن إذا فعلت ذلك فمن المحتمل أن «تُشنَق» في الوقت المناسب. في الواقع، هذا ما حدث في النهاية للعديد من النظريات مثل ميكانيكا نيوتن، التي تم تأكيدها إلى حدٍّ ما ولكن تبيَّن بعد ذلك أنها خاطئة. علاوة على ذلك، يبدو من المرجح أن هذا سيكون مصير كل النظريات في النهاية. وهكذا فإن نظرية النسبية الخاصة لأينشتاين لا

يمكن أن تكون صحيحة تمامًا، فقط لأنها تقترب من النظرية العامة. وأدرك أينشتاين ضمنيًّا أنه حتى النظرية العامة ليست صحيحة تمامًا عندما انخرط في بحثه عن «نظرية المجال الموحد» العمومية التي كان يأمل أن تحتوي على النسبية العامة، والديناميكا الكهربائية، ونظرية الجسيمات الأولية، كتقريبٍ وحالاتٍ محدودة[1]. علاوة على ذلك، كما لاحظنا بالفعل، من الواضح أن الميكانيكا الكلاسيكية خاطئة، بمعنى أنها حالة تقريبية ومحددة لميكانيكا الكم، وهي نوعٌ مختلفٌ تمامًا من النظرية. والآن يبدو من المحتمل أن نظرية الجسيمات الأولية الحالية، جنبًا إلى جنب مع ميكانيكا الكم، ستظهر أنها خاطئة، بمعنى أنها مقاربة لبعض النظريات غير المعروفة من نوعٍ جديدٍ لا يزال أكثر عمومية.

إذا كانت النظريات العلمية المفيدة ليست فقط قابلة للدحض ولكن من المحتمل جدًّا أيضًا أن تكون خاطئة بالفعل، فماذا يمكن أن يعني البحث عن الحقيقة من خلال البحث العلمي؟ ألا تكشف أطروحة البروفيسور بوبر هكذا عن نوعٍ عميقٍ من الارتباك في الهدف الكامل للعلم وأهدافه ومقاصده وإجراءاته وإنجازاته؟

تعود جذور هذه المشكلة إلى موقفٍ معينٍ تجاه الحقيقة في العلم، التي أصبحت مثل مفاهيم المكان والزمن المطلقين والجوهر الدائم، معتادة لدرجة أنها قد تبدو حتمية. يعتبر هذا الموقف القوانينَ

(1) تذكر أيضًا كما ورد في الفصل الثاني والعشرين أن هناك أسبابًا أخرى للاشتباه في أن تكون هناك حدودٌ لصلاحية نظرية النسبية.

العلمية الأساسية حقائق مطلقة، بمعنى أن مثل هذه القوانين يفترض أنها تحافظ تمامًا (أي من دون تقريبٍ) في مجالات غير محدودة، تحت ظل جميع الظروف الممكنة، بحيث لا تخضع أبدًا للتعديل والتناقض والتغيير الجوهري. على سبيل المثال، قبل ظهور النسبية والنظرية الكمومية، كانت قوانين نيوتن للحركة، جنبًا إلى جنب مفاهيمه عن المكان والزمن، تعتبر حقائق مطلقة من هذا النوع. في وقتٍ لاحقٍ، ربما بدأ العديد من العلماء في اعتبار النسبية والنظرية الكمومية حقائق «مطلقة»، بينما شعروا أن ميكانيكا نيوتن كانت نسخة خاطئة من مثل هذه «الحقائق الأبدية».

من أين أتت فكرة الحقيقة المطلقة؟ من الواضح أنه على الأقل منذ العصور الوسطى كانت هذه الفكرة سائدة تمامًا. على سبيل المثال، كان يُنظر إلى مذاهب أرسطو على أنها حقائق مطلقة، وإذا عدنا إلى الوراء في الزمن، يبدو واضحًا أنه لا يوجد مجتمعٌ معروفٌ في السجلات التاريخية لم يقبل بعضَ أنواع العقائد أو المفاهيم أو الأفكار كحقائق مطلقة. وهكذا، يبدو أن البحث عن الحقيقة المطلقة يعتمد على استمرار تقليد له جذور عميقة جدًّا في الماضي البعيد. ولكن، كما هو الحال مع الجوهر الدائم، لم يواجه الجنس البشري أبدًا أي بيانات عامة لم تكن تقريبية، ولها مجالاتٌ وشروطٌ محدودة للصلاحية. علاوة على ذلك، حتى لو كانت هناك بياناتٌ عامة لم يثبت أنها محدودة الصلاحية، فلن تكون هناك (كما في حالة فرضية المواد الدائمة) طريقة للتأكد من أنها ستستمر ثم أمكن التحقق منها حيث توسع النطاق قيد النظر إلى ما لا

نهاية. وبالتالي، فإن فكرة الحقيقة المطلقة لا تستند إلى الحقائق، ولا يمكن في الواقع إثباتها من خلال أي تجارِب.

بالإضافة إلى ذلك، من الواضح أن الافتراض بأن قانونًا ما صحيحٌ تمامًا ليس ضروريًّا أبدًا، لأن أي قوانين يمكن تأكيدها على أنها حقائق مطلقة يمكن تأكيدها فقط مع قدرٍ أكبر من الإخلاص لوقائع القضية، باعتبار أنها علاقاتٌ قائمة في مجالٍ ما. يمكن الإشارة إلى مدى مثل هذا المجال عند إثبات خطأ القانون في نهاية المطاف في مزيدٍ من البحث والتحقيق واستبدال قانون جديد به أو مجموعة من القوانين التي تحتوي على القوانين الأقدم كقضايا تقريبية أو مقيدة. على سبيل المثال، أثبتت ميكانيكا نيوتن، كما رأينا، فشلها حين أمكن قياس السرعة مقارنةً بالضوء، حيث توجب استبدالها بنظرية أينشتاين، التي أظهرت أن مظلة قانون نيوتن صالحة في حالة السرعات المنخفضة بدرجة كافية.

ومع ذلك، لا ينبغي لنا الافتراض أنه يمكننا في نهاية المطاف معرفة مجال صلاحية قانون معين بشكلٍ كاملٍ ومثالي، وبالتالي الحصول على نوعٍ آخر من الحقيقة المطلقة من شأنها أن تؤكد قانونًا معينًا قابلًا للتطبيق دائمًا -على الأقل في مجالٍ محددٍ ومُحدود جيدًا-. لأن معرفتنا بهذا المجال هي نفسها غير مكتملة. وهكذا، فيما يتعلق بقوانين نيوتن، فقد وجد أنه حتى في مجال السرعة المنخفضة المحدد بنظرية النسبية، فإن هذه القوانين تفشل في المستوى الذري، حيث تكون النظرية الكمومية ضرورية، وربما على مقياس الفضاء خارج المجرة والزمن، وكذلك في الأجزاء الداخلية للنجوم فائقة الكثافة، حيث تصبح التأثيرات النسبية

العامة مهمة. نظرًا إلى أنه لا يمكننا التأكد من عدم وجود قيودٍ أخرى غير معروفة حتى الآن على قوانين نيوتن، التي سيتم الكشف عنها في البحث المستقبلي، يمكننا فقط أن نقول إنه من الضروري دائمًا توخي الحذر من إمكانية اكتشاف قيودٍ إضافية على المجال القابل لتطبيق أي قانون معين حتى بعد الكشف بالفعل عن بعض القيود من هذا النوع.

مع ذلك، يبدو من الواضح أنه ما دام أمكن اكتشاف القوانين التي لها مجال صلاحية يتجاوز الحقائق التي تستند إليها بأي شكلٍ من الأشكال، فستسنح الظروف التي يمكن فيها إجراء البحث العلمي بالطرق المستخدمة حاليًا. من الواضح أن مثل هذا البحث لا يتطلب أن تكون أيٌّ من هذه القوانين حقائقَ مطلقة، بشرط التأكُّد من صحتها بشكلٍ موضوعي في مجالاتٍ معينة واختبار خطئها بالمثل في مجالاتٍ أوسع.

فيما يتعلَّق بمفهوم القانون الموصوف أعلاه، يُنظر إلى أطروحة البروفيسور بوبر حول الحاجة إلى قابلية تكذيب النظريات على أنها تنشأ بشكلٍ طبيعي تمامًا. في الوقت الحالي، لم نعد بحاجة إلى افتراض أن النظرية العلمية إما صحيحة تمامًا، وبالتالي «حقيقة أبدية»، وإما أنها خاطئة تمامًا، وبالتالي ليس لها أي أهمية على الإطلاق. بدلًا من ذلك، يُنظر إلى قانون الطبيعة -من خلال طريقتنا في فهمه- للتعبير عن حقيقة أنه مجموعة معينة من التغييرات التي تحدث في الطبيعة، ويقابلها مجموعة من التغييرات في وجهات النظر والأطر المرجعية وأنماط التحقق، وما إلى ذلك؛ يمكن اكتشاف بعض العلاقات العامة، التي تظل كما هي طوال كل هذه التغييرات، لكن هذا الثبات يجب أن يُنظر إليه

على أنه نسبيٌّ فقط، بمعنى أنه كلما توسَّع النطاق، فإننا نترك مجالًا في أذهاننا لفكرة أن القانون قد ينهار. وهذا يعني أنه قد يُختبَر خطؤه في بعض التجارب المستقبلية، نحن لا نلزم أنفسنا متى وأين وكيف سيتم إثبات خطئه ولكن نترك الأمور لتظهرها التطورات المستقبلية. النقطة الأساسية هي فقط أن أذهاننا ليست منغلقة على هذا السؤال. بدلًا من ذلك، نحن مستعدون دائمًا لتقبُّل خطأ النظرية عندما يحدث، من دون أن نواجه في ذلك الوقت «أزمة» تحطيم مفاهيمنا عن الحقائق المطلقة و«الحقائق الأبدية» وإسقاطها مرة أخرى، كما حدث دائمًا منذ أن بدأ الإنسان سباق بحثه عن هذا النوع من الحقيقة.

على الرغم من أهمية قابلية النظرية لإثبات خطئها، فمن الواضح أننا لا نقترح نظريات لمجرد إظهار أنها خاطئة. بدلًا من ذلك، كما أشرنا بالفعل، يجب أن تكون النظرية العلمية المقبولة أيضًا قادرة على تحمُّل عددٍ معين من الاختبارات التجريبية والنقد، التي تظهر أنها تؤدي إلى استنتاجاتٍ حقيقية، تتجاوز الحقائق التي كانت تستند إليها النظرية في الأصل. بالطبع، قد تحتوي بعض الحالات على مساحة صغيرة من صحة الاستدلال والتنبؤ بحيث تكون إما تافهة وإما ذات أهمية ضيقة إلى حدٍّ ما (على سبيل المثال، قلم رصاص على الطاولة). القانون العلمي الحقيقي هو القانون الذي له مجالٌ واسعٌ من الصحة إلى حدٍّ ما، لذا فإن أحد أهداف البحث العلمي هو إيجاد قوانين ذات أوسع مجالٍ صحيحٍ ممكنٍ.

في الواقع، من دون تطوير مثل هذه القوانين، سيكون العلم كما

نعرفه شبه مستحيلٍ. بالنسبة إلى قدرٍ كبيرٍ من البحث العلمي يجب أن يكون قائمًا على الجهد المبذول لإثبات أن النظرية التي أمكن تأكيدها جيدًا بالفعل متاحة داخل مجالٍ واسعٍ، بحيث يمكن الاستمرار في تطبيقها بدقة أكبر وفي أنواعٍ جديدة من المشكلات باستمرارٍ. وهكذا تساعد النظرية من هذا النوع في تحديد أنواع الأسئلة التي من المحتمل أن تكون ذات صلة في تحقيقاتنا عن الطبيعة. في غياب مثل هذه النظرية، يتراجع البحث إلى نوعٍ من التجميع العشوائي أو غير المنضبط للحقائق المعزولة، ومعظمها -بشكلٍ عامٍّ- غير وثيق الصلة بعضه ببعض أو بالكشف عن قوانين الطبيعة.

ومع ذلك، سيحدث في النهاية، كما رأينا، أن الجهود الإضافية لتأكيد نظرية ناجحة من النوع الموصوف أعلاه ستؤدي في النهاية إما إلى إثبات خطئها وإما إلى فرضيات مخصصة عشوائية، تنطوي على درجة لا تطاق من الارتباك والغموض، وهو في جوهره يعادل تقريبًا إثبات خطأ النظرية. تساهم مثل هذه النتيجة في تحديد مجال صلاحية النظرية المعنية، ولكنها أكثر من ذلك، توفر عادةً أدلة أو مؤشراتٍ مهمة، مما يساعد على تطوير قوانين أحدث لها مجالات أوسع للصلاحية مع دمج تنبؤات القوانين القديمة التي من المعروف أنها صحيحة (من حيث التقريبات المناسبة كحالاتٍ مقيدة). لا تُظهر هذه القرائن الأشكال التي يجب أن تتخذها القوانين الأحدث بشكلٍ مباشرٍ. يعتمد العثور على مثل هذه القوانين على خطوة إبداعية من قبل بعض العلماء، والتي يُرى فيها طريقة جديدة للنظر إلى الأشياء (فرضية جديدة، فكرة جديدة، إلخ)

تحل المشكلات التي كانت غير قابلة للحل من وجهة النظر القديمة. ومع ذلك، فإن إمكانية مثل هذه الخطوات الإبداعية الجديدة تعتمد على خلفية التطور العلمي حيث يعمل نشاط العلماء في تأكيد وإثبات خطأ النظريات القديمة معًا بطريقة تكميلية، باعتبارها جوانب ضرورية أيضًا لتطوير المعرفة العلمية.

بعد أن أثبتت نظرية جديدة أنها تحتوي على محتوى تنبؤي إضافي يتجاوز الحقائق التي ساعدت على اقتراحها، فإنها تميل بدورها في الاضطلاع بدور إطار عملٍ مقبولٍ، سيؤدي تطويره وصياغته إلى أنواع الأسئلة التي يحتمل أن تكون ذات صلة في مزيدٍ من التحقيق في الطبيعة. في نهاية المطاف، فإن النظرية الجديدة تعاني من مصير أسلافها[1]. ومن الواضح أن اكتشاف الحقيقة في العلم هو عملية لم تنته أبدًا، وهي ليست بحثًا عن مجموعة ثابتة ومحددة جيدًا من المبادئ التي تشكِّل معرفتها هدفًا نهائيًّا للتحقيقات العلمية. علاوة على ذلك، فإن اكتشاف الحقيقة ليس عملية اقتراب من مجموعة من هذه المبادئ خطوة بخطوة، كحدٍّ لا يمكن الوصول إليه أبدًا، ولكن يمكن الاقتراب منه بطريقة تجميعية. كما لا يمكن مقارنة الحقيقة ببعض الأسس التي أمكن جمعها شيئًا فشيئًا حتى تصبح كومة أو «كنزًا» من الحقائق يتزايد باستمرارٍ.

من الواضح أن فكرة الحقيقة المطلقة التي لا نعرفها ومع ذلك نقترب منها باستمرارٍ هي فكرة غير قابلة للإثبات وغير ضرورية مثل

(1) لمزيدٍ من المناقشة حول هذا النوع من التطور للنظريات العلمية، انظر: T.S.Kuhn, "The Structure of Scientific Revolutions," International Encyclopedia of Unified Science, Vol. 11, No. 2, University of Chicago Press, Chicago, 1962.

فكرة أننا نمتلك بالفعل -أو يمكننا أن نعرف تمامًا في النهاية- هذه الحقيقة المطلقة. كل ما نعرفه في الواقع وكل ما نحتاج إلى قوله هو أن كل مجموعة من القوانين العلمية لها بعض مجالات إثبات صحتها غير المعروفة بشكلٍ كاملٍ. ليس من الضروري أن نلزم أنفسنا بأي شكلٍ من الأشكال بفرضيات حقيقة مطلقة لا نعرفها ولا يمكننا معرفتها ولكننا نفترض أنه يمكن الاقتراب منها. بالإضافة إلى كونه غير ضروري ولا أساس له، فإن مثل هذا الالتزام يميل إلى إرباكنا لأنه يشير إلى أن المسيرة نحو الحقيقة ستكون على خطٍّ ما، أو مجموعة من الخطوط، التي تستمر في الاتجاهات السابقة بطريقة تجعل الاختلاف بين تنبؤاتنا والقوانين والحالة الحقيقية للأمور تتضاءل دائمًا. لكن التقدم الفعلي للعلم لا يشير إلى مثل هذه العملية من التقارب المطرد. بدلًا من ذلك، كما في حالة النسبية والنظرية الكمومية، فإنه يُظهر أنه، بشكلٍ عام، تسير الأفكار القديمة على مسارٍ خاطئ تمامًا عندما تتجاوز مجالاتها المناسبة، وأن هناك حاجة لأفكارٍ جديدة جذريًّا، تتعارض مع الأفكار القديمة وفي الوقت نفسه تحتويها بمعنى ما كحالاتٍ مقيدة وتقريبية، لذا فإن فكرة اتباع نهجٍ ثابتٍ ومتقاربٍ تجاه نوعٍ محددٍ من الحقيقة المطلقة هي في الواقع فكرة مضللة للغاية.

وبالطريقة نفسها فإن فكرة التراكم المطرد لأجزاءٍ من الحقيقة المطلقة تتعارض أيضًا مع وقائع قضية البحث العلمي. تشير هذه الفكرة إلى أنه على الرغم من أننا لا نعرف الحقيقة المطلقة بأكملها، فإن لدينا أجزاءً منها، وهي صحيحة تمامًا ومستقلة عن أجزاءٍ أخرى ستكتشف

لاحقًا. ولكن كما رأينا، فإن كلَّ جزءٍ من هذا البحث (على سبيل المثال، ميكانيكا نيوتن) له مجالٌ معين فقط من إمكانية إثبات صحته مثل حدوده الكاملة والدقيقة غير معروفة تمامًا، بمعنى أن الاكتشافات اللاحقة قد تتعارض دائمًا مع القوانين السابقة كما ظهر في بعض الحالات حتى الآن بطرقٍ غير متوقعة. لذلك، لا يمكن بأي حالٍ من الأحوال اعتبار «حقيقة جزئية» معينة حتى على أنها نوعٌ من «لبنة» يمكن إضافتها إلى الآخرين، بحيث يمكن اعتبار البشرية كأنها تبني بنية تتصاعد باستمرارٍ للحقيقة، يمكن دائمًا الاعتماد على كل جزءٍ منها (على الأقل في بعض المجالات التي حددت بالكامل بالفعل).

وهكذا يُنظر إلى الحقيقة على أنها تُدرك بطريقة ديناميكية بشكلٍ أساسي، بمعنى أن معرفتنا بها يمكن أن تخضع لتطوراتٍ جديدة بشكلٍ أساسي في أي وقتٍ، وتطورات تتعارض مع البنية القديمة للأفكار بطرقٍ غير متوقعة، وتحتوي على ميزاتٍ جديدة غير متوقعة بشكلٍ أساسي. في كل مرحلة تحتوي هذه المعرفة على شكل مجموعة من النظريات التي أظهرت حتى الآن القدرة ليس فقط على شرح الحقائق المعروفة عند اقتراحها لأول مرة، ولكن أيضًا التي تنبَّأت بشكلٍ صحيحٍ بمجالاتٍ واسعة من الظواهر الأخرى تتجاوز هذه الحقائق. قد يكون من المتوقع أن تظل معظم هذه النظريات صالحة في مجموعة من التجارب الأخرى، التي صُمِّمت لتطبيقها والتعبير عنها ومساءلتها، واختبارها في مجالاتٍ أوسع. ولكن من وقتٍ لآخر، سيتم اختبار خطأ أجزاءٍ من الهيكل النظري بأكمله، سواء كانت كبيرة أو صغيرة، مما يؤدي إلى

ضرورة تطوير نظريات جديدة. في هذه العملية لا يوجد تراكمٌ دائمٌ للنظريات، ولا يوجد نهجٌ لأي شكلٍ معينٍ كحدٍّ متقاربٍ، ما تحقق في أي مرحلة هو، بالطبع ما تم تسجيله في نهاية المطاف في المجلات والكتب المدرسية، مما يجعله متاحًا للتطبيق التقني وللدراسة وللتطوير والنقد من قِبَل المحققين. ولكن في مواجهة المشكلات الجديدة التي تثيرها النظريات القديمة دائمًا، فإن الحقيقة العلمية لها حياتها الأساسية في نوعٍ من «المنطقة النامية» حيث يلتقي الإنسان دائمًا بما لم يكن معروفًا له حتى الآن.

سننتقل إلى هذا السؤال بمزيدٍ من التفصيل في القسم A-4 من الملحق.

* * *

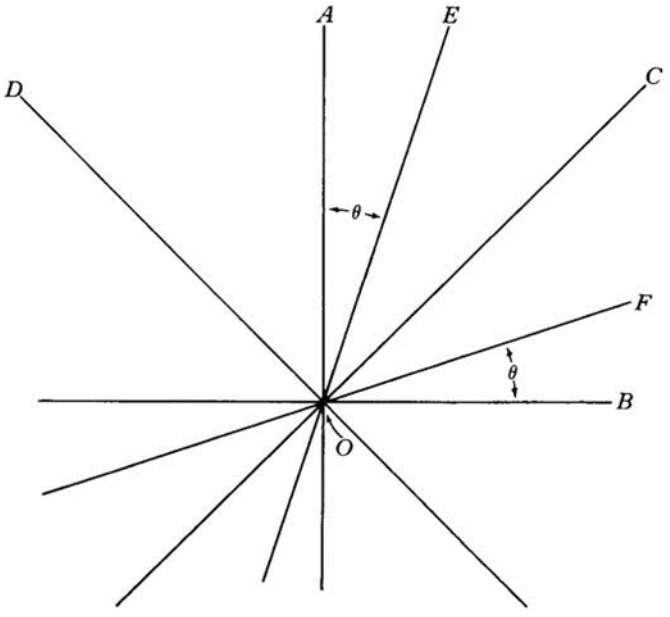
XXVI. مخطط مينكوفسكي Minkowski Diagram وحساب K للتفاضل والتكامل K Calculus

لقد ناقشنا حتى الآن مفاهيم أينشتاين النسبية للمكان والزمن من وجهة نظرٍ فيزيائية ورياضية، تعتمد المعالجة الرياضية إلى حدٍّ كبيرٍ على الصيغ (3-14) و(4-14) لتحويلات لورنتز. سنقدم الآن طريقة هندسية طوَّرها مينكوفسكي للنظر في معنى نظرية النسبية، مما يساعد على إبراز أهمية النظرية في ضوءٍ مختلفٍ.

نبدأ بما يُسمَّى «مخطط مينكوفسكي» للمكان والزمن (انظر الشكل 1-26). عند مناقشة هذا الرسم التخطيطي، نأخذ في الاعتبار أولًا وجود مراقب، في حالة سكونٍ في المختبر. نحن نمثِّل إحداثي الوقت كما أمكن قياسه بواسطة هذا المراقب بواسطة الخط OA وأحد إحداثيات الفضاء (z) بواسطة الخط OB. من حيث المبدأ، يجب أن ندرج إحداثيات الفضاء الأخرى، x وy، حتى يكون الشكل رباعي الأبعاد. ومع ذلك، يكفي للعديد من الأغراض التعامل مع z وt، بحيث يكفي رسم تخطيطي ثنائي الأبعاد.

تشير كل نقطة في هذا الرسم البياني إلى حدثٍ (مثل وميض إشارة ضوئية)، يجب أن يحدث كل حدثٍ حقيقي خلال فترة زمنية معينة ويحتل منطقة معينة من الفضاء. لكن، إذا كان الفاصل الزمني قصيرًا جدًّا وكانت منطقة المكان صغيرة بالمقابل، فقد نستبدل الحدث الممتد الفعلي عن طريق التجريد المبسط لنقطة الحدث point event.

شكل 1-26



دع النقطة O تمثِّل هذا الحدث، الذي يحدث عند الزمن $t = 0$ لمراقبٍ يقع عند $z = 0$. إذا كان المراقب في حالة سكونٍ بالنسبة إلى المختبر، فإن الأحداث التي تصف ما يحدث له خلال فترة من الزمن ستقع على خط OA، وهو محور t في مخططنا. مثل هذا الخط يُسمَّى خط العالم world line . يمثِّل الخط OB بعد ذلك جميعَ الأحداث المتزامنة مع O، كما قاسها هذا المراقب.

سيكون من المناسب اعتماد وحداتٍ زمنية بحيث تكون سرعة الضوء **c** هي الوحدة. يمكننا القيام بذلك عن طريق $\tau = ct$. ثم إذا افترضنا أن المحور OA يمثِّل الوقت من حيث وحدات τ، فإننا نرى أن

مسارات أشعة الضوء $z = \pm \tau$ يمثِّلها الخطَّان OC وOD، عند 45 درجة بالنسبة إلى المحاور z و τ.

بالطبع هناك العديدُ من الاتجاهات الممكنة لشعاع الضوء في ثلاثة أبعاد، بحيث يتم تمثيل المجموعة الكاملة من أشعة الضوء عبر O بواسطة مخروط، ثم يتوافق الخطَّان OC وOD مع تقاطع هذا «المخروط الضوئي» مع المستوى $z\text{-}\tau$.

الآن سنفترض أن هناك مراقبًا ثانيًا Ω_2 يتحرك في سفينة صاروخية بسرعة v بالنسبة إلى المختبر، مساره $z = (v/c)\tau$، ثم يحدد خط العالم الخاص به OE مع ميلٍ بالنسبة إلى المحور τ، يساوي ظل الزاوية: $\theta = v/c$tan. وفقًا لنتائج الفصل الثالث عشر، سينسب هذا المراقب التزامن إلى مجموعة أحداثٍ مختلفة عن تلك التي يعتبرها المراقب متزامنة Ω_1، المثبت في المختبر. في الواقع، إذا كانت τ'وz' هي الإحداثيات التي قاسها Ω_2، فإن القيمة $\tau' = 0$ تحدد الأحداث التي يعتبرها متزامنة. لكن من المعادلة (14–3) نرى أن $\tau' = ct' = 0$ تعني أن $t = (v/c^2)z$، أو $\tau = (v/c)z$. يُشار إلى هذا الموضع بخط OF، مائل بزاوية $\theta = \tan^{-1}(v/c)$ بالنسبة إلى محور z.

وفقًا لمبدأ النسبية، كما هو موضحٌ في الفصلين السادس عشر والسابع عشر، لا يوجد نظام إحداثيات «مفضل»، بحيث تشكل جميع القوانين الأساسية للفيزياء نفس العلاقات في كل إطارٍ مرجعي. لذلك يجب أن يكون من الصحيح تمامًا استخدام مخطط مينكوفسكي، حيث يعتبر مراقب السفينة الصاروخية في حالة السكون في أثناء تحرك

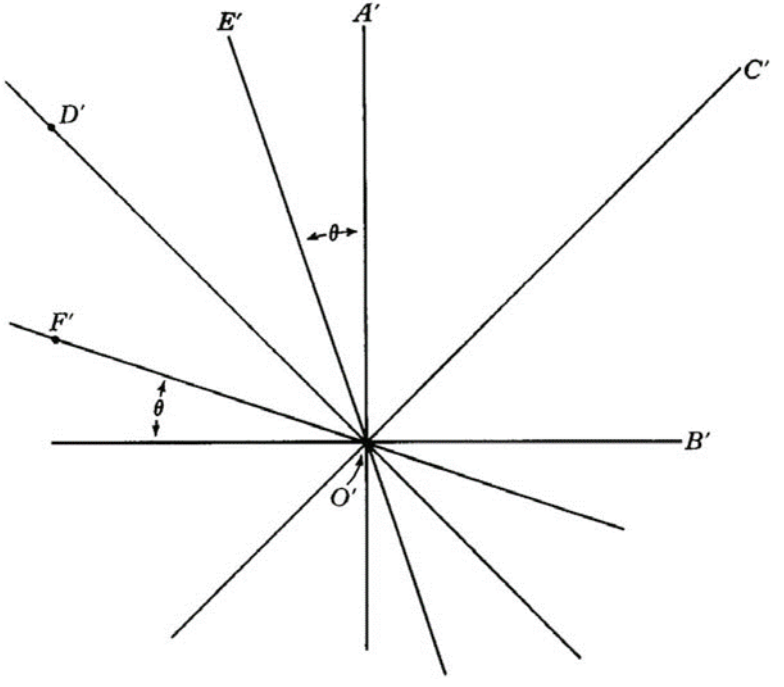
المختبر بسرعة –v بالنسبة إلى السفينة. نوضح هذا الاحتمال في الشكل 26–2، حيث يمثِّل O'A' الخط العالمي لسفينة الصواريخ، ويمثِّل O'B' مجموعة الأحداث التي يعتبرها المراقب في سفينة الصواريخ متزامنة. ثم يتم إعطاء الخط العالمي لمراقب المختبر بواسطة O'E'، في حين أن الأحداث المتزامنة مع O' لمراقب المختبر تكون على الخط O'F' (المقابلة للسرعة v- للمختبر بالنسبة إلى سفينة) واحدة من أبسط الطرق وأكثرها أناقة لمواصلة تطوير معنى مبدأ النسبية من حيث مخطط مينكوفسكي هي بمساعدة ما يُسمَّى «حساب K للتفاضل والتكامل (اختصارًا حساب (K)». يبدأ حساب التفاضل والتكامل[1] بالنظر في مجموعة من المراقبين، كل منهم مزود بساعة متكافئة، ومع مجموعة رادار قادرة على إرسال نبضات يتم توقيتها بواسطة هذه الساعة، بحيث يفصل بينها فتراتٌ منتظمة. إلى جانب وجود جهاز إرسال رادار، من المفترض أن يكون كل مراقب مزودًا بجهاز استقبال، يمكنه تسجيل أوقات الوصول (كما قاسها على ساعته)، وكلا من إشاراته الخاصة عندما تنعكس عائدة من الأشياء الموجودة في بيئته ومن الإشارات المنبعثة من المراقبين الآخرين.

سنبدأ بافتراض أننا في حالة سكونٍ في المختبر، الذي يقوم بإرسال إشارات على فترات متباعدة بانتظام N_1 وN_2 وN_3، إلخ، كما هو موضحٌ في الشكل (3-26). تتحرك هذه الإشارات بسرعة الضوء، وتستقبل بواسطة مراقب الصاروخ (على الخط العالمي OE) على فترات مشار

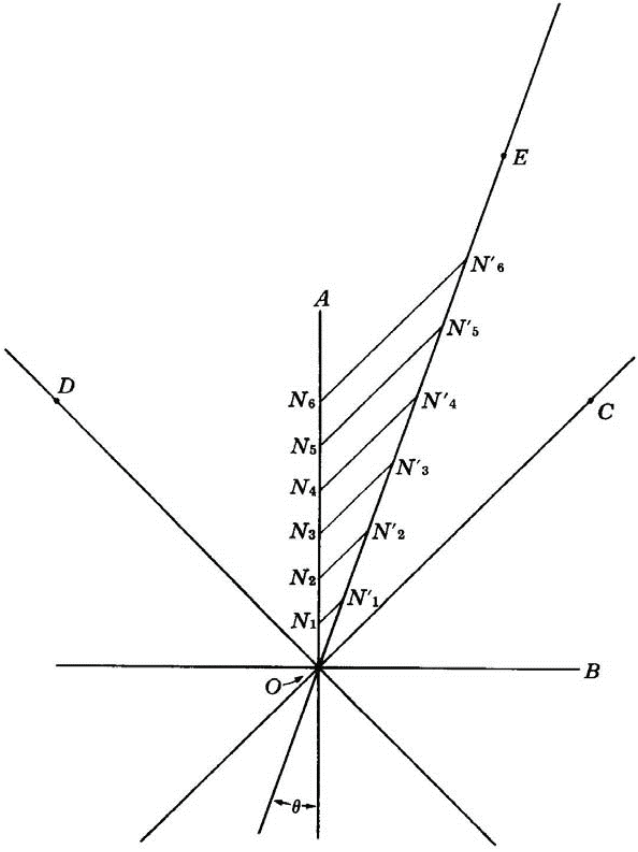
(1) قدَّم هذا الحساب للتفاضل والتكامل العالم إتش بوندي H.Bondi في محاضرة عامة.

إليها بواسطة N_3 ،N_2 ،N_1، إلخ. لنفترض أن T_0 هو الوقت بين النبضات، كما قاسته ساعة المختبر. الآن سيقيس مراقب الصاروخ وقتًا آخر T مثل الفترة الفاصلة بين استقبال النبضات المتتالية. بشكلٍ عامٍّ، يجب أن يختلف T وT_0 بشكلٍ واضحٍ. حتى في النظرية نيوتن لن تكون T هي نفسها T_0، بسبب انزياح دوبلر، ومع ذلك، في نظرية النسبية، سنرى أن النسبة دالة مختلفة لسرعة السفينة الصاروخية عمَّا هي عليه في نظرية نيوتن.

شكل 2-26



شكل 26-3



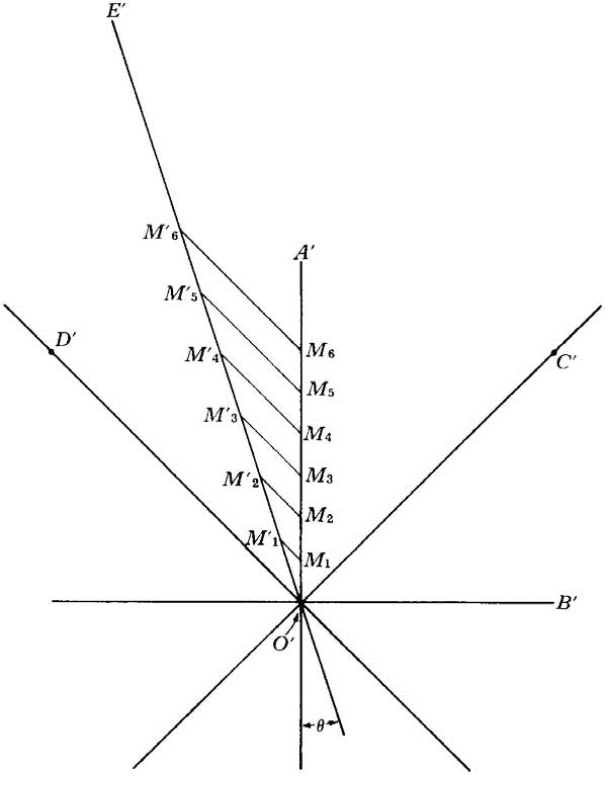
سيصبح لدينا المعادلة التالية:

$$k = \frac{T}{T_0} \qquad (26-1)$$

الآن، وفقًا لمبدأ النسبية، يجب أن يكون هناك احتمالٌ مماثلٌ لتجربة مماثلة، حيث يرسل مراقب الصاروخ نبضاتٍ منتظمة ،M_1 ،M_2 ،M_3، إلخ، كما هو موضحٌ في الشكل 4-26، الفاصل الزمني بين هذه النبضات هي T_0، كما تقاس بساعته. يستقبل النبضات مراقب المختبر في M_1 وM_2 وM_3 وما إلى ذلك، مع وجود فاصلٍ بينها نشير إليه بواسطة T'. ثم نحدد النسبة:

$$k' = \frac{T'}{T_0} \qquad (26-2)$$

شكل 4-26



التي سنحسبها حاليًّا بمساعدة المزيد من الإثبات الرياضي.

لاحظ أنه في الشكلين 3-26 و4-26، قمنا برسم الخطوط M_1M_1'، M_2M_2'، إلخ (وأيضًا N_1N_1' وN_2N_2'، إلخ)، التي تشير إلى مسارات إشارات الراديو، مع ميل 45 درجة، مما يشير إلى أنه داخل كلا الإطارين تكون سرعة الضوء لها القيمة نفسها c. هذه هي الطريقة التي نجسد بها داخل مخطط مينكوفسكي الحقائق المرصودة وهي أن سرعة الضوء ثابتة، وذلك بالنسبة إلى جميع المراقبين.

من الواضح أن التجارب التي أجريت في الإطارين متكافئة، ويجب وصفها بشكلٍ متناظرٍ، عندما يُحال كلٌّ منها إلى إطار المراقب المقابل. وهكذا، في كل تجربة ترسل إشارات منتظمة على فترات زمنية T_0، كما قاستها الساعة التي تتحكم في انبعاث الإشارات المعنية. في كل تجربة، تتحرك الإشارات بسرعة c، ويستقبلها مراقب يتباعد عن المصدر بسرعة v. كلما نفَّذ مراقبان مختلفان إجراءات مكافئة، فإن القوانين السارية في هذه الإجراءات يجب أن تكون هي نفسها، نستنتج إذن أن النسبة $k' = T'/T_0$ يجب أن تكون هي نفسها النسبة، أو $k = T/T_0$ بحيث:

$$k = k' \qquad (26-3)$$

ومع ذلك، يجب أن نتذكر أن ما ورد أعلاه صحيحٌ فقط في النظرية النسبية، حيث يكون للضوء السرعة نفسها في كل إطارٍ مرجعي. وهكذا في ميكانيكا نيوتن، تمثل أشعة الضوء كخطوطٍ عند 45 درجة على المحاور فقط في إطار ساكن في الأثير، بحيث لا يكون المنطق الذي

أظهرنا من خلاله المساواة بين k و k' قد طبق.

