هشام غصيب

المكتبة التقدمية

الأعمال الفكرية

2

الأهلي

WARD BOOKS

هشام غصيب

الأعمال الفكرية 2

هشام غصيب

الأعمال الفكرية 2

• الأعمال الفكرية
• هشام غصيب
• الطبعة الأولى 2007

نشر بدعم من البنك الأهلي الأردني Jordan Ahli Bank الأهلي | ahli

حقوق النشر والتوزيع محفوظة:

دار وَرْد الأردنية للنشر والتوزيع
P.O. Box 927651 Amman 11190 Jordan
Tel. +962 6 5606 263 - Fax + 962 6 5606 382
E-mail : wardbooksjo@yahoo.com

• الغلاف: غسان أبو لبن
• الإخراج الفني: تغريد التويمي
• رقم الايداع لدى دائرة المكتبات الوطنية 2059/ 7 / 2007
ISBN 978-9957-455-45-3 (ردمك)

جميع الحقوق محفوظة للناشر. لا يُسمَح بإعادة إصدار هذا الكتاب، أو أي جزء منه، أو تخزينه في نطاق استعادة المعلومات، أو نقله بأيّ شكل من الأشكال، دون إذن خطي مسبَق من الناشر.
All rights 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 written permission of the publisher.

المحتويات

١ - دراسات في تاريخية العلم ٧
أهداف الكتاب ٩
مقومات الإبداع العلمي ١١
تاريخية الفكر العلمي ٢٥
المغزى التاريخي للثورة العلمية الكبرى ٣٩
الكون المتسع: مقدمة في الكوزمولوجي ٨١
المراجع الرئيسية ٩٥

٢ - هل نشأ الكون من العدم؟ ١٠١
(١) درب العلم ١٠٣
(٢) نظرية النسبية العامة ١٠٧
(٣) مبادئ النسبية العامة ١٠٩
(٤) مبدأ النسبية الخاصة ١١٢
(٥) قوى نيوتن الوهمية ١١٥
(٦) وحدة الكون وفق ماخ ١١٧
(٧) ماخ بلغة آينشتاين ١٢٠
(٨) لغز الكتلة ١٢٣
(٩) كيف تلغي الجاذبية ١٢٦
(١٠) هل يمكن أن يتوقف الزمن؟ ١٢٩
(١١) انحناء الضوء بفعل الجاذبية ١٣٢
(١٢) الجاذبية وانحناء المكان ١٣٥
(١٣) هندسة إقليدس ١٣٨
(١٤) الهندسة اللاإقليدية ١٤١
(١٥) هندسة غاوس ١٤٤
(١٦) هندسة ريمان ١٤٧
(١٧) كون آينشتاين ١٥٠
(١٨) المكان بوصفه مادة ١٥٢
(١٩) الطريق إلى الزمكان ١٥٦
(٢٠) من نسبية غاليليو إلى نسبية آينشتاين ١٥٩

(٢١) جولة في الزمكان ١٦٢
(٢٢) حياة المادة في الزمكان ١٦٥
(٢٣) الزمكان المنحني ١٦٨
(٢٤) قانون نيوتن الأول وفق آينشتاين ١٧١
(٢٥) الجاذبية: من أرسطو إلى نيوتن ١٧٤
(٢٦) جاذبية نيوتن ١٧٧
(٢٧) لغز عطارد بين نيوتن وآينشتاين ١٨٠
(٢٨) كون نيوتن ١٨٣
(٢٩) التصور المجالي لجاذبية نيوتن ١٨٦
(٣٠) قانون المجال الجاذبي النيوتني ١٨٩
(٣١) نقد آينشتاين لجاذبية نيوتن ١٩٢
(٣٢) انحناء الزمان ١٩٥
(٣٣) ١٩١٥ ١٩٨
(٣٤) كيف ركب آينشتاين قانون المجال الجاذبي ٢٠١
(٣٥) قانون آينشتاين العام للمجال الجاذبي ٢٠٤
(٣٦) الزمكان من أرسطو إلى آينشتاين ٢٠٧
(٣٧) غرائب المجال الجاذبي ٢١٠
(٣٨) حقول تطبيق النسبية العامة ٢١٣
(٣٩) أثر الجاذبية على الفوتونات ٢١٦
(٤٠) مشكلة حركة حضيض عطارد ٢١٩
(٤١) حركات الكواكب وفق النسبية العامة ٢٢٢
(٤٢) تحدب المكان بفعل المادة ٢٢٥
(٤٣) الثقوب السوداء وفق نظرية نيوتن ٢٢٨
(٤٤) الثقوب السوداء في النسبية العامة ٢٣١
(٤٥) إشكالية اللانهاية في النظرية الفيزيائية ٢٣٤
(٤٦) آينشتاين والثقوب السوداء ٢٣٧
(٤٧) الثقوب السوداء: من أوبنهايمر إلى هوكنغ ٢٤٠
المراجع الرئيسية ٢٤٣

٣- هل يمكن أن ينشأ الكون من العدم؟ [علم الكون: آليات تطوره] ٢٦٥

٤- رواية الاتصال لكارل سيغان ٢٨٥

٥- لغز الثابت الكوني ٢٩٥

دراسات في تاريخية العلم

(نشر عام ١٩٩٣)

أهداف الكتاب

وضعت هذه الدراسة في صورة محاضرات توخياً لتحقيق الأهداف الآتية:

١- التعريف بالعلم بوصفه ظاهرة حضارية تاريخية، أي بوصفه إنتاجاً اجتماعياً ثقافياً يتطور تاريخياً.