يمكننا الآن اشتقاق قيمة **k** كدالة للسرعة النسبية v للراصدين. للقيام بذلك، نفترض تجربة يتبادل فيها مراقب المختبر (المشار إليه بالخط العالمي OA في الشكل 5-26) الإشارات مع المراقب المتحرك (مع الخط العالمي OE). لنفترض أنه في بداية التجربة، مرَّ الراصدان بالقرب من بعضهما، في المكان والزمن المقابلين لنقطة الأصل O. ثم، لأن الإشارة تستغرق وقتًا ضئيلًا لتنتقل بين المراقبين في هذه اللحظة، سيكونان قادرين على مزامنة ساعاتهما. من أجل التبسيط، نفترض أنَّ كلا المراقبين قد حدَّدا ساعاتهما بحيث تتوافق اللحظة O طبقًا للمعادلة التالية:

$$t = 0, \quad t' = 0$$

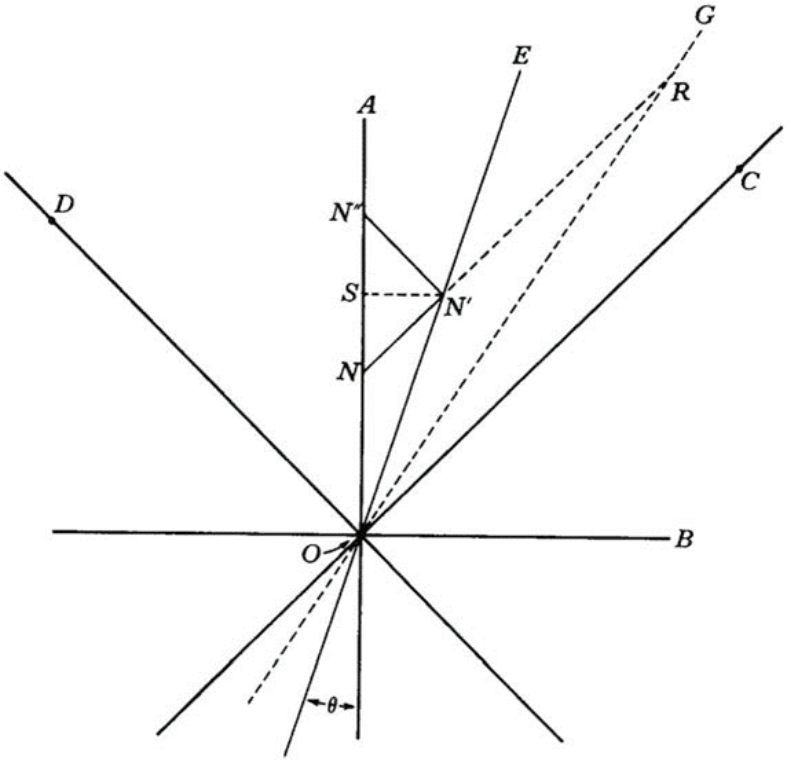
يرسل مراقب المختبر إشارة عند النقطة المقابلة لـ N والزمن T_0، كما قاستها ساعته. يستلم المراقب الإشارة الإشارة المراقب الموجود في سفينة الصواريخ عند النقطة المقابلة لـ N'. راصد الصاروخ يرمز ذلك الزمن بالمعادلة التالية:

$$T = kT_0 \qquad (26-4)$$

لكن دعونا الآن نفترض أنه عند استقبال الإشارة عند N'، يرسل مراقب الصاروخ على الفور إشارة خاصة به يستلمها مراقب المختبر عند النقطة المقابلة لـ N''، عند الزمن T_1، ومع ذلك، كما رأينا، فإن مبدأ النسبية يعني ما يتبع هذه المعادلة:

$$T_1 = kT = k^2T_0 \qquad (26-5)$$

شكل 5-26



سنستعمل الآن بعض الهندسة البسيطة. لأن (NN') و(N'N'') كليهما يتوافقان مع أشعة الضوء عند 45 درجة على المحور، فيصبح لدينا المعادلات التالية:

$$(SN') = (NS) = (SN'') = \frac{(NN'')}{2}$$

$$(SN') = (NS) = (OS)\tan\theta = (OS)\frac{v}{c} = \frac{(NN'')}{2}$$

$$(OS) = (ON) + (NS) = (ON) + \frac{(NN'')}{2}$$

$$(ON) = T_0$$

$$(NN'') = T_1 - T_0 = \frac{k^2 - 1}{2}T_0$$

$$(OS)\frac{v}{c} = \frac{k^2 + 1}{2}\frac{v}{c}T_0 = \frac{k^2 - 1}{2}T_0 \qquad (26-6)$$

$$\frac{v}{c} = \frac{k^2 - 1}{k^2 + 1} \qquad (26-7)$$

$$k = \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v/c}} \qquad (26-8)$$

وهكذا حصلنا على المعامل K وهو الكمية الأساسية في حساب K للتفاضل والتكامل. لاحظ أنها تساوي واحدًا صحيحًا عند v = 0، كما يجب أن تكون. وبالنسبة إلى قيمة v الموجبة فهي أكبر من الواحد الصحيح، وبالنسبة إلى سالب v فهي أقل من الواحد الصحيح.

المعامل K هو في الواقع مجرد انزياح دوبلر النسبي (لزاوية رؤية صفرية)، التي حصلنا عليها سابقًا بطريقة ملتوية أكثر بكثيرٍ في المعادلة

(17-12) بمساعدة تحويلات لورنتز. ومع ذلك، فقد اشتققنا هذه المرة الصيغة بشكلٍ مباشرٍ جدًّا من مبدأ النسبية، باستخدام ثبات سرعة الضوء كما قاسها المراقبون الذين يتحركون بسرعاتٍ مختلفة.

في الواقع، يمكن استخدام حساب K للتفاضل والتكامل للحصول على الصيغ الأساسية التي اشتققناها سابقًا من تحويلات لورنتز. لتوضيح هذا الاحتمال، دعونا نبدأ باستنتاج الصيغة التي تقارن معدلات الساعات المتكافئة التي تتحرك بسرعاتٍ مختلفة. الآن، بالإشارة إلى الشكل 5-26، نعلم أنه في الفترة المقابلة لـ (ON')، سيسجل مراقب الصاروخ الزمن تبعًا للمعادلة:

$$T = kT_0 \qquad (26-9)$$

من ناحية أخرى، نظرًا إلى أن الخط (N'S) عمودي على المحور OA، فإن مراقب المختبر سيعتبر الحدث N' متزامنًا مع S، لذلك، سينسب مراقب المختبر إلى N' تنسيق الزمن بالمعادلة التالية:

$$t = (OS) = (ON) + (NS) = (ON) + \frac{(NN'')}{2} = \frac{1 + k^2}{2} T_0 \qquad (26-10)$$

ويترتب على ذلك أن النسبة t/T من الأزمنة المقاسة لنفس الحدث (N') بواسطة مراقب المختبر ومراقب الصاروخ، على التوالي يمكن التعبير عنها بالمعادلة التالية:

$$\frac{t}{T} = \frac{k + k^{-1}}{2} = \frac{1 + k^2}{2k} = \left[1 + \frac{1 + (v/c)}{1 - (v/c)}\right]\frac{1}{2k}$$
$$= \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)}} \frac{1}{\sqrt{1 + (v/c)}} = \frac{1}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \qquad (26-11)$$

وبالتالي فقد استنتجنا بشكلٍ مباشرٍ «تباطؤ» الساعات المتحركة، من دون مساعدة تحويلات لورنتز. يمكننا الآن استنتاج الصيغة النسبية لجمع السرعات ذات الصلة المباشرة. للقيام بذلك، افترض وجود مراقبٍ ثالثٍ، كما هو موضحٌ في الشكل 26-5، له خطٌّ عالمي OG، وسرعته هي w بالنسبة إلى المختبر. من الممكن الحصول على معامل K المقابل لهذا المراقب بطريقتين مختلفتين. أولًا، نبدأ من خلال إطار المختبر، ونبعث إشارة عند النقطة N المقابلة للزمن T_0. يستلم المراقب OG الإشارة عند النقطة R، في الزمن المقابل الموضَّح بالمعادلة التالية:

$$T_2 = k(w)T_0 \qquad (26-12)$$

حيث إن $k(w) = \sqrt{[1 + (w/c)]/[1 - (w/c)]}$. ولكن يمكننا أيضًا الحصول على صيغة T_2 على مرحلتين. أولًا، نفترض أن الإشارة الخارجة من N تصل إلى N' خلال الزمن الموضَّح بالمعادلة التالية (الذي يقاس بساعة مراقب الصاروخ):

$$T_1 = k(v)T_0 \qquad (26-13)$$

حيث $k(v) = \sqrt{[1 - (v/c)]/[1 + (v/c)]}$. ثم يرسل مراقب الصاروخ على الفور إشارة (تتوافق مع N'R). إذا كان للراصد OG سرعة u، كما قيست من خلال إطار السفينة الصاروخية، فوفقًا لمبدأ النسبية يصبح لدينا المعادلة التالية:

$$T_2 = k(u)T_1 = \sqrt{\frac{1 + (u/c)}{1 - (u/c)}}\sqrt{\frac{1 + (v/c)}{1 - (v/c)}}T_0 \qquad (26-14)$$

من ذلك نستنتج المعادلات التالية:

$$\frac{(1 + u/c)}{(1 - u/c)}\frac{(1 + v/c)}{(1 - v/c)} = \frac{1 + w/c}{1 - w/c} \qquad (26-15)$$

$$k(w) = k(u)k(v) \qquad (26-16)$$

وبالتالي، فإن المعامل K لزوجٍ من التحولات في التسلسل هو مجرد نتاج معامل K الفردية لكلا التحويلين. بمساعدة القليل من الجبر نحصل على المعادلة التالية:

$$w = \frac{u + v}{1 + (uv/c^2)} \qquad (26-17)$$

وهي الصيغة النسبية لجمع السرعات المعطاة في المعادلة. (8-15)

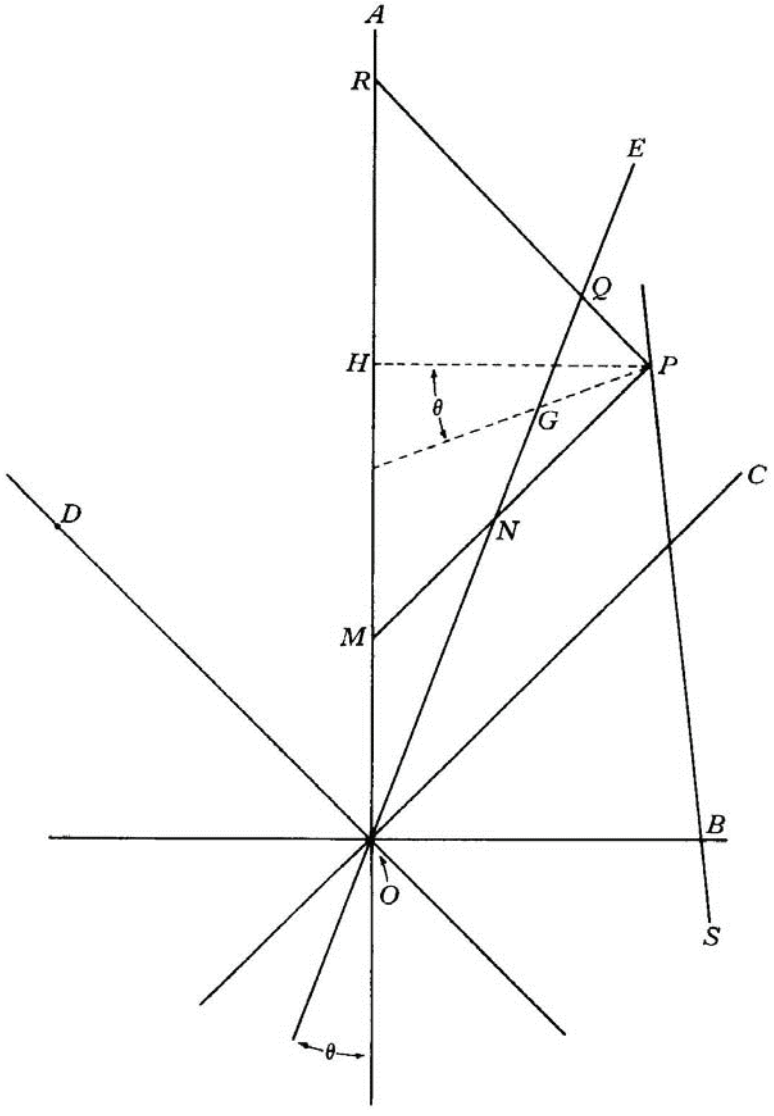
أخيرًا، يمكن استخدام حساب K للتفاضل والتكامل للحصول على تحويلات لورنتز نفسها. قبل القيام بذلك، من المفيد ملاحظة أنه نظرًا إلى أن سرعة الضوء هي نفسها لجميع المراقبين، فإننا لا نحتاج إلى معايير منفصلة للزمن والمسافة. بدلًا من ذلك، بمجرد أن يكون لدى المرء ساعة، يكون معيار المسافة مطبقًا فعليًّا، لأنه إذا أرسل أحدهم إشارة رادار إلى جسمٍ على مسافة d، فعندئذٍ إذا كان δt هو الزمن اللازم لتنتقل الإشارة من المصدر إلى الجسم وتنعكس مرة أخرى، فإن المسافة d لهذا الجسم يمكن التعبير عنها بالمعادلة:

$$d = \frac{c\,\delta t}{2} = \frac{\delta \tau}{2} \qquad (26-18)$$

لهذا السبب، يكفي أن يكون لدى جميع المراقبين ساعات متكافئة، ليس من الضروري أن نفترض بالإضافة إلى ذلك أن لديهم عصي متر قياسية. هذا يجعل الأسس المنطقية لإجراء القياس بسيطة للغاية، لأنه يمكن للمرء استخدام فترات اهتزازات الذرات أو الجزيئات كساعاتٍ قياسية يمكن الاعتماد عليها لتعمل بطرقٍ مكافئة لجميع المراقبين.

لاستنتاج تحويلات لورنتز، نشير إلى الشكل 6-26. لنفترض أن مراقب المختبر OA ومراقب الصاروخ OE يمرَّان أحدهما بالآخر عند O، وهو ما يقابل الصفر الزمني لكليهما. يرسل مراقب المختبر إشارة عند M، تقابل الوقت T_1 كما تقاس بساعته. عند N، تمر هذه الإشارة بمراقب الصاروخ، الذي يرسل في الوقت نفسه إشارته الخاصة عند الزمن T_1، كما قاستها ساعته. تسافر الإشارتان معًا حتى تصلان إلى جسمٍ ذي خطٍّ عالمي ST، ويضربانه عند P. تعود الإشارات المنعكسة، وتضرب سفينة الصواريخ عند Q، في الزمن T_2' الذي تشير إليه ساعة مراقب الصاروخ. تستمر الإشارات في ضرب المختبر عند R، في الزمن T_2 المشار إليه في ساعة المختبر.

شكل 6-26



الآن، ينسب مراقب المختبر إلى الحدث P إحداثيات الزمن والمكان تبعًا للمعادلات التالية:

$$\tau = ct = cT_1 + c\frac{T_2 - T_1}{2} = c\frac{T_2 + T_1}{2} \quad (26-19)$$

$$x = c\frac{T_2 - T_1}{2} \quad (26-20)$$

$$\tau + x = cT_2 \qquad \tau - x = cT_1 \quad (26-21)$$

وفقًا لمبدأ النسبية، سيكون لدى مراقب الصاروخ مجموعة معادلة من الصيغ.

$$\tau' = ct' = \frac{c}{2}(T_1' + T_2') \qquad x' = \frac{c}{2}(T_2' - T_1') \quad (26-22)$$

$$\tau' + x' = cT_2' \qquad \tau' - x' = cT_1'$$

ولكن طبقًا لحساب K للتفاضل والتكامل، يصبح لدينا المعادلات التالية:

$$T_1' = kT_1 \qquad T_2 = kT_2' \quad (26-23)$$

$$T_1'T_2' = T_1T_2$$

مما سبق، وحيث إن $\tau = ct$ ، يصبح لدينا المعادلة التالية:

$$\left(t' + \frac{x'}{c}\right)\left(t' - \frac{x'}{c}\right) = (t')^2 - \frac{(x')^2}{c^2} = T_1'T_2' = T_1T_2 = t^2 - \frac{x^2}{c^2} \quad (26-24)$$

هذا يعطي (للحالة أحادية البعد) صيغة ثابتة للفترة التي حسبناها في المعادلات، (7-9) و(8-9) من تحويلات لورنتز. ومن المعادلة (26-20) نحصل على المعادلة التالية:

$$t = \frac{kT'_2 + T'_1/k}{2}$$
$$x = \frac{kT'_2 - T'_1/k}{2} \qquad (26-25)$$

وباستخدام القليل من الجبر، يمكننا اختزال المعادلة السابقة للمعادلة التالية:

$$t = \frac{t' - (vx'/c^2)}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \qquad x = \frac{x' - vt'}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \qquad (26-26)$$

التي هي في النهاية بالطبع، تحويلات لورنتز.

من وجهة نظر حساب K للتفاضل والتكامل، يمكن أن نرى بشكلٍ مباشرٍ إلى حدٍّ ما لماذا يعزو مراقبان مختلفان التزامن إلى مجموعة مختلفة من الأحداث. في الواقع، المعادلات (20-26) إلى (22-26) أكدت أنه عندما يرسل أي مراقبٍ إشارة رادار، فإن ذلك المراقب يحدد وقت الحدث P ليكون متزامنًا مع حدثٍ في خط عالمه الذي يقع في منتصف المسافة بين نقطة انبعاث إشارة الرادار ونقطة استقبال انعكاسها. وهكذا، في الشكل 6-26، يحدِّد مراقب المختبر أن P متزامنة مع H، وهي نقطة المنتصف بين M وR، بينما يحدد مراقب الصاروخ P على أنه متزامنة مع G، التي تقع في منتصف المسافة بين N وQ..

لقد لفتنا الانتباه سابقًا إلى الجانب التقليدي للتزامن في نظرية النسبية في الفصل الثاني عشر، حيث ناقشناه في مثال المراقبين في قطار سكة حديد وعلى الجسر. نرى هنا بمصطلحاتٍ أكثر دقة كيف أن تساوي

سرعة الضوء لكلا الراصدين، بالإضافة إلى حقيقة أنهما يستخدمان اصطلاحات مكافئة لتعريف التزامن، يعني أنهما لا يمكنهما الاتفاق على الأحداث التي تحدث في نفس الوقت؛ وبالتالي فإننا نعرض مصدر المواقع المختلفة للأحداث المتزامنة لمراقبين مختلفين، كما هو موضحٌ في الأشكال 1-26 و2-26.

من الواضح أن حساب k للتفاضل والتكامل يوفر لنا طريقة مباشرة للغاية للحصول على العديد من العلاقات التي اشتقت تاريخيًّا أولًا على أساس تحويلات لورنتز. تتمثَّل ميزة حساب K للتفاضل والتكامل على أنه يجعل العلاقة بين هذه العلاقات والمبادئ والحقائق الأساسية التي تقوم عليها النظرية واضحة جدًّا. في الواقع، بدءًا من مبدأ النسبية وثبات سرعة الضوء، رأينا أن تحويلات لورنتز نفسها تتبع ببساطة سمات هندسية وتركيبية معينة لأنماط مجموعات معينة من الأحداث الفيزيائية. ومع ذلك، وبقدر ما هو أنيق ومباشر، فإن حساب K للتفاضل والتكامل لم يتطور بعد بما يكفي ليحل محل تحويلات لورنتز في جميع العلاقات المختلفة المهمة في نظرية النسبية. وبالتالي، فإن الموقف في الوقت الحالي هو أن نهج تحولات لورنتز ونهج حساب K للتفاضل والتكامل يكمل أحدهما الآخر، بمعنى أن كلًّا منهما يقدِّم رؤى لا يمكن الحصول عليها بسهولة في النهاية. بالإضافة إلى ذلك، يعد حساب k للتفاضل والتكامل جديدًا إلى حدٍّ ما، بحيث يمكنه التعبير عن معظم الأدبيات الحالية من حيث نهج تحويلات لورنتز. على الرغم من أنه من الممكن أن تطوير حساب k للتفاضل والتكامل في نهاية المطاف بدرجة كافية

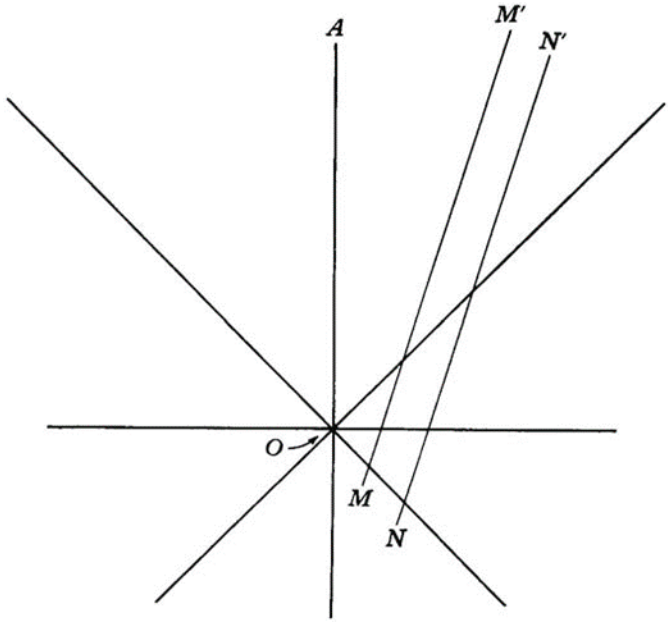
لاستبدال تحويلات لورنتز كأساسٍ للنظرية الرياضية، يبدو أنه لبعض الوقت، على الأقل، ستستمر تحويلات لورنتز في كونها المعبر الرئيسي عن النظرية، بينما سيعمل حساب k للتفاضل والتكامل على توفير رؤى إضافية حول معنى النظرية.

❊ ❊ ❊

XXVII. هندسة الحدث واستمرارية الزمكان.

رأينا في الفصل السابق كيف توصف الظواهر الفيزيائية من حيث الأحداث (مثل انبعاث وامتصاص الإشارات) والعمليات (مثل إرسال إشارة الرادار من الباعث إلى المستقبل) باستخدام مخطط مينكوفسكي. حتى الأجسام الموجودة باستمرارٍ (مثل المراقب) موصوف من خلال خطه العالمي، الذي هو في الواقع موضع سلسلة متصلة من الأحداث، تمثل الأماكن والأزمنة المتتالية التي يوجد فيها. إن جميع الأشياء الحقيقية (بما في ذلك المراقبون) ممتدة في المكان أيضًا، بحيث يمكن وصفها عن طريق «قنوات العالم world tubes» (يشار إلى أحدها في الشكل 1-27 حيث تكون حدودها 'MM و'NN). داخل مثل هذه القناة، تحدث مجموعة معقدة جدًّا من الأحداث والعمليات بشكلٍ عامٍّ (على سبيل المثال، حركات الأجزاء المختلفة المكونة للجسم، وصولًا إلى الجزيئات والذرات والإلكترونات والبروتونات، إلخ).

شكل 1-27



ضمنيًّا في مخطط مينكوفسكي هو تغيير جذري للغاية في مفاهيمنا المتعلقة بالطبيعة العامة للأشياء. لنرى كيف يحدث هذا، نبدأ بالتذكر أنه في نظرية نيوتن هناك معنى فريدٌ للتزامن، لذلك من المنطقي أن نفترض أنه في كل لحظة يتكوَّن العالم من أجسامٍ مختلفة (سواء على المستوى الكبير وعلى المستوى الذري والإلكتروني). في اللحظة التالية، ستظل هذه الأجسام موجودة، لكن كلَّ واحدٍ منهم سينتقل من مكان إلى آخر. تعتبر مهمة الفيزياء بعد ذلك بمثابة تحليل للعالم إلى الأشياء الأساسية الدائمة التي تشكِّله، بما في ذلك متابعة حركات هذه الأشياء مع مرور الوقت. أشرنا في الفصل الرابع والعشرين إلى: نظرًا

إلى أنه يمكن إنشاء جميع الأجسام المعروفة (بما في ذلك ما يُسمَّى بـ «الجسيمات الأولية») وتدميرها وتحويلها بطرقٍ مختلفة، فإن الفكرة الموصوفة في الفقرة السابقة قد أثبتت بالفعل أنها غير كافية، فيما يتعلق بالحقائق التجريبية المعروفة الآن في الظواهر الفيزيائية. لكن النسبية تقدِّم أسبابًا نظرية إضافية ضد الفكرة القائلة بأن العالم يتكوَّن في كل لحظة من ترتيبٍ ما لأشياء محددة بشكلٍ فريدٍ. لأنه كما رأينا، فإن فكرة «نفس الوقت» الآن لها معنى فقط فيما يتعلق بإطار المراقب.

لا يتفق المراقبون المختلفون على الأحداث التي تشكل مقولة «نفس الوقت»، وبالتالي فهم لا يتفقون على الخصائص الأساسية «للأشياء» (مثل الطول والكتلة وما إلى ذلك).

لقد تعاملنا مع المشكلة الموضحة أعلاه من خلال تقديم مخطط مينكوفسكي، بالنسبة إلى «الجسم» الذي يستبدل الآن بهيكل ونمط أحداث وعمليات (على سبيل المثال، خط العالم أو قناة العالم الذي يمثل مراقبًا). يتوافق النوع المعتاد من الجسم الدائم نسبيًّا الآن مع نمط من الأحداث والعمليات التي تميل إلى أن تظل مماثلة لنفسها على مدى فترة زمنية طويلة إلى ما لا نهاية. الجسم غير الدائم يتوافق مع نمطٍ يتغيَّر ويتحوَّل، يبدأ في منطقة ما (حيث يتم «إنشاء» هذا الجسم) وينتهي في منطقة أخرى (حيث يتم «تدمير» هذا الجسم). في الإجراء الموصوف أعلاه، يستبدل تحليل العالم إلى تحليل العناصر المكونة من حيث إنها الأحداث والعمليات، المنظمة والمرتبة والهيكلية بحيث تتوافق مع خصائص نظام المواد تحت الدراسة أو الفحص. ويترتب على ذلك أن

المكان والزمن المأخوذين يشكِّلان معًا الوسائل التي من خلالها تعالج خصائص الظواهر الفيزيائية. بهذا المعنى، يلعب المكان والزمن معًا دورًا مشابهًا للدور الذي يلعبه المكان وحده في ميكانيكا نيوتن. بمعنى، توصف طبيعة الأشياء بنوعٍ من النمط «الهندسي» في المكان والزمن، كما هو موضحٌ في مخطط مينكوفسكي.

في هندسة المكان، هناك توحيدٌ شاملٌ لأبعاده الثلاثة، بناءً على حقيقة أن كل بُعدٍ من الأبعاد يمكن أن يرتبط بالأبعاد الأخرى عن طريق الدوران.

جبريًّا، يمثل الدوران من خلال زاوية حول المحور z بالتحويلات في المعادلة التالية:

$$\begin{aligned} x &= x' \cos\alpha + y' \sin\alpha \\ y &= y' \cos\alpha - x' \sin\alpha \end{aligned} \qquad (27\text{-}1)$$

من دون هذا التحويلات لن يكون ممكنًا تبريرنا فيما يتعلق بالأبعاد الثلاثة باعتبارها متحدة في مساحة واحدة كـ«سلسلة متصلة» (على سبيل المثال، في الرسم البياني العشوائي، حيث ترسم كمية مادية مثل درجة الحرارة مقابل أخرى، مثل الضغط، لا يوجد مثل هذا الاتحاد). ثم يُطرح السؤال بطبيعة الحال حول ما إذا كان، في «هندسة» المكان والزمن معًا، لا يوجد اتحادٌ مماثلٌ لأبعاد المكان والزمن، بحيث يشكلان أيضًا سلسلة متصلة واحدة. (تذكر أنه في ميكانيكا نيوتن، الزمن مستقلٌّ عن المكان، لذلك لا يحدث مثل هذا الاتحاد هناك).

لنرى أن هناك نوعًا من الاتحاد بين المكان والزمن في نظرية النسبية، من الضروري فقط الإشارة إلى تحويلات لورنتز، حيث يمكن التعبير عن الإحداثيات z، τ بالقيمة z'، τ'. من الواضح أن هذا التحول يشبه الدوران. لإبراز هذا التشابه بمزيدٍ من التفصيل، يمكننا افتراض زاوية القطع الزائد β، المحددة بالمعادلات التالية:

$$\sinh\beta = \frac{e^{\beta} - e^{-\beta}}{2} = \frac{v}{c}\frac{1}{\sqrt{1-(v^2/c^2)}} \qquad (27\text{-}2)$$

$$\cosh\beta = \frac{e^{\beta} + e^{-\beta}}{2} = \frac{1}{\sqrt{1-(v^2/c^2)}} \qquad (27\text{-}3)$$

يمكن بالتالي كتابة تحويلات لورنتز بالمعادلة التالية:

$$\begin{aligned} \tau &= \tau' \cosh\beta - x' \sinh\beta \\ x &= x' \cosh\beta - \tau' \sinh\beta \end{aligned} \qquad (27\text{-}4)$$

نرى أن المعادلة (27-4) تختلف عن التحويل الدوراني في (27-1)، أولًا، لأن دالة القطع الزائد $\cosh\beta$ و$\sinh\beta$ تحل محل الدوال المثلثية $\cos\alpha$ و $\sin\alpha$، وثانيًا، أن معاملي sinh لهما علامة سالبة، بينما في (27-1) أحد المعاملات $\sin\alpha$ له علامة زائد، بينما الآخر لديه علامة سالبة. ومع ذلك، فإن التشابه مع الدوران لا يزال قويًّا للغاية، ولهذا السبب يُطلق على التحول (27-4) الدوران القطع الزائد hyperbolic rotation.

يكمن الاختلاف الأساسي بين التدويرات المثلثية ودوران القطع الزائد في الدوال الثابتة في ظل هذه التحولات ذات الصلة. وهكذا في الدوران المثلثي، في المستوى XY ، ما هو ثابت هو دالة المسافة

$x^2 + y^2$. في دوران القطع الزائد في المستوى $z\tau$، يكون الثابت هو $z^2 - \tau^2$، الذي يختلف عن دالة المسافة بأن التعويض بالقيم z^2 τ^2، يكون بإشاراتٍ معاكسة، بينما في المعادلة الأخيرة، يعوض بقيم x^2 و y^2 بالإشارة نفسها.

إذا نظرنا الآن إلى الأبعاد الثلاثة للمكان فإننا نرى من المعادلة (9-7) أن الدوال الموصوفة بالمعادلة التالية:

$$s^2 = \tau^2 - x^2 - y^2 - z^2 = \tau'^2 - x'^2 - y'^2 - z'^2$$

(27-5)

ثابتة في ظل تحولات لورنتز العشوائية في المكان والزمن وفي ظل التدوير العشوائي في المكان (وكذلك في ظل انعكاسات z ،y ،x ،τ). وبشكلٍ أكثر عمومية، إذا نظرنا إلى حدثين لهما إحداثيات x1، وy1، و z1، وτ_1 وx2، وy2، وz2 وτ_2، فإن هناك أمرًا آخر سيكون ثابتًا هو ما يُسمَّى الفترة بين الحدثين ويمكن التعبير عنه بالمعادلة التالية:

$$s^2 = (\tau_1 - \tau_2)^2 - (x_1 - x_2)^2 - (y_1 - y_2)^2 - (z_1 - z_2)^2$$

(27-6)

يمكن بسهولة ملاحظة أن الدالة (27-6) هي تعميم لدوال المسافة (3-11) التي تنطبق في المكان العادي ثلاثي الأبعاد. ومع ذلك تطبق المعادلة (27-6) في المكان والزمن معًا، بشرط أن تخضع τ لتحويل لورنتز، وهو دوران قطع زائد، وليس دورانًا عاديًّا.

يبدو من الواضح إذن أنه في الفيزياء النسبية، يتَّحد المكان والزمن في سلسلة متصلة رباعية الأبعاد، حيث يمكن تحويل بعضهم إلى بعض

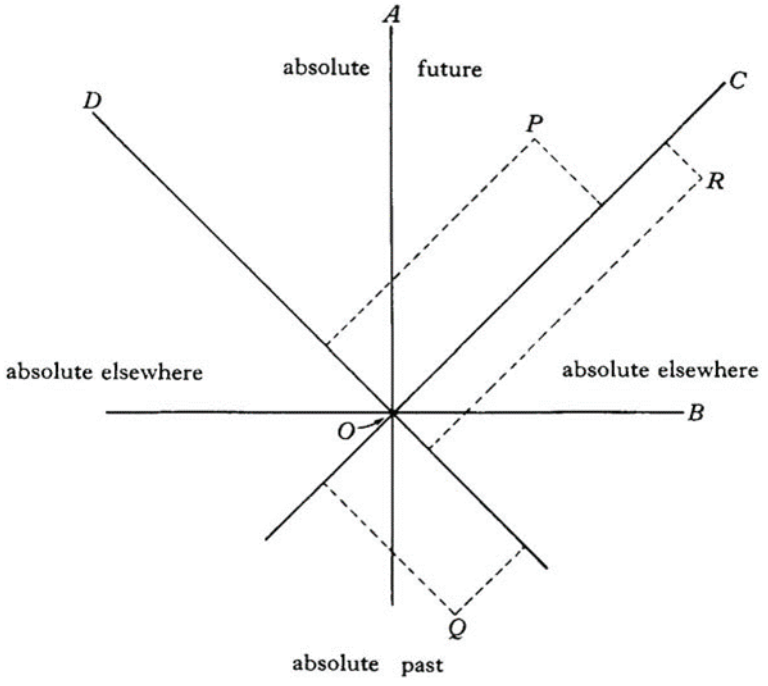
مثلما رأينا في معادلة الدالة (6-27) s^2 الثابتة. هذه السلسلة المتصلة تُسمَّى الزمكان بدلًا من «المكان والزمن»، وهما كلمتان متصلتان في نحتٍ لغوي جديدٍ لتؤكد هذا النوع من الاتحاد.

وتجدر الإشارة إلى أنه على الرغم من الاتحاد الموصوف أعلاه للمكان والزمن الذي أحدثته نظرية النسبية، فإنه لا يزال هناك تمييزٌ مهمٌّ وغريبٌ بينهما ناتج عن حقيقة أن الحدود الرياضية $(\tau_1 - \tau_2)^2$ و $(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2$ يظهران بعلامات معاكسة في صيغة الفاصل الزمني الثابت s^2 لهذا السبب، من الممكن أن يكون $s2$ موجبًا أو سالبًا أو صفرًا لأزواجٍ مميزة من الأحداث. في الواقع، نظرًا إلى أن $s^2 = 0$ يمثِّل مخروط الضوء، فمن الواضح أن هذا المخروط يشكِّل الحدود بين الأحداث ذات القيم الإيجابية والسلبية لـ s^2. إذا اخترنا في الشكل 6-27 أحد الأحداث، O، كنقطة أصل الإحداثيات حيث إن $(x_2 = y_2 = z_2 = \tau_2 = 0)$، فإننا نرى أنه بالنسبة إلى حدثٍ آخر، P، داخل مخروط الضوء، يكون s^2 موجبًا، بينما بالنسبة إلى أحداث مثل E، التي تقع خارج مخروط الضوء، تكون s^2 سالبة. ولكن نظرًا إلى أن s^2 ثابت، فإنه يترتب على ذلك أن خاصية وجود حدثٍ ما في الداخل أو الخارج أو على المخروط الضوئي لحدثٍ آخر هي نفسها في كل إطار مرجعي. لذلك، على الرغم من أن المكان والزمن، إلى حدٍّ ما، يمكن تحويل أحدهما إلى الآخر في تغيير الإطار المرجعي، فإن هناك حدودًا معينة لهذا التحول، بمعنى أن الفاصل الزمني داخل مخروط الضوء لا يمكن تحويله إلى آخر خارج مخروط الضوء، أو على حدود مخروط الضوء.

الآن، أبسط حالة لفترة داخل مخروط الضوء هي حالة يكون فيها $x = y = z = 0$. يمثِّل هذا الفاصل فارقًا زمنيًّا فقط. في ظل تحويل لورنتز، ينتقل هذا الفاصل الزمني إلى آخر بإحداثيات جديدة، x' ، y' ، z' ، τ' بحيث لا تكون x' و y' و z' بشكلٍ عام تساوي صفرًا. ومع ذلك، لن يتغير مربع الفترة الزمنية، سيظل إيجابيًّا. لهذا السبب، تسمى الفواصل الزمنية ذات القيم الموجبة لـ S2 بـ«أشباه الزمن like-time»، لأنها في بعض الأطر المرجعية تتوافق مع فارقٍ زمني بسيطٍ للأحداث التي تحدث في المكان نفسه.

من ناحية أخرى، فإن أبسط حالة للفاصل الزمني خارج مخروط الضوء هي حالة واحدة يكون فيها $\tau = 0$. مثل هذا الفاصل الزمني، الذي يتوافق مع فصل الأحداث في المكان، تمثِّله قيمة s^2 سالبة. إذا تحولنا إلى إطارٍ مرجعي جديدٍ، فعندئذٍ بشكلٍ عام سيتوقف عن أن كون τ' تساوي صفرًا، ولكن يبقى s^2 ثابتًا، وبالتالي سالبًا.

شكل 2-27



تسمى هذه الفترات «أشباه المكان space-like»، لأنها تتوافق في بعض الأطر المرجعية مع الفصل المكاني للأحداث المتزامنة.

باختصارٍ، من الواضح أنه حين يمكن تحويل إحداثيات المكان والزمن أحدهما إلى الآخر نتيجة لتغيير سرعة الإطار المرجعي، فإن التمييز بين أحداث أشباه المكان وأحداث أشباه الزمن هو أمرٌ غير متغير، الشيء نفسه بالنسبة إلى جميع المراقبين. وبالمثل، فإن خاصية الوجود داخل المخروط الضوئي، وبالتالي فترات أشباه المكان وفترات أشباه الزمن، هي أيضًا خاصية ثابتة. لذلك يتم الحفاظ على نوعٍ معينٍ

من الاختلاف الدقيق بين المكان والزمن (بمعنى عدم وجود قابلية التبادل الكاملة في ظل التحويلات)، على الرغم من حقيقة أن الزمكان متحدًا في سلسلة متصلة رباعية الأبعاد (بينما إذا كان z و τ قد تمَّا وفقًا لدوران مثلثي عادي، كان من الممكن أن ينتج عن ذلك تكافؤ كامل للمكان والزمن، بحيث يمكن أن يحدث تبادل z و τ، كما نقوم بتبديل x و y بدوران 90 درجة ببساطة).

يمكننا الحصول على مزيدٍ من التبصُّر في التمييز الثابت بين فترات أشباه المكان، وفترات أشباه الزمن، والفترات «الخالية null» (أي الفترات الواقعة على مخروط الضوء، حيث $s^2 = 0$) عن طريق قياس الإحداثيات u، v لحدث P في مخطط مينكوفسكي على طول اتجاه أشعة الضوء، مثل هذا الإجراء يتوافق مع دوران بزاوية 45 درجة للمحاور $\chi\tau$.

يمكن حساب المعادلة التالية:

$$u = \frac{\tau - \chi}{\sqrt{2}} \qquad v = \frac{\tau + \chi}{\sqrt{2}} \tag{7-27}$$

$$uv = \frac{\tau^2 - \chi^2}{2} = \frac{s^2}{2}$$

إذن باستخدام مجموعتنا الجديدة من المحاور، فإن الثابت s^2 هو حاصل ضرب u و v. وهو شعاع الضوء المقابل لـ $s^2 = 0$، وبالتالي إما $u = 0$ وإما $v = 0$. يشير الموضع $u = 0$ إلى الخط OC، بينما يشير $v = 0$ إلى OD.

نقطة مثل P، (انظر الشكل 2-27) داخل مخروط الضوء وتالية

للنقطة O، لها قيمٌ موجبة لكلٍّ من u و v من ناحية أخرى، نقطة مثل Q، التي تقع داخل مخروط الضوء ولكن قبل O، لها قيم سالبة لـ uوv. يجب أن تحتوي النقاط الموجودة خارج المخروط (مثل F على إما u موجب و v سالب وإما v موجب وu سالب.

دعونا نرى كيف تتغيَّر u وv في ظل تحولات لورنتز (4-27)، لدينا المعادلات التالية:

$$u = \frac{\tau - z}{\sqrt{2}} = \frac{(\cosh\beta)\tau' - (\sinh\beta)z' - (\cosh\beta)z' - (\sinh\beta)\tau'}{\sqrt{2}} = \frac{e^{\beta}}{\sqrt{2}}(\tau' - z') = e^{\beta}u' \tag{27-8}$$

$$v = \frac{\tau + z}{\sqrt{2}} = \frac{(\cosh\beta)\tau' - (\sinh\beta)z' + (\cosh\beta)z' - (\sinh\beta)\tau'}{\sqrt{2}} = \frac{e^{-\beta}}{\sqrt{2}}(\tau' + z') = e^{-\beta}v' \tag{27-9}$$

نرى بعد ذلك أنه في ظل تحويلات لورنتز، يخضع كلٌّ من u و v لعملية تحويلٍ بسيطة بشكلٍ خاص، حيث يضرب كلٌّ منهما على التوالي بواسطة عامل ($e^{-\beta}$وe^{β}) يكون أحدهما مقلوبًا للعامل الآخر (بحيث تظل uv (ثابتة). كحالة خاصة، نعتبر شعاعًا ضوئيًّا (حيث u=0 أو v=0 الذي يؤدي الآن على الفور إلى أن u’ = 0 أو v’ = 0، مما يظهر ثبات سرعة الضوء بطريقة مباشرة للغاية.

من الواضح أن تحويل لورنتز هو تمدد على طول اتجاه أحد أشعة الضوء بواسطة عامل e^{β} وانكماش على طول اتجاه الآخر بواسطة مقلوب العامل الأول $e^{-\beta}$. إذا أخذنا في الاعتبار أي عنصر من عناصر

«المساحة» في الزمكان، فمن الواضح أنه في ظل هذا التحول يخضع هذا العنصر لنوعٍ من «القص»، مع «محاور» القص على الخطوط المقابلة للشعاعين الضوئيين. لذلك بدلًا من الدوران الحقيقي (أو المثلثي)، يصبح تحويل الزمكان هو دوران قطع زائد، وهو -كما رأينا- قص في نمط الأحداث.

الآن في تحويل القص الموضح أعلاه، يضرب u وv بالعوامل e^{β}و $e^{-\beta}$ التي تكون دائمًا موجبة. ويترتب على ذلك أن التمييز بين الأحداث داخل المخروط الضوئي قبل O أو بعد O هو تمييز ثابت. وبالتالي، ليس لدينا فقط السمة الثابتة للأحداث على أنها داخل أو خارج أو فوق مخروط الضوء لـ O، ولكن لدينا أيضًا ثبات خاصية الأحداث المستقبلية لـ O داخل مخروط الضوء) بعد O أي المستقبل، وقبل O أي الماضي.

بطريقة مماثلة، نرى بسهولة أنه بالنسبة إلى الأحداث على مخروط الضوء، هناك أيضًا تمييز ثابت بين الأحداث السابقة وتلك اللاحقة. بالنسبة إلى مخروط الضوء، إما $u = 0$ وإما $v = 0$، وأيهما الذي لا يساوي صفرًا يجب أن يكون موجبًا لحدثٍ متأخرٍ عن O، سالبًا لحدثٍ سابقٍ لـO.

من ناحية أخرى، فإن خاصية كونك متقدمًا أو متأخرًا عن O ليست ثابتة، لحدثٍ خارج مخروط الضوء. بالإشارة إلى الشكل 26-1، سنفترض على سبيل المثال الحدث B، المتزامن مع O في إطار المختبر. في إطار المراقب Ω_2، يتحرك بسرعة **v** بالنسبة إلى المختبر

(مع الخط العالمي OE)، الحدث الذي يقيسه ليكون متزامنًا مع O سوف يتوافق مع نقطة ولتكن B' موجودة على خط OF، وبالتالي لا يتزامن مع O في إطار المختبر. إذا أخذنا في الاعتبار جميع القيم الممكنة للسرعة v، فإننا نرى أن أي نقطة خارج مخروط الضوء عبر O ستُعتبر متزامنة مع O من قِبَل بعض المراقبين إما في ماضي O وإما في مستقبل O بواسطة مراقبين مختلفين مع سرعاتٍ مناسبة. لذلك بينما الأحداث داخل مخروط الضوء الخاصة بعضها ببعض لها ترتيبٌ زمني فريدٌ (بمعنى أن جميع المراقبين سيتفقون على أيهما أقدم وأيهما أحدث)، فإن الأحداث خارج مخاريطها الضوئية بالنسبة إلى بعضها البعض لا تفعل ذلك.

* * *

XXVIII. مسألة السببية والسرعة القصوى لانتشار الإشارات في نظرية النسبية

لقد رأينا في الفصل السابق أنه بالنسبة إلى زوجٍ من الأحداث خارج المخروط الضوئي أحدهما إلى الآخر، لن يتفق مراقبون مختلفون بشكلٍ عامٍّ على أيُّهما حدث أولًا وأيهما حدث أخيرًا. للوهلة الأولى، قد نعتقد أن هذا الغموض يُحدِث خلطًا في مسألة السببية. وبالتالي فمن البدهي أنه إذا كان A هو سبب B، فيجب أن يحدث A إما قبل B وإما في الوقت نفسه .B لا يمكن اعتبار الحدث المتوقع غدًا سببًا لما يحدث اليوم. لذا من خلال سبب حدوث حدث B، يعني أحد الشروط (A) التي تؤدي -في حالة وجودها ونشاطها- إلى ظهور .B وبالتالي فإن حريقًا يحدث اليوم قد يؤدي إلى تفجير بعض المتفجرات الآن، لكن حريق الغد لن يفجر هذه المتفجرات اليوم.

يبدو واضحًا أنه إذا سُمح لنا بتبديل ترتيب الماضي والحاضر والمستقبل بطريقة عشوائية تمامًا، فإن النتيجة ستكون مشوشة، سواء في الفيزياء أو في الحياة اليومية. لنفترض، أن أحد المراقبين رأى أن احتراق بعض الوقود يتبعه تسخين الماء، وأنه بالنسبة إلى مراقب آخر، تم تسخين الماء أولًا، بينما شوهد الوقود محترقًا لاحقًا. أو لنفترض أن أحد المراقبين جاع في البداية ثم تناول طعامًا أشبع جوعه، في حين أن مراقبًا آخر أشبع بالطعام ثم جاع. يمكن للمرء أن يواصل مضاعفة مثل هذه الحالات دون حدودٍ، موضحًا أنه لا يمكننا فهم العالم إذا تمكنَّا من إجراء تغييراتٍ عشوائية في الترتيب الزمني للأحداث. السؤال إذن هو

معرفة ما إذا كان الغموض النسبي في الترتيب الزمني للأحداث خارج مخروط الضوء للمراقب سوف يخلط بين مشكلة السبب والنتيجة.

في الإجابة عن هذا السؤال، نتذكر أولًا أنه، كما هو موضحٌ في الفصل الرابع عشر، لا يمكن لأي شيء أو تأثير أو قوة، وما إلى ذلك، أن يتحرك أو ينتقل بشكلٍ أسرع من سرعة الضوء C. من السهل إذن أن نرى أنه ما دام تم استيفاء هذا الشرط، فإن الغموض النسبي في الترتيب الزمني لن يخلط بين مسألة السببية. لأنه إذا كان أحد الأحداث (A) هو سبب لحدثٍ آخر (B)، فيجب أن يكون هناك نوعٌ من الفعل الفيزيائي للاتصال بينهما. (إذا لم يكن هناك أي اتصالٍ فيزيائي، فلا يمكن لأحدهما أن يكون سببًا للآخر)، ولكن إذا لم ينتقل مثل هذا الفعل الفيزيائي أسرع من الضوء فإن أي حدثين مرتبطين سببيًّا سوف يحدثان بترتيبٍ زمني فريدٍ لا لبس فيه -كما رأينا في الفصل السابق. بعبارة أخرى، إذا كان السبب A أقدم من تأثيره B لمراقبٍ واحدٍ، فإن هذه العلاقة ستظل سارية لجميع المراقبين. لذلك، سيكون ترتيب السبب والنتيجة ثابتًا، بحيث لا يؤدي أي التباس إلى هذا الترتيب عندما ينظر مراقبون مختلفون إلى مجموعة الأحداث نفسها، كل في إطاره المرجعي الخاص.

من ناحية أخرى، إذا كان أي تأثير يمكن أن يكون أسرع من الضوء، فإن فكرة ترتيب السبب والنتيجة ستختلط تمامًا. لرؤية هذا، ضع في اعتبارك حالة متطرفة، حيث نفترض أن التأثيرات الفيزيائية يمكن أن تنتقل بسرعات غير محدودة، بحيث يمكن لمراقبين بعيدين أن يكونا

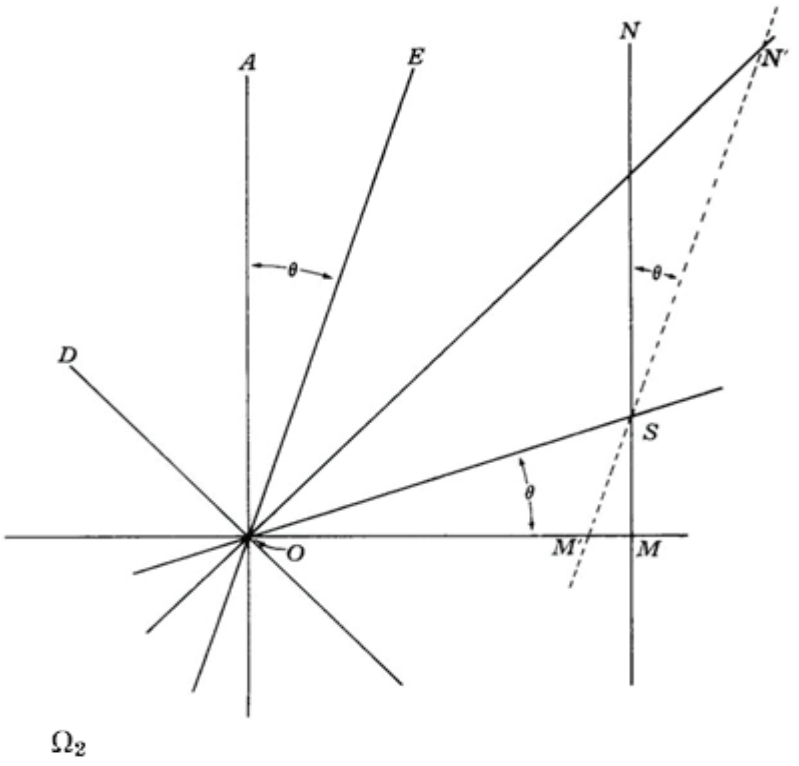
على اتصالٍ متزامنٍ. سنفترض أن أحد هؤلاء المراقبينΩ_1، قد مثَّلناه في الشكل 1-28 بواسطة الخط العالمي OA، بينما الآخرΩ_3، بالسرعة نفسها، سنمثِّله على الخط العالمي MN. وفقًا لفرضيتنا، يمكن أن يكون المراقب Ω_1 في الوقت الذي يمثِّله O على اتصالٍ فيزيائي مباشرٍ مع المراقب الآخر Ω_3 في الوقت الذي يمثِّله M، بحيث يمكن لكلٍّ منهما استخدام جهة الاتصال هذه للإشارة إلى الآخر.

الآن، إذا لم يكن هناك مبدأ النسبية مع ثبات سرعة الضوء، فإن هذا الافتراض لن يحتوي على تناقضاتٍ منطقية ذاتية. في الواقع، إنه يتوافق فقط مع مفهوم «البدهية» بأن ما نراه في لحظة معينة هو على اتصالٍ مباشرٍ معنا وجميعها تحدث في الوقت نفسه، وهو ما نطلق عليه «الآن«.

ومع ذلك، دعونا نواصل النظر في الآثار الإضافية لمبدأ النسبية، كما طورها أينشتاين، أي أن قوانين الفيزياء لها نفس الشكل لجميع المراقبين، وأن جميع المراقبين يصفون السرعة نفسها للضوء. كما رأينا سابقًا، يترتب على ذلك أن مراقبين متحركين نسبيًّا لا يتفق أحدهما مع الآخر بشأن مجموعة الأحداث المتزامنة. وبالتالي فإن المراقب Ω_2 على الخط العالمي OE سوف يعتبر الأحداث على خط O متزامنة مع O، بينما Ω_1(مع الخط العالمي OA) سيعتبر الأحداث على OB متزامنة. ولكن وفقًا لمبدأ النسبية، فإن جميع القوانين العامة التي تحدث في إطار Ω_1 ستحدث أيضًا في إطارΩ_2. لذلك، إذا افترض أن المراقب Ω_1 سيكون على اتصالٍ مع حدث M متزامن مع الحدث O المتصل بمراقبه Ω_2، الذي يمكن أن يكون في إطارٍ يتحرك نسبيًّا بالنسبة إلى

الحدث S الذي يتزامن مع الحدث O في إطاره المرجعي.

شكل 1-28



سنفترض الآن المراقب Ω_3 على الخط العالمي MN. في الزمن المقابل لـ S، سيتقاطع خط عالمه مع خط العالم M'N' للمراقب Ω_4 الذي يتحرك بالسرعة نفسها. من الواضح أنهما اثنان من المراقبين في النقطة نفسها S، ولكن بسرعاتٍ مختلفة، يمكن أن يكونا على اتصالٍ مباشرٍ بشكلٍ أساسي، بحيث لا يكون هناك فاصلٌ زمني (أو لا يكاد يذكر) لتمرير الإشارة من أحدهما إلى الآخر. بعد ذلك، وفقًا لمبدأ النسبية، Ω_4 يجب أن يكون لديه القدرة نفسها على إرسال إشارة على

الفور إلى Ω_2 عند O (وهو الحدث المتزامن مع S في إطاره) Ω_1 ينبغي له أن يرسل الإشارة إلى Ω_3 عند M. يمكن للمراقب Ω_2 بعد ذلك إرسال الإشارة إلى Ω_1 عند الحدث O، وΩ_1 يمكنه إرسال إشارة إلى Ω_3 عند الحدث M (وهو متزامنٌ مع O في الإطار المرجعي لـ Ω_1وΩ_3). من خلال هذه الدورة من الإشارات، يمكن لـ **S** الاتصال بـ M والعكس صحيح. لكن الحدث M هو ماضٍ بالنسبة إلى الحدث S. لذا يمكن لـ S التواصل مع ماضيه في M، وإخبار نفسه بما سيكون عليه مستقبله. ولكن عندما يعلم M هذا يمكن أن يقرر تغيير أفعاله، بحيث يكون مستقبله في S مختلفًا عما قالته «ذاته» لاحقًا. على سبيل المثال، يمكن للذات في الماضي أن تفعل شيئًا يجعل من المستحيل في المستقبل إرسال الإشارة، وبالتالي، سيظهر تناقضٌ منطقي مع الذات.

من خلال تعميم السطر أعلاه، يمكن بسهولة إظهار أن تناقضًا مشابهًا قد ينشأ إذا افترض المرء أن الاتصال الفيزيائي قد نقل بأي سرعة أكبر من سرعة الضوء.

سنجد أنه ما دمنا نقبل نظرية النسبية لأينشتاين، فإنها ستؤدي إلى سخافة افتراض أن هناك أي فعل من خلال الاتصال الفيزيائي قادر على تشكيل أساس إشارة تنتقل أسرع من الضوء. بعبارة أخرى، إما أن نفترض أنه لا يوجد فعلٌ مادي ممكن أسرع من الضوء، وإما علينا التخلي عن تصور أينشتاين لمبدأ النسبية. ولكن حتى الآن تأكد هذا الشكل من مبدأ النسبية بشكلٍ واقعيٍّ. إلى جانب ذلك، كما رأينا بالفعل، لم تكتشف أي أفعال فيزيائية تنتقل فعليًّا أسرع من الضوء

(على سبيل المثال، لا يمكن تسريع الأجسام المادية إلى سرعة الضوء، لأن هذا يتطلَّب طاقة لا نهائية، بينما لا توجد مجالاتٌ معروفة لها تأثيرٌ أو تنتشر أسرع من الضوء). بطبيعة الحال، فإن نظرية أينشتاين، مثل جميع النظريات الأخرى، من حيث المبدأ قابلة لإثبات خطئها عندما تمتد التجارب إلى مجالاتٍ أوسع. ولكن ما دمنا بقينا في المجال الذي تكون فيه هذه النظرية صالحة (وحتى الآن، التجارب المعروفة كانت وما زالت في مثل هذا المجال)، فلن يصبح ممكنًا أن يكون لدينا أفعالٌ فيزيائية تنتقل أسرع من الضوء.

بالنظر إلى حدث O، يجب أن يقع أي حدثٍ P آخر، كما رأينا، في مجموعة معينة من مناطق الزمكان، التي تخضع لتمييزٍ ثابتٍ (انظر الشكل 2-27). إذا كان في الداخل أو على حدود المخروط الضوئي، فإن هذا الحدث يكون إما في المستقبل من O وإما في الماضي من O. ولأن هذا التمييز مستقلٌّ عن الإطار المرجعي، فيمكن القول إنه بمعنى ما «مطلق» (على الأقل في المجال الذي تتحقق فيه نظرية أينشتاين). يمثِّل الجزء «الأمامي» من مخروط الضوء عبر O، بالإضافة إلى كل ما داخله، «المستقبل المطلق» لـ O، بينما يُسمَّى الجزء «الخلفي» للمخروط الضوئي المقابل، وكل ما داخله، «الماضي المطلق» لـ O. المنطقة الواقعة خارج المخروط الضوئي قد سميت على نحوٍ ملائمٍ للغاية «المطلق في أي مكانٍ آخر» من O. بالنسبة إلى هذه المنطقة ليس لها اتصالٌ مباشرٌ مع O على الإطلاق، وبالتالي فهي في الأساس «أي مكان آخر». وبالتالي، إذا افترضنا نجمًا بعيدًا، فنحن لدينا اتصالٌ فقط

بما كان عليه ذلك النجم منذ زمنٍ طويلٍ. إن وجود هذا النجم «الآن» هو مجرد استنتاجٍ محتملٍ، بناءً على معرفتنا العامة بخصائص النجوم. لكن في الواقع لا نعرف إذا ما كان موجودًا «الآن». على سبيل المثال، ربما يكون قد انفجر بالفعل. لاحقًا قد نتمكَّن (أو سيتمكَّن غيرنا من المراقبين) من رؤية هذا الانفجار. ولكن مهما حدث لهذا النجم فهو «الآن» بالنسبة إلينا: «المطلق في أي مكان آخر»، لا يمكن أن يكون له أي اتصال بنا «الآن». (لاحقًا سيتعيَّن علينا أن نمثل بنقطة أخرى على خط عالمنا، والتي تختلف عن النقطة التي تمثلنا الآن).

عندما يكون هناك حدثان في مكانٍ آخر تمامًا، بحيث لا يمكن أن يكون لهما اتصالٌ فيزيائي، فلا فرق سواء قلنا إن أحدهما قبل أو بعد الآخر. نظامهما الزمني النسبي له طابعٌ تقليديٌّ بحتٌ، بمعنى أنه يمكن للمرء أن ينسب أي ترتيبٍ مناسبٍ، ما دام المرء يطبق أعرافه بطريقة متسقة. وكما رأينا، فإن المراقبين، الذين يتحركون بسرعاتٍ مختلفة، ويقومون بتصحيح الزمن Δt، الذي يستغرقه الضوء للوصول إليهم من نقطة على مسافة $\mathbf{r}$ بواسطة الصيغة $\Delta t = r/c$، سيصلون إلى اصطلاحاتٍ مختلفة لتخصيص مثل هذه الأحداث مثل (قبل، وبعد، ومتزامن) مع بعض الأحداث التي تجري في الجوار المباشر للمراقب. لكن ما دام أنه لا يوجد اتصالٌ فيزيائي، وهو أساس علاقة الارتباط السببي للأحداث، فلا يهم ما نقوله عمَّا قبل وما بعد. من ناحية أخرى، كما رأينا، عندما يكون مثل هذا الاتصال السببي ممكنًا، يكون ترتيب الأحداث واضحًا، لذا لن تؤدي تحويلات لورنتز أبدًا إلى الارتباك بشأن السبب والنتيجة.

XXIX. الزمن الصحيح Proper Time

حتى الآن كنَّا نناقش الآثار المترتبة على نظرية النسبية الخاصة، التي تُعتبَر صالحة للمراقبين الذين يتحركون بسرعة ثابتة. كما أشرنا سابقًا (الفصل السادس عشر)، لا يمكن تطبيق مبدأ النسبية بشكلٍ صحيحٍ في الإطار المرجعي المتسارع للمراقب، ما دمنا تحت مظلة النظرية الخاصة. بعبارة أخرى، للحصول على القوانين التي تشكِّل نفس العلاقات (أي لها نفس الشكل)، حتى بالنسبة إلى الأطر المرجعية المتسارعة، من الضروري توسيع أساسنا المفاهيمي والانتقال إلى النظرية العامة للنسبية. ومع ذلك، هذا لا يعني أن النظرية الخاصة لا يمكنها أن تقدِّم أي تنبؤاتٍ على الإطلاق بشأن ما سيحدث للمراقبين المتسارعين. هذا يعني فقط أنه إذا أردنا القيام بمثل هذه التنبؤات، فسيتعيَّن علينا تبني وجهة نظر مراقبٍ غير متسارع، عندما نصوغ القوانين الأساسية للفيزياء. انطلاقًا من وجهة النظر هذه، من الممكن بعد ذلك تغيير المضمون وذلك لمعرفة ما قد يترتب عليه عند النظر إليه من خلال الإطار المتسارع. (لقد طور إجراء مماثل في الواقع في ميكانيكا نيوتن، التي تستند قوانينها إلى إطار القصور الذاتي، ويمكن تحويلها إلى إطارٍ متسارعٍ يؤدي إلى شروطٍ إضافية في معادلات الحركة، مثل قوى الطرد المركزي وقوى كوريوليس Coriolis forces).

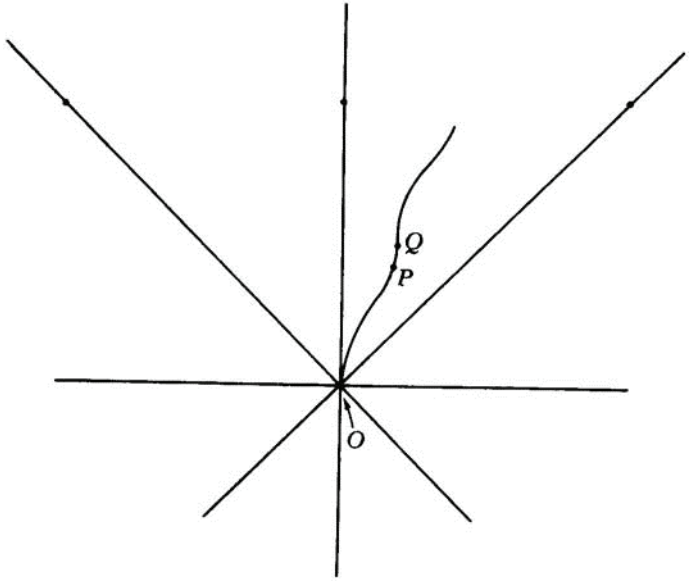
لدراسة هذه المسألة، نلاحظ أولًا أنه في الإطار المرجعي لمراقبٍ يتحرك بسرعة ثابتة، يمثِّل المراقب المتسارع بخط عالمي منحني (انظر الشكل 29-1) الذي يبقى في مكانٍ ما داخل مخروط الضوء

لأي نقطة O والذي يمر من خلاله. الآن سنفترض نقطة معينة P على خط العالم هذا، ونقطة قريبة Q. إذا كانت Q قريبة بدرجة كافية من P، فيمكننا تقريب المنحنى عن طريق تفاضلات الإحداثيات $tQ - tP = dt$ و$zQ - zP = dz$. عند النقطة P سنفترض أن سرعة المراقب المتسارعة v وعند Q سنفترض أنها $v + dv$.

إن الفكرة الأساسية التي تجعل من الممكن استنتاج الآثار المترتبة على نظرية النسبية الخاصة في إطار مرجعي متسارع هي تلك الخاصة بالإطار غير المتسارع الذي يتحرك محليًّا. لمعرفة ما تعنيه هذه الفكرة، دعونا نبدأ من النقطة P، متحركًا بسرعة v. المراقب الفعلي، كما افترضنا، متسارع. لكن يمكننا أن نتخيل مراقبًا غير متسارع عند P يتحرك بسرعة (ثابتة) **v**. النقطة المهمة فيما يتعلق بمثل هذا المراقب هي أنه خلال فترة زمنية قصيرة بما فيه الكفاية، dt، سرعة المراقب المعجل بالنسبة إلى الحركة المشتركة سيكون سرعة المراقب dv، وهي صغيرة جدًّا. لقد رأينا بالفعل أنه بالنسبة إلى السرعات المنخفضة، فإن نظرية أينشتاين تقترب من قوانين نيوتن كحالة مقيدة. لذلك، على الأقل خلال فترة زمنية معينة dt، يمكن مناقشة حركات النظام من حيث قوانين نيوتن المطبقة في الإطار المرجعي ذي السرعة الثابتة. من تحويلات لورنتز. عندما تصبح dv قابلة للإدراك، ننتقل ببساطة إلى إطار آخر بسرعة ثابتة $v + dv$، إلخ. وهكذا من خلال النظر في سلسلة من هذه الإطارات المتحركة المشتركة، يمكننا حساب ما سيراه مراقبٌ بسرعة ثابتة (على سبيل المثال، في إطار المختبر) بمساعدة سلسلة مقابلة من تحويلات

لورنتز. أو، بالعكس، يمكننا استخدام إجراء مشابه للبدء بما نلاحظه في إطار المختبر، لحساب ما يمكن رؤيته بواسطة مراقب متحرك في أي لحظة.

شكل 1-29



أحد الأمثلة المهمة للإجراء الموصوف أعلاه هو حساب ما يسمى بـ «الزمن الصحيح» الذي تسجله ساعة تتسارع على طول خط عالمي معين، مثل OPQ. عند القيام بذلك، نستفيد من المبدأ الموضَّح أعلاه، أي أنه خلال فترة زمنية قصيرة بما فيه الكفاية، dt (حيث يكون dv صغيرًا جدًّا)، ستتصرف الساعة كما هو موضح في الإطار المرجعي المشترك للحركة بشكلٍ أساسي كما هو الحال وفقًا لميكانيكا نيوتن، التي تؤكد أن معدل الساعات المصمَّمة بشكلٍ صحيحٍ لا يعتمد على

كيفية تسريعها. لذلك، خلال الفاصل الزمني dt، ستسجل الساعات فترة dt_0 مرتبطة بـ dt عن طريق تحويلات لورنتز في إطار المراقب المتحرك بالنسبة إلى إطار المختبر. يمكن الحصول على هذه العلاقة بسهولة من خلال النظر في الدالة الثابتة الموضحة بالمعادلة التالية:

$$ds^2 = c^2\,(dt)^2 - (dz)^2 \qquad (29\text{-}1)$$

في الإطار المتحرك المشترك لدينا $dt'=dt_0$ و $dz'=0$ (لأن الساعة في هذا الإطار تكون في حالة سكون)، لذلك فإن $ds^2=c^2\,dt_0^{\,2}$ و:

$$\frac{ds^2}{c^2} = dt_0^2 = (dt)^2 - (dz)^2/c^2$$

$$\frac{dt_0}{dt} = \sqrt{1 - (dz/dt)^2/c^2} = \sqrt{1 - (v^2/c^2)} \qquad (29\text{-}2)$$

يمكن حساب الفترة Δt_0 لـ«الزمن الصحيح» الذي سجلته الساعة المتسارعة في حركتها بين t1 و t2 عن طريق التكامل (29-2). والنتيجة هي المعادلة التالية:

$$\Delta t_0 = \int_{t_1}^{t_2} \sqrt{1 - \frac{v^2(t)}{c^2}}\,dt \qquad (29\text{-}3)$$

يمكن توسيع هذه الصيغة بسهولة إلى الأبعاد الثلاثة للمكان، التي تستمر في الصمود إذا استبدلنا v2 بمربع السرعة الإجمالية $v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$.

يتضح من المعادلة (3-29) أنه بسبب $\sqrt{1-(v^2/c^2)} \leqslant 1$ فإن الزمن الصحيح المسجل بواسطة ساعة تتحرك فيما يتعلق بإطارٍ مرجعي معين يكون عمومًا أقل من الفارق الزمني، كما قاسته الساعات المثبتة في ذلك الإطار المرجعي.

* * *

XXX. مفارقة التوأمين

على أساس نتائج الفصل السابق يمكننا الآن وصف التناقض الظاهري المعروف الذي تؤدي إليه نظرية النسبية.

سنفرض أن هناك زوجًا من التوائم «المتشابهة». أحدهما سيقوم برحلة في سفينة صاروخية، نفترض أنها قادرة على بلوغ سرعة قريبة من سرعة الضوء، بينما يبقى الآخر على الأرض. عندما يعود التوأم الذي قام بالرحلة إلى الأرض، ستظهر الساعات في سفينته الصاروخية انقضاء الفترة الزمنية كالمعادلة التالية: $k = k'\mathbf{P} = m\mathbf{v}$

$$\Delta t_0 = \int_{t_1}^{t_2} \sqrt{1 - \frac{v^2(t)}{c^2}}\, dt$$

وحيث إن الساعات المصممة بالمثل من التوأم الذي بقي على الأرض ستظهر انقضاء الفترة الزمنية $t_2 - t_1 > \Delta t_0$. ولكن كما رأينا سابقًا، ستخضع جميع العمليات الفيزيائية والكيميائية والعصبية والنفسية وما إلى ذلك لنفس تحويلات لورنتز الذي يطبق على الساعات. لذلك، فإن التوأم الذي قام بالرحلة سيختبر زمنًا أقل من الشخص الذي بقي على الأرض، وإذا كانت سرعة السفينة الصاروخية قريبة من سرعة الضوء، فقد تكون هذه الفترة الزمنية ملحوظةً. على سبيل المثال، إذا مرَّت 20 عامًا على الرجل الذي بقي على الأرض، فربما يكون قد مرَّ عامٌ أو عامان فقط بالنسبة إلى الرجل الذي كان في السفينة الصاروخية.

قبل الشروع في مناقشة أهمية هذا الاستنتاج، دعونا أولًا نلاحظ أنه لا ينتهك مبدأ النسبية، الذي يؤكد أن قوانين الفيزياء يجب أن تشكِّل العلاقات نفسها، بغض النظر عن كيفية تحرك الإطار المرجعي. لأنه كما أشرنا في الفصل السابق، فقد قيدنا أنفسنا حتى الآن بنظرية النسبية الخاصة، حيث تكون قوانين الفيزياء ثابتة فقط للمراقبين الذين يتحركون بسرعة ثابتة. من الواضح أن استنتاجات هذه النظرية لا يمكن تطبيقها بشكلٍ متماثلٍ في إطار كلا المراقبين، لأن أحدهما يتحرك بتسارع والآخر ليس كذلك. لهذا السبب، لا يجوز تبديل المراقبين، والقول بأن المراقب في السفينة الصاروخية يجب أن يرى توأمه في المختبر على أنه أقل من عمره. بدلًا من ذلك، ما دمنا بقينا ضمن نطاق نظرية النسبية الخاصة، يجب أن نعطي الإطار المرجعي غير المتسارع دورًا فريدًا في التعبير عن قوانين الفيزياء؛ وبهذه الطريقة نوضح كيف يمكن للمراقبين اللذين عانا من أنواع مختلفة من الحركات، عندما يجتمعان مرة أخرى أن يجدا أنهما قد مرَّا بفترات زمنية مختلفة.

للحصول على قوانين مماثلة للمراقبين المتسارعين وغير المتسارعين، يجب أن ننتقل إلى النظرية العامة للنسبية. لكن للقيام بذلك، يجب علينا إدخال مجال الجاذبية. كما أوضح أينشتاين، في إطارٍ مرجعي متسارعٍ، يجب أن تحدث تأثيراتٌ جديدة، تعادل تلك التي قد ينتجها مجال الجاذبية. في الواقع، من وجهة نظر المراقب المتسارع، يمكن للمرء أن يقول إن هناك مجالَ جاذبية إضافيًّا فعَّالًا، يعمل على البيئة العامة (النجوم، والكواكب، والأرض، وما إلى ذلك) مما يشرح تسارعه بالنسبة إلى سفينة الصواريخ.

وفقًا للنظرية العامة للنسبية، سيكون لساعتين تعملان في أماكن ذات إمكانات جاذبية مختلفة معدلات مختلفة. إذا كان المراقب على متن السفينة الصاروخية يستخدم قوانين النسبية العامة نفسها التي يستخدمها المراقب على الأرض، ولكنه يأخذ في الاعتبار إمكانات الجاذبية المختلفة المناسبة في إطاره المرجعي، فسوف يتنبأ بعد ذلك بفرق في معدلات نوعي الساعات. وكما تظهر عملية حسابية أخرى، سوف يتوصل إلى الاستنتاجات نفسها حول هذا الفارق الزمني كما حصل عليها الراصد على الأرض (الذي تقلل قوانين النسبية العامة بالنسبة إليه إلى تلك الخاصة بالنسبية الخاصة لأنه لم يتحرك بتسارع). لذا فإن الدرجة المختلفة من «الشيخوخة» للتوأمين متوافقة تمامًا مع مبدأ النسبية، عند تعميم النظرية بشكلٍ كافٍ لتطبيقها على الأطر المرجعية المتسارعة.

لماذا تبدو شيخوخة التوأمين المختلفة متناقضة بالنسبة إلى معظم الناس عندما سمعوا عنها لأول مرة؟ الإجابة تكمن أساسًا في نمط التفكير المعتاد، حيث نعتبر تلقائيًّا أن كلَّ ما هو موجود بشكلٍ مشتركٍ في تصوراتنا الحاضرة يحدث في الوقت نفسه، وهو ما نسميه «الآن». وبالتالي، عند النظر إلى النجوم في سماء الليل، لا يمكننا تجنب رؤية السماء بأكملها على أنها موجودة «الآن»، بالتزامن مع فعل إدراكنا. نتيجة لذلك، نُقاد، تقريبًا من دون مزيدٍ من التفكير الواعي، إلى افتراض أنه إذا انطلقت سفينة صاروخية في الفضاء، فيمكننا الاستمرار في مشاهدتها، أو البقاء على اتصالٍ مباشرٍ معها، ومقارنة كل حدث فيها (على سبيل

المثال، دقات الساعة) مع الأحداث المقابلة التي تحدث لنا في الوقت نفسه. عند عودته، سيُنظر إليه بعد ذلك على أنه قد مرَّ بالقدر نفسه من الزمن، كما يحدث بالفعل مع جميع الأنظمة التي نعرفها (والتي تتحرك بالطبع بسرعات منخفضة جدًّا بالنسبة إلى الضوء).

من المعروف لنا بالطبع أن ما نراه في سماء الليل لا يحدث في الواقع في اللحظة ذاتها التي ندركه فيها، بل بالأحرى أن كل ما نراه قد مضى وذهب (السدم البعيدة، على سبيل المثال، كما كانت قبل مئة مليون سنة أو أكثر). علاوة على ذلك، فإن حكمنا على متى كان ما نراه موجودًا بالفعل يستند إلى التصحيح $\Delta t = r/c$، وهو الزمن الذي يستغرقه الضوء للوصول إلينا. وكما أوضحنا في فصول سابقة، فإن هذا التصحيح ليس هو نفسه بالنسبة إلى جميع المراقبين، ولكنه يعتمد على سرعاتهم. نتيجة لذلك، لم يعد لإجراءاتنا المعتادة (لتخصيص زمن فريد لكل حدثٍ) معنى كبيرٌ. وإذا لم يكن للأحداث البعيدة زمنًا فريدًا من الحدوث، وهو الزمن نفسه بالنسبة إلى جميع الطرق الصالحة لقياسها، فلن يكون هناك أي سبب وجيه لافتراض أن اثنين من المراقبين اللذين ينفصلان ثم يلتقيان سيكونان بالضرورة قد مرَّا بالقدر نفسه من الزمن.

لإبراز نوع المشكلة التي تميل مفاهيمنا البدهية عن التزامن إلى إظهارها بشكلٍ أكثر حدة، دعونا نفترض ما سيحدث بالفعل إذا أرسل كل مراقب إلى الآخر ضوءًا عاديًّا أو إشارة راديو (مثلا إشارة واحدة في الثانية) كما يقيسها بساعاته الخاصة. يمكن لكل مراقب بعد ذلك

أن «يرى» كيف يمر زمن بالنسبة إلى المراقب الآخر، حتى يتمكن على الأرجح من التحقق من الكيفية التي يمر خلالها الاثنان بفترات مختلفة من الزمن.

لنبدأ بمناقشة ما يمكن أن يراه المراقب الذي بقي في المختبر. لتبسيط المشكلة، نفترض أن السفينة الصاروخية قد تم تسريعها مبدئيًّا إلى السرعة v في فترة زمنية قصيرة جدًّا بحيث يمكننا اعتبار التسارع فوريًّا بشكلٍ فعالٍ. نفترض أن السفينة الصاروخية تتحرك بعيدًا عن المختبر بسرعة ثابتة v في اتجاه z خلال فترة زمنية T/2، كما قاسها في إطار المختبر. ثم يتم إطلاق دفقة أخرى، فتنعكس السرعة (t_0 – v). تستمر السفينة لفترة زمنية أخرى T/2 حتى تعود إلى الأرض، وبعد ذلك تتباطأ فجأة إلى سرعة الأرض. (لا يغير هذا الافتراض للدفقات المفاجئة للتسارع أي سمة أساسية للمشكلة.) يظهر الخط العالمي للسفينة الصاروخية في مخطط مينكوفسكي (الشكل 1-30) على أنه OEA. يشار إلى إشارات الضوء العادية الصادرة عن المراقب المتحرك بخطوط مثل N_1N_1'، M_1M_1' إلخ.

في البداية، سيستقبل المراقب OA إشارات عند M_1'، M_2'، M_3' إلخ، والتي تقل تردداتها من خلال تأثيرات انزياح دوبلر، وفقًا للصيغة النسبية (12-17)[1].

إذا كانت فترة الساعة τ_0 في السفينة الصاروخية هي التي تحدد هذه الإشارات، فسيكون الزمن بين الإشارات τ' كما يظهر في المختبر

(1) يمكن استخدام حساب K للتفاضل والتكامل، كما قدم في الفصل السادس والعشرين.