٢- التعريف بتاريخية العلم من حيث إرهاصاته ونشأته وتطوره وانعكاساتها على طبيعة المعرفة والحقيقة العلمية.

٣- التعريف بالشروط الاجتماعية التاريخية لنشوء العلم وتطوره.

٤- التعريف بالعلم بوصفه ثورة فكرية ثقافية، أي بالأثر الثوري الذي تركه ويتركه العلم على وعي الأفراد والجماعات البشرية وإمكانات نمو قوى الإنتاج.

٥- إلقاء الضوء على اللحظات الحاسمة في تاريخ علوم الطبيعة، وإعطاء فكرة عامة عن نسق تطور هذه العلوم وخط تطورها الرئيسي.

٦- تعميق الوعي بأهمية العلم في حياتنا، وتعميق إدراك البعد التاريخي للعقل البشري وخصوصية الحضارة الحديثة، وزعزعة التصورات القبْلية التي تعوق انخراطنا في العصر الحديث.

(١)

مقومات الإبداع العلمي

معنى الإبداع العلمي

ماذا نعني بالإبداع؟ إننا نعني إنتاج (أو اكتشاف) الجديد، أي تخطي المألوف السائد. لكن، هل كل جديد يعد إبداعاً؟ ينبغي أن نفرق بين الإبداع والبدع.

هناك شرطان لكون الجديد إبداعاً علمياً: (أ) أن يكون الجديد معرفة جديدة أو أن يصب في معرفة جديدة؛ (ب) ألاّ يكتفي بتخطي المألوف، وإنما أن يغير المألوف في اتجاه توسيعه وإنضاج عناصره وحل مشكلاته وتناقضاته وتغيير بناه.

مقومات العقلية الإبداعية (الشروط الإدراكية العامة للمبدع)

(أ) الارتكاز إلى سلطة العقل العلمي في بعديه المنطقي والتجريبي في الحكم على المألوف، لا إلى سلطة السلف وبديهية المألوف (نبذ التعصب والالتزام بالتعددية).

(ب) توافر حد أدنى من روح التحدي التي تسعى دوماً إلى اختبار المألوف والتساؤل بصدده ونقده نقداً موضوعياً يأبى الانصياع إلى الأحكام غير المدروسة وغير المختبرة.

(ج) إدراك مادية موضوع الإبداع إدراكاً منهجياً، أي إدراك: (i) استقلالية الموضوع عن أي ذات أو منطق بحت؛ (ii) أن هناك قوانين موضوعية تحكم أحداثه وتطوره؛ (iii) أن ظاهره ليس مماثلاً لباطنه.

(د) الإلمام العميق بما تم إنتاجه من معرفة بصدد الموضوع، أي الإلمام العميق بالموضوع من حيث واقعه وتراثه وجذور هذا التراث، والانخراط في العشيرة العلمية السائدة.

(هـ) الالتزام الوجداني العميق بقضايا المعرفة.

(و) استملاك أدوات استنطاق الموضوع وأدوات إنتاج المعرفة به، النظرية والعملية.

ولنر كيف تتبدى هذه الشروط في عملاقين من عمالقة العلم الحديث: كهلر وبلانك.

يوهانس كبلر (١٥٧١-١٦٣٠م)

- مكتشف القوانين الثلاثة التي تحمل اسمه، والتي تصف حركات الكواكب حول الشمس وعلاقاتها ببعضها [(١) أن مدارات الكواكب حول الشمس إهليلجية، (٢) أن الكوكب يمسح مساحات متساوية في أزمان متساوية، (٣) أن مربع الزمن الدوري للكوكب يتناسب طردياً مع مكعب متوسط بعده عن الشمس. كما كان له أثر كبير في نشوء علم الضوء الحديث.

-كان ملماً بأحدث الرصدات الفلكية في عصره، وكان على اتصال مع اثنين من أشهر الراصدين آنذاك: ميستلن وتيكور براهه.

- كان ملماً إلماماً عميقاً بالنظريات الفلكية السائدة في عصره، وبخاصة: نظرية بطلميوس، ونظرية كوبرنيكوس، ونظرية تيكو.

- كان ملتزماً التزاماً يكاد أن يكون عاطفياً وجمالياً بنظرية كوبرنيكوس.

- كان على اتصال وثيق مع جهابذة عصره من الفلكيين، وفي مقدمتهم: غاليليو وتيكو وميستلن.