(حيث إن $\theta = 0$) موضحٌ بالمعادلة التالية:

$$\frac{\tau_1}{\tau_0} = \frac{\nu_0}{\nu} = \left[1 + \frac{v}{c}\right]\frac{1}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \qquad (30\text{-}1)$$

من ناحية أخرى، بعد تسارع السفينة الصاروخية عند **E**، ستقترب من المختبر، بحيث يرى مراقب المختبر إشارات تتباطأ فترتها الزمنية بعد E. تبعًا للمعادلة:

$$\frac{\tau_2}{\tau_0} = \frac{\nu_0}{\nu_2} = \left[1 - \frac{v}{c}\right]\frac{1}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \qquad (30\text{-}2)$$

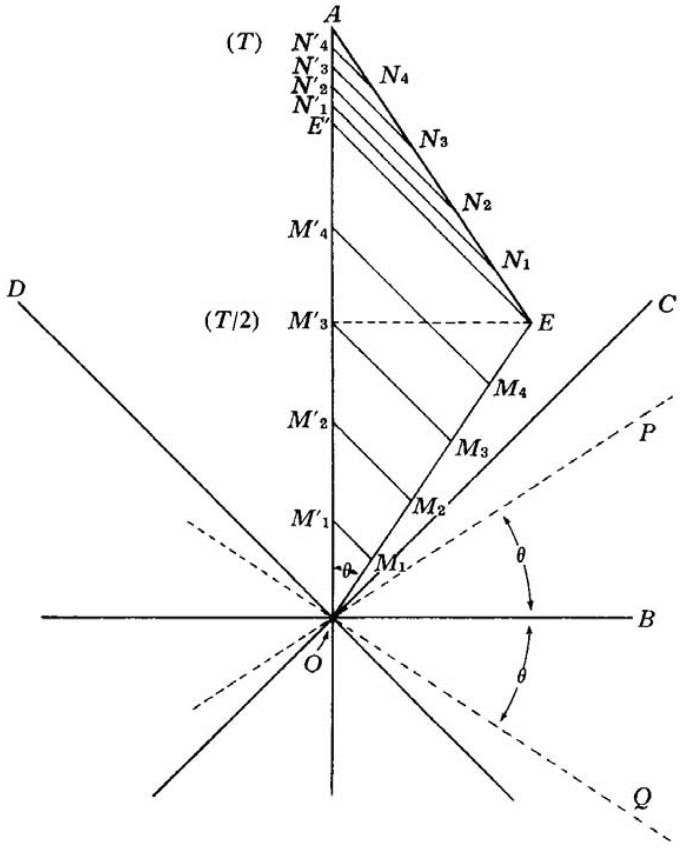
بسبب المساواة في سرعة تقهقر الصاروخ وسرعة اقترابه، من الواضح أن السفينة الصاروخية ستصدر العدد نفسه، N/2، من الإشارات في طريقها في أثناء الذهاب والعودة (N العدد الإجمالي للإشارات المنبعثة خلال الرحلة بأكملها). سيكون الزمن الإجمالي الذي يتلقى خلاله مراقب المختبر لهذه الإشارات موضحًا بالمعادلة التالية:

$$\frac{N}{2}\frac{\tau_0}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}}\left(1 + \frac{v}{c} + 1 - \frac{v}{c}\right) = \frac{N\tau_0}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \qquad (30\text{-}3)$$

مما يوضح، بالطبع، أن هذه الإشارات سوف تستقبل في المختبر على مدى فترة زمنية أطول من $N\tau_0$، والتي يمكن اعتبارها مأخوذة من قبل مراقب على متن السفينة الصاروخية. النقطة المهمة التي يجب ملاحظتها هنا هي أن مراقب المختبر لا يمكنه أن يعرف بشكلٍ مباشرٍ كيف يمرُّ الزمن بالنسبة لى المراقب الموجود على متن السفينة

الصاروخية، لأن الإشارات بين المراقبين تتغير بسبب انزياح دوبلر. بعبارة أخرى، ما يمكن ملاحظته بشكلٍ مباشرٍ في إطار المختبر هو، أولًا (في البداية) مجموعة من النبضات الأبطأ وبعد ذلك، مجموعة أخرى من النبضات الأسرع (على سبيل المثال، إذا كان مراقب المختبر سيشاهد المراقب المتحرك، فسوف يرى أولًا حياة الأخير تتباطأ، ثم بعد ذلك تتسارع). ومن خلال الحساب فقط يمكن لمراقب المختبر أن «يصحح» تأثيرات التقهقر أو اقتراب السفينة الصاروخية. في هذا الحساب يأخذ سرعة الضوء لتكون c. ولكن إذا اعتبر جميع المراقبين أن سرعة الضوء هي c، فإن أولئك الذين لديهم سرعات مختلفة يقومون في الواقع بتصحيحٍ مختلفٍ. نتيجة لذلك، ينسب التوأم في المختبر التزامن إلى أحداثٍ على خطوطٍ موازية لـ OB، بينما ينسب التوأم على الصاروخ التزامن إلى أحداثٍ في خطوطٍ موازية لـ OP، حتى يصل إلى نقطة التسارع E، وبعد ذلك ينسب تزامن الأحداث في خطوط موازية لـ OQ. وهكذا، عندما ينتقل التوأم الموجود في السفينة الصاروخية، على سبيل المثال، من M_3 إلى M_4، فإنه لا يحسب الفترة الزمنية نفسها للعملية كما يحسبها مراقب المختبر، لأنه يأخذ زمنًا يساوي صفرًا للتوافق مع الخط المنحدر OP وليس الخط الأفقي OB. بعد التسارع عند E، يأخذ الخط OQ ليكون مطابقًا لزمنه الذي يساوي صفرًا. بهذه الطريقة نرى أن هناك مجالًا للاختلاف في مقدار الزمن المسجل بالفعل بواسطة ساعات المراقبين اللذين ينفصلان ثم يجتمعان مرة أخرى.

شكل 1-30

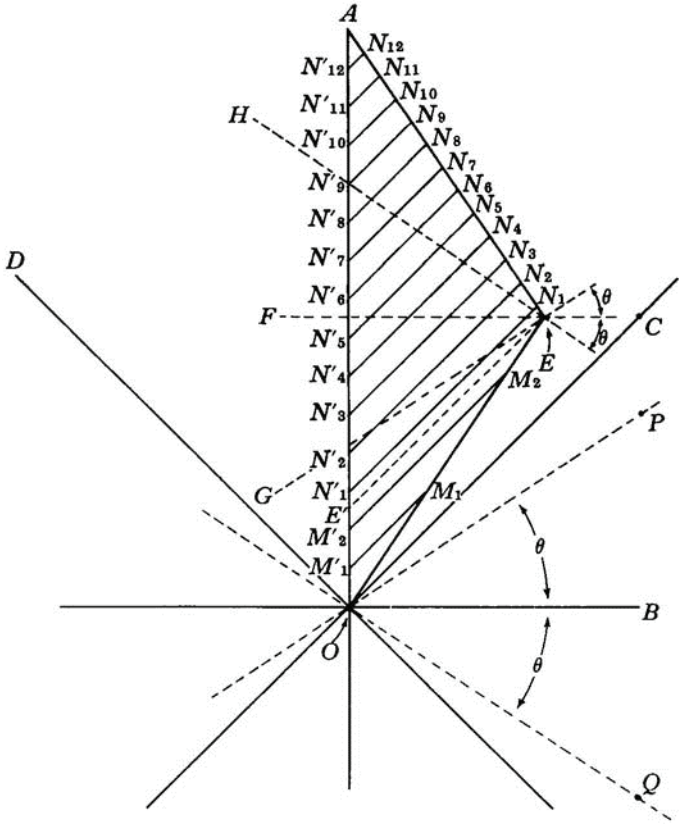


يمكننا الحصول على مزيدٍ من التوضيح في هذه المشكلة من خلال النظر فيما سيجده مراقب السفينة الصاروخية عندما ينظر إلى مجموعة من الإشارات الضوئية المرسلة بشكلٍ موحدٍ من قِبَل مراقب المختبر (انظر الشكل 2-30). بسبب انزياح دوبلر، الإشارات المرسلة من O و E' سوف تستقبلها عند O و E بترددٍ مخفضٍ، بينما ستستقبل الإشارات المرسلة بين E' و A بترددٍ متزايدٍ.

فقط قبل التسارع مباشرة عند E، ينظر مراقب سفينة الصواريخ إلى الأحداث على الخط EG (بالتوازي مع OP) المتزامنة مع E، ولكن بعد التسارع مباشرة يأخذ الأحداث على الخط EH (بالتوازي مع OQ) في الوقت نفسه مع E. نرى أن هناك قفزة مفاجئة في إحداثيات الزمن تُعزى إلى حدث معين N'_4، وأنه بعد التسارع عند E، يُنسب حدث مثل إحداثيات زمنية أصغر مما كان عليه من قبل (الفرق المقابل للخط GH). هذه القفزة في إسناد إحداثيات الزمن تعني أن هناك مجالًا لمزيدٍ من الإشارات القادمة من مراقب المختبر إلى المراقب المتحرك أكثر من العكس، على الرغم من أن كليهما يستخدمان ساعات متشابهة. وبما أن هذه القفزة تحدث فقط في إطار الصاروخ وليس في إطار المختبر، فمن الواضح أن الوضع غير متماثل بين الراصدين.

إذا كان مراقِب الصاروخ يراقب المراقب الثابت، فسيرى بعد ذلك أن حياة الأخير تتباطأ في البداية ثم تتسارع فيما بعد، لكنه سيجد خلال مجمل الرحلة أن تأثير التسارع أكبر من موازنة ذلك التباطؤ. لذلك لن يتفاجأ عندما يكتشف عند لقاء توأمه أن هذا توأمه على الأرض قد عاش حياة أطول مما عاشه توأم السفينة الصاروخية.

الشكل 2-30



نرى إذن أنه لا يوجد في الواقع شيء متناقضٌ في الاستنتاج النسبي بأن الساعة المتسارعة ستسجل زمنًا أقل عند المرور بين نقطتين مما تسجله ساعة غير متسارعة تمر بين نفس النقطتين. هذا ممكن لأنه في نظرية النسبية، الزمن ليس مطلقًا، مع لحظة عالمية هي «الآن»، الشيء نفسه بالنسبة إلى جميع المراقبين المتعايشين. بل هو نوعٌ أكثر دقة بكثيرٍ من المفاهيم، التي يمكن أن تكون مختلفة فيما يتعلق بإطارات مرجعية

مختلفة. هناك مجالٌ لأنواعٍ مختلفة من الزمن، كما هو مسجل في الساعات والعمليات الفيزيائية التي تخضع لأنواعٍ مختلفة من الحركة. من نواحٍ عديدة، يبدأ الزمن المادي في إظهار بعض خصائص خبرتنا الخاصة مع الزمن في الإدراك الفوري. وبالتالي، من المعروف جيدًا أن فترة زمنية معينة يمكن قياسها فيزيائيًّا بواسطة الساعة قد تبدو طويلة أو قصيرة، أو أبدية أو مجرد لحظة، اعتمادًا على مقدار الأحداث خلال هذه الفترة. (في القسم A -3 من الملحق سوف نتطرق إلى مشكلة إدراك الوقت بمزيدٍ من التفصيل) حتى تطوير نظرية النسبية، بدا أن الزمن المادي لم يشترك في هذه النسبية والاعتماد على الظروف. لكننا الآن نرى أن هذا حدث بسبب أننا درسناه فقط في المجال المحدود للسرعات المنخفضة. نظرًا إلى توسيع المجال ليشمل سرعات ملحوظة مقارنةً بـ c، فقد بدأنا في العثور على الزمن اعتمادًا على ظروف لا تختلف تمامًا عمَّا نختبره في الإدراك الفوري. بعبارة أخرى، جميع أشكال الزمن، بما في ذلك التسلسل الزمني والإدراك الحسي، هي وسائل لترتيب الأحداث الفعلية وقياس مدتها النسبية. إن فكرة وجود نظامٍ عالمي فريدٍ وقياس للزمن ليست سوى عادة فكرية نشأت في المجال المحدود لميكانيكا نيوتن. هي فقط صالحة في هذا المجال، لكنها تصبح غير كافية كلما توسع المجال. وربما مع اتساع المجال بشكلٍ أكبر، قد نضطر إلى تعديل مفاهيمنا عن الزمن (والمكان) أكثر لإثرائهما، وربما تغييرهما جذريًّا، بطريقة تعامل فيها المفاهيم النسبية الحالية على أنها تقريبية وحالات محدودة خاصة.

XXXI. أهمية مخطط مينكوفسكي في إعادة بناء الماضي

بسبب التوحيد النسبي للمكان والزمن في سلسلة واحدة من الزمكان رباعية الأبعاد، هناك ميلٌ لتفسير مخطط مينكوفسكي على أنه يمثِّل نوعًا من الحلبة أو مجال العمل، الذي يمكن للمراقب أن يراه فعليًّا في أي لحظة. وهذا يعني، بشكلٍ غير واعٍ تقريبًا، أنَّ هذا يقود إلى تبني وجهة نظر مراقبٍ يقف خارج المكان والزمن، يمسح الكون بأكمله من البداية إلى النهاية، كما يستطلع رجلٌ في طائرة المناظر الطبيعية تحته. ثم يطيل النظر إلى خطوط العالم للمراقبين الآخرين على أنها مساراتٌ يمرُّ بها هؤلاء المراقبون، تمامًا مثل قطار سكة حديد تلاحظه من طائرة، يمكن رؤيته وهو يتقدَّم على طول مساره الخاص.

ومع ذلك، يظهر القليل من التفكير أن وجهة النظر هذه لمخطط مينكوفسكي يجب أن تكون بعيدة جدًّا عن الحقيقة بالفعل. سنفترض أن مراقبًا في حالة سكونٍ في المختبر، سيمثِّل خطه العالمي OA في الشكل 31-1. في كل لحظة يمثل هذا المراقب بنقطة ما في الرسم التخطيطي ولتكن P. لا يستطيع هذا المراقب مسح مخطط مينكوفسكي بأكمله، على العكس من ذلك، يمكنه فقط معرفة الأحداث الموجودة داخل مخروط الضوء السابق، PM، وPN. لذلك، فإن «مستقبله المطلق» و«مستقبله المطلق في أي مكانٍ آخر» غير معروفٍ بالنسبة إليه.

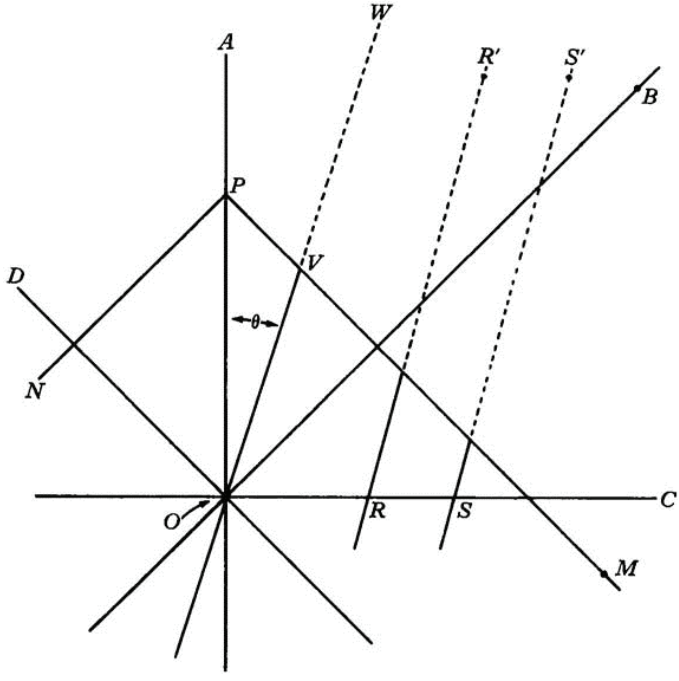
إن الوضع الحقيقي، كما اختبره أحد المراقبين في لحظة ما، يختلف بشكلٍ لافتٍ للنظر عمَّا يظهر في مخطط مينكوفسكي. لا تقتصر معرفة المراقب على جزءٍ من مخطط مينكوفسكي الموجود في ماضيه المطلق

فحسب، بل إنه أيضًا لا يرى ماضيه يحدث بالفعل، كما هو موضحٌ في هذا المخطط. لأننا في أي لحظة نختبر فقط ما هو موجودٌ بالفعل في تلك اللحظة. ما نراه في لحظة معينة من الماضي لم يعد موجودًا في الواقع في تلك اللحظة. ما تبقَّى من الماضي هو مجرد أثرٍ موجودٍ في الحاضر. قد يكون هذا الأثر في ذاكرتنا، أو في لوحة فوتوغرافية، أو قد يُترك في بنية الأشياء (على سبيل المثال، حلقات الأشجار، الهياكل العظمية لحيوانات ما قبل التاريخ، طبقات الصخور والأرض المدروسة في الجيولوجيا، إلخ). من هذه الآثار نعيد بناء الماضي في أفكارنا، وكذلك بمساعدة الصور والنماذج، وبالتالي فمن الواضح أن الديناصور المعاد بناؤه ليس الديناصور الحقيقي، تمامًا كما أن صورة حدث الماضي ليست ذلك الحدث نفسه. نظرًا إلى أن الذكريات مليئة بالحياة والحركة واللون والشعور، فإننا غالبًا ما نشعر بالارتباك حيالها، وفي الواقع نعاملها كما لو أن ما نتذكره لا يزال موجودًا. لكن في الواقع، كل ما يظهر في الذاكرة هو أيضًا مجرد أثرٍ للماضي الذي ذهب. هذا الأثر موجودٌ في خلايا دماغنا، وكما هو الحال، «أعيد تشغيله» في الوقت الحاضر، بقدر ما يمكن للمرء إعادة تشغيل تسجيل الفونوغراف، أو إعادة عرض فيلمٍ.

على أساس معرفتنا، ليس فقط للأحداث الفورية والحقائق من الماضي، ولكن أيضًا من التنظيمات العامة والاتجاهات والقوانين المجردة إما بوعي وإما بشكلٍ حدسي من الخبرات الفردية والجماعية، نحن قادرون على توقُّع مستقبلٍ محتملٍ. ولكن بينما نتوقع ذلك، فإن

هذا المستقبل أيضًا غير موجودٍ. إنه في الحقيقة ليس أكثر من صورة، توقع، فكرة. إذا كانت توقعاتنا قائمة على أسسٍ جيدة، فإن المستقبل الفعلي، عندما يأتي، قد يكون قريبًا مما كان متوقعًا. ولكن، بشكلٍ عامٍّ، غالبًا ما تكون توقعاتنا خاطئة، إما لأن معرفتنا بقوانين وأنظمة الطبيعة غير كافية، وإما لأن معرفتنا بالحقائق ذات الصلة غير كافية. علاوة على ذلك، يتضح من تجربتنا العامة أن كل هذه التوقعات التنبؤية تخضع لحالاتٍ احتمالية، أي لعوامل تنشأ خارج المجالات تحقيقاتنا في لحظة معينة، وهي عوامل غير معروفة لنا وبالتالي قد تلعب دورًا حاسمًا في تحديد ما سيحدث بالفعل.

شكل 1-31



تقدِّم نظرية النسبية مثالًا مهمًّا على أهمية الحالات الاحتمالية. وهكذا، كما رأينا، يمكن للمراقب P في لحظة معينة الحصول على معلومات فقط عمَّا كان في ماضيه المطلق. حتى لو كان على اتصالٍ بمراقبين آخرين، يمكنه فقط سماع ما رأوه في ماضيه المطلق، في أوقاتٍ كانت أيضًا في ماضيه المطلق. لذا، سواء كانت المعرفة تنبع من خبرة الفرد أو الخبرة الجماعية لمجموعة من الناس أو المجتمع، يجب أن تستند دائمًا إلى ما مضى وذهب، في الوقت الذي ننظر فيه. ومع ذلك، هناك العديد من سمات الطبيعة المنتظمة والمرتبة بحيث لا تتغيَّر بشكلٍ ملحوظٍ مع مرور الوقت. بالنسبة إلى مثل هذه الميزات، فإن المعرفة القائمة على الماضي بهذه الطريقة ستوفر تقريبًا جيدًا. ومع ذلك، كما رأينا في الفصول السابقة، لا يمكننا أبدًا أن نعرف مسبقًا ما هو المجال المناسب للقوانين التي توصلنا إليها في التحقيقات السابقة، لذلك يجب أن نكون دائمًا مستعدين لاحتمال أنه في التجارب اللاحقة في المجالات الجديدة، التنظيمات السابقة سوف نتخلَّى عنها.

حتى لو كان لدينا بعض المعرفة الموثوقة إلى حدٍّ ما حول القوانين العامة للطبيعة، كما تعلمناها من التجارب السابقة، والملاحظة، والتجربة، يبدو واضحًا أنه لا يمكننا تجنُّب الحالات الاحتمالية، فقط لأننا لا نستطيع أن نعرف تمامًا وبشكلٍ مؤكدٍ ما هو موجودٌ في أي مكانٍ آخر بشكلٍ مطلق. على سبيل المثال، إذا رأى مراقب P في الشكل 4-26 جسيمًا يتحرك على خطٍّ عالمي OV في ماضيه المطلق، فيمكنه أن يفترض بشكلٍ معقولٍ أن الجسيم لا يزال موجودًا على الخط VW،

وهو امتداد OV إلى المنطقة خارج المخروط الضوئي لـ P. إذا كان لديه قدرٌ كبيرٌ من المعلومات حول ما حدث داخل مخروط الضوء السابق، فقد يكون قادرًا على تطوير فكرة إسقاطية شاملة إلى حدٍّ ما لِمَا يجري خارج مخروط الضوء الخاص به. لكن هذه الصورة المتوقعة تخضع دائمًا للحالات الاحتمالية، لأن شيئًا غير معروفٍ لـ P قد يحدث دائمًا في مكانه المطلق (على سبيل المثال، نيزك، قد يدخل المختبر بشكلٍ غير متوقعٍ من الفضاء الخارجي، وبالتالي تتغير أدوات الرصد، ويبتعد الجسيم عن الاستمرارية المتوقعة لخطه العالمي على طول VW). ومن الواضح أن ما يحدث في المستقبل المطلق لـ **P** يعتمد على ما هو مطلقٌ في مكانٍ آخر، بحيث يخضع مستقبله أيضًا لحالاتٍ احتمالية.

للوهلة الأولى، قد يميل المرء إلى التساؤل عمَّا إذا كانت المعرفة الكاملة والمؤكدة للماضي المطلق لـ P لن تمكننا من عمل إسقاطٍ كاملٍ ومؤكدٍ لِمَا يحدث في أي مكانٍ آخر مطلق للحدث P، وبالتالي يسمح من حيث المبدأ محو الاحتمالات. لكن هذا السؤال ليس وثيق الصلة بالموضوع، لأنه من الواضح أن مثل هذه المعرفة الكاملة والمؤكد للماضي مستحيلة. في الواقع، تستلزم مثل هذه المعرفة العودة إلى الوراء بشكل لا نهائي، وإجراء ملاحظاتٍ وقياساتٍ ذات حساسية ودقة كبيرين في المقابل، لأنه في كثيرٍ من الحالات قد يعتمد ما يحدث في مستقبلنا بشكلٍ حاسمٍ على الأشياء الصغيرة التي حدثت منذ فترة طويلة. لكن تميل آثار الماضي البعيد إلى القضاء عليها وتشويشها في ملاحظاتنا. كلما ذهبنا إلى الوراء، يجب أن تكون القياسات أكثر

حساسية ودقة، ويجب أن تكون معرفتنا وفهمنا لقوانين الطبيعة أفضل، من أجل تفسير الآثار التي نلاحظها في الوقت الحاضر لإعادة بناء الماضي بشكلٍ صحيحٍ. من الواضح أنه من المستحيل أن يكون لديك حساسية كاملة ودقة للأدوات والمعرفة والفهم الكاملين لمجمل قوانين الطبيعة التي ستكون ضرورية للحصول على معلوماتٍ كاملة ومحددة حول ماضينا المطلق، حتى في لحظة معينة من وجودنا. هذا يعني أن التوقعات بين ماضينا المطلق إلى ماضينا المطلق في أي مكانٍ آخر غير مكتملة بالضرورة. لذلك هناك دائمًا الكثير مما هو غير معروفٍ في كل مكانٍ آخر لدينا؛ ولهذا السبب وحده، ستخضع التنبؤات المتعلقة بالمستقبل لحالاتٍ احتمالية تنشأ عمَّا هو غير معروفٍ في الوقت الذي تحدث فيه عملية التنبؤ. بالطبع، قد نتعرف على هذه الأشياء لاحقًا (عندما تصبح جزءًا من ماضينا المطلق)، ولكن بعد ذلك سيكون هناك شيءٌ مطلقٌ جديدٌ في مكانٍ آخر، غير معروف في الوقت الحالي، لذلك سيكون هناك دائمًا ما هو غير معروف.

يمكن ملاحظة أن كل هذه الاعتبارات تنشأ من الحاجة إلى مراعاة الحقيقة المهمة المتمثلة في أن المراقب جزءٌ من الكون، إنه لا يقف خارج المكان والزمن، وقوانين الفيزياء، بل لديه في كل لحظة مكانٌ محددٌ في سيرورة الكون الكلية، ويجب أن يرتبط بهذه العملية بالقوانين نفسها التي يحاول دراستها. نتيجة لذلك، وبسبب شكل هذه القوانين الفيزيائية، التي تعني أنه لا يمكن نقل أي فعل فيزيائي أسرع من الضوء، فهناك قيودٌ معينة على ما يمكن أن يعرفه مثل هذا المراقب في لحظة معينة.

في النظرية الكمومية، تكون النتائج المترتبة على حقيقة أن المراقب جزءٌ من الكون أكثر إثارة للإعجاب. لأنه عندما يأخذ المرء في الحسبان كمية الفعل غير القابلة للتجزئة التي تربط المراقب بما يلاحظه، يرى المرء أن كل فعل من أفعال الملاحظة تؤدي إلى مشاركة غير قابلة للاختزال للمراقب فيما يلاحظه، وهي مشاركة تحتوي على اضطرابٍ في النظام المرصود. نتيجة لذلك، كما أوضح هايزنبرج في مناقشته لمبدأ عدم التأكد، يوجد حدٌّ أدنى من عدم اليقين في دقة كل نوعٍ من القياس. ولكن ربما لم يتم إدراك أن نظرية النسبية في حد ذاتها تؤدي إلى ضرورة وجود نوعٍ من عدم اليقين المتأصل في تنبؤاتنا، يختلف عن ذلك الذي يتبع النظرية الكمومية، ومع ذلك لا يختلف تمامًا في آثارها.

دعنا الآن نعود إلى حقيقة أن الماضي في لحظة معينة، مثل P، غير موجود بالفعل، كما هو موضح في مخطط مينكوفسكي، ولكن هذا في الواقع مجرد إعادة بناء (يمكننا من خلالها، بالطبع، عرض المستقبل المحتمل). لقد رأينا مثالًا على ذلك في الفصل السابق، حيث يلاحظ شخصٌ واحدٌ في المختبر توأمه في السفينة الصاروخية والعكس صحيح. ما يلاحظه كلٌّ من هؤلاء الأشخاص في الواقع هو في البداية تباطؤ في العمليات التي يُرى أنها تحدث عند الآخر، لأن سفينة الصواريخ تبتعد عن المختبر، ولاحقًا تسريع هذه العمليات لأنها تقترب. في لحظة معينة يكون للمراقب ذاكرة أو سجلٌ آخر لما شوهد حتى تلك اللحظة، إنه لا يأخذ هذه الذاكرة أو السجل على أنها تمثِّل ما حدث بالفعل. بدلًا من ذلك، يجب عليه تفسيرها أو «تصحيح» تأثيرات

الزمن الذي يحتاج إليه الضوء للوصول إليه، وهذا التصحيح يعتمد على معرفته بالقوانين العامة للفيزياء، على الأقل فيما يتعلق بانتشار الضوء. وأنواع أخرى من الإشارات. من الواضح أن مثل هذا الإجراء يرقى إلى إعادة بناء ما يفترض أنه حدث بالفعل للمراقب الآخر. تعتمد صحة إعادة البناء هذه على صحة معرفته بقوانين انتشار الإشارات. وبالتالي قد يعرف فقط القوانين غير النسبية، وفي هذه الحالة ستحتوي إعادة بنائه على أنواعٍ معينة من الأخطاء (التي ستكون كبيرة عند السرعات العالية) والتي يمكن تجنبها باستخدام قوانين النسبية.

هناك حاجة إلى إعادة بناءٍ مماثلة للوصول إلى طول الجسم. لذلك ضع في اعتبارك مسطرة تتحرك بسرعة v بالنسبة إلى المختبر مع نقاط نهاية موضحة في الشكل 1-27 بواسطة الخطين العالميين RR' و SS'. ما هو طوله في الزمن المقابل للحظة O في خط العالم لمراقب المختبر؟ من الواضح أن هذا المراقب لا يمكن أن يكون على اتصالٍ بالحدثين R وS في الزمن المقابل للحدث O.

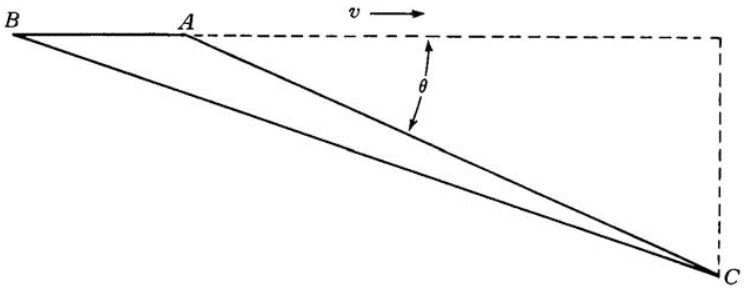
بدلًا من ذلك، يمكنه التعرُّف على هذه الأشياء (على سبيل المثال، باستخدام الإشارات الضوئية) فقط لاحقًا؛ ومن هذه المعرفة يمكن أن يصنع نوعًا من إعادة البناء الذهني للمسطرة كما كانت في الزمن المقابل لـ C.

حسب التعريف، يجب أن يكون طول المسطرة، بالطبع، هو المسافة بين نقطتي نهايتها، مأخوذة في الزمن نفسه، كما يحسبها المراقب المعني، مع مراعاة الزمن اللازم لوصول الضوء إليه من أجزاء

مختلفة من أجزاء المسطرة. للحصول على البيانات اللازمة لمثل هذا الحساب، يمكنه، على سبيل المثال، التقاط سلسلة من الصور الفوتوغرافية للمسطرة، ومعرفة مسافة الكاميرا من المسطرة والاتجاه الذي تشاهده الكاميرا، يمكنه استخدام طرق هندسية معروفة لحساب طول المسطرة. عند دراسة كيفية القيام بذلك، يمكننا أن نرى بوضوحٍ شديدٍ كيف أن بعض الخصائص النسبية مثل انكماش لورنتز للأجسام المتحركة هي إلى حدٍّ كبيرٍ مسألة تعريفٍ تقليدي للخصائص المعنية. وبالتالي، إذا كانت المسطرة تتحرك على طول اتجاه طولها وتم تصويرها من مسافة بعيدة بزاوية ما θ، إلى اتجاه حركتها، فلن تظهر هذه الصورة بمفردها المسافة بين نقطتي نهاية المسطرة عند نفس الزمن (الشكل 31-2). بدلًا من ذلك، تختار الكاميرا فقط جميع أشعة الضوء التي تمر عبر مصراع الكاميرا shutter في فترة (قصيرة يمكن تجاهله) يكون خلالها الأخير مفتوحًا. باستخدام التقديرات التالية من افتراض أن المسطرة تقابل زاوية صغيرة جدًّا $\Delta\theta$، عند الكاميرا C، نحسب بسهولة أن أشعة الضوء المحددة بهذه الطريقة من الخلف عند الحدث B، للمسطرة قد بدأت متأخرة عن تلك الموجودة في المقدمة A، بفترة زمنية تساوي $\Delta t = (l - v\,\Delta t/c)\cos\theta$، حيث 1 هو طول المسطرة. وحيث إن $\Delta t = (l/c)[\cos\theta/1 + (v/c)\cos\theta]$. بسبب حركة المسطرة سيكون الطول الذي يظهر في الصورة $l' = l/[1 + (v/c)\cos\theta]$. لذلك، سيتعيَّن على المراقب «تصحيح» هذا التأثير، إذا كان يرغب في الحصول على «طول» المسطرة بقيمة معينة باستخدام إحداثيات زمنه.

لإجراء هذا التصحيح يجب أن يعرف سرعة المسطرة. يمكنه العثور عليها، على سبيل المثال من سلسلة الصور الفوتوغرافية التي التقطها على فتراتٍ متتالية، مقاسة بساعاته، إذا لاحظ التغييرات في موضع المسطرة.

شكل 2-31



في الأمثلة أعلاه، أوضحنا كيف تكون الخصائص مجردة، مثل الطول والتردد، في المجال النسبي. نادرًا ما يُنظر إليهم بشكلٍ مباشرٍ على هذا النحو. بدلًا من ذلك، لا يمكن حسابها إلا بعد عملية من إعادة البناء، بناءً على قدرٍ كبيرٍ من المعرفة بالماضي، العام والخاص.

ومع ذلك، فإن كل ما لدينا من معلومات لها الصفة الموصوفة أعلاه. وبالتالي فمن الواضح أن ما نعرفه عن عصور ما قبل التاريخ يأتي بالكامل من إعادة بناء آثار هذه الأوقات التي لا تزال موجودة. لكن معرفتنا بالأوقات التاريخية هي أيضًا مجرد إعادة بناء، بالإضافة إلى سجلات ما قاله الناس وفعلوه (سجلات غالبًا ما تكون خاطئة ومضللة وغير كاملة، إلخ). وحتى معرفتنا بماضينا المباشر هي أيضًا

إعادة بناء مماثلة، بناءً على ما يمكننا تذكره منه. لذا فإن الماضي بأكمله هو نوعٌ من إعادة البناء. من المؤكد أن الكثيرَ منها يحدث من خلال التوقع المعتاد لأنواع معينة من التنظيمات، تتطلب القليلَ من التفكير الواعي أو لا تتطلب أي تفكيرٍ على الإطلاق. ومع ذلك، لا يمكن إنكار أن الماضي قد ولَّى، وأن كل ما تبقى منه هو آثارٌ، ونحن نفسر، وننظم، ونبني بعض المعرفة التقريبية وغير الكاملة بشكلٍ عامٍّ لِمَا حدث بالفعل. هذه المعرفة لها درجة معينة من الحقيقة المحدودة والجزئية، مما يجعلها دليلًا عامًّا مفيدًا للأعمال المستقبلية، بشرط أن يكون المرء متيقظًا للتعرف على الأخطاء كلما أظهرت نفسها.

مع وضع كل هذا في الاعتبار، دعونا نبدأ الآن في مسألة ما يمكن أن يعنيه مخطط مينكوفسكي بالفعل. الإجابة هي أن هذا الرسم البياني هو نوعٌ من خريطة الأحداث في العالم، التي يمكن أن تعطينا بشكلٍ صحيحٍ ترتيبَ ونمطَ وهيكلَ الأحداث الحقيقية، ولكنها ليست في حد ذاتها العالم كما هو في الواقع. وهكذا، فإن الجميع على دراية بحقيقة أن خريطة العالم مصنوعة من الورق والحبر وما إلى ذلك، وأن الخريطة ليست هي العالم. ومع ذلك، فإن الخريطة الجيدة لها هيكلٌ يشبه في بعض النواحي هيكل العالم. وهكذا، في مثل هذه الخريطة، إذا عرضت مدينة معينة C على أنها تقع بين مدينتين أخريين A وB، فسنجد في الواقع عند انتقالنا من A إلى B أن C بالفعل بينهما. (ستكون الخريطة السيئة، هي تلك التي لا يتشابه هيكلها مع الهيكل الذي من المفترض أن تكون عليه الخريطة).

يمكن القول إذن إن الفيزياء قد طوَّرت نوعًا من خريطة الأحداث التي تحدث في العالم، على سبيل المثال، إذا تم رؤية الحدث B على الخريطة على أنه يقع بين الحدثين A وC، فيجب أن نجد أن C تمت ملاحظتها بالفعل بعد A وقبل B بالترتيب الزمني على أساس نظرية أينشتاين، ومع ذلك، طوَّر الفيزيائيون الآن خريطة أكثر دقة، حيث يرتبط المكان والزمن بطبيعتهما، بالطريقة المحددة في مخطط مينكوفسكي. في هذه الخريطة، إذا كان هناك حدثان مطلقان أحدهما للآخر في مكانٍ آخر، فهذا يعني ضمنيًّا أن المراقبين الذين يتحركون بسرعاتٍ مختلفة قد يعزون ترتيبًا زمنيًّا مختلفًا للأحداث، حيث يقول البعض إن A قبل B والبعض الآخر إن B قبل A. ومع ذلك، إذا كانت الأحداث داخل المخروط الضوئي بعضها لبعض، فإن الخريطة تشير إلى أن جميع المراقبين سوف يتفقون على أيهما الأقدم وأيهما الأحدث (حتى لا يكون هناك غموضٌ في ترتيب مجموعات الأحداث المرتبطة سببيًّا).

من الواضح أنه حتى في حالة جغرافيا الأرض، فإن الخريطة هي إعادة بناء متقنة، تستند إلى عددٍ هائلٍ من الملاحظات المنظمة والمرتبة والهيكلية وفقًا لمبادئ هندسية معينة أمكن استخلاصها من نطاقٍ واسعٍ من التجارب السابقة. غالبًا ما توجد أخطاء في الخريطة تصحح على أساس المزيد من الملاحظة؛ وفي بعض الأحيان كانت هناك تغييرات أساسية في بنية الخريطة، ناتجة عن امتداد التجربة إلى مجالاتٍ أوسع (على سبيل المثال، عندما استبدلت فكرة الأرض المسطحة بمفهوم الأرض الكروية). علاوة على ذلك، لا يتوقع أحدٌ أن تكون الخريطة

كاملة، بدلًا من ذلك، إنها مجرد دليلٍ عامٍّ، حتى ترى ما هو شكل بلد معين فعليك أن تذهب إلى هناك.

بطريقة مماثلة، تستند مفاهيم الفيزيائي عن المكان والزمن إلى إعادة البناء، بما يتوافق مع المبادئ الهندسية والديناميكية والهيكلية المناسبة التي استنبطت تجريديًّا من مجموعة واسعة من التجارب السابقة. تحتوي هذه أيضًا على أخطاء يجب تصحيحها على أساس المزيد من الملاحظات، ويمكن أن تخضع لتعديلاتٍ هيكلية أساسية، حين تمتد التجربة إلى مجالاتٍ جديدة. وبالمثل، فإن الخريطة لم تكتمل أبدًا. في الواقع، إنها تقوم فقط على ما مضى وانتهى. ولكن عندما يوضع كلُّ هذا في هيكل خريطة مفاهيمية جيدة، يمكن أن تكون بمثابة دليلٍ عامٍّ لِمَا يمكن توقُّعه في المستقبل. ومع ذلك، لنرى كيف سيكون المستقبل حقًّا، يجب علينا، بالطبع، الانتظار حتى يحدث بالفعل. ومن وقتٍ لآخر، ستكون هناك مفاجآتٌ لا تتوافق إطلاقًا مع ما هو موجودٌ على خريطتنا.

الفرق بين الخريطة والمنطقة التي توجد عليها الخريطة واضحٌ جدًّا لدرجة أنه من غير المحتمل أن يخلط أحدٌ بين الخريطة مع ما يفترض أن تمثِّله (أي أكثر من شخصٍ من المرجح أن يخلط بين صورة وجبة مع وجبة حقيقية يمكن أن تغذيه). لكن يبدو أن أفكارنا عن المكان والزمن (سواء اكتسبت من خلال الخبرة المشتركة أو في البحث المادي) يمكن الخلط بينها بسهولة نسبيًّا مع ما يحدث بالفعل. وهكذا، عندما اقترح نيوتن فكرة المكان والزمن المطلق، لم يقل الفيزيائيون أنَّ هذا مجرد

نوعٍ من الخرائط المفاهيمية، التي قد يكون لها هيكلٌ صحيحٌ جزئيًّا وخاطئ جزئيًّا بالنسبة إلى العمليات الفيزيائية الحقيقية. بدلًا من ذلك، شعروا بـ(ما هو) مطلقٌ من الزمن والمكان. الآن وقد أصبحت رؤية هذه الفكرة على أنها درجة محدودة فقط من الصلاحية، فمن المحتمل أن يكون الميل هو الشعور بأن (ما هو) نسبي من الزمكان، كما هو موضح في مخطط مينكوفسكي.

يمكن تجنُّب الكثير من الالتباس حول هذه النقطة إذا قلنا إن كلًّا من الزمكان عند نيوتن وعند أينشتاين عبارة عن خرائط مفاهيمية، لكلٍّ منها هيكلٌ يشبه، في مجاله، مجموعات حقيقية من الأحداث والعمليات التي يمكن ملاحظتها بالفعل. ثم تُترك مساحة في أذهاننا للترفيه عن فكرة أنه مع دخول الفيزياء إلى مجالاتٍ جديدة، قد تكون هناك حاجة إلى أنواعٍ أخرى من الخرائط المفاهيمية.

أي خريطة من هذا النوع هي ما ليس عليه العالم. أي أن الخريطة هي فكرة أو صورة أو وصفٌ أو تمثيلٌ، في حين أن العالم ليس أيًّا من هذه الأشياء. ولكن كما يحدث مع كل الأفكار، فإن الأفكار الملائمة تعني هيكلًا مشابهًا لبنية ما هو موجود. واختبار مدى كفاية الفكرة هو معرفة ما إذا كان الهيكل الذي كُشِف عنه في التجربة الفعلية مشابهًا لتلك التي تتضمنها أفكارنا. إذا لم يكن الأمر كذلك، فإننا نحتاج إلى مفاهيم جديدة، مما يعني ضمنيًّا بنية أخرى تكون كافية لتلك التي كشف عنها في الحقائق التي نلاحظها بالفعل.

في جميع الخرائط (المفاهيمية أو غير ذلك) تنشأ حاجة للمستخدم

إلى تحديد موقعه وتوجيهه من خلال رؤية أي نقطة على الخريطة تمثِّل موقعه وأي خطٍّ يمثِّل الاتجاه الذي يبحث فيه. عند القيام بذلك، يدرك المرء، في الواقع، أن كل نقطة واتجاه من الملاحظة ينتج منظورًا فريدًا عن العالم. ولكن بمساعدة خريطة جيدة لها بنية مناسبة، يمكن للمرء أن يربط ما يُرى من منظورٍ ما بما يُرى من منظورٍ آخر، وبهذه الطريقة يستخرج ما هو ثابتٌ في ظل تغيير المنظور، ويؤدي إلى معرفة دائمة التحسن وفهم الطابع الفعلي للمنطقة قيد التحقيق. وبالتالي، عندما يقوم مراقبان لهما وجهات نظرٍ مختلفة بنقل ما يرونه، فلا داعي للمناقشة، وتقديم آراء حول أي وجهة نظر «صحيحة» وأي وجهة نظر «خاطئة». بدلًا من ذلك، يراجعون خرائطهم، ويحاولون الوصول إلى فهمٍ مشتركٍ لسبب وجود منظورٍ مختلفٍ لكل شخصٍ ينظر إلى المنطقة نفسها، وبالتالي كيف توصل إلى وجهة نظره الخاصة، المرتبطة بطريقة معينة بوجهة نظر الآخر. (بالطبع، إذا لم يتمكنوا من القيام بذلك بعد جهودٍ معقولة، فقد يبدأون في الشك في أنهم قد يحتاجون إلى خرائط بهياكل مختلفة).

في ميكانيكا نيوتن قلَّلت أهمية موقع ومنظور المراقب. بالطبع، ربما أدرك الفيزيائيون دائمًا أنَّ كلَّ مراقبٍ لديه بالفعل منظور. ومع ذلك، ربما شعروا أن مثل هذا المنظور لا يحتاج إلى لعب دور في القوانين الأساسية للفيزياء. بدلًا من ذلك، افترضوا أن العملية الفيزيائية تحدث في مكانٍ وزمنٍ «مطلق» بشكلٍ مستقلٍّ عن الطريقة التي يتم بها قياسها ومراقبتها، بحيث لا يظهر منظور المراقب (أو أدواته) على الإطلاق في

هذه القوانين. من ناحية أخرى، من وجهة نظر أينشتاين، من الواضح أن أي مثالٍ معينٍ لمخطط مينكوفسكي هو خريطة مقابلة لما سيتم ملاحظته في نظامٍ يتحرك بطريقة معينة وموجهة إلى اتجاه معين. لذلك، تحتوي هذه الخريطة بالفعل على بعض من منظور المراقب الضمني فيها. علاوة على ذلك، كما رأينا، حتى المراقب بسرعة معينة لديه، في كل لحظة، منظورٌ مختلفٌ عن الكون، لأنه يمتلك معلوماتٍ فقط عن ماضيه المطلق، الذي يتوافق مع منطقة مختلفة من الزمكان في كل لحظة من وجود مثل هذا المراقب. وبالتالي، سواء أخذنا في الاعتبار ما يراه مراقبون مختلفون أو المراقب نفسه في أوقاتٍ مختلفة، فمن الضروري ربط نتائج كل هذه الملاحظات باستمرارٍ، من خلال إحالتها إلى خريطة الزمكان ذات الهيكل الصحيح، وفي هذا طريقة لتطوير معرفة وفهم متناميين باستمرارٍ لِمَا هو ثابتٌ وبالتالي لا يعتمد على المنظور الخاص لكل مراقب.

من الواضح إذن أنه بينما تؤكد النسبية الدور الخاص لكلِّ مراقبٍ بطريقة تختلف عمَّا قامت به في النظريات السابقة، فإنها لا تندرج بالتالي في نوع من «الذاتية[1] subjectivism» التي تجعل الفيزياء تشير فقط إلى ما يجده المراقب مناسبًا أو يختار التفكير فيه. بدلًا من ذلك، ينصب تركيزه على الحقيقة التي أهملت تقريبًا حتى الآن وهي أنَّ كلَّ مراقبٍ لديه منظورٌ متأصلٌ، مما يجعل وجهة نظره فريدة بطريقة ما. لكن الاعتراف بهذا المنظور الفريد يخدم، كما كان، لتمهيد الأرضية لنهجٍ أكثر واقعية لاكتشاف ما هو في الواقع ثابتٌ ولا يعتمد على منظور المراقب.

(١) الذاتية Subjectivism: مذهب فلسفي ذات عقيدة «المعرفة كلها ناشئة عن الخبرة الذاتية». (المترجم).

ملحق

الفيزياء والإدراك

A-1 : مقدمة

لقد رأينا خلال هذا الكتاب، أنه في نظرية النسبية لأينشتاين، لم تعُد مفاهيم المكان والزمن والكتلة وما إلى ذلك، تمثِّل المطلق، الموجودة في حد ذاتها كموادٍ أو كياناتٍ دائمة. بدلًا من ذلك، يُنظر إلى الفيزياء بأكملها على أنها تتعامل مع اكتشاف ما هو ثابتٌ نسبيًّا في الحركات المتغيرة التي يمكن رصدها في العالم، وكذلك التغيرات في وجهات النظر، والأطر المرجعية، والتوقعات المختلفة، إلخ، التي يمكن اعتمادها في مثل هذا الرصد. لقد تضمَّنت قوانين نيوتن وجاليليو بالفعل عددًا من المفاهيم النسبية من هذا النوع (على سبيل المثال، نسبية مركز الإحداثيات، ونسبية الاتجاهات، وسرعة الإطار المرجعي). لكن داخل قناعاتهم ما زالت المفاهيم الأساسية للمكان والزمن والكتلة، وما إلى ذلك، تُعامَل على أنها مطلقة. كانت مساهمة أينشتاين في توسيع هذه المفاهيم النسبية لتشمل قوانين، ليس فقط الميكانيكا، ولكن أيضًا تلك الخاصة بالديناميكا الكهربية والبصريات، في النسبية الخاصة، والجاذبية في النظرية العامة. في سبيل القيام بذلك

دفعه البحث إلى اتخاذ الخطوة الثورية التي أشرنا إليها، أي التوقُّف عن اعتبار خصائص المكان والزمن والكتلة وما إلى ذلك على أنها عناصر مطلقة، بدلًا من التعامل معها على أنها سماتٌ ثابتة لعلاقات تجمعات الأشياء المرصودة. من الأشياء والأحداث إلى الأطر المرجعية. في الأطر المرجعية المختلفة، ستكون الإحداثيات مختلفة للمكان، والزمن، والكتلة، والطاقة وما إلى ذلك، وهي المرتبطة بأشياء وأحداثٍ محددة. ومع ذلك، هناك مجموعات مختلفة من التحولات (على سبيل المثال، الدورات، إزاحة الفضاء، تحويلات لورنتز) التي تربط العديد من جوانب العالم، فإذا رُصِدت في أي إطارٍ فيمكن رصدها كذلك في إطارٍ آخر. وفي هذه التحولات تمثِّل دوال معينة خصائص ثابتة (مثل الفترة الزمنية والكتلة الساكنة)، وستكون هي نفسها لجميع الإطارات المرجعية، داخل المجموعة المعنية. بطبيعة الحال، فإن مثل هذا الثبات سيظل بشكلٍ عامٍّ في بعض المجالات فقط، لذلك مع توسيع المجال قيد التحقيق، قد نتوقع الوصول إلى علاقاتٍ ثابتة جديدة، تحتوي على العلاقات الأقدم كحالاتٍ تقريبية محدودة. وهكذا يُنظر إلى شرعية الطبيعة على أنها تتوافق فقط مع إمكانية العثور على ما هو ثابتٌ. ولكن نظرًا إلى أن كلَّ نوعٍ من الثوابت يتعلَّق فقط بمجالٍ مناسبٍ، فمن المتوقع أن يستمر العلم في اكتشاف أنواعٍ جديدة من العلاقات الثابتة، كلٌّ منها يساهم في فهم مجالٍ جديدٍ للظواهر.

للوهلة الأولى، قد تبدو وجهة النظر الموصوفة أعلاه مختلفة تمامًا عن وجهة النظر «البدهية» (بالإضافة إلى الفيزياء الأقدم لنيوتن). لأننا

لسنا معتادين على اعتبار العالم مكونًا إلى حدٍّ ما من أشياء دائمة أو مشبعة ببعض القوانين الدائمة، وهذا يعني أننا في الحياة اليومية لا نتحدث أبدًا عن «العلاقات الثابتة»، بل نشير إلى المناضد والكراسي والأشجار والمباني والأشخاص، إلخ، وكلٌّ منها يُنظر إليه بشكلٍ أو بآخر من دون وعي على أنه نوعٌ معينٌ من كائنٍ أو كيانٍ، مضاف إلى الآخرين فيصنع العالم كما نعرفه. نحن لا نعتبر هذه الأشياء أو الكيانات ثوابت نسبية التي إلى جانب خصائصها والقوانين التي تفي بها، قد جردت من التدفق الكلي للتغيير والحركة. يبدو أن هناك فرقًا صارخًا بين الطريقة التي نتصور بها العالم كما رصدناه في الخبرة المباشرة (وكذلك في مجال الفيزياء الكلاسيكية غير النسبية) والطريقة التي نتصوره بها في نظرية النسبية.

سنبيِّن في هذا الملحق أنَّ الاختلاف بين مفاهيم الخبرة المشتركة وتلك الخاصة بنظرية النسبية ينشأ أساسًا بسبب بعض الأفكار المعتادة المتعلقة بهذه الخبرة، وأن هناك الآن قدرًا كبيرًا من الأدلة العلمية الجديدة، ولكن المؤكدة جيدًا، التي تشير إلى أن وضعنا الفعلي لإدراك العالم (رؤيته، سماعه، لمسه، إلخ) أقرب بكثيرٍ في الشخصية والبنية العامة إلى ما تقترحه الفيزياء النسبية مما هو مقترحٌ من قِبَل فيزياء ما قبل النسبية. في ضوء هذا الدليل، يبدو أن المفاهيم غير النسبية تبدو طبيعية بالنسبة إلينا أكثر من المفاهيم النسبية، ويرجع ذلك أساسًا إلى فهمنا المحدود وغير الكافي لمجال الخبرة المشتركة، وليس بسبب أي حتمية متأصلة في أسلوبنا المعتاد في فهم هذا النطاق.

A-2 : تطور مفاهيمنا الشائعة عند الرضع وصغار الأطفال

يأتي الدليل المؤيد للاقتراح في نهاية الفصل الأول من عدة مجالاتٍ مختلفة. سنبدأ بالدراسات الرائعة لتنمية الذكاء عند الرضع والأطفال الصغار التي أجراها بياجيه[1] J.Paiget. على أساس الملاحظات الطويلة والدقيقة للأطفال من جميع الأعمار منذ الولادة وحتى عشر سنوات أو أكثر، كان في الواقع قادرًا على رؤية تطور أفكارنا المعتادة عن المكان والزمن والأشياء الدائمة والمادة الدائمة مع الكمية الإجمالية المحفوظة وما إلى ذلك، وبالتالي تتبُّع العملية التي تُبنى فيها هذه المفاهيم حتى تبدو طبيعية وحتمية.

لا يتصرف الرضيع الصغير كما لو كان لديه مفهوم الكبار لعالمٍ منفصلٍ عن نفسه، يحتوي على أشياء مختلفة بشكلٍ أو بآخر دائمة. بدلًا من ذلك، يقدم بياجيه دليلًا جيدًا يشير إلى أن الرضيع يبدأ بتجربة كلية غير متمايزة تقريبًا. وهذا يعني أنه لم يتعلَّم بعد أن يميِّز بين ما ينشأ داخله وخارجه، ولا أن يميز بين الجوانب المختلفة للعالم «الخارجي» أو «الداخلي». بدلًا من ذلك، يختبر عالمًا واحدًا فقط، في حالة من التدفق المستمر للأحاسيس، والإدراك، والمشاعر، إلخ، مع عدم وجود أي شيء يمكن تصنيفه على أنه دائمٌ فيه. ومع ذلك، يعطي الرضيع بعض ردود الفعل الفطرية المرتبطة بالطعام والحركات وما إلى ذلك.

---

(1) J.Paiget, The Origin of Intelligence in the Child, Routledge and Kegan Paul, London, (1953). J.Piaget and B.Inhelder, The Child's Conception of Space, Routledge and Kegan Paul, London, (1956).

يمكن أن تتطور ردود الفعل هذه بحيث تستوعب بشكلٍ انتقائي جوانبَ مختلفة من البيئة؛ وبهذه الطريقة تبدأ البيئة في التمايز بشكلٍ فعَّالٍ إلى حد اتخاذ بعض الميزات «التي يمكن التعرُّف عليها». ولكن في هذه المرحلة، يكون التعرُّف وظيفيًّا إلى حدٍّ كبيرٍ (على سبيل المثال، بعض الأشياء «للأكل»، وبعضها «للشرب»، والبعض «للسحب» وما إلى ذلك)، ويبدو أن هناك تطورًا ضئيلًا أو معدومًا لقدرة الشخص البالغ على التعرف على جسمٍ بالشكل أو الهيئة أو الهيكل أو غيرها من الخصائص المتصورة.

في البداية، تساهم هذه الأفعال الانعكاسية والوظائف إلى حدٍّ كبيرٍ في تلبية الاحتياجات الأولية، التي تشير إليها الأحاسيس، مثل الجوع، إلخ. ومع ذلك، في المرحلة التالية، هناك ما يُسمَّى بـ «المنعكس الدائري circular reflex»، وهو أمرٌ حاسمٌ بالنسبة إلى تنمية الذكاء. في مثل هذا المنعكس يوجد دافعٌ صادرٌ يتبعها (على سبيل المثال، يؤدي إلى الحركة من اليد)، ليس بشكلٍ أساسي لإشباع الحاجة، بل بسبب بعض النبضات الحسيَّة الواردة (على سبيل المثال، في العين والأذن وما إلى ذلك). يمكن القول إن هذا هو بداية الإدراك الحقيقي، لأن الطريقة الأساسية للتواصل مع شيء ما -وليس مجرد إشباعٍ فوري لحاجة جسدية- هي من خلال دمجه في عملية يكون فيها دافعٌ معينٌ تجاه الفعل مصحوبًا بإحساسٍ معينٍ.

ينفذ مبدأ المنعكس الدائري هذا في جميع التطورات اللاحقة. وهكذا، في مرحلة معينة، يبدأ الرضيع في الاستمتاع بمثل هذه

المنعكسات، بالترتيب، كما يقول بياجيه: «لإنتاج نظارات فضولية». وجد، على سبيل المثال، أن سحب حبلٍ معينٍ سينتج إحساسًا مثيرًا بالحركة أمامه (إذا كان الحبل مرتبطًا بجسمٍ ملونٍ). يجب ألا نفترض أنه يفهم العلاقة السببية بين الحبل والحركة، أو حتى إنه يتنبَّأ بإحساس الحركة في مخيلته ثم يحاول إدراكها من خلال عملية ما. بدلًا من ذلك، يكتشف أنه من خلال إجراء مثل هذه العملية، فإنه يحصل على إحساسٍ لطيفٍ يمكن التعرُّف عليه. بعبارة أخرى، الاعتراف بتكرار حدثٍ سابقٍ يأتي أولًا؛ القدرة على استدعاء هذا الحدث من الذاكرة يأتي فقط في وقتٍ لاحقٍ، وبالتالي، في هذه المرحلة، فهو يعرف فقط أن عملية معينة ستؤدي إلى تجربة ممتعة ومميزة.

إن القدرة على التعرُّف على شيء مشابه لما أمكن تجربته من قبل هي بالتأكيد شرطٌ أساسيٌّ ضروري للبدء في رؤية شيء دائم نسبيًّا في تدفق العملية، وهو من المحتمل جدًّا أن يكون العنصر الرئيسي في تجارب الرضيع المبكرة. هناك شرطٌ آخر مهمٌّ لذلك وهو تنسيق العديد من أنواع المنعكسات المختلفة المرتبطة بجسمٍ معينٍ. وهكذا، في البداية يبدو أن الرضيع لا يدرك إلا القليل أو لا يدرك أن الشيء الذي يراه هو الشيء نفسه الذي يسمعه. بدلًا من ذلك، يبدو أن هناك منعكساتٍ منفصلة إلى حدٍّ ما، مثل الاستماع، والنظر بالعينين، وما إلى ذلك. ومع ذلك، في وقتٍ لاحقٍ، يبدأ تنسيق هذه المنعكسات، حتى يتمكَّن أخيرًا من فهم أنه يرى ما يسمعه، ويستوعب ما يسمعه. يرى، إلخ. هذه خطوة مهمة في نمو الذكاء، لأنه يتضمن بالفعل المفهوم الذي سيتطور أخيرًا – عن جسمٍ واحدٍ مسؤولٍ عن جميع أنواع تجربتنا المختلفة معه.

ومع ذلك، لا يزال الرضيع بعيدًا عن فكرة الشيء الدائم، أو العلاقات السببية الدائمة بين هذه الأشياء. بدلًا من ذلك، يشير سلوكه في هذه المرحلة إلى أنه عند تقديم شيء مألوف له فإنه يقوم الآن بتجريد بعض إجماليات الإحساس والاستجابة التي يمكن التعرُّف عليها بشكلٍ غامضٍ، بما في ذلك تنسيق اليد والعين والأذن، إلخ. وبالتالي هناك بذرة لمفهومٍ الثابت هنا، لأنه في التدفق الكلي للخبرات يمكنه الآن التعرف على مجموعاتٍ ثابتة معينة من سمات النمط، تختبر هذه المجموعات نفسها كإجمالياتٍ، بحيث لا يمكن التعرف على الجسم خارج سياقه العرفي.

في وقتٍ لاحقٍ، يبدأ الطفل في تتبُّع جسمٍ متحركٍ بعينيه، ويكون قادرًا على التعرُّف على ثبات شكله على الرغم من حركته. وبالتالي فهو يبدأ في بناء المنعكسات اللازمة لإدراك استمرارية وجود أشياء معينة، بصرف النظر عن سياقاتها المعتادة. ومع ذلك، لا يزال ليس لديه فكرة عن أي شيء دائم. بدلًا من ذلك، يتصرَّف كما لو كان يعتقد أن الشيء يأتي إلى الوجود حين يراه أولًا ويزول من الوجود حين يراه آخر مرة. وهكذا، إذا مرَّ شيء أمامه واختفى لاحقًا من مجال نظره، فإنه يبحث عنه، ليس في الاتجاه الذي رآه فيه آخر مرة، بل في اتجاه المكان الذي رآه فيه لأول مرة، كما لو كان يعتبر هذا المكان هو المصدر الطبيعي لمثل هذه الأشياء. وبالتالي، إذا اختفى جسمٌ ما وراء عائقٍ، فلا يبدو أنه لدى الطفل أي فكرة عن البحث عنه هناك. يأتي إدراك إمكانية القيام بذلك في وقتٍ لاحقٍ فقط، بعد أن يبدأ الطفل في العمل مع ما يسميه

بياجيه «مجموعات العمليات groups of operations». أبسط هذه العناصر هي «مجموعة من اثنين». أي أن هناك عملياتٍ -مثل تدوير شيء ما ثم تدويره مرة أخرى، وإخفائه خلف عائقٍ وإعادته للعرض مرة أخرى، وهز شيء ما ذهابًا وإيابًا- وهي تشترك في وجود عملية يمكن أن تكون نتيجتها «التراجع» عنها بسبب عملية ثانية، بحيث تؤدي العمليتان اللتان تتبع إحداهما الأخرى إلى الحالة الأصلية. فقط بعد أن يفهم هذا الاحتمال، يبدأ الرضيع في البحث عن شيء خلف العائق حيث اختفى الجسم الذي يتتبعه عن الأنظار، لكن سلوكه يشير إلى أنه لا يزال يفتقر إلى فكرة الشيء الدائم، الموجود حتى عندما لا يراه. بدلًا من ذلك، ربما يشعر أنه يستطيع «التراجع» عن الاختفاء، عن طريق «عملية» وضع يده خلف العائق وإخراج الشيء المعني.

في هذا الصدد، يجب أن نتذكر أن الرضيع لا يزال لا يرى فاصلًا واضحًا ودائمًا بينه وبين العالم، أو بين الأشياء المختلفة الموجودة فيه. ومع ذلك، فهو يبني ردودَ الفعل والعمليات اللازمة لتصور هذا الترسيم في وقتٍ لاحقٍ. وهكذا، فقد بدأ في تطوير مفهوم السببية، والتمييز بين السبب والنتيجة. في البداية يبدو أنه اعتبر السببية كأنها نوعٌ من السحر «المتعاطف». قد يكتشف أن بعض الحركات المطبقة على وترٍ أو شيء آخر بالقرب منه ستنتج حركاتٍ مقابلة في مكانٍ آخر. إنه لا يدرك على الفور الحاجة إلى الاتصال، ولكنه غالبًا ما يتصرف كما لو كان يتوقَّع أن تتبع النتائج مباشرة كنوعٍ من الاستجابة السحرية لتحركاته. هذا، بالطبع، ليس غير متوقع حقًّا، إذا اعتبر المرء أن الطفل لا يميز بوضوحٍ

بعد بين ما داخله عمَّا هو في الخارج. وبالتالي، في كثير من الحالات، ستنتج الحركات في الواقع تأثيراتٍ داخلية محسوسة دون اتصال وسيطٍ مرئي. لذلك، ما دام الطفل ينظر إلى جميع جوانب تجربته على أنها كلية واحدة، من دون تمييزٍ واضحٍ بين «الداخل» و«الخارج»، فلا يوجد في تجربته ما ينكر توقُّع مثل هذه السببية السحرية المتعاطفة. ومع ذلك، سيبدأ لاحقًا في رؤية الحاجة إلى روابط وسيطة في العلاقات السببية، ولا يزال في وقتٍ لاحقٍ قادرًا على التعرُّف على الأشخاص والحيوانات وحتى الأشياء الأخرى كأسبابٍ للأشياء التي تحدث في مجال تجربته.

في غضون ذلك، تُبنى مفاهيم المكان والزمن. وهكذا عندما يتعامل الطفل مع الأشياء ويحرك جسده، يتعلم تنسيق تجاربه البصرية المتغيرة مع الإدراكات اللمسية والحركات الجسدية. في هذه المرحلة، يتوسع مفهومه عن مجموعات الحركات من «مجموعة من اثنين» إلى مجموعات أكثر عمومية. وهكذا، يتعلم أنه يمكنه الانتقال من مكان A إلى آخر B بعدة طرقٍ مختلفة، وأن كل هذه المسارات تقوده إلى نفس المكان (أو بدلًا من ذلك، إذا انتقل من A إلى B بطريقٍ واحدٍ، يمكنه «التراجع» عن هذا والعودة إلى A بعددٍ كبيرٍ من المسارات البديلة). قد يبدو هذا بدهيًّا بالنسبة إلينا، ولكن بالنسبة إلى الرضيع الذي يعيش في تدفق العملية، فمن المحتمل أن يكون اكتشافًا هائلًا لاكتشاف أنه في كل هذه الحركة، هناك أشياء معينة يمكنه دائمًا العودة إليها في مجموعة متنوعة من الطرق. وبالتالي، فإن فكرة مجموعة الحركات أو العمليات القابلة للعكس توفِّر الأساس الذي سيبني عليه لاحقًا مجموعة الأماكن

الدائمة التي يمكن للمرء أن يعود إليها، والأشياء الدائمة، التي يمكن دائمًا إعادتها إلى شيء مألوفٍ ويمكن التعرُّف عليه من خلال عملياتٍ مناسبة (على سبيل المثال، عمليات التدوير والتشتيت وما إلى ذلك).

في هذه الأثناء، يتعلَّم الطفل تدريجيًّا استدعاء صور الماضي، مع بعض التقريب في التسلسل الذي حدث فيه، وليس مجرد التعرُّف على شيء مألوف فقط بعد أن يراه. وهكذا تبدأ الذاكرة الحقيقية، ومعها الأساس لفكرة التمييز بين الزمن الماضي والوقت الحاضر (والوقت اللاحق في المستقبل، عندما يبدأ الطفل في تكوين صورٍ ذهنية لِمَا يتوقعه).

تحدث خطوة حاسمة عندما يكون الطفل قادرًا على تكوين صورة لجسمٍ غائبٍ، كما هو الحال حتى عندما لا يدركه بالفعل. قبل أن يتمكَّن من القيام بذلك، يبدو أنه يتعامل مع هذه المشكلة كما لو كان يعتبر الشيء الغائب شيئًا يمكنه (أو لأشخاصٍ آخرين) إنتاجه أو إنشاؤه بمساعدة عمليات معينة. لكنه الآن يبدأ في تكوين صورة ذهنية للعالم، تحتوي على كل من الأشياء المتصورة وغير المتصورة، كل منها في مكانها. هذه الأشياء، إلى جانب أماكنها، يُنظر إليها الآن على أنها موجودة بشكلٍ دائمٍ، وفي مجموعة من العلاقات تتوافق تمامًا مع مجموعات الحركات والعمليات التي يعرفها بالفعل (على سبيل المثال، صورة المكان الذي ترتبط فيه كل نقطة بكل نقطة أخرى من خلال العديد من المسارات يمثل السمة الثابتة لتجربته مع مجموعات العمليات، حيث كان قادرًا على الانتقال من نقطة إلى أخرى عبر العديد من الطرق).

في هذه المرحلة، يبدو أن الطفل يبدأ في رؤية التمييز بوضوحٍ بينه وبين بقية العالم. حتى الآن لم يكن قادرًا على إجراء مثل هذا التمييز، لأنه لم يكن هناك سوى مجالٍ واحدٍ لتجربة ما كان موجودًا بالفعل لمجموعة تصوراته الإجمالية. ومع ذلك، مع قدرته على خلق صورة ذهنية للعالم، أي تخيله، فإنه يتصور الآن مجموعة من الأماكن التي تكون دائمة، وهذه الأماكن مشغولة بأشياء دائمة مختلفة. لكن أحد هذه الأشياء هو نفسه. في «خريطته» الذهنية الجديدة للعالم يمكنه الحفاظ على تمييزٍ دائمٍ بينه وبين الأشياء الأخرى. كل شيء على هذه الخريطة ينقسم إلى فئتين، ما هو «داخل جسده» وما هو ليس كذلك. يتعلم أن يربط بين المشاعر والملذات والآلام والرغبات، بكل ما هو «داخل جسده»، وبالتالي فهو يشكِّل مفهوم «الذات» المتمايز عن بقية العالم، ومع ذلك يحتل مكانته في هذا العالم. وبالمثل، ينسب «الذوات» إلى دواخل أجساد الآخرين، وكذلك إلى الحيوانات. يُنظر إلى كل «ذات» على أنها بداية لأفعالٍ سببية في العالم وتعاني من آثار الأفعال السببية التي تنشأ خارجه. في النهاية يتعلَّم أن ينسب إلى الأشياء غير الحية نوعًا أقل وأكثر ميكانيكية من «الذات» من دون مشاعر وأهداف ورغبات، ولكن لا يزال لديه قدرة معينة على بدء الإجراءات السببية، ومعاناة آثار الأسباب الناشئة خارجها. بهذه الطريقة، تتشكَّل الصورة العامة لعالمٍ في المكان (والزمن)، الذي يتكوَّن من كياناتٍ منفصلة ودائمة يمكن أن تعمل بعضها مع بعض سببيًّا.

إن مفاهيم العالم الموضوعي والموضوع المقابل لأحد الأشياء

في العالم، كما رأينا، تتشكَّل معًا في الخطوة نفسها. ومن الواضح أن هذا ضروري، لأن الصورة الذهنية للعالم التي تعمل كنوعٍ من «خريطة» المفاهيم تتطلب انفراد أحد الأشياء الموجودة على هذه «الخريطة» لتمثِّل مكان المراقب، حتى يكون لديه منظورٌ على العالم في كل لحظة يمكن أن يؤخذ في الاعتبار. وهذا يعني، تمامًا كما يجب أن تحتوي «الخريطة» النسبية في شكل مخطط مينكوفسكي (كما ناقشناه في نهاية الفصل التاسع والعشرين)، على شيء ما فيها لتمثيل المكان والزمن والاتجاه والسرعة، من المراقب، لذلك يجب أن يكون للخريطة الذهنية التي ينشئها كلُّ شخصٍ تمثيلٌ مطابقٌ لعلاقة ذلك الشخص بالبيئة.

يجب ألا نفترض، بالطبع، أن الطفل يعرف أنه يصنع صورة ذهنية أو خريطة للعالم. بدلًا من ذلك، كما يبرز بياجيه جيدًا، غالبًا ما يجد الأطفال الصغار صعوبة في التمييز بين ما يتخيله أو يتذكره في الفكر وما يدركه فعليًّا من خلال الحواس (على سبيل المثال، قد يعتقد أن الآخرين قادرون على رؤية الأشياء التي يفكر فيها). وبالتالي سيأخذ الطفل هذه الخريطة الذهنية على أنها معادلة للواقع. ويتم تكثيف هذه العادة مع كل تجربة جديدة، لأنه بمجرد تشكيل الخريطة، فإنها تدخل وتشكل جميع الإدراكات الفورية، وبالتالي تتداخل مع التجربة بأكملها وتصبح غير قابلة للانفصال عنها. في الواقع، من المعروف أن الطريقة التي نرى بها شيئًا ما تعتمد على ما نعرفه عنه. (مثال واضح لذلك هي حالة الصورة الغامضة، التي تخضع لتفسيريْن، أحدهما واضحٌ والآخر أقل وضوحًا. بمجرد إخبار الشخص بالتفسير الثاني، في كثيرٍ من الحالات، لا يكون

بإمكانه رؤية الصورة الأصلية)، وهكذا، على مدى سنواتٍ، نتعلَّم أن نرى العالم من خلال بنية معينة من الأفكار نتفاعل معها فورًا مع كل تجربة جديدة قبل أن يكون لدينا وقتٌ للتفكير. وبهذه الطريقة توصلنا إلى الاعتقاد بأن طرقًا معينة لتصور العالم وإدراكه لا يمكن أن تكون خلاف ذلك، على الرغم من أننا في الحقيقة اكتشفناها وبنيناها عندما كنَّا أطفالًا، ومنذ ذلك الحين أصبحت عادات فإنها قد تكون مناسبة فقط لبعض مجالات الخبرة.

من الصعب جدًّا تحقيق العدالة الكاملة لنطاق ومجال عمل بياجيه في ملخصٍ من هذا النوع. إلى جانب تغطية العديد من النقاط المتعلقة بفترة الطفولة التي لم تذكر هنا، فإنه ينتقل لمناقشة تطور الذكاء بعد أن يتعلم الطفل التحدُّث والانخراط في التفكير بشكلٍ أو بآخر كما يعرفه الكبار. هنا، على الطفل أن يحل مجموعة جديدة من المشاكل لأنه يجب أن يترجم إلى بنية الفكر واللغة تلك البنية الإدراكية المباشرة للعالم التي يمثِّلها على «الخريطة» الذهنية التي أشرنا إليها. هذه العملية يصاحبها حتمًا قدرٌ كبيرٌ من الارتباك، حيث تتعارض أفكار الطفل وكلماته بشكلٍ متكررٍ مع ما يجب أن يدركه. ومع ذلك، يتعلم الطفل، خطوة بخطوة، معرفة الأشكال المغلقة، والمنحنيات السلسة، والأشياء الموجودة داخل أو خارج الآخرين. وهذه هي ما يسمى بالعلاقات «الطوبولوجية». يكتشف بعد ذلك حقائق المنظور (التي تقف وراء الهندسة الوصفية) ويتعلم كيفية التعرُّف على أحجام وأشكال الأشياء، وبالتالي يصبح على دراية بمجموعة العلاقات التي يتلخص جوهرها في الهندسة الإقليدية.

في هذه العملية، يتعلم أيضًا الحاجة إلى التفكير المنطقي، عندما يرغب في التفكير في بنية العالم، والتواصل مع الآخرين، وكذلك عندما يرغب في تطبيق أفكاره على مشكلة عملية. (يوضح بياجيه أن المنطق في البداية يلعب فقط دورًا صغيرًا جدًّا في تفكير الأطفال). وهكذا في عملية التطوير المستمرة، يبني الطفل معرفته وفهمه للعالم، بمساعدة مجموعاتٍ ذات صلة من الصور الذهنية، والأفكار، والأوصاف في الكلمات، مما يشير إلى بنية مشابهة لتلك الموجودة في جوانب مختلفة من العالم كما يدركها بشكلٍ مباشرٍ.

سيكون من المناسب لأغراضنا هنا أن نناقش بإيجازٍ تطور مفهوم الطفل لثبات عدد الأشياء والكمية الإجمالية للمادة الموجودة فيها، لأن هذه المفاهيم لعبت دورًا أساسيًّا في الفيزياء بشكلٍ واضحٍ. كما يوضح بياجيه، فإن الطفل الذي بدأ حديثًا في الحديث ليس لديه في البداية فكرة أن مجموعة من الأشياء لها رقمٌ ثابتٌ، بغض النظر عن كيفية نقلها وإعادة ترتيبها. بدلًا من ذلك، فإنه يشكل في كل لحظة تقديرًا إدراكيًّا عامًّا لما إذا كانت مجموعة معينة تبدو أكثر أو أقل أو مساوية لمجموعة أخرى، ولا يتردد في القول إن مجموعتين متساويتين في البداية غير متساويتين، بعد أن خضعتا لبعض إعادة الترتيب في الفراغ (على الرغم من أن عددَ الأشياء ظلَّ في الواقع ثابتًا).

ربما ننظر إلى النتائج المذكورة أعلاه على أنها ليست مفاجئة، إذا أخذنا في الاعتبار حقيقة أن الطفل ليس لديه بعد فكرة الحفاظ على عدد الأشياء في أثناء تحركها وتغيير علاقات بعضها مع بعض وعلاقتها

بالمراقب. في الواقع، تتطور هذه الفكرة في سلسلة من المراحل. أولًا، يتعلم الطفل إنشاء تطابقٍ واحدٍ لواحدٍ بين الأشياء الموجودة في علاقة بسيطة، مثل الصفوف المتوازية. عندما يفقد شكل ترتيب العلاقات بين الأشياء (عندما يعاد ترتيب الأشياء لكنها لم تعُد في شكل صفوفٍ) لا يمكنه حتى الآن التفكير في أنها تحتوي على نفس العدد. في وقتٍ لاحقٍ، عندما يتعلم كيفية وضعها في أشكالٍ مترابطة مرة أخرى، سيقوم بتشكيل فكرة مماثلة لفكرة «المجموعة القابلة للانعكاس»، أي أنه يمكن إعادة مجموعات معينة من الأشياء من خلال عمليات مناسبة إلى حالتها الأصلية من واحدٍ مقابل الآخر. من هنا يشكِّل مفهومًا جديدًا أو «خريطة ذهنية» للأشياء على أنها تمتلك في جميع الأوقات عددًا ثابتًا، التي تصور بأمانة بنية عملية لمثل هذه المجموعات التي يمكن إعادتها إلى أشكالٍ متطابقة. ثم، تدريجيًّا، ينسى العمليات التي تؤسس التطابق بين الأشياء ويفكر في عدد الأشياء على أنها خاصية ثابتة تنتمي إلى مجموعة إجمالية معينة، حتى عندما تتحرك هذه الأشياء ويُعاد ترتيبها.