- كان ممتلكاً لأدوات البحث الرئيسية السائدة في عصره، وفي مقدمتها: الأساليب الرياضية المتنوعة والنماذج الميتافيزيقية الإغريقية المتنوعة. إذ كان كبير رياضيي الإمبراطورية الرومانية المقدسة Imperial Mathematicus.

- لم يكن سجين الآيديولوجيات الدينية السائدة، بمعنى أن تفكيره لم يكن محكوماً للمعتقدات المؤسسية (الرسمية)، وإنما كان يتمتع باستقلالية ذاتية كبيرة وبتوتر شديد كان يدفعه باستمرار إلى البحث والاختبار. فمع أنّه كان محسوباً على الكنيسة البروتستانتية الألمانية، إلا أنّه كان على علاقة جيدة مع الكنيسة الكاثوليكية، وكان يعارض كنيسته في كثير من الآراء والتفسيرات.

- تصوره للذات الإلهية مثلاً كان يختلف عن التصورات الدينية الشائعة، وكان أقرب إلى التصورات الأفلاطونية والفيثاغورية (الإغريقية). لقد تصور الله على أنّه رياضي متفوق خلق الكون وفق أنموذج رياضي وعلى أساس الأنساق الهندسية.

- لكنه لم يتعصب تعصباً مطلقاً لأفكار مسبقة، مهما كانت تستهويه، فقد

كان ملتزماً بحرية الفكر والتعددية الفكرية. فإلى جانب نزعاته الأفلاطونية والفيثاغورية القوية، كان يملك نزعة مادية إمبريقية قوية شكلت في تزاوجها مع النزعة الفيثاغورية العصب الرئيسي في إبداعه العلمي والدافع الرئيسي له.

- لولا النزعة المادية الإمبريقية لاكتفى بما أبدعه من نماذج أفلاطونية جميلة، ولولا نزعته الفيثاغورية لاكتفى بالرصدات التقريبية ومطابقة هذه على النماذج الفلكية السائدة في عصره.

- تزاوج النزعتين دفعه إلى البحث عن أنساق رياضية عامة في أدق الرصدات المتوافرة في عصره، واكتشاف قوانينه الثلاثة الشهيرة.

- هذه النزعات والالتزامات دفعته أيضاً إلى التمرد على أكثر التحيزات الميتافيزيقية رسوخاً، وهو التحيز المتمثل في اعتبار الحركة الدائرية المنتظمة ضرورة فلسفية للأجرام السماوية. لقد نبذ هذا التحيز وقاده ذلك إلى اكتشاف القوانين السليمة لحركات الأجرام السماوية، وإلى إحداث الثورة الفلكية الكبرى.

- عناصر الإبداع العلمي كلها تتجلى بوضوح في عمل كبلر.

ماكس بلانك (١٨٥٨-١٩٤٧م)

- صاحب نظرية الكنتم Quantum Theory، التي أحدثت شرخاً في البناء النظري الكلاسيكي المقام على قاعدة ميكانيكا نيوتن؛ شرخاً أدّى إلى ثورة عارمة في الفيزياء.

- عندما وضع بلانك نظريته الجديدة الثورية كان يعد قطباً من أقطاب العلم الكلاسيكي في عصره في العالم كله.

- لم يكن بلانك غاوي ثورات ولم يكن متمرداً في طبعه، وإنما كان ذا مزاج محافظ.

- كان ملماً إلماماً عميقاً بالنظرية الكلاسيكية، وبفضل ذلك كان يكن احتراماً كبيراً لهذه النظرية. إذ كان مدركاً للنجاحات الكبرى التي أحرزتها هذه النظرية وللإمكانات الكبيرة التي كانت تحتويها في باطنها ولتناسقها المنطقي البديع، برغم

بعض الثغرات والشروخ فيها هنا وهناك.

- كانت النظرية الكلاسيكية تتألف وقتها من ثلاثة مكونات رئيسية هي: الميكانيكا، والثيرموديناميكا، والكهرمغناطيسية، وكانت المحاولات جارية للتوفيق بينها توفيقاً كاملاً وسد بعض الثغرات التي ظهرت في محاولة تطبيقها على بعضها.

- حاول بلانك أن يطور الثرموديناميكا، بما يؤهله لتطبيقها على الكهرمغناطيسية، وبصورة خاصة فقد عني بثيرموديناميكا الأطياف الضوئية المنبعثة من المواد الصلبة.

- قادت المحاولات المتكررة آنذاك لتطبيق الثرموديناميكا الكلاسيكية على الكهرمغناطيسية إلى مشكلات نظرية عويصة عرفت بالكارثة فوق البنفسجية.

- كان بلانك متمكناً بصورة استثنائية من أساليب النظرية الكلاسيكية وأفانينها الرياضية والفكرية.

- قاده إلمامه العميق بهذه النظرية إلى إدراك أن حل الكارثة فوق البنفسجية لا يمكن أن يتم ضمن إطار النظرية الكلاسيكية، ولولا هذا الإلمام والتزامه بهذه النظرية ما أدرك ذلك.

- لكنه كان ملتزماً أيضاً بالروح العلمي النقدي الذي يرفض سلطة السلف وأي شكل من أشكال التقديس، والذي يسعى باستمرار إلى اختبار الأفكار.

- قاده ذلك كله إلى وضع الفرضية الكنتمية التي قالت بأن الضوء يتم امتصاصه وبثه من الذرات على صورة كنتمات Quanta أو حزم غير متصلة، وهي فكرة ثورية تناقض النظرية الكلاسيكية في الصميم. وأدت هذه الفكرة في الربع الأول من القرن العشرين إلى تقويض أركان الصرح الكلاسيكي برمته.

الأساس الاجتماعي التاريخي للإبداع العلمي

إنّ مثال كبلر بالذات يبرز بشكل واضح بعض الشروط الاجتماعية التاريخية الأساسية للإبداع العلمي.

صحيح أن الإبداع العلمي هو فردي في مظهره، إلا أنّه يستلزم توافر شروط اجتماعية حضارية معينة، كما إنّه يعبر عن قوى ورؤى اجتماعية معينة، ويتم عبر شبكة كثيفة من العلاقات والمؤسسات الاجتماعية التي لها تجلياتها وتعبيراتها العديدة، ومنها الإبداع العلمي.

في حال مثال كهلر، فإنّ هذه الشروط هي:

(أ) وجود جماعة علمية فعالة (أو أنماط معينة من المثقفين) كان يسودها حد أدنى من التجانس الثقافي واللغة المشتركة والتراث المشترك والهواجس والرؤى المشتركة، وتمتد في عملها عبر مجموعة من المؤسسات كالجامعات والمراصد المدعومة من الدولة ومن طبقات رئيسية في المجتمع (كالصناع والتجار).

(ب) كان تحت تصرف كهلر تراث عالمي من الفكر والمعرفة زاخر بالأدوات الفكرية والرياضية والرصدية المتطورة التي ساهمت شعوب وحضارات عديدة في صنعها، وفي مقدمتها الإغريق والعرب. وقد استوعبت أوروبا هذا التراث بفضل انفتاحها المنظم على العالم وسيطرتها المتعاظمة على خطوط التجارة العالمية، وهذا بدوره عبر عن تعاظم قوة البرجوازية الأوروبية وتزايد حاجاتها. وقد مكنت استقلالية هذه الطبقات الصاعدة، بالإضافة إلى الثورة التجارية في أوروبا، مكنت المجتمعات الأوروبية من بناء الأطر والمؤسسات القادرة على استيعاب فيض المعرفة المتدفق إليها وعلى هضمه وإعادة انتاجه.

(ج) كان كهلر تعبيراً عن روح الحرية والتحدي الوثاب والرغبة الجامحة في الاستكشاف التي اتسمت بها الطبقات الصاعدة في أوروبا آنذاك، تلك الروح الدافقة التي تبدت علمياً فيما أبداه كوبر نيكوس من مثابرة عنيدة في بناء أنموذج رياضي مفصل للكون معارض في جوهره للميكانيكا الأرسطية السائدة في عصره، وفي إقدام برونو على بناء تصور لا نهائي للكون على أساس المادية الذرية، وفي إقدام غاليليو على استعمال التلسكوب في سبر أغوار الكون لأول مرة في التاريخ أداة لهدم التصور الأرسطي البطلمي للكون إلى غير رجعة، وفي النقد الشامل الذي وجهه فرانسيس بيكون إلى كل وجه من وجوه الفكر القديم، وفي مقدمته المنطق الأرسطي،

وفي شروع ديكارت في تفسير كل مظهر من مظاهر العالم المادي بدلالة حركات الدقائق الذرية وتصادماتها، وفي شروع هوبز في تفسير كل مظهر من مظاهر العالم الإنساني بدلالة هذه الحركات.

الخلاصة (١): أنّ الثورة التجارية والصعود السريع والمطرد للبرجوازية الأوروبية الطامحة للسيطرة عالمياً شكلا الأرضية الضرورية لإبداع كبلر العلمي، وإبداع غيره من علماء عصره.

الخلاصة (٢): أنّ مسألة الإبداع العلمي ليست مسألة عبقريات فردية تقع خارج إطار التفسير العقلاني، ولا هي مسألة وحي يهبط على المبدعين من عبقر أو من عالم مثالي يقع خارج إطاري المكان والزمان، وإنما هي مسألة سيرورة مادية اجتماعية تنبع من شروط مادية حضارية تاريخية.