يصبح إجراء التفكير في الأرقام على أنها خاصية متأصلة ودائمة للمجموعة أمرًا معتادًا لدرجة أن المشكلة «ما هو الرقم؟» يعتبر واضحًا جدًّا بحيث لا يتطلب الكثير من المناقشة. ومع ذلك، عندما جاء علماء الرياضيات الحديثون لدراسة هذا السؤال، كان ما يتعينَّ عليهم فعله هو الكشف عن الأساس الذي يقوم على أساسه كلُّ طفلٍ بتطوير مفهومه عن العدد (وبالتالي الوصول إلى تعريف المساواة في الأعداد الأساسية لمجموعتين من حيث واحد-واحد بين أرقام مجموعة). نرى بعد

ذلك أن أعمق المشاكل غالبًا ما توجد في دراسة ما يبدو واضحًا، لأن «الواضح» غالبًا ما يكون مجرد فكرة تلخص السمات الثابتة لمجالٍ معينٍ من الخبرة الذي أصبح معتادًا وانخفض أساسه خارج الوعي. لذلك لفهم ما هو واضحٌ، من الضروري في كثيرٍ من الأحيان الانتقال إلى وجهة نظرٍ أوسع، حيث يسلط المرء الضوءَ على العمليات والحركات والتغييرات الأساسية، التي نعثر فيها على خصائص معينة ثابتة.

تظهر مشكلة مشابهة فيما يتعلق بالحفاظ على كمية المادة أو المادة. وهكذا، عندما تتوزع كمية معينة من السائل في العديد من الحاويات ذات الأشكال المختلفة، لا يتردد الطفل الصغير في القول إن الكمية الإجمالية للمياه قد زادت أو انخفضت، وفقًا للانطباعات التي ينتجها التوزيع الجديد في تصوراته الفورية. في وقتٍ لاحقٍ، عندما يرى إمكانية إعادة الماء إلى الحاوية الأصلية، حيث يكون لها الحجم نفسه كما كانت في الأصل، يقوده إلى فكرة وجود كمية ثابتة من السائل. إن ضرورة هذه الخطوة في تطوير مفاهيم الطفل واضحة. بداهة لا يوجد سببٌ لافتراض أن كمية مادة معينة محفوظة. تأتي هذه الفكرة فقط كنتيجة للحاجة إلى فهم أنواعٍ معينة من الخبرة. ثم بعد ذلك، ينسى المرء أنه كان لا بُدَّ من تطوير مثل هذه الفكرة. يصبح من المعتاد، وفي النهاية يبدو أنه لا مفرَّ من افتراض أن العالم مكونٌ من موادٍ أساسية معينة دائمة تمامًا بكمياتها الإجمالية. ثم، عندما لا نجد هذا الدوام المطلق في مستوى الخبرة المشتركة، فإننا نفترض أنه في المستوى الذري أو في مكانٍ آخر. كما في حالة الأرقام، تظهر هنا بعض المشاكل العميقة

جدًّا في محاولة لفهم ما يبدو واضحًا. لا شيء يبدو أكثر وضوحًا من فكرة وجود كمية دائمة من الجوهر. ومع ذلك، لفهم هذه الفكرة بشكلٍ أعمق، يجب أن ننتقل إلى سياقٍ أوسع، حيث لا يلزم تطبيق مثل هذه الفكرة. يمكننا بعد ذلك أن نرى أن مثل هذه المفاهيم تنشأ عندما يكتشف الطفل نوعًا من الثبات النسبي في ظل عملياتٍ معينة، مثل صب السائل مرة أخرى في الحاوية الأصلية، لذلك نجد أنه في فهم الإدراك الفوري، يجب على المرء أن يفعل بشكلٍ أساسي ما تم فعله في نظرية النسبية، أي التخلي عن مفهوم الشيء الدائم والثابت تمامًا، لمعرفة ثبات علاقات أو خصائص معينة في مجالٍ واسعٍ من العمليات المتضمنة في المراقبة والقياس، حيث تتغير الظروف والسياق والمنظور.

لتلخيص عمل بياجيه، نتذكر أن الرضيع يبدأ بنوعٍ من مجموع الإحساس، والإدراك، والشعور، حيث تكون في حالة من التدفق، حيث يوجد القليل أو لا يوجد بنية يمكن التعرف عليها ذات خصائص دائمة. ينشأ تطور الذكاء بعد ذلك في سلسلة من العمليات والحركات وغيرها يتعلم الطفل من خلالها العالم. على وجه الخصوص، ما يتعلمه دائمًا يعتمد على قدرته على رؤية العلاقات الثابتة في هذه العمليات والحركات، على سبيل المثال، نوع ثابت من الارتباط بين ما يراه وما يسمعه، علاقة ثابتة بين السبب والنتيجة، شكل ثابت لشيء كما يتبعه بعينه، وهو احتمالٌ ثابتٌ «للتراجع» عن بعض التغييرات عن طريق عملياتٍ مناسبة. صورة (ولاحقًا بنية للأفكار المنظمة واللغة) تعمل كنوعٍ من «الخريطة» التي تمثِّل علاقات الثبات بشكلٍ صحيحٍ، بمعنى

أنها تتضمن ميزاتٍ ثابتة مشابهة لتلك التي كشف عنها في العمليات (الصورة الذهنية لـتوافق المساحة ذات المواضع الدائمة المتصلة بعددٍ لا نهائي من المسارات الممكنة مع التجربة التشغيلية للقدرة على الوصول إلى المكان نفسه من خلال العديد من الطرق المختلفة). وسرعان ما يأخذ الإدراك الفوري هيكل هذه «الخرائط»، ثم لا يدرك المرء أن الخريطة تمثِّل فقط ما وجد أنه ثابتٌ. بدلًا من ذلك، تبدأ الخريطة في اختراق ما يُدرك بطريقة تبدو أنها سمة حتمية وضرورية للخبرة بأكملها، ومن الواضح جدًّا أنه من الصعب للغاية التشكيك في سماتها الأساسية.

يشير عمل بياجيه إلى أنه من أجل فهم عملية الإدراك، من الضروري تجاوز وجهة النظر المعتادة، حيث يخلط المرء بشكلٍ أو بآخر بين السمات الهيكلية العامة لـ «خرائطنا» الذهنية وميزات العالم التي لا يمكن أن تكون غير ذلك تحت أي ظروفٍ يمكن تصورها. بدلًا من ذلك، يتم توجيه المرء إلى اعتبار الكلية الأوسع لعملية الإدراك لها نوعٌ من التدفق، حيث تظهر بعض الميزات الثابتة نسبيًّا، لتمثِّلها مثل هذه «الخرائط»، بمعنى أنها تصور بأمانة بنية هذه الميزات. ولكن كما رأينا في هذا الكتاب، هناك خطوة مماثلة متضمنة في الانتقال من وجهة نظرٍ غير نسبية في الفيزياء إلى وجهة نظرٍ نسبية، لأننا عند القيام بذلك نتوقف عن اعتبار مفاهيمنا عن المكان والزمان والكتلة وغيرها، على أنها تمثِّل سماتٍ دائمة وضرورية تمامًا للعالم، بدلًا من ذلك، فإننا نعتبرها تعبِّر عن العلاقات الثابتة الموجودة بالفعل في مجالاتٍ معينة من البحث.

A-3: دور الثابت في الإدراك

يُظهر عمل بياجيه، الذي ناقشناه في القسم السابق، أن تطوير الذكاء يبدو أنه يعتمد على القدرة على إدراك ما هو ثابتٌ في مجالٍ معينٍ من العمليات والتغييرات والحركات، وفهم هذه العلاقات بالوسائل للصور العقلية والأفكار والتعبيرات اللفظية والرمزية الرياضية، مما يشير إلى بنية مشابهة لتلك التي نواجهها بالفعل. سنستشهد الآن ببعض الأدلة القادمة من الدراسة المباشرة لعملية الإدراك، التي تؤكد بقوة الآثار المترتبة على وجهة النظر هذه، وتوسع مجال تطبيقها بشكلٍ كبيرٍ. هناك مفهومٌ شائعٌ للإدراك كنوعٍ من العمليات الكسولة، حيث نسمح ببساطة بدخول انطباعات الحس إلينا، لتتجمع في هياكل كاملة، ثم تسجل في الذاكرة، ومع ذلك، توضح الدراسات الجديدة ذلك في الواقع هذا التصور هو -على العكس من ذلك- عملية نشطة، حيث يجب على الشخص القيام بأشياء كثيرة جدًّا في سياق أي من الأفعال التي تساعد في توفير هيكلٍ عامٍّ معين لما يدركه. من المؤكد أن هذا الهيكل صحيحٌ من الناحية الموضوعية، بمعنى أنه يشبه بنية نوع الأشياء التي يواجهها في التجربة المشتركة. ومع ذلك، فإن حقيقة أن قدرًا كبيرًا مما نراه ينظم ويرتب في شكلٍ تحدده وظائف أجسامنا وأنظمتنا العصبية له آثارٌ بعيدة المدى على دراسة مجالات جديدة من الخبرة، سواء في مجال الإدراك الفوري نفسه أو في العلم (الذي يعتمد بشكلٍ عام على الإدراك بمساعدة الأدوات، من أجل الوصول إلى مجالاتٍ جديدة).

يمكن للمرء أن يرى الدور النشط للمراقب بشكلٍ أكثر وضوحًا من خلال التفكير أولًا في الإدراك اللمسي. وبالتالي، إذا حاول المرء العثور على شكل كائنٍ غير مرئي بمجرد الشعور به، فيجب على المرء أن يتعامل مع الشيء، ويديره، ويلمسه بطرقٍ مختلفة (تمَّت دراسة هذه المشكلة بالتفصيل من قبل جيبسون وزملائه[1]).

في مثل هذه العمليات نادرًا ما يلاحظ المرء الأحاسيس الفردية على الأصابع ومفاصل الرسغ إلخ. وبدلًا من ذلك، يدرك المرء بشكلٍ مباشرٍ البنية العامة للشيء، التي تظهر، بطريقة ما، من تغييرٍ معقدٍ للغاية في جميع الأحاسيس. هذا الإدراك للبنية يعتمد على تيارين عصبيين للطاقة – ليس فقط التيار الداخلي للأحاسيس التي أشرنا إليها أعلاه، ولكن أيضًا التيار الخارجي الذي يحدد حركات اليد. إن معرفة هذا الهيكل ضمنيًّا في العلاقة بين التيارات الخارجية والداخلية (مثل الاستجابة لحركاتٍ معينة من الانعطاف، والضغط، إلخ).

من الواضح إذن، أن الإدراك اللمسي هو بطبيعة الحال نتيجة لمجموعة من العمليات النشطة، التي يقوم بها المستقبل. ومع ذلك، فإن الدوافع الخارجة التي تؤدي إلى حركة اليد وتدفق الأحاسيس إما أنها لا تُلاحظ وإما تكون على هامش الوعي فقط. ما يُدرك بقوة هو في الواقع بنية الجسم نفسه. يبدو من الواضح أنه من خلال التدفق المعقد والمتغير للحركة مع الاستجابات الحسية المرتبطة بها، فإن الدماغ قادرٌ على تجريد بنية ثابتة نسبيًّا للجسم الذي يتعامل معه. من الواضح أن

(1) J.G.Gibson, Psychological Review, 69, 477(1962) .

هذا الجسم الثابت ليس في العمليات الفردية والأحاسيس ولكن يمكن تجريده فقط من مجملها خلال فترة زمنية معينة.

للوهلة الأولى، قد يعتقد المرء أن الوضع مختلفٌ تمامًا في الرؤية، وأن الشخص «يأخذ» بشكلٍ غير فعَّالٍ صورة العالم. لكن الدراسات الأكثر دقة تظهر أن الرؤية تتضمن دورًا نشطًا مشابهًا للمستلم، وأن بنية ما يراه المرء مستخرجة من العلاقات الثابتة المماثلة بين حركاتٍ معينة والأحاسيس المتغيرة التي هي استجابة العين لهذه الحركات.

واحدة من أكثر الحركات الأساسية الضرورية للرؤية قد أظهرها ديتشبيرن[1] Ditchburn، الذي اكتشف أن مقلة العين تخضع باستمرارٍ لذبذباتٍ صغيرة وسريعة للغاية تحول الصورة بمسافة مساوية تقريبًا لتلك الموجودة بين الخلايا المجاورة على الشبكية من العين. بالإضافة إلى ذلك، لديها انحرافٌ منتظمٌ أبطأ، يليه «نقرة flick » تعيد الصورة أكثر أو أقل إلى مركزها الأصلي. التجارب التي نظر فيها الشخص إلى مجال الرؤية بالكامل من خلال مرايا مرتبة لإلغاء آثار هذه الحركة أدَّت في البداية إلى رؤية مشوهة وقريبة من انهيارٍ كاملٍ للرؤية، بمعنى أن المشاهد لا يرى أي شيء على الإطلاق، على الرغم من أن الصورة الواضحة للعالم كانت مركزة على شبكية عينه.

شرح ديتشبيرن هذه الظاهرة بطريقة جذابة حقيقة أنه عندما تحافظ على منبه ثابتٍ في الخلايا العصبية لبعض الوقت، فإنها تتكيَّف؛ أي أن قوة استجابتهم تميل إلى الانخفاض، وتهبط في النهاية إلى ما دون عتبة

(١) R.W.Ditchburn, Research, 9, 466 (1951), Optica Acta, 1, 171 and 2, 128 (1955).

ما هو محسوس. في ظل الظروف التي يثبت نمط شديد الضوء على الشبكية بأكملها بواسطة المرايا التي تعوض حركات مقلة العين، فمن المتوقع بعد ذلك أن تتم عملية التكيف هذه. بهذه الطريقة يمكن للمرء أن يفسِّر التشويه والتلاشي النهائي لما هو موجودٌ في مجال الرؤية، كما لوحظ في تجارب ديتشبيرن. ومع ذلك، في الرؤية العادية، سيكون التكيُّف جزئيًّا فقط، لأن الاهتزازات والحركات الأخرى لمقلة العين ستؤدي دائمًا إلى تغييراتٍ مقابلة في نمط الضوء على شبكية العين. وبالتالي، فإن استجابة الأعصاب المتصلة بخلية شبكية معينة ستعتمد بدرجة أقل على شدة الضوء عند النقطة المعنية أكثر من اعتمادها على الطريقة التي تتغير بها شدة الضوء مع الموضع. هذا يعني أن إثارة العصب البصري لا تتوافق مع نمط الضوء على شبكية العين، بل مع نمط معدل يتم فيه زيادة التباينات، وينتج عنه انطباعٌ قويٌّ عند حدود الأشياء، حيث تختلف شدة الضوء بشكلٍ حادٍّ مع الموقف. بهذه الطريقة، يحصل المرء على تأكيد الخطوط العريضة وأشكال الأشياء التي تساعد على أن يُنظر إليها على أنها منفصلة ومتميزة، وهو تصورٌ لن يكون واضحًا وملحوظًا تقريبًا إذا كانت العين حسَّاسة لشدة الضوء نفسها، بدلًا من ذلك من التغييرات.

قدَّم بلات[1] Platt اقتراحًا مثيرًا للاهتمام مفاداه أن قدرتنا على تمييز استقامة الخطوط بدقة كبيرة تعتمد على حركات الانجراف و«النقر» التي

(1) J.R.Platt, Principles of Self Organising Systems, Zopf and von Fuerster (eds)., Pergamon, 1961; Information Theory in Biology, Yockey, Quastler, and Platzman, (eds.), Pergamon, 1958; and Scientific American, 202, 121, June 1960.

ذكرناها، أو على الحركات المشابهة لها. الآن، أظهر هوبل وويسل[1] Hubel and Wiesel من خلال متابعة الاتصالات من العصب البصري عبر خلايا العقدة الشبكية إلى الدماغ أن أنواعًا معينة من المناطق على شبكية العين تشبه مقاطع من القضبان الخطية القصيرة تتعين في الخلايا المقابلة للقشرة. يمكن أن يفسر هذا التعيين قدرتنا على إجراء تمييزات بدائية نسبيًّا فيما يتعلق بأجزاء المجال البصري التي تكون خطوطًا (بدقة تقابل عرض القضبان، التي تكون عمومًا بترتيب عدة أضعاف المسافة بين خلايا الشبكية). من ناحية أخرى، كما أشار بلات، يمكن للمرء أن يلاحظ فواصل في خطية مثالية تقابل الصورة الشبكية لنحو ثلاثين من المسافة بين الخلايا. المشكلة التي أثارت اهتمام بلات هي شرح كيفية جعل هذه الدقة الرائعة ممكنة.

يعتمد اقتراح بلات على ملاحظة أن حركات مقلة العين عبارة عن دوران. دوران صغير لمقلة العين حول محور في مستوى موازٍ للجزء النقري من شبكية العين (أي المنطقة الصغيرة من الرؤية المركزية التي يتم تضمينها عند التمييز الدقيق للشكل والحجم)، التأثير هو إعطاء الصورة في هذه المنطقة حركة خطية مقابلة. بالنسبة إلى الشكل العام، ستنتج مثل هذه الحركة بعض التغيير في نمط التحفيز، سيكون بالطبع محسوسًا. ولكن بالنسبة إلى الحالة الخاصة لقطعة من خطٍّ مستقيمٍ موازٍ لاتجاه إزاحة صورتها، فإن الخط سينتقل إلى داخل نفسه. لذلك، ستكون الصورة ثابتة في ظل هذه الحركة، ثم يفترض بلات أن الدماغ

(1) D.H.Hubel, Scientific American, 209, 54, November 1963.

لديه طريقة ليكون حسَّاسًا لمثل هذا الثبات، مما يسمح له بالتعرف على خاصية الاستقامة[1].

من الواضح أن دقة التمييز في العملية لا يجب أن تكون محدودة بالمسافة بين خلايا شبكية العين، لأنه إذا لم يكن الخط مستقيمًا، فسوف ينتج عنه اختلافٌ في نمط إثارة الأعصاب. يمكن اكتشاف هذا الاختلاف حتى لو كان فشل خطية الأداء في منطقة أصغر من حجم خلية الشبكية، بشرط أن تكون هناك حساسية كافية للتغيرات الصغيرة في نمط شدة الضوء التالية على هذه الخلايا[2].

من سمات الإدراك، مع ذلك، أن هناك عادة العديد من الآليات البديلة للحصول على النوع نفسه من المعلومات، التي يمكن أن تعزز أو تساعد بعضها بعضًا، وبالتالي، فإن رسم خرائط المناطق الشبيهة بالقضيب على شبكية العين إلى خلايا قشرة الدماغ التي كشف عنها هوبل وويسل يمكن أن يعطينا تصورًا تقريبيًّا للخطوط المستقيمة، التي يمكن استكمالها بالعملية التي اقترحها بلات، عندما اقترح فكرة التمييز الدقيق. علاوة على ذلك، من خلال النظر في عمل بياجيه الذي نوقش في القسم A2، يبدو من المحتمل أنه، بدءًا من الطفولة، يقوم كلُّ شخصٍ ببناء طرقٍ معينة لمعرفة الخطوط المستقيمة، مقارنة بنوعٍ من

(1) حقيقة أن الخطوط المستقيمة لا تختفي تمامًا من مجال الرؤية كنتيجة للتكيُّف يمكن تفسيرها من خلال العديد من الآليات الممكنة، مثلًا، من خلال افتراض أنه عندما تبدأ شدَّتها في التلاشي بشكلٍ ملحوظٍ، تخضع مقلة العين لـ «نقرة» تنقل الخط إلى قسمٍ جديدٍ من منطقة النقرة.

(2) إن دوران مقلة العين حول محورٍ عمودي على مستوى النقرة من شأنه أن يسمح بعملية دقيقة مماثلة للتعرُّف على الانحناء المنتظم (أي أنه لا توجد تغييراتٌ في الانحناء في منطقة صغيرة من القوس).

ذاكرة شبكات الخطوط، التي تعلَّمها من خلال التجربة على مدى فترة طويلة من الزمن، بالإضافة إلى ذلك، هناك آلياتٌ أخرى متضمنة في أعمال هيلد وجيبسون وآخرين، سنناقشها حاليًّا.

النقطة الجوهرية التي نرغب في تأكيدها في العمل المتعلِّق بالعين هي أنه لا يوجد شيءٌ يُدرك من دون حركاتٍ أو تغيراتٍ في الصورة على شبكية العين، وأن خصائص هذه الاختلافات تلعب دورًا كبيرًا في تحديد البنية التي رأيناها بالفعل. من المهم ألا تكون هذه الاختلافات نتيجة للتغييرات التي تحدث بشكلٍ طبيعي في البيئة فحسب، ولكن (كما في حالة الإدراك اللمسي) يمكن أيضًا إنتاجها بنشاطٍ بواسطة الحركات في أجهزة الإحساس للمراقب نفسه. لا يُنظر إلى هذه الاختلافات في حد ذاتها إلى أي حدٍّ ملموسٍ، ما يُدرك هو شيء ثابتٌ نسبيًّا، على سبيل المثال، مخطط وشكل جسم، واستقامة الخطوط، وأحجام وأشكال الأشياء، ومع ذلك لا يمكن إدراك الثابت ما لم تكن الصورة متنوعة بشكلٍ فعَّالٍ.

توضِّح التجارِب التي أجراها هيلد وجيبسون[1] أن حركات الجسم تلعب أيضًا دورًا أساسيًّا في الإدراك البصري، لا سيما التنسيق بين هذه الحركات والتغيرات الناتجة التي تظهر في الصورة البصرية للعالم. على سبيل المثال، عندما يتم تزويد الأشخاص بنظاراتٍ مشوَّهة

(1) للمزيد حول هذه التجارب يمكنك مطالعة:

R.Held and S.J.Freedman, Science, 142, 455 (1963); Psychology, A Study of Science, S.Koch (ed.), McGraw-Hill, New York, 1959, p. 456; R.Held and J.Rekosh, Science, 141, 722 (1963).

(مما يجعل الخطوط المستقيمة تبدو كأنها منحنية) ويُسمَح لهم بدخول غرفة منقوشة بطريقة لم تكن معروفة لهم من قبل، فإنهم يتعلمون في النهاية «تصحيح» تأثيرات هذا التشويه بالنظارات، والتوقف عن رؤية الانحناء الذي يجب أن يكون موجودًا بالفعل في صورة خطٍّ مستقيمٍ على شبكية أعينهم. في وقتٍ لاحقٍ، عندما يخلعون النظارات، يرون الخطوط المستقيمة منحنية، على الأقل لفترة من الوقت. (الحالة الأكثر تطرفًا لمثل هذه التجربة هي السماح للشخص برؤية العالم من خلال النظارات التي تقلب الصورة، وبعد مرور بعض الوقت يراها في الجانب الصحيح لأعلى، ولكن عندما يخلع النظارات يراها رأسًا على عقب مرة أخرى، لفترة من الوقت).

النقطة المثيرة للاهتمام في هذه التجارب هي أن «إعادة تعلُّم» ما يتوافق مع خط مستقيم يعتمد بشدة على القدرة على تحريك الجسم بنشاطٍ. وبالتالي فإن الأشخاص الذين يتمتعون بحرية التجول قادرون على تعديل رؤيتهم لتتناسب مع نظاراتهم بسرعة إلى حدٍّ ما، في حين أن الأشخاص الذين يخضعون بشكلٍ غير فعال لحركاتٍ متكافئة على الكراسي إما لا يتعلمون أبدًا القيام بذلك وإما يكونون أقل فاعلية في مثل هذا التعلم. لذلك من الواضح أن ما هو ضروري ليس فقط أنه يجب أن تكون هناك اختلافاتٌ مناسبة للصورة على العين، ناتجة عن الحركة، ولكن أيضًا أن بعض هذه الاختلافات يجب أن ينتجها نشاط المستقبل. بعبارة أخرى، كما في حالة الإدراك اللمسي، فإن ما يراه المرء في الواقع يتحدد بطريقة ما من خلال تجريد ما هو ثابتٌ من مجموعة من

الاختلافات فيما يُرى، لقد أنتج هذا التباين، على الأقل جزئيًّا، باعتباره عنصرًا أساسيًّا وجانبًا من عملية المراقبة نفسها.

في التجربة المذكورة أعلاه، قد يخمِّن المرء بشكلٍ ما أنه من خلال خبرات الحركة التي تبدأ مع الطفولة المبكرة (كما نوقش في عمل بياجيه)، يكون لدى كل شخص بالفعل نوعٌ من البنية الإقليدية المضمنة في حركاته الجسدية. بقدر ما يمكن للمرء أن يتحقق من خلال محاولة المشي إلى حافة الغرفة وعيناه مغمضتان، يبدو أنه يمتلك في جهازه العصبي نوعًا من القدرة أو المهارة التي تجعله قادرًا على التجريد من كل الحركات والأحاسيس المتغيرة بينما بعض المعلومات في جسده تتعلق باستقامة مساره، وكمية الدوران، إلخ. في الرؤية العادية (من دون نظارات مشوهة)، عندما يمشي المرء على طول مثل هذا الخط المستقيم المحسوس ميكانيكيًّا، تخضع الصورة على شبكية العين لإسقاط التحول (على الأقل تقريبًا) الذي تتغير فيه الأشكال الظاهرة، ولكن تتحول فيه الخطوط المستقيمة إلى خطوط منحنية لذلك، عندما يسير المرء في خط مستقيم، فإن المعلومات المشتقة ميكانيكيًّا عن ثبات اتجاه الحركة ستتفق مع ما تنطوي عليه المعلومات البصرية المقابلة، المستخرجة من التحويل الإسقاطي للخطوط في مجال الرؤية. ومع ذلك، عندما يرتدي المرء نظاراتٍ مشوهة، فإن ما يشعر به ميكانيكيًّا أنه يسير في خطٍّ مستقيمٍ سيتم استشعاره بصريًّا على أنه يمشي في خطٍّ منحنٍ. وبالتالي، هناك تناقضٌ بين ما يراه المرء وما يدركه من خلال الإحساس والحركة والأحاسيس الحركية. ويبدو بعد ذلك أنه تحت مستوى الوعي يحاول الدماغ والجهاز العصبي حلَّ هذا التناقض

عن طريق اختبار فرضياتٍ مختلفة. فيما يتعلق بما يشكل بالفعل خطًّا مستقيمًا[1]. عندما نعثر على فرضية تزيل التناقض بين ما يُرى وما هو محسوس ميكانيكيًّا، فإن هذه الفرضية تكون مجسدة مباشرة في البنية التي ندركها. لذلك، فإن الشخص الذي يرتدي عدساتٍ مشوهة يتوقف في النهاية عن إدراك الخط المنحني بصريًّا في ظل الظروف التي يشعر فيها ميكانيكيًّا بخطٍّ مستقيمٍ، ولكنه بدلًا من ذلك يأتي ليرى ويشعر بالخط المستقيم نفسه (كما هو الحال في أعمال بياجيه التي نوقشت في القسم السابق، حيث يتعلم الطفل إدراك الأشياء المرتبطة الثابتة بين ما يراه، وما يسمعه، وما يستوعبه، وما إلى ذلك).

في مناقشة أعمال ديتشبيرن وهوبيل وويسل وبلات، رأينا بالفعل أن العصب البصري لا ينقل «نسخة» بسيطة من الصورة على شبكية العين، بل يميل إلى تأكيد بعض التركيبات الهيكلية. من خلال زيادة التباينات والحساسية لوجود أو عدم وجود خطوطٍ وأشكالٍ أخرى من هذا القبيل. ومع ذلك، من عمل هيلد وجيبسون، من الواضح أن الصورة التي ندركها تحتوي في الواقع على سماتٍ هيكلية ليست حتى على شبكية العين في لحظة معينة، ولكن تكتشف بمساعدة العلاقات التي أمكن ملاحظتها لمدة من الزمن.

وبالتالي، فإن الصور ليست مجرد صورة أو انعكاسٍ لانطباعات إحساسنا اللحظية، بل هي نتيجة لعملية معقدة تؤدي إلى بناءٍ دائم التغير

(1) يقترح بلات، على سبيل المثال، أن الدماغ قد يجد مزيجًا جديدًا من دوران مقلة العين، حول محور موازٍ لشبكية العين وعمودي عليها، الذي يمكن تنسيقه باستمرارٍ مع الخط المستقيم المحسوس ميكانيكيًّا.

(ثلاثي الأبعاد) موجود لإدراكنا في نوعٍ من «العرض الداخلي». يعتمد هذا البناء على تجريد ما هو ثابت في العلاقة بين مجموعة من الحركات التي ينتجها بنشاط المُستَقبل نفسه والتغييرات الناتجة في مجمل «مدخلاته» الحسية. يعمل هذا البناء، في الواقع، كنوعٍ من «الفرضية» المتوافقة مع السمات الثابتة الملحوظة لتجربة الشخص الشاملة مع البيئة المعنية. (على سبيل المثال، يتطابق تصور الخط المستقيم مع فرضية حول ما هو ثابت في التغييرات البصرية والميكانيكية والتغييرات الأخرى التي اختبرت في العلاقات مع هذا الخط، نتيجة للحركات التي أجراها الشخص في اتصالات الإدراك الحسي معها).

لا تعتمد عملية البناء فقط على تجريد العلاقات الثابتة بين تصورات الحركة والحس، كما هو موضح أعلاه؛ لكن أيضًا تعتمد على كل ما يعرفه المستقبل. على سبيل المثال، إذا نظر الشخص إلى رسالة ما على مسافة أكبر من اللازم للحصول على رؤية واضحة ومتميزة، فسوف يرى شيئًا غامضًا جدًّا وغير واضحٍ في الشكل. ولكن إذا تم إخباره بماهية الرسالة، فستظهر صورتها فجأة بوضوحٍ كبيرٍ نسبيًّا. أو بدلًا من ذلك، يمكنه إسقاط عملة معدنية صغيرة على سجادة ذات نقوش كثيرة، حيث سيجد عمومًا أنها ضاعت أمام بصره. ثم، إذا التقط بريقًا من الضوء المنعكس، فإن العملة التي يعرف أنه فقدها ستبرز فجأة في إدراكه. يجب أن تكون صورتها على شبكية العين طوال الوقت، لكنها لم تدخل «العرض الداخلي» للإدراك حتى يتناقض اللمعان المنعكس مع تصور السجادة التي لا تحتوي على أي شيء، بل يقترح أيضًا ما يعرفه عن العملة المفقودة.

يصف جيبسون عددًا كبيرًا من التجارب التي تبرز الخصائص العامة للإدراك الموصوفة أعلاه. يوضح أنه في إدراك العمق، أو الطابع ثلاثي الأبعاد للعالم، فإن الرؤية المجهرية ليست سوى أحد العوامل ذات الصلة. عامل مهم آخر هو مجرد المظهر البصري المتغير للأشياء ونحن نتحرك. وهكذا، بينما نسير، تصبح صورة الشيء الذي نقترب منه أكبر، كلما اقترب الجسم، زادت سرعة تغيير حجمه الظاهري. بهذه الطريقة (بالإضافة إلى العديد من الطرق الأخرى، مثل وضع الظلال، والضبابية النسبية للأشياء البعيدة)، يكون الدماغ قادرًا على تجريد المعلومات المتعلقة بمسافة الأشياء في البعد على طول خط البصر. على أساس هذه المعلومات، فإنه «يبني» باستمرارٍ مجالًا ما يدركه بالطريقة التي وصفها بالفعل، أي من خلال تقديم «فرضيات» مختلفة لما هو ثابت. على سبيل المثال، إذا أخطأ المرء في تقدير مسافة شيء ما، فسوف يخطئ المرء أيضًا في تقدير حجمها. عندما يمشي المرء، قد يشعر أن الشيء لا يغير حجمه الظاهري بالطريقة التي يشير إليها حكمنا على بُعده. وفجأة سيظهر في مجال الإدراك طريقة مختلفة لرؤية الشيء، وهو ما يتوافق مع المعلومات الجديدة. نرى إذن أن ما يظهر بالفعل في مجال الإدراك، على الأقل عندما يرى المرء شيئًا ثابتًا نسبيًّا، هو بنية وترتيب الأشياء التي تعتبر ثابتة في أحجامها وأشكالها وعلاقاتها المكانية. هذا البناء في «العرض الداخلي» هو أن الافتراض بأنه ثابتٌ لا يفسر مظهره البصري الحالي فحسب، بل يفسر أيضًا التغييرات في مظهره التي اختبرها نتيجة للحركات السابقة، بالإضافة إلى كل ما

نحن عليه الآن. نعرف أو نعتقد أننا نعرف عنه. في كل لحظة، يكون لمثل هذا البناء طابعٌ مؤقتٌ، بمعنى أنه قد يكون عرضة للتغييرات، إذا أدى ما يعنيه ضمنيًّا إلى تناقضاتٍ في التجارب اللاحقة التي تتعلق بالحركات اللاحقة، والتحقيقات، والاختبارات. وهنا نرى دورًا أساسيًّا من الحركات النشطة للمستقبل، فمن خلال هذه «الفرضيات» الحالية في «العرض الداخلي» للإدراك دائمًا ما يختبر ثم يصحح ويعدل.

حتى الآن كنَّا نفكر فقط في الحالة التي يتحرك فيها المستقبل في بيئة ثابتة نسبيًّا. إذا كانت الحركات تحدث في بيئته أيضًا، فهناك مشكلة إضافية تتمثَّل في معرفة أي من التغييرات الملحوظة ترجع إلى تحركات المراقب وأيُّها ترجع إلى تحركات ما هو موجود في البيئة؟ يتم التعامل مع هذه المشكلة، في الواقع، من خلال القدرة على تجريد نوعٍ عالٍ من الثبات، أي حالة حركة ثابتة نسبيًّا.

بشكلٍ عامٍّ، عندما يتحرك الشخص في بيئته، يبدأ دماغه (إلى حدٍّ كبيرٍ من دون وعي) بملاحظة تلك السمات التي لا تتغير بشكلٍ كبيرٍ نتيجة لهذه الحركات. يتعامل معها كخلفية بعيدة وثابتة نسبيًّا، يمكن على أساسها إدراك الحركات الأخرى. كلما اقتربت الأشياء، بالطبع، مع تغيير أحجامها الظاهرة، وأشكالها، بشكلٍ ملحوظٍ بطريقة منهجية عندما يمشي الشخص، ويحرك رأسه. يبدو أن الدماغ قد طور القدرة على أن يكون حساسًا لمثل هذه الحركات الظاهرة والتغيرات في البيئة المجاورة، خاصةً عندما يقوم بتنسيقها مع الحركات التي ينتجها المستقبل نفسه. يسمح هذا بالقضاء على الحركات المنتجة ذاتيًّا في

مجال ما يمكن إدراكه، بحيث يتوافق بناء «العرض الداخلي» مع عالمٍ ثابتٍ بشكلٍ عامٍّ، حيث يُنظر إلى المستقبل نفسه على أنه يتحرك. لذلك، عندما يتجول الشخص في الغرفة، فإنه لا يشعر بأن الغرفة تتحرك، وتدور حولها، وتغير شكلها. كل الاختلافات فيما يدركه. ولكن إذا تعرض، على سبيل المثال، لأضرارٍ في آلية التوازن الدقيقة في الأذن الداخلية، فلن يعد قادرًا على تنسيق تصوراته الميكانيكية مع تصوراته البصرية. قد يصاب بعد ذلك بالدوار، ويشعر أن العالم يدور حوله. الفرق بين هذين الأسلوبين من الإدراك مذهل جدًّا لأي شخصٍ سبق له تجربة ذلك.

على أساس القضاء على حركة المستقبل، يمكن للدماغ بعد ذلك الانتقال إلى المستوى التالي من التجريد، حيث يستشعر حركة جزءٍ من مجال الرؤية على خلفية يُنظر إليها على أنها ثابتة. تظهر أبسط حالة عندما يعاني جسمٌ معينٌ من موضعه في الفضاء وربما أيضًا الدوران. في هذه الحالة يكون المرء قادرًا على إدراك أن الكائن له حجمٌ وشكلٌ ثابتان بالفعل، على الرغم من حقيقة أن صورته على شبكية العين تتغير طوال الوقت. يرتبط هذا الإدراك ارتباطًا وثيقًا بالقدرة على رؤية شيء مثل امتلاك حالة معينة من الحركة، بدلًا من سلسلة من الصور «الثابتة» للكائن المعني، كل منها في وضع مختلف قليلًا. يبدو الأمر كما لو أن الدماغ كان قادرًا على إنشاء إطارٍ مرجعي متحرك، حيث يمكن رؤية الجسم المتحرك على أساس أن له شكلًا ثابتًا. بهذه الطريقة، يبدو أن الدماغ يُدرج في عملية بنائه القدرة على تجريد حالة معينة من الحركة، التي في ظل افتراض جسم ذي شكلٍ معينٍ متوافقة مع التغييرات التي أدركها في مظهر الجسم لفترة زمنية.

بالطبع، سيكون هناك بعد ذلك أنواعٌ أخرى من التغييرات التي لا يمكن تفسيرها بهذه الطريقة (على سبيل المثال، قد ينمو كائنٌ ما في الحجم، ويغير شكله). يجب أن يُنظر إليها من خلال التغييرات الداخلية الأكثر دقة في الكائن المعني.

إن مشكلة كيفية إدراك الحركة أبعد ما تكون عن الحل الكامل. ومع ذلك، فمن الواضح بالفعل أن مثل هذا التصور لا يمكن أن يستند فقط إلى «انطباعات الحِسِّ» في لحظة معينة. بدلًا من ذلك، فإن «العرض الداخلي» الذي ندركه يجسد سماتٍ هيكلية معينة، لا تعتمد فقط على التجريدات من الأحاسيس المباشرة، ولكن أيضًا على سلسلة من الأفكار التجريدية على مجموعة ممتدة إلى حدٍّ ما من التصورات السابقة. في الواقع، من دون هذه السلسلة من الأفكار التجريدية، لم نتمكن من رؤية عالمٍ به نظامٌ محددٌ جيدًا، له نظامٌ، وبنية. حتى البيئة الثابتة تقدم بشكلٍ فعَّالٍ في «العرض الداخلي» كهيكلٍ مؤقتٍ وافتراضي، التي عندما يُفترض أنها ثابتة، ستكون متوافقة مع التجارب المتغيرة التي مرَّ بها المستقبل مع هذه البيئة، في الحركات التي أنتجها هو نفسه. وتقدم البيئة التي تتغير هي نفسها في «العرض الداخلي» كهيكلٍ يعبر عنه من حيث الحالات الثابتة للحركة لأجزاء من البيئة التي تفسر التجارب المتغيرة السابقة التي لا تفسرها حركات المستقبل.