محددات الإبداع العلمي

ما السر في ولادة العلم الحديث في مطلع الحقبة الحديثة؟ لماذا اتخذت الفلسفة الطبيعية الشكل الذي اتخذته في الحضارات القديمة؟ لماذا كانت الفلسفة الطبيعية تزدهر في بعض الفترات وتضمر في الأخرى؟ لماذا تختلف الفلسفة الطبيعية في الشكل والمضمون والوتيرة من حضارة إلى أخرى؟

في ضوء تحليلنا لكبلر ولغيره من منتجي العلم في الحضارات المختلفة، وفي ضوء اكتشافنا العلاقة التي تربط الإبداع العلمي مع طبيعة القوى الاجتماعية السائدة والصاعدة وحاجاتها وقدراتها، فإنه يمكن وضع المحددات الآتية لعملية الإبداع العلمي (المحددات التي تحدد وجود الإبداع العلمي وازدهاره وتطوره)، وهي محددات مترابطة عضوياً مع بعضها:

(١) نمط الإنتاج السائد، أي الكيفية التي يتم بها تنظيم العمل من أجل إنتاج الأساسيات المادية للحياة الاجتماعية وتبادلها وتصريف الفائض. أما البنى الأساسية التي يتشكل منها نمط الإنتاج فهي علاقات الإنتاج (بين

المنتجين ومنظمي الإنتاج والمعتاشين على إنتاج غيرهم)، أي علاقات الملكية من جهة، وقوى الإنتاج، أي الفاعليات المنتجة، من جهة أخرى.

(٢) طبيعة القوى الاجتماعية الرئيسية السائدة من حيث أنماط وعيها ومبدأ وجودها وآفاقها وطموحاتها وقدراتها وحاجاتها التاريخية.

(٣) علاقات القوة السائدة في المجتمع ودرجة نضج التشكيلة الاجتماعية المعنية.

(٤) التركيبة السياسية وبنية اتخاذ القرار فيها.

(٥) طبيعة الآيديولوجيات السائدة في المجتمع، والطرائق التي يتم بها توجيه الإعلام والتربية والثقافة في المجتمع.

(٦) وضع المجتمع المعني في النظام العالمي لتقسيم العمل، أي علاقة هذا المجتمع مع محيطه الاجتماعي.

الإبداع العلمي في الحضارتين الإغريقية والرومانية

مميزات الحضارة الإغريقية

- شهدت هذه الحضارة الثورتين الفلسفية والهندسية، أي مولد الفلسفة والهندسة الرياضية، على يدي طاليس.
- شهدت أول نظام ديمقراطي مديني في التاريخ.
- لكنها عجزت عن: (أ) تحقيق الثورة العلمية، أي اتباع المنهجية العلمية التجريبية في دراسة الطبيعة؛ (ب) عن بناء قاعدة تكنولوجية متطورة ونامية.
- يكمن سر ذلك في نمط الإنتاج المسيطر في الحضارة الإغريقية، وهو نمط الإنتاج العبودي.
- يتميز هذا النمط في أن العبد فيه هو أداة الإنتاج الرئيسية.
- نتائج هذا الوضع: (أ) تدني الإنتاجية لانعدام الحقوق والمسؤولية، (ب)

غياب الحافز لتطوير أدوات الإنتاج، (ج) كون الغزو والعدوان هما الآلية الأساسية لإنتاج الأداة الرئيسية للإنتاج، ومن ثم ازدهار التكنولوجيا العسكرية على حساب التكنولوجيا الإنتاجية، (د) تدني التكنولوجيا بصورة عامة، (هـ) الإعلاء من قيمة النشاطات الذهنية النظرية على حساب العمل اليدوي والتقاني، بل تجريد هذا الأخير من كل قيمة اجتماعية (وهذا هو أحد الأسباب الرئيسية لازدهار الفلسفة من دون العلم)، (و) الطابع الترفي لتصريف الفائض الاقتصادي.

- هذا يفسر غياب المؤسسات العلمية الفعالة، لكنه لا يفسر تميز أيونيا وأثينا عن غيرها من المناطق الإغريقية والرومانية في مجالي الفلسفة والرياضيات.

- الذي يفسر ذلك هو تفوق أيونيا وأثينا على صعيدي التجارة العالمية والسياسة. فقد كانتا مركزين عالميين رئيسيين للتجارة بحكم موقعهما الجغرافي وتطورهما التاريخي، الأمر الذي أدى إلى نشوء طبقات تجارية فعالة فيهما وإلى تكون فائض اقتصادي كبير نسبياً. كذلك، فقد ساد فيهما (في أثينا بخاصة) جو ديموقراطي أصيل عكس توازناً معيناً بين الطبقات الحرة، الأمر الذي لم يتحقق في المدن الإغريقية الأخرى. فكان أن ساد جو من الحرية الفكرية والتنافس الفكري شكل أساساً للثورة الفلسفية الإغريقية.

- كانت هزيمة أثينا الديموقراطية على يدي إسبرطا الأوليغارشية إيذاناً بانحسار الإبداع الفلسفي في بلاد اليونان.

- في روما أدت السيطرة المحكمة لطبقة الملاك الكبار والفصل المطلق بين العمل والملكية إلى جمود الفكر في شتى أشكاله وتدهوره الفظيع.

- في الإسكندرية، أدى ارتكاز الطبقة الحاكمة الإغريقية إلى المجتمع المصري القديم العريق والغني بتكنولوجيته وزراعته المتطورة نسبياً إلى ازدهار جزئي للعلوم الرصدية.

الإبداع العلمي في الحضارة الأوروبية الحديثة

- النمط السائد في هذه الحضارة هو نمط الإنتاج الرأسمالي.

- شهد في مطلعه الثورة العلمية الكبرى، التي تم بموجبها مولد المنهجية العلمية في حقل الطبيعة، وتطور العلم بتطوره.

- أساس هذا النمط هو تجريد المنتج من وسائل الإنتاج كلها وتركيز هذه الوسائل في أيدي أقلية من البشر على صورة ملكية خاصة أو شبه خاصة. وتكون النواتج النهائية في هذا النمط هي السلع التي يتم إنتاجها وتبادلها من أجل تحقيق الأرباح وتراكم الرأسمال. من ثم فإن هذا النمط يفترض تمركز رؤوس الأموال في أيدي أقلية في المجتمع من جهة ووجود عمالة حرة (أي غير مملوكة سوى من صاحبها) من جهة أخرى.

- إنّ الطبيعة التنافسية لهذا النمط وسعيه إلى زيادة ربحية رأس المال يحتمان عليه أن يسعى إلى زيادة إنتاجية ساعة العمل بتطوير أساليب تنظيم العمل وأدوات الإنتاج. وبغير ذلك فإنّه ينهار ويندثر.

- بذلك، فإنّ التطور السريع والمستمر للتكنولوجيا هو شرط أساسي من شروط استمرار هذا النمط. لكن مثل هذا التطور يستلزم تطوراً بوتيرة أسرع في إنتاج المعرفة. ومن هنا جاءت ضرورة العلم لهذا النمط. ولهذا السبب تم مولد العلم على صورة تيار اجتماعي كاسح في مطلع الحقبة الرأسمالية من تاريخ البشرية، وشهدت هذه الحقبة أسرع وتيرة لتطوّر المعرفة في التاريخ.

- كذلك، يمتاز هذا النمط في أن الفائض الاقتصادي لا يبدّد ولا يهدر جله في الاستهلاك المباشر لأعضاء الطبقات المالكة، وإنما يسخر بفضل الطبيعة التنافسية المحمومة لهذا النمط في تجديد أدوات الإنتاج وشروطه وفي تنمية الإبداع ودفعه إلى الأمام.

- تنشأ التركيبتان السياسية والآيديولوجية بحيث تؤمن شروط مثل هذا النمو (مؤسسات البحث والتدريب) وتتحكم فيها وفيه.

- أخذ ينزع هذا النمط مؤخراً بفعل أزمته إلى نوع من الهدر المدمر للبيئة وإلى الإنتاج المتزايد لأدوات القتل والدمار.

الإبداع العلمي في الوطن العربي

- نمط الإنتاج السائد في الحضارة العربية الإسلامية هو الإقطاع الدولاني Statist Feudalism أو الآسيوي.

- أساس هذا النمط هو امتلاك طبقة تربطها عصبية معينة القوة العسكرية والآيديولوجية وتسخير هذه القوة في شفط الفائض الاقتصادي من المنتجين (الفلاحين بصورة أساسية) على قاعدة الدور الذي تؤديه هذه الطبقة في تنظيم الإنتاج الزراعي والحرفي وفي تأمين التجارة.

- مصادر الفائض: (١) الزراعة، (٢) التجارة، (٣) النهب المباشر عبر الغزو والعدوان.

- مراحل نمو هذا النمط: (١) مرحلة توحيد العرب حول الخلافة الإسلامية (الدولة الإسلامية)، (٢) مرحلة الفتوحات (ومن ذلك نبع توكيد الأمويين للعصبية العربية)، (٣) مرحلة الاستغلال المنظم.

- المرحلة الثالثة هي المرحلة التي شهدت تطور الفكر والمعرفة في الحضارة العربية الإسلامية. إذ إن تنظيم الزراعة والحرف والتجارة استلزم تطوير الممارسات العلمية ضمن إطار الآيديولوجيا السائدة.

- غذى هذا التطور نشوء برجوازيات "وطنية" هنا وهناك. ولكن هذه البرجوازيات لم تصل إلى المستوى الذي يمكنها من الاستقلال والهيمنة. لذلك أخفق المجتمع العربي في تحقيق الرأسمالية والثورة العلمية، وإن كان قاب قوسين أو أدنى منهما.

- ساهم العرب مساهمة أساسية في تطوير المنهج التجريبي لأن الحرفي لم يكن منبوذاً عندهم كما كان عليه الحال في الحضارة الإغريقية. لكن الالتحام الجدلي بين التنظير والتجريب لم يتحقق في الحضارة العربية الإسلامية إلا فيما ندر (بصورة خاصة، الحسن بن الهيثم). وبتعبير آخر، فمع أن العرب ابتكروا كثيراً من عناصر المنهج التجريبي وطرائقه، إلا أن التجربة ظلت في واد والنظرية في واد آخر في أغلب الأحيان، حيث إن هدف التجربة والرصد لم يكن معرفياً نظرياً، وإنما كان

عملياً نفعياً، كما إنّ ارتكاز النظرية إلى الميتافيزيقا المثالية حال دون علميتها، أي قابليتها لأن تترجم إلى إجراءات تجريبية.