قد ينشأ أيضًا غموضٌ في إسناد الحركات إلى المراقب أو إلى أجزاءٍ مختلفة من البيئة. وهكذا، إذا كان الشخص جالسًا في قطارٍ لا يتحرك، ويشاهد قطارًا متحركًا آخر من خلال النافذة، فقد يجد أنه يتصور نفسه

متحركًا، وحتى إنه يحصل على بعض الأحاسيس الجسدية للحركة. ولكن عندما يفشل في الشعور بالاهتزاز المتوقع للقطار، يبدأ في النظر بعناية أكبر، ويمكنه قريبًا أن يرى في البيئة أدلة أخرى معينة، مما يشير إلى أن القطار الآخر هو الذي يتحرك وأنه في حالة سكون. فجأة تغير أسلوبه في إدراك العالم. هذا عرضٌ مذهلٌ لكيفية أن تصوراتنا للعالم هي بناء في «العرض الداخلي»، بناءً على البحث عن فرضية تتوافق مع كل ما اختبرناه فيما يتعلق بموقفٍ معينٍ، لذلك نحن لا ندرك فقط ما هو أمام أعيننا، نحن ندركه منظمًا ومرتبًا من خلال التجريدات حول نوع الحالة الثابتة (التي قد تشمل حالات الحركة الثابتة (بسرعة ثابتة)) التي ستشرح التجربة الفورية ومجموعة واسعة من التجارب السابقة التي أدَّت إلى ذلك.

النتائج من النوع الموصوف أعلاه قادت جيبسون[1] إلى اقتراح مفهومٍ جديدٍ لِمَا يشكِّل الإدراك. ويؤكد على الحاجة إلى التخلي عن فكرة أن الإدراك يتكوَّن من تجميع انطباعات الحس بشكلٍ غير فعَّالٍ، والتي يقوم بتنظيمها وهيكلها من خلال المبادئ التي يوفرها المراقب فقط. في الواقع، يُنظر إلى انطباع المعنى المنعزل على أنه تجريدٌ عالي المستوى للغاية، ولا يلعب أي دور مهم في عملية الإدراك الفعلية. بدلًا من ذلك، نحن حسَّاسون بشكلٍ مباشرٍ لهيكل بيئتنا نفسها. وبالتالي، في التحليل الأخير، لا يوفر المراقب بنية تصوراته، بقدر ما يقوم بتجريدها. أو كما يضع جيبسون نفسه هذه النقطة، فإن بنية بيئتنا هي الحافز الذي

(1) J.G.Gibson, American Psychologist, 15, 694 (1960).

يؤدي إلى ما ندركه (أي البناء في «العرض الداخلي» الذي يقدم في وعينا). فيما يتعلق بالإدراك البصري، على سبيل المثال، يشير جيبسون إلى أنه من خلال كل منطقة من الفراغ، يمرُّ عددٌ لا نهائي من أشعة الضوء، يسير في جميع الاتجاهات. تحتوي أشعة الضوء هذه ضمنيًّا على جميع المعلومات حول بنية العالم التي يمكننا الحصول عليها من الرؤية. لكن العين المثبَّتة في موضعٍ معينٍ لا يمكنها تجريد هذه المعلومات، يجب أن يتحرك بعدة طرق، وعلى الأقل يجب أن ينتج جزءٌ من هذه الحركات من قبل المراقب نفسه، لأنه (كما أوضح هيلد وزملاؤه) تجرد المعلومات الهيكلية بشكلٍ أساسي من خلال العلاقات الثابتة بين الاستثارة العصبية الخارجة التي تؤدي إلى هذه الحركات والإثارة العصبية الداخلية المناظرة التي تنتج عنها.

ينطبق المبدأ نفسه على التلسكوب الراديوي، الذي يكون على اتصالٍ مع بنية الكون كله، من خلال مجموعة مماثلة من موجات الراديو.

يطرح جيبسون مجموعة متصلة من الأسئلة بخصوص دور الزمن في الإدراك. السؤال النموذجي، على سبيل المثال؛ «متى ينتهي حافزٌ معينٌ؟» الطريقة القديمة للنظر في هذه المشكلة هي الإشارة إلى ما يُسمَّى «الحاضر المزيف». أي، وجد أن هناك فترة زمنية، بترتيب عُشر ثانية، يتم اختبارها «بشكلٍ خادعٍ» كلحظة واحدة، بمعنى أن الناس لا يبدو أنهم قادرون بوضوحٍ على التمييز بين التغييرات التي تحدث في أوقاتٍ أقل من هذا. من هذا المفهوم، سيترتب على ذلك أن جميع

تصوراتنا يمكن من حيث المبدأ أن يتم ترتيبها بشكلٍ فريدٍ في الوقت المناسب، بدقة تبلغ عُشر ثانية أو نحو ذلك. ومع ذلك، يطرح جيبسون أسئلة تشير إلى محاولة فهم السمات الأساسية لعملية الإدراك من خلال إحالتها بهذه الطريقة إلى مثل هذا النظام الزمني.

لمعرفة سبب سؤال جيبسون عن الترتيب الزمني البسيط للتصورات الموصوفة أعلاه، دعونا نتذكر أننا لا ندرك الأحاسيس اللحظية إلى حدٍّ ملموسٍ. بدلًا من ذلك، نحن ندرك بنية شاملة يتم تجريدها، وهي بنية أنشئت بشكلٍ واضحٍ خلال فترة زمنية معينة. لقد رأينا بالفعل فيما يتعلق بالإدراك البصري، على سبيل المثال، أن القرائن التي تحصَّلنا عليها بمرور الوقت قد تتجمَّع في لحظة معينة وتؤدي إلى تكوين بنية جديدة لما يتم إدراكه. من الواضح أنه ليس من المنطقي أن نقول إن هذا الهيكل الجديد يعتمد فقط على آخر دليلٍ تلقته. بدلًا من ذلك، فإنه يعتمد على مجموعة كاملة من القرائن. هذا يعني أن الحافز المعين لتصوراتنا لا يقتصر على أصغر فترة زمنية يمكن تمييزها، بدلًا من ذلك، يمكن القول إن بعض المحفزات تحدث على فتراتٍ أطول بكثيرٍ.

في الموسيقى، تُرى خاصية المنبهات بشكلٍ أكثر وضوحًا. عندما يستمع المرء إلى نغمة، تستمر النغمات التي سُمعت سابقًا في التردد في العقل، بينما تأتي كلُّ النغمات الجديدة. قد يفهم المرء فجأة (أي من خلال إدراك الهيكل العام) لقطعة موسيقية في لحظة معينة من هذه العملية، لكن من الواضح أن الملاحظة الأخيرة التي تلقاها ليست هي

الأساس الوحيد لمثل هذا الفهم. بالأحرى، إنها البنية الكاملة للنغمات التي يتردد صداها في العقل. هذه النغمات لها علاقاتٌ متعددة، لا تقتصر على ترتيبها الزمني لفهم هذه العلاقات كضرورة لفهم الموسيقى. إن الجهد المبذول في النظر إلى المحتوى الأساسي للموسيقى من حيث ترتيبها الزمني يمكن أن يؤدي إلى طريقة ضيقة للغاية للنظر في المشكلة، مما قد يؤدي إلى حدوث ارتباكٍ.

بطريقة مماثلة يمكن للمرء أن يفكر في مشكلة كيفية إدراك المرء للإيقاع. في أي لحظة هناك نبضة واحدة فقط يمكن سماعها، لكن نبضة واحدة ليست إيقاعًا. من الواضح أن ارتداد مجموعة كاملة من النبضات في العقل، كلها في علاقة معينة تشكل إدراك الإيقاع. عندئذٍ لا يمكن للمنبه الذي يشكِّل إيقاعًا أن يشير فقط إلى لحظة واحدة من الزمن. لذلك يبدو من المهم أن ندرك أن السمات الأساسية للإدراك لن تُفهم دائمًا من خلال تحديد ما يُدرك في ترتيبٍ زمني.

في الواقع، في كثيرٍ من الحالات لا يمكن تخصيص لحظة زمنية فريدة لميزة معينة لما يمكن إدراكه. في أثناء الاستماع إلى مقطوعة موسيقية، قد يقدر المرء إيقاعًا يستند إلى عدة ثوانٍ، وهو موضوع قد يتطلب دقيقة أو أكثر ليفهم وقد ننظر إلى ساعة إيقاف، ونرى حركات اليد ربما يشير ذلك إلى جزء من الثانية. عندما يقول المرء «الآن»، ماذا يعني هذا؟ هل يشير إلى تصور موضع معين للمؤشر على الساعة، أو إدراك جزء معين من الإيقاع، أو إدراك جزء من الموضوع، أو ربما إلى شيء آخر؟

يبدو إذن أن الجهد المبذول لترتيب مجمل تصورات المرء من منظور نظامٍ زمني واحد فريد يجب أن يؤدي إلى الارتباك والسخافة. وبالتالي يمكن ترتيب تصورات معينة (مثل تلك التي تشبه رؤية المؤشر على قرص الساعة). ولكن لفهم عملية الإدراك في سياقٍ أوسع، يجب أن نرى أن الهياكل التي يتم إدراكها لا ترتبط ارتباطًا صارمًا بهذا الترتيب الزمني كما قد تقودنا مفاهيمنا العرفية إلى التفكير. هناك ترتيبٌ زمني فضفاضٌ، بمعنى، أن تصورات اليوم ليست مرتبطة ارتباطًا وثيقًا بأحداث الأمس (على الرغم من أن هذه التصورات لا تزال في الواقع «تتردد» داخلنا وتساعد في تشكيل التصورات الحالية). ومع ذلك، فإن الفكرة الصعبة والسريعة القائلة بأن كلَّ تصورٍ مرتب بشكلٍ فريدٍ كما هو الحال في وقتٍ سابقٍ، أو لاحقًا، أو متزامنًا مع آخر (خلال فترة «الحاضر المزيف») يبدو أنه يؤدي إلى نوعٍ من الارتباك، مما يشير إلى أنه ربما لا يكون له صلة كبيرة بـالحقائق الفعلية للإدراك.

قد يكون من المفيد التفكير في مثالٍ بسيطٍ لمشكلة فيزيائية حيث تؤدي محاولة اعتبار الترتيب الزمني للأحداث كأساسٍ لفهم عملية ما إلى نوعٍ من الارتباك مشابه لما ينتج عنه عند تطبيقه على الإدراك. لنفترض، من أجل مناقشتنا، أن هناك كائناتٍ على سطح المريخ، وأنهم أصبحوا مهتمين بدراسة إشارات الراديو القادمة من الأرض. عندما يأتون لمراقبة الإشارات التلفزيونية، لن يكونوا قادرين على فهمها بقدرٍ كبيرٍ، إذا افترضوا أن المبدأ الأساسي لهذه الإشارات كان نوعًا من الصيغة أو مجموعة من العلاقات التي تحدد ترتيبهم الزمني. في الواقع،

لا يمكن فهم الإشارات بشكلٍ صحيحٍ إلا عندما يمكن إدراك أنها تنشأ في سلسلة من الصور الكاملة، والتي تُترجم بعد ذلك بشكلٍ منهجي إلى سلسلة زمنية من النبضات. لذلك يجب فهم المبادئ التي تحكم الترتيب الفعلي للنبضات من حيث التركيب المكاني الذي يختلف تمامًا عن الترتيب الزمني الذي تستقبل به الإشارات الراديوية. أو، بعبارة أخرى، لا يرتبط ترتيب الإشارات أساسًا بترتيب الوقت. بطريقة مماثلة، قد لا يكون هيكل عمليتنا الإدراكية مرتبطًا بشكلٍ أساسي ببعض السلاسل الافتراضية من اللحظات، ولكن قد يعتمد على أنواعٍ مختلفة تمامًا من المبادئ التي تتضمن (مثل إشارة التلفزيون) تكاملًا ما يتم استقباله على فتراتٍ زمنية مناسبة من الزمن، ويمتد إلى ما بعد فترة «الحاضر المزيف».

إذا كان الإدراك المعين يدمج ما يأتي على مدى فترات طويلة من الزمن، فهل هذا يعني أن الذاكرة هي العامل الرئيسي الذي يحدد الهيكل العام لما ندركه؟ (الذاكرة هي القدرة، على سبيل المثال، على تذكر ما يقرب من الأحاسيس، والأحداث، والأشياء، التي اختبرها في الماضي). لا يقبل جيبسون فكرة أن الهيكل في تصوراتنا يأتي بشكلٍ أساسي من الذاكرة، على الرغم من أن من الواضح أن الذكريات لها بعض التأثير في تشكيل مثل هذه التصورات. يقترح أن العملية الرئيسية هي ما يسميه «التناغم» مع ما يدركه المرء. وهكذا، عندما يرى المرء شيئًا جديدًا وغير مألوفٍ، فإنه لا يدرك أولًا بشكلٍ غامضٍ سوى عددٍ قليلٍ من السمات الهيكلية العامة. ثم بينما يتحرك فيما يتعلق بما يُنظر

إليه وربما يبحث أيضًا، يبدأ في تجريد المزيد من تفاصيل هذا الهيكل، وتصبح تصوراته أكثر وضوحًا. ربما يمكن للمرء أن يقارن هذه العملية بنوعٍ من المهارة، الذي لا يعتمد أيضًا على تذكر جميع الخطوات التي اكتسب هذه المهارة من خلالها.

سواء في حالة الإدراك أو في حالة بناء المهارة، يجب على الشخص أن يلتقي بنشاطٍ مع بيئته بطريقة ينسق فيها نبضاته العصبية الخارجة مع تلك التي تأتي من داخله. ونتيجة لذلك، فإن بنية بيئته، تدمج تدريجيًّا في دوافعه المنتهية، حتى يتعلم كيفية تلبية بيئته بالنوع الصحيح من الاستجابة. فيما يتعلق بتعلم مهارة ما، فمن الواضح كيف يحدث ذلك. ولكن بمعنى ما، فإن إدراك كل نوعٍ من الأشياء هو أيضًا مهارة، لأنه يتطلب من الشخص أن يلتقي بنشاطٍ من البيئة مع الحركات المناسبة للكشف عن بنية تلك البيئة. (ستكون هذه الحقيقة واضحة أيضًا إذا لم يكن لمفهومنا المعتاد أن الإدراك هو علاقة غير فعَّالة بشكلٍ بحتٍ).

إذا تعلَّمنا بنية الأشياء من خلال «التناغم»، فيبدو واضحًا أن السمات العامة جدًّا لقدرتنا على فهم بنية العالم ستعود -في كثيرٍ من الحالات- إلى ما تعلمناه في الطفولة المبكرة. هنا يمكن أن ترتبط دراسات عملية الإدراك بعمل بياجيه، الذي ناقشناه في القسم السابق. هناك رأينا كيف يبدأ الرضيع بمجموعة محدودة من ردود الفعل الفطرية. عندما تتطور إلى «منعكس دائري»، يكون لديه السمة الأساسية للإدراك، أي القدرة على أن يكون حساسًا للعلاقة بين النبضات العصبية الصادرة والواردة، وهي علاقة مميزة لما يجب إدراكه. بعدها سيصبح قادرًا على «التوفيق»

خطوة بخطوة مع بيئته، من خلال تجريد مثل هذه العلاقات مما هو ثابت في هيكلها العام. من خلال القيام بذلك، يقوم ببناء مفاهيمه عن المكان، والزمن، والسببية، وتقسيم العالم إلى أشياء دائمة (أحدها هو نفسه)، ومفهوم الجوهر الدائم، والأعداد الدائمة للأشياء، إلخ. تتشابك المفاهيم في نسيج الإدراك، بمعنى أنها تساعد في تشكيل بنية ما يظهر في «العرض الداخلي» الموجود في وعينا. لذلك بينما نكون قادرين على «مواءمة» أنفسنا مع أنواعٍ جديدة من الهياكل عندما نلتقي بشيء جديدٍ، يبدو أن هناك بعض السمات الهيكلية العامة، من النوع الموصوف أعلاه، التي يتعلمها لأول مرة في الطفولة، والتي ندرك تواجدها في كل ذلك.

يمكن النظر إلى الهيكل العام أو الكلي لعملية الإدراك الحسي لدينا ليس فقط من وجهة نظر تطورها منذ الطفولة، ولكن يمكن أيضًا فحصها مباشرة في البالغين. لقد أُجريت مثل هذه الدراسات بواسطة هب Hebb ورفاقه[1] من خلال عزل الأفراد في بيئاتٍ لم يكن هناك سوى القليل أو لا شيء يمكن إدراكه. تضمنت الحالات القصوى لمثل هذه العزلة وضع الناس في خزانات من الماء في درجة حرارة مريحة، مع عدم رؤية أو سماع أي شيء، وتغطية الأيدي بطريقة لا يمكن من خلالها الشعور بأي شيء. وجد هؤلاء الأفراد الذين كان لديهم صعوبة كافية في التطوع لمثل هذا العلاج أنه بعد فترة من الوقت بدأت بنية المجال الإدراكي

(1) R.Held and S.J.Freedmon, Science, 142, 455 (1963); also the Symposium on Sensory Deprivation, The Journal of Nervous and Mental Diseases, No. 1, January 1961.

في التغيُّر. أصبحت الهلوسة وغيرها من الإدراكات الذاتية، وكذلك تشوهات الوعي بالزمن، أكثر وأكثر تواترًا. أخيرًا، عندما خرج هؤلاء الأشخاص من العزلة، وجد أنهم تعرَّضوا لدرجة كبيرة من الارتباك العام، ليس فقط في عواطفهم ولكن أيضًا في قدرتهم على الإدراك. على سبيل المثال، غالبًا ما وجدوا أنفسهم غير قادرين على رؤية أشكال الأشياء بوضوحٍ، أو حتى رؤية أشكالهم ثابتة، لقد رأوا ألوانًا متغيرة لم تكن موجودة. تميل «التناغمات» الهيكلية، المُدمجة في الدماغ منذ الطفولة المبكرة، إلى التفكك عندما لا توجد بيئة منظمة بشكلٍ مناسبٍ للعمل عليها. إذا قارنَّا هذه المواءمات ببعض أنواع المهارات اللازمة لتلبية بيئتنا النموذجية، فربما لا يكون من غير المتوقع تمامًا أن تتحلل عندما لا يتم استخدامها. ولكن ما لا يزال مفاجئًا هو السرعة الكبيرة للغاية التي تتدهور بها مثل هذه «المهارات» على مدى العمر. لتوضيح ذلك، اقترح أنه في حالة عدم وجود بيئة خارجية للدماغ للعمل عليها، يبدأ العمل في البيئة الداخلية، أي على النبضات التي تنتج تلقائيًّا في الجهاز العصبي نفسه. لكن لا يبدو أن هذه الدوافع في الواقع لها بنية محددة جيدًا ومفهومة لنا، لذلك في الجهد النشط لـ «التوافق» مع بنية إما غير موجودة وإما غير مفهومة للأشخاص الذين أجروا التجربة بالفعل، يتم خلط التعديلات القديمة، التي بُنيت على مدى العمر، وتفككها.

لقد أكدت الفرضية المذكورة أعلاه إلى حدٍّ ما من خلال التجارب التي بحث فيها الناس لفترة طويلة على شاشة تلفزيون تحتوي على نمطٍ عشوائي متغيرٍ (غير منظمٍ) من البقع. نتج عن

ارتباكٍ في الإدراك مشابه لِمَا تم الحصول عليه في التجارب التي تم فيها عزل الموضوعات. وبالتالي يمكن القول إنه في محاولة للتكيُّف مع بنية غير موجودة أو غير مفهومة في بيئته العامة، بدأ الدماغ في تحطيم «التناغم» الهيكلي الأقدم الذي كان مناسبًا للبيئة الطبيعية التي يعيش فيها الناس عمومًا.

الآثار المترتبة على هذه التجارب بعيدة المدى لدرجة أنها مزعجة إلى حدٍّ ما، ومع ذلك، يمكن ملاحظة أنهم بشكلٍ عامٍّ يميلون إلى مواصلة ما اقترحه بالفعل بياجيه وفي النتائج التي لخصناها في هذا القسم. في كل هذا، رأينا أنه في الإدراك يوجد دافعٌ عصبيٌّ صادرٌ ينتج حركة، استجابة لها توجد مجموعة واردة منسقة من الأحاسيس. يبدو أن القدرة على تجريد علاقة ثابتة في هذه النبضات العصبية هي أساس الإدراك الذكي. لأن الهيكل الموجود في «العرض الداخلي» يتحدد بالحاجة إلى تفسير ما هو ثابت في العلاقة بين الحركات الصادرة والأحاسيس الواردة. بهذه الطريقة لا يتعلم المستقبل دائمًا عن بيئته فحسب، بل يغيِّر نفسه أيضًا. أي أن بعض الانعكاس للبنية العامة لبيئته يمكن بناؤها في نظامه العصبي. فما دامت بيئته العامة لا تختلف كثيرًا في الهيكل عمَّا تم بناؤه بالفعل في نظامه العصبي، فيمكنه إجراء تعديلات من خلال «التناغم» مع الميزات الجديدة للبيئة. ولكن في بيئة لا يوجد بها مثل هذا الهيكل الملموس، يبدو أن هناك ميلًا لفقدان هذا التناغم، في البحث عن هيكلٍ إما غير موجود وإما يحتوي على ميزاتٍ تتجاوز قدرة المستقبل على فهم إذا كانت موجودة.

تقودنا هذه النتائج إلى السؤال القديم الذي صاغه كانط لأول مرة، حول ما إذا كان أسلوبنا العام في فهم العالم كما هو منظمٌ ومرتبٌ في المكان والزمن ومن خلال العلاقات السببية، متأصلًا بشكلٍ موضوعي في طبيعة العالم، أو ما إذا كانت مفروضة من قبل عقولنا. اقترح كانط أن هذه المبادئ العامة تشكِّل نوعًا من المعرفة المسبقة، المضمنة في العقل، التي كانت شرطًا مسبقًا ضروريًّا لأي خبرة يمكن التعرف عليها على الإطلاق، ولكنها قد لا تكون سمة من سمات «الأشياء في حد ذاتها».

يبدو أن اقتراح كانط كان صحيحًا من بعض النواحي ولكنه كان خاطئًا في الأساس من حيث إنه نظر في المشكلة في إطارٍ ضيقٍ للغاية. من المؤكد أننا في أي لحظة نلتقي بتجربة جديدة مع «تناغم» بنيوي معين في الدماغ وهو شرط ضروري لإدراك الجوانب التي يمكن التعرف عليها من العالم. هذا «التناغم» مسؤولٌ عن قدرتنا على رؤية مجموعة ثابتة إلى حدٍّ ما من الأشياء في كل لحظة، منظمة في الفراغ، مرتبطة سببيًّا، تتغير في تسلسلٍ زمني منظم ببساطة، إلخ. عندما يتم تقسيم هذا «التناغم» لفترة طويلة في أثناء العزلة عن الإدراك أو عن طريق تصور بيئة من دون بنية مرئية، فإن التجارب المذكورة أعلاه تُظهر بالفعل أن عملية التعرف على بيئة ما تتداخل بشكلٍ خطيرٍ معها.

من ناحية أخرى، تظهر النظرة الأوسع إلى هذه المشكلة أن انسجام الشخص البالغ مع الهيكل العام للعالم قد بُني بشكلٍ متطورٍ بدءًا من الطفولة. في بداية هذا التطور، يجب أن يكتشف الطفل بنية بيئته في

عملية طويلة يختبرها فيها، ويعمل عليها. ربما لا يختلف إجراؤه في القيام بذلك بشكلٍ أساسي عن ذلك المستخدم في البحث العلمي. إنه مهتم ببيئته، وسبرها، واختبارها، ومراقبتها، وكما كانت، فهو دائمًا يطور «فرضيات» إدراكية جديدة في «العرض الداخلي» تشرح تجاربه بشكلٍ أفضل. بفعله هذا، فهو «ينسجم» مع بيئته، ويطور الاستجابات الصحيحة لإدراك هيكلها بشكلٍ مناسبٍ. مع تقدمه في السن، تميل هذه العملية برمتها إلى الوقوع في مجال العادة. لكن كلما واجه شيئًا غريبًا وغير متوقعٍ، يكون قادرًا على تجريد سمات هيكلية جديدة، من خلال استمرار هذا النوع من التجريب والملاحظة الذي يميز الطفولة المبكرة.

بالطبع، يجد الشخص صعوبة في تغيير السمات الهيكلية العامة جدًّا، مثل تنظيم كل التجارب من حيث المكان والزمن والسببية. ومع ذلك، فإن التجارب المذكورة أعلاه تشير إلى أنه لا يبدو أن هناك حاجة متأصلة إلى مواصلة أيٍّ منها بنيَّة معينة، وأن الدماغ ربما يكون قادرًا على تجريد مجموعة واسعة جدًّا من أنواع السمات الهيكلية التي قد تكون موجودة بالفعل في جزءٍ من البيئة المتاحة لحواسه، بشرط أن يكون هناك اهتمامٌ مناسبٌ، مما يؤدي إلى نوعٍ من التجريب، والتحقيق. في أي لحظة، يعتمد الهيكل الذي نعرفه بالفعل على الخبرات والعادات السابقة، وهذا بدوره تمليه جزئيًّا البيئة العامة التي عاش فيها الناس بالفعل، وجزئيًّا من خلال الاهتمامات التي تحدد السمات الهيكلية التي سيوليها الناس قدرًا كبيرًا من الاهتمام. لذلك فنحن في الواقع نقترب من التجارب الجديدة، كما اقترح كانط، بنوعٍ من المبادئ الهيكلية

العامة المقدمة بالفعل. ومع ذلك، فإن التجارب المذكورة هنا تشير إلى أن كانط كان مخطئًا فيما يتعلق بأي مجموعة معينة من المبادئ من هذا النوع على أنها تتبع حتمًا لمقدمة من طبيعة العقل البشري. بدلًا من ذلك، وفقًا للخطوط التي اقترحها جيبسون، يبدو أن الشخص قد يصبح «منسجمًا» مع أي سماتٍ هيكلية لبيئته يمكن أن يستجيب لها نظامه العصبي، التي كان مهتمًّا بها بدرجة كافية.

فيما يتعلق بالمفاهيم الموضحة أعلاه، يمكننا أن نرى أنه في حين أن تصوراتنا لها جانبٌ شخصي، يعتمد على الخلفية والتكييف الخاصين لكل شخصٍ، وكذلك على الخلفية العامة والتكيف للبشرية جمعاء، فإن لديهم أيضًا جانبًا شخصيًّا، نوعًا من المحتوى الموضوعي الذي يمكن أن يتجاوز هذه الخلفية الخاصة والمحدودة. لأن الهيكل العام لتصوراتنا (الناتجة عن هذه الخلفية) يمكن اعتباره نوعًا من الفرضية، وبمساعدتها نقترب من التجارب اللاحقة التي تغيرت فيها الأشياء ليس فقط من تلقاء نفسها، ولكن أيضًا بسبب تحركاتنا. والأفعال والتحقيقات التي تغير علاقاتنا مع بيئاتنا. إلى الحد الذي تتناسب فيه التجارب الجديدة مع استمرار الهيكل القديم من دون تناقضاتٍ، تتأكد هذه الفرضيات بشكلٍ فعَّالٍ. ولكن إذا كنَّا متيقظين، فسوف نشعر بالتناقضات التي تنشأ (كما رأينا بالفعل، في العديد من الأمثلة التي نوقشت سابقًا). عندما يحدث هذا، يكون الدماغ حسَّاسًا لاكتشاف علاقاتٍ جديدة، مما يؤدي تلقائيًّا إلى مزيدٍ من الفرضيات، التي تتجسد في ظهور هياكل جديدة في «العرض الداخلي». يمكن لأي شخص أن يرى هذا يحدث وهو

يقترب من شيء بعيدٍ غير معروف له، أو عندما يقترب من شيء غير معروف في الضوء الخافت، على سبيل المثال، القمر. سيرى مختلف الأشكال والأشياء التي تظهر ثم تختفي، لأنها لا تتوافق مع الخبرات الأخرى الناتجة عن تحركاته، وتحقيقاته. لذلك هناك عملية مستمرة من «التجربة والخطأ» حيث ما ثبت أنه خطأ يُهمل باستمرارٍ، بينما تطرح هياكل جديدة باستمرارٍ «للنقد». في نهاية المطاف هناك تطور بهذه الطريقة للإدراك الذي يقف أمام مزيدٍ من الحركات، والاستقصاءات، بمعنى أن آثاره التنبؤية تثبت بالفعل في مثل هذه التجارب. (بالطبع، حتى هذا دائمًا ما يكون مؤقتًا، بمعنى أنه يمكن مناقضته لاحقًا).

ثم يكون المحتوى الموضوعي لتصوراتنا ضمنيًّا في عملية إثبات الخطأ والتأكيد الموصوفة أعلاه. في الواقع، فإن حقيقة أن رؤيتنا للعالم يمكن إثبات خطئها نتيجة لمزيدٍ من الحركة، والملاحظة، والاستقصاء، تعني ضمنًا أن هناك في العالم أكثر مما أدركناه وعرفناه، وهذا يعني أننا في الواقع لا نخلق العالم. في الواقع، نحن فقط نخلق «عرضًا داخليًّا» للعالم ردًّا على حركاتنا وأحاسيسنا. ومع ذلك، فإن إمكانية تأكيد «العرض الداخلي» هي التي توضح أن هناك ما هو أكثر من مجرد ملخص للتجارب السابقة. بالنسبة إلى هذا «العرض الداخلي»، يقوم على تجريد الهيكل العام لهذه التجارب السابقة، حيث يحتوي الهيكل على استنتاجات تنبؤية للتجارب اللاحقة. على سبيل المثال، عندما نقترب من مقدمة شيء ما مثل المنزل، نتوقع (إلى حدٍّ كبيرٍ من دون وعي) العديد من السمات الهيكلية لأجزاء الكائن غير المرئية بعد. وهكذا،

عند رؤية الجزء الأمامي والجانب الأول من المنزل، جنبًا إلى جنب مع أجزاء من سطحه، نستنتج أن له جوانب أخرى، وأن هذه الخطوط لها خطوطٌ متوازية معينة، وزوايا معينة. قد تأتي هذه الاستنتاجات جزئيًّا من الذاكرة، بعد أن أنهيت جولة منازل مماثلة سابقًا، لكنها تأتي في جزءٍ كبيرٍ منها، ليس من الاسترجاع البسيط للتجارب السابقة نفسها، ولكن من المبادئ الهيكلية العامة التي جردت من مجموعة واسعة جدًّا من هذه التجارب (على سبيل المثال، الأبعاد الثلاثة للفضاء، ووجود خطوط مستقيمة، وخطوط متوازية، وزوايا قائمة، وكلها تشير معًا إلى مجال عام معين من الاحتمالات للجوانب غير المرئية من الشيء، بغض النظر عن الذكريات الخاصة للأشياء المماثلة التي قد نمتلكها).

يظهر القليل من التفكير أن هناك عددًا هائلًا من الحالات التي تبين فيها صحة الأنواع الموصوفة أعلاه من الاستدلالات التنبؤية بناءً على الهيكل العام لتصوراتنا. وهذا يعني أن «العالم» الذي نراه في الإدراك الفوري لديه -في لحظة معينة- بنية عامة، صمدت أمام سلسلة طويلة من الاختبارات، والملاحظات التي أدت إلى اللحظة المعنية. وكقاعدة عامة، يحدث أن الإسقاط الطبيعي لهذا الهيكل وفقًا للحالة المعروفة لحركة المراقب وما هو موجود في مجال الإدراك سيستمر إلى حدٍّ ما وفقًا للملاحظات اللاحقة في العديد من النواحي. هذا يعني أن الهيكل العام لتصوراتنا له تشابهٌ معينٌ مع الهيكل العام لما هو في الواقع في بيئتنا. ومع ذلك، فإن التشابه ليس كاملًا، كما يتضح من ظهور التناقضات، والأحداث غير المتوقعة، التي تتطلب تغييرات مستمرة فيما هو «مبني»

في مجال الإدراك، وليست مجرد نتيجة الإسقاط الطبيعي مما تم إدراكه سابقًا. بهذه الطريقة نواجه باستمرار ما لم يذكر ضمنيًّا في تصوراتنا السابقة، وبالتالي نتذكر بأن هناك حقيقة تتجاوز ما أدركناه بالفعل، التي دائمًا تتكشف عن جوانب منها في تصوراتنا الإضافية.

* * *

A-4: التشابه بين عملية الإدراك والعملية التي يبحث بها العلم العالم

لقد ناقشنا في الأقسام السابقة من هذا الملحق دراساتٍ حول تطور عملية الإدراك لدى الإنسان منذ الطفولة، بالإضافة إلى الدراسات المباشرة حول كيفية حدوث هذه العملية عند البالغين. يمكن تلخيص ما ينتج عن هذه الدراسات في البيان الذي مفاده أننا في عملية الإدراك نتعلم عن العالم بشكلٍ أساسي من خلال كوننا حساسين لما هو ثابت في العلاقات بين حركاتنا وأنشطتنا واختباراتنا، وما ينتج عنها. التغييرات فيما يأتي من خلال أعضاء حواسنا. تقدم هذه العلاقات الثابتة فورًا في وعينا كنوعٍ من «البناء» في «العرض الداخلي»، الذي يجسد فرضية تفسر السمات الثابتة التي عثر عليها في مثل هذه التجارب حتى اللحظة المعنية. هذه الفرضية، مع ذلك، مؤقتة بمعنى أنه ستستبدل بفرضية أخرى، إذا واجهنا في حركاتنا اللاحقة، والتحقيقات تناقضات مع الآثار المترتبة على «بنائنا». ومع ذلك، فقد رأينا طوال هذا الكتاب أن الأبحاث في الفيزياء أظهرت سماتٍ أساسية مشابهة جدًّا لتلك الخاصة بالإدراك الموصوف أعلاه، وذلك مع التطور الإضافي للفيزياء، إلى أشكالها الأكثر حداثة (على وجه الخصوص، مع نظرية النسبية)، هذا التشابه يميل إلى أن يصبح أقوى. وهكذا، فإن جوانب ميكانيكا نيوتن التي ثبتت صحتها في النهاية تتكون من اكتشاف الثبات في علاقاتٍ معينة (قوانين نيوتن للحركة)، في مجموعة متنوعة من الأنظمة والحركات وتغييرات الأطر المرجعية. من ناحية أخرى، فإن سمات النظرية التي

اعتبرت تمثل المطلق (أي الفضاء المطلق، والزمن المطلق، ومفهوم المواد الدائمة ذات الكتل الثابتة، وما إلى ذلك) أظهرت في النهاية أنها غير ضرورية، وفي الواقع مصادر مهمة للارتباك والخطأ، في محاولة لتوسيع المعرفة العلمية لقوانين الحركة إلى مجالاتٍ أوسع. استندت خطوات أينشتاين الرئيسية إلى إبعاد مثل هذه الأفكار المطلقة، وعلى توسيع مفهوم قوانين الفيزياء إلى مجالاتٍ أوسع كعلاقاتٍ ثابتة (على سبيل المثال، لتشمل سرعات مماثلة لتلك الخاصة بالضوء). بفعله هذا، قاد أيضًا إلى إسقاط فكرة الكميات الثابتة من المواد، التي لها كتلٌ ثابتة. وبدلًا من ذلك، كان يُنظر إلى الكتلة على أنها مجرد خاصية ثابتة نسبيًّا، تعبِّر عن العلاقة بين طاقة الجسم ومقاومته القصور الذاتي للتسارع، جنبًا إلى جنب مع خصائص الجاذبية. تشير التطورات الإضافية في الفيزياء الحديثة، بما في ذلك النظرية الكمومية ودراسات التحولات لما يُسمَّى بالجسيمات «الأولية» (كما نوقشت في الفصل الثالث والعشرين) إلى أن فكرة الكيانات الدائمة المكونة من موادٍ ذات خصائص نوعية وكمية غير متغيرة قد تحتاج إلى إسقاطها تمامًا، ولن يترك للفيزياء شيئًا سوى دراسة ما هو ثابتٌ نسبيًّا في أوسع مجموعة متنوعة من الحركات وتحولات الإحداثيات وتغييرات المنظور، إلخ.

علاوة على ذلك (كما رأينا في الفصل الرابع والعشرين)، يبدو أن الفكرة القائلة بأن العلم يجمع الحقائق المطلقة عن الطبيعة، أو حتى يتعامل مع هذه الحقائق بطريقة متقاربة، لا تتفق جيدًا مع الحقائق المتعلقة بالتطور الفعلي للنظريات العلمية على هذا النحو حتى الآن،

وكان بالفعل أيضًا مصدرًا رئيسيًّا للارتباك في البحث العلمي. بدلًا من ذلك، كما أكد البروفيسور بوبر، يتقدم العلم فعليًّا من خلال طرح فرضياتٍ قابلة للدحض، التي تأكدت حتى نقطة معينة وبعد ذلك، كقاعدة عامة، يُختبر خطؤها في النهاية. ثم تطرح فرضيات جديدة يمكن انتقادها واختبارها من خلال عملية «التجربة والخطأ» تشبه إلى حدٍّ بعيدٍ تلك التي تتعرض لها تصوراتنا المباشرة باستمرارٍ.

النقطة المثيرة للاهتمام التي ظهرت من دراسة متزامنة لما تطور في العلم الحديث وما كشف عنه في الدراسات الحديثة لعملية الإدراك هي أن الأفكار الجديدة المطلوبة لفهم كليهما متشابهة إلى حدٍّ ما. سنقدم في هذا القسم بعض الحجج لصالح الاقتراح القائل بأن هذا التشابه ليس عرضيًّا بل هناك سببٌ عميقٌ وراءه. السبب الذي نقترحه هو أن البحث العلمي هو في الأساس طريقة لتوسيع إدراكنا للعالم، وليس بشكلٍ أساسي طريقة للحصول على المعرفة عنه. وهذا يعني أنه في حين أن العلم يتضمن البحث عن المعرفة، فإن الدور الأساسي لهذه المعرفة هو أنها عنصرٌ مساعدٌ لعملية إدراك حسية ممتدة. وإذا كان للعلم في الأساس مثل هذا النمط من الإدراك، فعندئذٍ، كما سنحاول أن نبيِّن، فمن المعقول تمامًا أن تكون بعض السمات الأساسية للبحث العلمي مشابهة إلى حدٍّ ما للسمات المقابلة للإدراك الفوري[1].

(1) لقد لاحظ العديد من المؤلفين التشابه بين البحث العلمي والإدراك، انظر:
N.H.Hanson, Patterns of Discovery, Cambridge University Press, New York, 1958, and T.Kuhn, The Nature of Scientific Revolutions, University of Chicago Press, Chicago 1963.

نظرًا إلى أن العلم كان يُنظر إليه عمومًا على أنه بحثٌ عن المعرفة بشكلٍ أساسي، فسيكون من الضروري البدء بالتعمق أكثر في مسألة العلاقة بين المعرفة والإدراك الفوري. الآن، كما رأينا، ما يظهر في الإدراك الفوري يجسد بالفعل نوعًا من التجريد للبنية العامة لما وُجد أنه ثابتٌ في عملية سابقة نشطة لاستكشاف البيئة التي أدَّت إلى الإدراك المعني. نقترح أن المعرفة هي مستوى أعلى من التجريد، بناءً على ما وجد أنه ثابتٌ في مجموعة واسعة من التجارب التي تنطوي على الإدراك الفوري. ربما يمكننا شرح هذه الفكرة بشكلٍ مباشرٍ من خلال الإشارة أولًا إلى حساب بياجيه لتطور مفهوم الطفل عن الفراغ (ناقشناه في القسم A-2). يكتشف الطفل في البداية مجموعة من العمليات، بحيث يمكنه الانتقال من مكان إلى آخر عبر طريقٍ معينٍ، والعودة بشكلٍ ثابتٍ إلى المكان نفسه من خلال مجموعة كبيرة من الطرق المختلفة. في وقتٍ لاحقٍ يكون الطفل قادرًا على تخيل (أي إنتاج صورة ذهنية) لمساحة، تحتوي حتى على أشياء لم تعد في مجال إدراكه المباشر، وأيضًا كائنًا متخيلًا يتوافق مع نفسه. يتوافق هيكل هذه الصورة الذهنية بأمانة مع ما وجده الطفل ثابتًا في تجاربه السابقة مع مجموعات الحركات، وبالتالي فإن هذه الصورة الذهنية تجرد نوعًا من «ثوابت ذات ترتيب أعلى»، أي شيء كان ثابتًا في نطاقٍ واسعٍ من التصورات المباشرة.

عندما نستخدم كلمات مثل «التجريد» لا نرغب في الإيحاء بأن هناك مجرد عملية استقراء، أو إخراج نوع من التلخيص لما أمكن تجربته سابقًا. بدلًا من ذلك، يشكِّل كلُّ تجريدٍ، نوعًا من «الفرضية» التي تُطرح لشرح ما وجد أنه ثابتٌ في مثل هذه التجارب السابقة. يمكن

الاحتفاظ فقط بالأفكار المجردة التي تصمد أمام المزيد من الاختبارات والتحقيقات. ومع ذلك، تصبح هذه الأمور اعتيادية في نهاية المطاف، ونتوقف عن إدراك طابعها الافتراضي والتجريبي الأساسي، معتبرين أنها -بدلًا من ذلك- سماتٌ متأصلة وضرورية لكل ما هو موجودٌ، في كل مجال محتمل للاختبار والتحقيق.

يمضي بياجيه بعد ذلك في وصف كيف أنه مع تطور اللغة والتفكير المنطقي، يستمر الطفل في تقديم تجريداتٍ ذات مستوى أعلى، حيث توجد هياكل مكونة من الكلمات والأفكار والمفاهيم، تعبر عن السمات الثابتة للعالم التي يعتبرها بشكلٍ تجريدي في تصوراته. من الواضح أنه لا يوجد حدٌّ من حيث المبدأ لعملية التجريد هذه. وهكذا يمكن القول بأن العلم والرياضيات يشكلان تجريداتٍ ذات مستوى أعلى (صيغت في كلمات ومخططات ورموز رياضية)، معبرة عن السمات الثابتة لما عثر عليه في التجارب والملاحظات (التي تنفذ من حيث التجريدات العادية للغة اليومية والبديهية). وهكذا فإن كل المعرفة هي بنية من التجريدات، والاختبار النهائي لصلاحيتها هو في عملية الاتصال بالعالم الذي يحدث في الإدراك الفوري.

يمكن ملاحظة أن الحالة الحاسمة في عملية التجريد الشاملة هذه هي تنحية أجزاءٍ معينة مما يظهر في «العرض الداخلي» على أنها لا تمثل الإدراك المباشر بشكلٍ مباشرٍ. هذه هي ما نتخيله، ونتصوره، ونرمزه، ونفكر فيه. ثم يُنظر إلى هذه الأجزاء على أنها مرتبطة بالإدراك الفوري كتجريداتٍ، تمثِّل السمات الهيكلية العامة لهذا الإدراك، تمامًا

مثل الخريطة التي تمثل التضاريس التي تعتبر خريطة[1]. ومع ذلك، كما أشرنا إلى ذلك في القسم A-2، لا يميز الطفل الصغير بسهولة بين ما يتخيله وما يراه استجابة للإدراك الفوري؛ بهذه الطريقة، تنشأ عادة الخلط بين «خرائطنا» المفاهيمية المجردة والواقع نفسه، وعدم ملاحظة أنها ليست سوى خرائط.

عندما يكبر الطفل يكون قادرًا على تجنُّب هذا الالتباس في المشاكل السطحية، ولكن عندما يتعلق الأمر بالمفاهيم الأساسية، مثل المكان والزمن والسببية، يكون القيام بذلك أكثر صعوبة. نتيجة لذلك، يستمر البالغ في عادة النظر في خرائطه المفاهيمية المجردة نسبيًّا، ورؤيتها كما لو كانت متأصلة في طبيعة الأشياء، بدلًا من فهم أنها تجريداتٌ ذات مستوى أعلى، فقط نوع من التشابه البنيوي مع ما وجد أنه ثابتٌ في المستويات الأدنى. إن هذا الالتباس، القائم على عادات طويلة الأمد، يجعل مناقشة مثل هذه المشاكل الأساسية أمرًا صعبًا للغاية.

ربما يمكننا توضيح هذه المفاهيم بشكلٍ أفضل بمساعدة مثالٍ بسيطٍ. افترض أننا ننظر إلى قرص دائري. الآن سيكون مظهره المباشر لأعيننا هو شكل القطع الناقص، الذي يتوافق مع إسقاطه على شبكية العين (كما قد يصوره فنان كان يحاول رسمه في المنظور). ومع ذلك، فإننا نعلم أنها في الحقيقة دائرة، ما هو أساس هذه المعرفة؟

ما يحدث في الواقع، كما أشرنا سابقًا، هو أن العين والرأس

(1) انظر أيضًا الفصل التاسع والعشرين، حيث ناقشنا اقتراح دورٍ مماثلٍ لمخطط مينكوفسكي في الفيزياء.

والجسم تتحرك دائمًا. في هذه الحركات، يتغير مظهر القرص دائمًا، حيث يخضع في الواقع لسلسلة من التحولات الإسقاطية المرتبطة بطريقة محددة بالحركات المعنية. بوسائل مختلفة (ناقشنا بعضها في القسم A-3)، يستطيع الدماغ تجريد ما هو ثابت في كل هذه الحركة، وتغيير المنظور. كل الآراء المتغيرة عنها، هي أساس «البناء» الذي نراه في «العرض الداخلي». بعد ذلك تفحص «الفرضية» القائلة بأن هذا الشيء هو عبارة عن دائرة بالفعل ويمكن اختبارها بطرقٍ لاحقة للتواصل معها بشكلٍ مدرك، ثم يحتفظ بها ما دامت أنها تصمد أمام مثل هذا الفحص والاختبار.

لكن إدراك أن الشيء المدرك عبارة عن دائرة يعتمد أيضًا على المعرفة التي تتجاوز مستوى الإدراك الفوري. وهكذا، منذ الطفولة المبكرة، تعلم الشخص أن يتخيل النظر مباشرة إلى الشيء في اتجاه عمودي، ورؤية شكله الدائري (بالإضافة إلى الشعور بأنه دائري عندما تمسكه يديه). ربما تعلم أيضًا أن يتخيل نفسه ممثلًا كنقطة على رسم تخطيطي، وأن يتابع مسار أشعة الضوء من الدائرة إلى نظره، وبالتالي يكون قادرًا على رؤية كيف يتحوَّل الشكل الدائري إلى مظهرٍ بيضاوي. إذا كان قد تلقَّى تعليمًا إضافيًّا، فيمكنه الانتقال إلى مستوى أعلى من التجريد، عن طريق حساب الشكل الصحيح للقرص رياضيًّا، من معرفة مظهره في العديد من وجهات النظر ومن معرفة علاقة المراقب بالقرص في كل هذه الآراء (المسافة، إلخ). في إجراء هذا الحساب، سيفعل بوعي على مستوى أعلى من التجريد ما يفعله دماغه تلقائيًّا على مستوى

أدنى، أي للعثور على بنية واحدة تفسر ما هو ثابت في علاقاتنا المتغيرة مع الشيء قيد المناقشة.

نرى إذن أنه لا يوجد فاصلٌ حاد بين تجريدات الإدراك المباشر وتلك التي تشكِّل معرفتنا، حتى لو حملنا هذه المعرفة إلى أعلى المستويات التي وصل إليها العلم والرياضيات. منذ البداية، تعبر تصوراتنا المباشرة عن «بناء» في «عرض داخلي»، بناءً على تجريد ما قبل الوعي لما هو ثابتٌ في بيئتنا أو عملية نشطة للتواصل معها. يكرر كلُّ مستوى أعلى من التجريد عملية مماثلة لاكتشاف ما هو ثابت في المستويات الأدنى، والذي تمثل بعد ذلك في شكل صورة، بنية رمزية للكلمات والصيغ، إلخ. لتشكيل الهيكل العام لمن هم في المستويات الأدنى، حتى الوصول إلى مستوى الإدراك الفوري. إذن بين جميع مستويات التجريد هناك تفاعلٌ مستمرٌّ ثنائي الاتجاه.

فكر، على سبيل المثال، في تجربة النظر إلى سماء الليل. استخرج الإنسان القديم من النجوم أنماط الحيوانات والبشر والآلهة، وبعد ذلك لم يكن قادرًا على النظر إلى السماء دون رؤية مثل هذه الكيانات فيها. يعرف الإنسان المعاصر أن ما وراء هذا الرأي حقًّا هو كون لا حصر له من النجوم والمجرات ومجرات المجرات، وأن كل شخص، له مكانٌ معينٌ في هذا الكون، يحصل على منظور معين عنه، وهو ما يمكنه مشاهدته في السماء. مثل هذا الرجل لا يرى الحيوانات أو الآلهة في السماء، لكنه يرى عالمًا هائلًا هناك. ولكن حتى وجهة نظر العلم الحديث ربما تكون صحيحة فقط في مجالٍ معينٍ. لذلك قد يشكِّل

الإنسان المستقبلي مفهومًا مختلفًا تمامًا عن الكلي الثابت الذي يقف وراء رؤيتنا لسماء الليل، حيث ربما يُنظر إلى المفاهيم الحالية على أنها حالة تبسيط وتقريب ومحدودة، ولكنها في الواقع بعيدة جدًّا عن كونها صحيحة تمامًا. لا يمكننا أن نقول إذن إنه في كل مرحلة كان الإنسان يوسع إدراكه للسماء ليلًا، منتقلًا من مستوى من التجريد إلى مستوى آخر، وفي كل مرحلة يتوجه إلى فرضياتٍ حول ما هو ثابتٌ، والتي تكون قادرة على الوقوف بشكلٍ أفضل أمام مزيدٍ من الاختبارات، والتحقيقات. ولكن إذا كان هذا هو الحال، فإن الاستقصاءات العلمية الأكثر تجريدًا وعمومية هي امتدادات طبيعية لنفس العملية التي يتعلم الطفل من خلالها أن يتعامل مع بيئته الإدراكية.

كما أشرنا في عدة مناسبات (على سبيل المثال، في مناقشة عمل بياجيه في القسم A-2 وتصور الحركة في القسم A-3) فإن إحدى المشكلات الأساسية التي يجب حلُّها في كل فعل إدراك هي أن تأخذ بعين الاعتبار وجهة نظر ومنظور المراقب الخاص. يعتمد حل هذه المشكلة بشكلٍ أساسي على استخدام عددٍ من مستويات التجريد، وكلها مرتبطة بشكلٍ صحيحٍ بعضها ببعض. وهكذا لا يدرك الشخص فقط المظهر القطع الناقص المباشر للقرص أمامه. يمكنه أيضًا إدراك التغييرات في مظهر القرص، التي تنتج عن حركاتٍ معينة يقوم بها هو نفسه بنشاطٍ. من خلال هذه التغييرات، يستطيع دماغه أن يستخلص معلوماتٍ حول علاقته بالقرص (على سبيل المثال، مدى بعده). النقطة الأساسية هنا هي أنه من خلال العديد من مستويات التجريد، وكلها تجري في الوقت نفسه

في العقل، من الممكن إدراك ليس فقط إسقاط موضوع الاهتمام ولكن أيضًا علاقة المراقب بالشيء المعني. من هذا يمكن دائمًا من حيث المبدأ الحصول على فكرة ثابتة عمَّا يحدث بالفعل. يمثل هذا في مستوى أعلى من التجريد، على سبيل المثال، من خلال تخيل مساحة تحتوي على القرص والمراقب نفسه، حيث يمثل كلا منهما في علاقاتهما الصحيحة. عندما يقول شخصٌ ما إن هذا الشيء دائري حقًّا، فمن الواضح أنه لا يشير إلى إحساس فوري لشكل الشيء ولكن إلى عملية التجريد الممتدة هذه، التي تمثل النتائج الأساسية لها في هذا الفضاء المتخيل والذي يحتوي على كل من هذا الشيء والشخص نفسه.

تظهر مشكلة مشابهة جدًّا في العلم. هنا، تتمدد أيدي وجسم وأعضاء حاسة الراصد (المراقب) بشكلٍ عام، عن طريق أدواتٍ مناسبة تكون في بعض النواحي أكثر حساسية، وأكثر قوة، وأكثر دقة، وكذلك قادرة على أنماطٍ جديدة للاتصال مع العالم. ولكن في النقطة الأساسية التي يقوم فيها المراقب بفحص بيئته واختبارها بنشاطٍ، فإن الوضع متشابه للغاية مع ما هو عليه في الإدراك الفوري، دون مساعدة من مثل هذه الأدوات.

في مثل هذه الاختبارات، هناك دائمًا بعض الاستجابة التي يمكن ملاحظتها لهذا الفحص والاختبار؛ وهي علاقة الاختلافات في هذه الاستجابة بالاختلافات المعروفة في حالة الأدوات التي تشكل المعلومات ذات الصلة فيما يجري ملاحظته (تمامًا كما يحدث مباشرة مع أعضاء الحس نفسها).

كما في حالة الإدراك الفوري، فإن مثل هذه الملاحظة لها أهمية قليلة جدًّا حتى يعرف المرء علاقة الأداة بالمجال الذي يخضع للمراقبة. من الممكن معرفة هذه العلاقة بمساعدة سلسلة من الأفكار التجريدية. وهكذا في أي تجربة لا يعرف المرء النتيجة المرصودة فحسب؛ يعرف المرء بنية الأداة وطريقة عملها، وقد اكتشف كل ذلك بمساعدة الملاحظات والإجراءات السابقة من أنواعٍ عديدة. بعبارة أخرى، في كل عملية من عمليات الملاحظة، هناك دائمًا ملاحظة ضمنية لأداة المراقبة نفسها، تجرى من حيث مستويات مختلفة من التجريدات المفاهيمية. لكن لفهم الملاحظة يحتاج المرء دائمًا إلى أنماطٍ معينة من التفكير حول المشكلة، حيث تمثل الأداة وما تلاحظه معًا، بحيث يمكن للمرء أن يرى «صورة كاملة» حيث يوجد مجالٌ ثابتٌ لما تتم دراسته له علاقة معينة بالأداة، هذه العلاقة تحدد كيف يوجد في الميدان «مشاريع» في بعض الاستجابة التي يمكن ملاحظتها من الأداة.

لقد سبق أن لفتنا الانتباه في الفصل التاسع والعشرين إلى حالة خاصة من المشكلة التي نوقشت أعلاه. وهكذا، في نظرية النسبية، يستخدم المرء مخطط مينكوفسكي، حيث يمكن من حيث المبدأ تمثيل جميع الأحداث التي تحدث في الزمكان بأكمله. ومع ذلك، يجب أن يحتوي كلُّ مثالٍ لمثل هذا الرسم البياني على سطر يتوافق مع الخط العالمي للمراقب الذي تكون نتائجه قيد المناقشة. عادة ما يمثل ذلك بمحور الرسم التخطيطي. بعد ذلك، إذا أردنا مناقشة نتائج مراقب آخر، يجب أن ندرج في الرسم البياني تمثيلًا لخط عالمه. بطريقة مماثلة،

يجب أن نختار نقطة لتمثيل المكان والزمن اللذين يحددان منظور رصد معينًا. من خلال أخذ كل هذا في الاعتبار، يمكننا من خلال استجابة أدوات المراقبة (التي تتعلق بسرعتها وزمنها ومكان عملها)، حساب الخصائص الثابتة لما يلاحظه المراقب، بهذه الطريقة فإن النتائج المختلفة للمراقبين المختلفين تفسر من خلال علاقاتهم المختلفة بالعملية قيد التحقيق. يمكن ملاحظة أن نظرية النسبية تقترب من الكون بطريقة مشابهة جدًّا لتلك التي يقترب فيها الشخص من بيئته في الإدراك الفوري. في كلا المجالين، كل الملاحظات تعتمد على تجريد ما هو ثابت كما يظهر في مختلف الحركات، من وجهات نظر وأطر مرجعية مختلفة. معبرًا عن الفرضيات بمستويات أعلى من التجريد تعمل كنوعٍ من «الخريطة»، لها ترتيبٌ ونمطٌ وهيكلٌ مشابه للملاحظات.

الميل إلى استخدام مثل هذه الخرائط لتصبح أمرًا معتادًا هو أيضًا شائعٌ في البحث العلمي والإدراك الفوري. عندما يحدث هذا، يقتصر تفكير الشخص على ما يمكن أن يتناسب مع مثل هذه الخرائط، لأنه يعتقد أنها تحتوي على كل ما يمكن أن يحدث، في كل حالة ومجال تجربة. تجرد فكرة البديهية لتزامن كل ما هو موجود في تصوراتنا المباشرة في مفهوم نيوتن للزمن المطلق، ونتيجة لذلك يبدو أنه من غير المفهوم أن توأمين يمكن تسريعهما بطرقٍ مختلفة ثم يلتقيان بعد فتراتٍ زمنية مختلفة (انظر الفصل الثامن والعشرين). لكن في القسم A-3، رأينا أن فكرة النظام الزمني الفريد لا تنطبق على ما يبدو من دون التباسٍ في مجال تصوراتنا المباشرة أيضًا. السبب الرئيسي في أن هذا

لم يلاحظ كثيرًا هو على الأرجح عادتنا في التعامل بجدية فقط مع ما يتناسب مع تصورنا المعتاد لكل ما يحدث، داخليًّا وخارجيًّا، على أنه في مثل هذا النظام الزمني الفريد والشامل.

يمكن ملاحظة أنه في النظرية الكمومية، تنتقل وجهة النظر الموصوفة أعلاه إلى أبعد من ذلك. السبب في الأساس هو عدم قابلية طاقة الكم للتجزئة، مما يعني أنه عندما نلاحظ شيئًا ما بدقة شديدة على المستوى الذري، نجد أنه يجب أن يكون هناك اضطرابٌ غير قابل للاختزال للنظام المرصود بالكميات المطلوبة لمثل هذه الملاحظة (الحقيقة وراء اشتقاق مبدأ عدم التأكد الشهير لهايزنبرج). يمكن إهمال تأثيرات هذه الكمات على المستوى الواسع. لذلك، على الرغم من أن المراقب يجب أن ينخرط في حركاتٍ وتحقيقاتٍ نشطة من أجل إدراك أي شيء على الإطلاق، يمكنه من حيث المبدأ (على الأقل في الإدراك البصري واسع النطاق) الامتناع عن إزعاج ما ينظر إليه بشكلٍ كبيرٍ. لكن الوضع مختلفٌ على مستوى الدقة الكمومية. هنا، يمكن مقارنة الكمات الضوئية بأصابع الرجل الكفيف، التي يمكن أن تعطي معلوماتٍ عن شيء فقط إذا تحركت وضربته. ومع ذلك، فإن الأعمى قادرٌ على تجريد بعض الخصائص الثابتة للشيء (مثل الحجم والشكل)، ولكن عند القيام بذلك، يأخذ دماغه في الاعتبار تلقائيًّا الحركة التي تنقلها عملياته الإدراكية إلى الشيء. وبالمثل، لا يزال الفيزيائي قادرًا على تجريد بعض الخصائص الثابتة للذرات والإلكترونات والبروتونات وما إلى ذلك (مثل الشحنة والكتلة واللف المغزلي)؛ ولكن عند القيام

بذلك يجب أن يأخذ في الاعتبار بوعي العمليات التي تحتوي عليها عملية الملاحظة بطريقة مماثلة. (مناقشة هذه النقطة بالتفصيل هي بالطبع خارج نطاق العمل الحالي؛ ولكن سيتم التعامل مع هذه الأسئلة في المنشورات اللاحقة).

* * *

A-5 : دور الإدراك في البحث العلمي

في المناقشة السابقة، رأينا التشابه الوثيق بين أنماط إدراكنا المباشر للعالم وأساليبنا في التعامل معه في التحقيقات العلمية الحديثة. سننتقل الآن إلى النظر مباشرة في الطابع الإدراكي المركزي للبحث العلمي، الذي اقترحناه في بداية القسم A-4.

بينما تشكل الأدوات العلمية للإنسان، كما رأينا، امتدادًا فعالًا لجسده وأعضائه الحسية، لا توجد هياكل خارجية قابلة للمقارنة تحل محل الجانب الداخلي للعملية الإدراكية (حيث السمات الثابتة لما يمكن اختباره، تقدم في «العرض الداخلي»). وبالتالي، فإن الأمر متروكٌ للعالم نفسه أن يكون على دراية بالتناقضات بين فرضياته وما يلاحظه، وأن يكون حساسًا للعلاقات الجديدة في ملاحظاته، وأن يطرح التخمينات أو الفرضيات، التي تشرح الحقائق المعروفة، وتجسد هذه الحقائق الجديدة في شكل علاقات، ولها آثار إضافية فيما يتعلق بما هو غير معروف حتى الآن، بحيث يمكن اختبارها في مزيدٍ من التجارب والملاحظات. لذلك هناك دائمًا مرحلة أخيرة حيث يلزم إجراء عملية إدراكية بشكلٍ أساسي في البحث العلمي، وهي عملية تحدث داخل العالم نفسه.

تميل أهمية المرحلة الإدراكية إلى التقليل من التأكيد، لأن العلماء يهتمون في الغالب بالمرحلة التالية، حيث تدمج الفرضيات التي صمدت في عددٍ من الاختبارات في جسم المعرفة العلمية المقبولة حاليًّا. في الواقع، يمكن توجيههم إلى افتراض أن النشاط الأساسي

للعالم هو تراكم المعرفة التي أمكن التحقق منها، نحو الهدف الذي توجه إليه جميع الأنشطة الأخرى في العالم في نهاية المطاف.

إذا كانت هذه المعرفة يمكن أن تشكل مجموعة من الحقائق المطلقة، فمن المنطقي على الأقل اعتبار تراكمها على أنه الهدف الرئيسي للعلم. ومع ذلك، كما رأينا، فإن مصير جميع النظريات أن يثبت خطؤها في نهاية المطاف، بحيث تكون حقائق نسبية، ومناسبة في مجالات معينة، بما في ذلك ما لاحظناه بالفعل، إلى جانب بعض المناطق غير المعروفة التي يمكن تحديد حدودها. إلى حدٍّ ما على الأقل، في التجارب والملاحظات المستقبلية. ولكن إذا كان هذا هو الحال، فلا يمكن اعتبار تراكم المعرفة هو الغرض الأساسي للبحث العلمي، وذلك ببساطة لأن صحة كل المعرفة مرتبطة بشيء ليس في المعرفة نفسها. لذلك لن يكون المرء قادرًا على رؤية ما يدور حوله البحث العلمي من دون مراعاة ما هو عليه، حتى المعرفة العلمية الراسخة والمختبرة جيدًا والتي يجب أن تكون مرتبطة بشكلٍ مستمرٍّ، إذا أردنا أن نكون قادرين على مناقشة مجال الصلاحية (والذي هو بالضرورة غير معروفٍ بشكلٍ كاملٍ).

هناك أيضًا صحة نسبية مماثلة للمعرفة التي نكتسبها في الإدراك الفوري. لكن في هذا المجال سبب ذلك واضحٌ إلى حدٍّ ما. في الواقع، العالم شاسعٌ جدًّا ويحتوي على الكثير من الأشياء المجهولة داخله لدرجة أننا لا نميل إلى افتراض أن ما نتعلمه من الإدراك المباشر هو مجموعة من الحقائق المطلقة، التي من المتوقع أن تكون آثارها صالحة

في مجالاتٍ غير محدودة من الخبرة المستقبلية. بدلًا من ذلك، ندرك أن الإدراك الفوري هو في الواقع وسيلة للبقاء في نوعٍ من الاتصال مع جزءٍ معينٍ من العالم، بطريقة يمكننا من خلالها إدراك الهيكل العام لهذا الجزء، من لحظة إلى أخرى، إذا كنَّا قد قمنا بإجراء عملية الإدراك بشكلٍ صحيحٍ. في هذا الاتصال، نشعر بالرضا إذا كنَّا قادرين على مواكبة ما نراه وربما، في بعض النواحي، أن نتقدم قليلًا (على سبيل المثال، في قيادة السيارة، يمكننا، إلى حدٍّ ما، توقُّع تحركات السيارات الأخرى، والأشخاص، والمنعطفات في الطريق، إلخ). وهكذا، في عملية الإدراك الفوري، يحصل المرء على نوعٍ من المعرفة، تكون آثاره صالحة في لحظة الاتصال ولبعض الوقت التي لا يمكن التنبؤ بها بعد هذه اللحظة. تكمن الأهمية الرئيسية للمعرفة السابقة من هذا النوع في آثارها على التصورات الحالية والمستقبلية، وليس في تراكم مخزون من الحقائق، التي تعتبر مطلقة.

وبالتالي فإن معرفتنا بما حدث بالأمس ليست في حد ذاتها ذات أهمية تذكر لأن الأمس قد ولَّى ولن يعود أبدًا. ومع ذلك، ستكون هذه المعرفة مهمة إلى حد أن آثارها والاستنتاجات التي يمكن استخلاصها منها قد تكون صالحة اليوم أو في وقتٍ لاحقٍ.

بالطبع، من الواضح أن للنظريات العلمية مجالاتٍ أوسع بكثيرٍ من صحة استدلالاتها التنبؤية مقارنة بـ«الفرضيات» التي تنشأ في الإدراك الفوري (تشترى هذه المجالات الأوسع على حساب الحاجة إلى العمل عند مستويات عالية جدًّا من التجريد). لأن مجال الصلاحية واسع جدًّا،

غالبًا ما يستغرق وقتًا طويلًا لإثبات حدوده. ومع ذلك، فإن ما يحدث في البحث العلمي، فيما يتعلق بالمشكلة قيد المناقشة، لا يختلف جوهريًّا عمَّا يحدث في الإدراك الفوري. لأنه في العلم أيضًا، مجمل الكون أكبر من أن يدرك بشكلٍ نهائي في أي شكلٍ من أشكال المعرفة، ليس فقط لأنه واسعٌ جدًّا ولا يقاس، ولكن أيضًا لأنه في مستوياته ومجالاته وجوانبه العديدة يحتوي على تنوع لا ينضب من الهياكل، التي تتجنب أي «شبكة» مفاهيمية معينة قد نستخدمها في محاولة التعبير عن ترتيبها ونمطها. لذلك، كما هو الحال في مجال الإدراك الفوري، فإن معرفتنا كافية لمجالٍ أصلي للاتصال بالعالم، يمتد بطريقة لا يمكن التنبؤ بها في بعض المجالات الأخرى. نظرًا إلى أن الهدف المتمثل في الحصول على معرفة صحيحة تمامًا لا علاقة له بمثل هذه الحالة، فقد تم توجيهنا إلى اقتراح أن البحث العلمي يجب اعتباره أساسًا وسيلة لتوسيع الاتصال الإدراكي للإنسان بالعالم، وأن الأهمية الرئيسية للمعرفة العلمية هي (كما يحدث في الإدراك الفوري) أنه عنصرٌ مساعدٌ لهذه العملية.

يظهر الطابع الإدراكي الأساسي للبحث العلمي بقوة أكبر عندما يحين الوقت لفهم الحقائق الجديدة، التي تختلف عن مجرد تراكم المزيد من المعرفة. لقد مرَّ كلُّ شخصٍ بهذه العملية في مناسباتٍ مختلفة في حياته. افترض أنه يتم شرح شيء غير مألوف (على سبيل المثال، نظرية في الهندسة). في البداية، يكون الشخص قادرًا على استيعاب أجزاءٍ مختلفة من المعرفة فقط، التي لم تتضح العلاقة بينها بعد. لكن في مرحلة معينة، في عملية سريعة جدًّا غالبًا ما توصف بـ

«النقر» أو «الومضة»، يفهم ما يتم شرحه. عندما يحدث هذا يقول «أنا أرى»، مشيرًا إلى الطابع الإدراكي الأساسي لمثل هذه العملية. (بالطبع، ليس المقصود الرؤية البصرية، بل أن يرى «بأعين العقل») ولكن ما الذي يراه؟ ما يدركه هو بنية كلية جديدة من حيث تقع جميع عناصر المعرفة القديمة في أماكنها الصحيحة، المرتبطة بشكلٍ طبيعي، بينما تظهر العديد من العلاقات الجديدة وغير المتوقعة فجأة. لاحقًا قد يترجمه إلى كلماتٍ، وصيغٍ، ومخططاتٍ للحفاظ على هذا الفهم، ولإيصاله إلى أشخاص آخرين، ولتطبيقه، أو لاختبار صلاحيته، ثم يظهر هيكلٌ جديدٌ في العقل.

عندما تنشأ الحاجة إلى تطوير نظريات جديدة، فإن الخطوة الجديدة أساسًا هي بشكلٍ عام فعلٌ أو سلسلة من أفعال الفهم. قبل هذا الفهم، كان العلماء يواجهون مجموعة من المشاكل، التي تولدت عنها النظريات القديمة، عند تطبيقها في مجالاتٍ جديدة. تؤدي هذه العملية في النهاية إلى إدراك التناقضات والالتباسات والغموض في النظريات القديمة، عند تطبيقها في المشكلات الجديدة. ثم إذا كان العالم مستعدًّا لترك المفاهيم القديمة جانبًا، فقد يصبح عقله حسَّاسًا للعلاقات الجديدة من حيث أي من الحقائق القديمة والجديدة التي يمكن رؤيتها. من هذه الحساسية يطور فهمًا جديدًا، أي التعبير عن الحقائق القديمة من حيث هيكل جديد، مع وجود آثار أخرى تتجاوز وجهات النظر القديمة.

بالطبع، يجب ألا نفترض أن كل أعمال الفهم هذه تؤدي على الفور إلى تصحيح النظريات. بعيدًا عن ذلك، وُجد أن العديد منها غير قادرة

على حل المشكلات الأساسية قيد الدراسة. ومن ثم يجب اختبار كل فهم من هذا القبيل لمعرفة ما هو مجال الصلاحية في الواقع. للقيام بذلك، من الضروري منطقيًّا العمل على الآثار المترتبة على الهيكل الجديد للأفكار التي ظهرت في العقل. ومع ذلك، وبقدر أهمية هذه الخطوات الأخيرة، فإنها تعتمد جميعها على أفعال الفهم الإبداعية الأساسية، التي من دونها سيتوقف العلم في النهاية عن التطور أو يتوقف عند الركود في مجالٍ محدودٍ لا يتجاوز أبدًا دائرة محدودة من الأفكار.

يبدو أنه لا يوجد حدٌّ لإمكانية العقل البشري لتطوير هياكل جديدة بالطريقة الموضحة أعلاه. وهذا الاحتمال هو الذي يبدو أنه وراء قدرتنا على طرح نظرياتٍ ومفاهيم جديدة، والتي تؤدي إلى معرفة تتجاوز الحقائق التي يمكن الوصول إليها في وقت تطوير النظريات لأول مرة. يجب أن نتذكر أن هذا الاحتمال موجودٌ في الإدراك الفوري بقدر ما هو موجود في البحث العلمي، لأن ما يمكن إنشاؤه في «العرض الداخلي» في كثيرٍ من الأحيان يؤدي، كما رأينا سابقًا، إلى العديد من الاستدلالات التنبؤية الصحيحة للتصورات المستقبلية. من الواضح أن مثل هذه القدرة لا يمكن أن تكون راجعة فقط إلى نوعٍ من الآلية التي تطرح «فرضيات» بشكلٍ عشوائي حتى تتأكد إحداها. بدلًا من ذلك، لأسبابٍ غير معروفة حتى الآن، يمكن للعقل البشري في عملية الإدراك العامة الخاصة به، سواء على المستوى المباشر أو على أعلى مستوى مشارك في الفهم، أن يخلق هياكل لها فرصة جيدة بشكلٍ ملحوظٍ في أن تكون صحيحة في المجالات الجارية. أبعد مما تقوم عليه الأدلة. على

أساس هذا الاحتمال، يمكن لعملية «التجربة والخطأ» بكفاءة التخلص من تلك الهياكل غير المناسبة. في الوقت نفسه، يمكن أن تساعد في توفير المواد، التي يؤدي نقدها إلى فعلٍ جديدٍ من الفهم أو الإدراك، حيث توضع هياكل أحدث، من المرجح عمومًا أن يكون لها مجالٌ أوسع من الصحة والتوافق مع الحقائق بشكلٍ أفضل من أي وقتٍ مضى.

باختصار، النقطة الأساسية هي أنه من خلال الإدراك، فإننا دائمًا في عملية اتصالٍ بالعالم، بطريقة يمكننا من خلالها أن نكون على دراية بالهيكل العام للجزء الذي كنَّا على اتصالٍ به. يمكن بعد ذلك اعتبار العلم وسيلة لإنشاء أنواعٍ جديدة من الاتصالات مع العالم، في مجالاتٍ جديدة، في مستوياتٍ جديدة، بمساعدة أدواتٍ مختلفة، وعلى مستوى عالٍ جدًّا لتلك العملية التي يتم من خلالها تقديم ما كان ثابتًا من حيث الهيكل في «العرض الداخلي» للإدراك الفوري. لم يعُد من المحيِّر إذن أن العلم لا يؤدي إلى معرفة الحقيقة المطلقة. لأن المعرفة التي يوفِّرها العلم (مثل كل المعارف الأخرى) بشكلٍ أساسي تعبيرٌ عن الهيكل الذي كشف عنه في عمليتنا للتواصل من لحظة إلى أخرى مع العالم الخارجي الذي يتجاوز مجمله قدرتنا على فهم أي مجموعة معينة من التصورات والأفكار والمفاهيم، إلخ. ومع ذلك، يمكننا الحصول على فهمٍ جيدٍ إلى حدٍّ ما لما كنَّا على اتصالٍ به حتى الآن، وهو أمرٌ صالحٌ أيضًا في بعض المجالات، سواء كانت كبيرة أو صغيرة، بما يتجاوز ما هو بُني عليه هذا الاتصال من خلال البقاء في حالة تأهب للتناقضات والحساسية للعلاقات الجديدة، وبالتالي السماح بنمو فهمٍ جديدٍ،

يمكنه مواكبة اتصالنا بالعالم، وبطريقة ما يمكننا توقع ما سيأتي لاحقًا.

تحدث هذه العملية في العلم على مستوى عالٍ جدًّا من التجريد، على نطاقٍ زمني يشمل سنواتٍ. في الإدراك الفوري يحدث على مستوى أدنى من التجريد، وهو سريعٌ جدًّا. في العلم، تعتمد العملية بشدة على العمل الجماعي، الذي يشمل مساهمات العديد من الناس، وفي الإدراك الفوري يكون الأمر فرديًّا إلى حدٍّ كبيرٍ. ولكن في الأساس يمكن اعتبار كليهما على أنهما يحتويان حالات عملية واحدة شاملة، من نوعٍ معممٍ من الإدراك، حيث لا توجد معرفة مطلقة يمكن مواجهتها.

* * *

الفهرس

تصدير 5

مقدمة 9

I. تمهيد 17

II. مفاهيم النسبية قبل أينشتاين 21

III. مشكلة نسبية قوانين الديناميكا الكهربائية 29

IV. تجربة ميكلسون ومورلي 34

V. جهود حفظ فرضية الأثير 38

VI. نظرية لورنتز للإلكترون 45

VII. مزيد من التطوير لنظرية لورنتز 49

VIII. مشكلة القياس التزامنية Measuring Simultaneity
في نظرية لورنتز 56

IX. تحويلات لورنتز 62

X. الغموض المتأصل في معاني قياسات الزمكان
وفقًا لنظرية لورنتز 67

XI. تحليل مفاهيم المكان والزمن من حيث الأطر المرجعية 69

XII. مفاهيم «البدهية» للمكان والزمن 77
XIII. تقديم لمفاهيم أينشتاين عن المكان والزمن 82
XIV. تحويلات لورنتز من وجهة نظر أينشتاين 95
XV. إضافة السرعات 102
XVI. مبادئ النسبية 107
XVII. بعض تطبيقات النسبية 113
XVIII. قوة الدفع Momentum والكتلة من خلال النسبية 122
XIX. معادلة الكتلة والطاقة 137
XX. قانون التحول النسبي للطاقة والقوة الدافعة. 144
XXI. الجسيمات المشحونة في المجال الكهرومغناطيسي 149
XXII. الإثبات التجريبي لنظرية النسبية 156
XXIII. المزيد عن معادلة الكتلة والطاقة 161
XXIV. نحو نظرية جديدة للجسيمات الأولية 174
XXV. إثبات خطأ النظريات 178
XXVI. مخطط مينكوفسكي Minkowski Diagram
وحساب K للتفاضل والتكامل K Calculus 190
XXVII. هندسة الحدث واستمرارية الزمكان. 210
XXVIII. مسألة السببية والسرعة القصوى لانتشار
الإشارات في نظرية النسبية 223
XXIX. الزمن الصحيح Proper Time 230

XXX. مفارقة التوأمين 235
XXXI. أهمية مخطط مينكوفسكي في إعادة بناء الماضي 246
ملحق – الفيزياء والإدراك 262
A-1 : مقدمة 262
A-2: تطور مفاهيمنا الشائعة عند الرضع وصغار الأطفال 265
A-3: دور الثابت في الإدراك 280
A-4: التشابه بين عملية الإدراك والعملية التي يبحث
بها العلم العالم 311
A-5: دور الإدراك في البحث العلمي 325

* * *