- لذلك عجز التيار العلمي الذي تجسد في الحسن بن الهيثم عن كسر هيمنة الميتافيزيقا المثالية، وعجزت حضارتنا عن تحقيق الثورة العلمية الكبرى، رغم أنّها كانت قاب قوسين أو أدنى من تحقيقها في وقت من الأوقات. والجدير بالذكر أن التيار العلمي في الحضارة العربية الإسلامية لم يصفّ بالقوة، وإنما ضمر وذبل حتى تلاشى بفعل عوامل تاريخية عديدة ومتشابكة. ومن ضمن هذه العوامل تصفية التيارات الفلسفية التي كان من الممكن أن تشكل أرضية صالحة لنمو التيار العلمي، وفي مقدمتها الرشدية.

- أما نمط الإنتاج السائد في الوطن العربي اليوم، فهو الرأسمالية التابعة، التي تشكلت بفعل الغزو الاستعماري وتغلغل العلاقات الرأسمالية الوافدة من الخارج في المجتمع العربي. وهي لا تفهم إلا بعلاقتها مع النظام الرأسمالي العالمي، وبخاصة مع المراكز الرأسمالية. والمسألة الحاسمة هنا هي موقع المجتمع العربي في التقسيم العالمي للعمل.

- بعض خصائص الرأسمالية التابعة: (١) انعدام الترابط العضوي بين القطاعات الاقتصادية المختلفة، (٢) شروط إعادة إنتاج القطاعات الرئيسية تقع خارج المجتمع المعني، (٣) قوى الإنتاج تكون ملجومة في كثير من القطاعات، (٤) الآيديولوجيا ما قبل الرأسمالية تظل تؤدي دوراً مهماً في حياة المجتمعات التابعة، (٥) جزء كبير من الفائض الاقتصادي يحول إما للهدر على أيدي البرجوازيات التابعة وإما للنهب على أيدي المراكز الرأسمالية.

(٢)

تاريخية الفكر العلمي

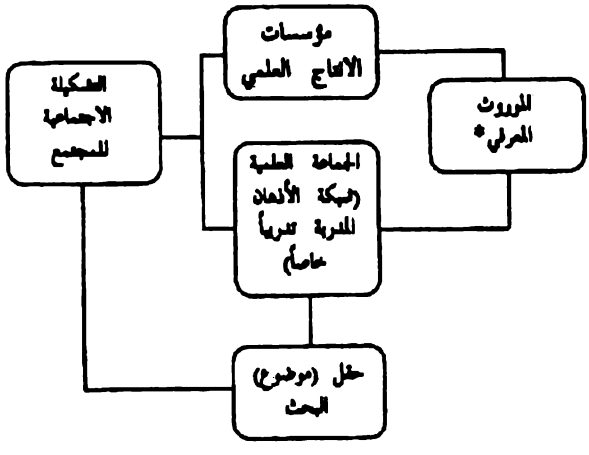
تحدثنا في الفصل الأول عن أسس تاريخية الفكر العلمي ومقوماتها. أما الآن فسنتحدث عن عناصر هذه التاريخية ومكوناتها.

الفكر العلمي

- العلم ليس مجموعة من الأجهزة والاختراعات العجيبة.
- إنه ليس مجرد مجموعة من الطلاسم المعطاة مسبقاً.
- إنه ليس مجموعة من المعلومات الثابتة والخالدة التي تتسرب من خارج المجتمع البشري إلى عقول النخبة.
- إنه ليس ممارسة ذهنية محضاً يمارسها نفر من الموهوبين والعباقرة في أبراجهم العاجية خارج إطار المؤسسات والتيارات الاجتماعية المتلاطمة.
- إنه فكر بشري، فكر ينتجه البشر.
- إنه إنتاج فكري اجتماعي له خصوصيته من حيث علاقته بكل من موضوعه والذات المنتجة له.
- إنّ إمكانيته مكتوبة في بنية الدماغ البشري.
- من ثم، فهو ليس حكراً على عرق بعينه. فجميع الأعراق ساهمت في بنائه، وإن كانت الثورة العلمية الكبرى قد اندلعت في أوروبا الغربية.
- إنّ العلم هو سيرورة اجتماعية معقدة تستلزم توافر جملة من الظروف المادية والاجتماعية المتطورة.
- إنّه ممارسة اجتماعية مؤسسية متطورة تمارسها فئات اجتماعية متخصصة ومدربة، وذلك ضمن أطر مؤسسية تضمن وجودها وتمولها قوى اجتماعية معينة تلبية لحاجات اجتماعية معينة.
- إنّ الذات المحركة للإنتاج العلمي ليست الفرد العبقري في حد ذاته وبمعزل عن حركة المجتمع، وإنما هي الجماعات العلمية المتشكلة تاريخياً والفاعلة ضمن أطر مؤسسية لتقسيم العمل، مرتبطة ارتباطاً وثيقاً بعملية الإنتاج المادي (القاعدة الاقتصادية).

أبعاد الممارسة العلمية ومحدداتها:

- العلم فكر، لكنه نمط مميز من الفكر ينتج بطريقة مميزة.
- كيف يتميز الفكر العلمي بوصفه ممارسة فكرية؟
- نقترح الأنموذج الآتي لإنتاج المعرفة العلمية:



شكل (١)

(*) الموروث المعرفي: هو شبكة مشروطة تاريخياً من البنى المفاهيمية النظرية المختبرة أو القابلة للاختبار العلمي، أي المدعمة تجريبياً ورصدياً، ومن الأساليب والطرائق النظرية والتجريبية. وهو جسد من الأفكار فيه قدر من اللاتجانس (أي إنه ليس مجرد صرح منطقي متجانس)، لكنه ليس كومة من الأفكار. إنه نظام مفتوح من الأفكار تنخره التوترات والتناقضات وتحيط فيه هالة من المشروعات والمعضلات والإمكانات تمتد إلى اللانهاية. وهو في جوهره عضوية متنامية.

وتتم عملية الإنتاج العلمي كالآتي:

(١) تقوم قوى أساسية في التشكيلة الاجتماعية بإنتاج مؤسسات الإنتاج العلمي والجماعة العلمية وبتجديدهما.

(٢) تؤدي الجماعة العلمية وظيفتين مترابطتين جدلياً ضمن إطار مؤسسات الإنتاج العلمي وباستعمال الموروث المعرفي: وظيفة عملية، حيث تستعمل الجماعة العلمية الموروث المعرفي لاستخراج المعلومات تحت ظروف معينة منتقاة أو منتجة في حقل البحث، ولاختبار مدى مطابقة جوانب من الموروث المعرفي للواقع، أي مدى صحته؛ وظيفة نظرية، حيث تستعمل الجماعة العلمية المعلومات المستخرجة والمعارف والخبرات المستقاة من التشكيلات الاجتماعية وجانباً من الموروث المعرفي لوضع النماذج والفرضيات والمفهومات الجديدة وحل تناقضات هذا الموروث ومشكلاته النظرية والعملية وحل مشكلات الحياة.

(٣) يترجم الموروث المعرفي المتنامي باستمرار إلى بنى وممارسات تساهم في تغيير التشكيلة الاجتماعية.

(٤) لا يتم اتصال التشكيلة الاجتماعية مع حقل البحث فقط عبر الجماعة العلمية، وإنما يتم بطرق أخرى أيضاً.

(٥) تتسم هذه الدورة الإنتاجية في أنها مستمرة ومتصلة ومتسعة.

- وعلى أساس هذا الأنموذج العام، تبرز الأسئلة الآتية، التي بتحديد الإجابات عنها تتحدد خصوصية الإنتاج العلمي:

(١) كيف تستخرج المادة الخام العلمية، أي المعلومات والانطباعات والبيانات الأولية؟

(٢) كيف تطوع الجماعة العلمية الموروث المعرفي بأدواته وطرائقه ومفهوماته ونماذجه من جهة والمادة الخام من جهة أخرى في استخلاص المعرفة العلمية، أي في معرفة القوانين وميكانيزمات إنتاج الظاهرات؟ أي، ما مقومات المنهجية العلمية؟ أي، كيف تسخر الجماعة العلمية طرائق الاستنتاج والتخمين والمخيال العلمي والاستقراء في إنتاج المعرفة العلمية؟

(٣) ما علاقة المنتج العلمي مع موضوعه؟

(٤) ما علاقة الممارسة العلمية مع التشكيلة الاجتماعية التي تنبت فيها؟

أي، كيف ترتبط هذه الممارسة مع غيرها من الممارسات الاجتماعية؟ ما العلاقة الجدلية التبادلية بين هذه وتلك؟

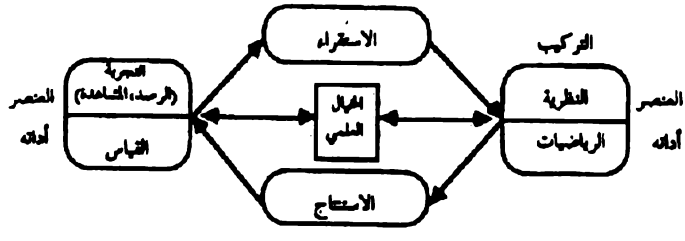
(٥) ما نسق تطور العلم؟ ما بنية الموروث العلمي؟ وما نسق تطورها؟ بصورة خاصة، ما العلاقة التي تربط العلم بالآيديولوجيات (الذات الاجتماعية، الوعي الاجتماعي)؟

السؤال الأول: الانطباعات والملاحظات المتراكمة والنابعة من الخبرة العامة للإنسان (من نشاطاته الحرفية والزراعية والملاحية ورحلاته وتعامله مع الكائنات الحية وما إلى ذلك) + رصداته وقياسته وتجاربه ومشاهداته العلمية. مع تقدم العلم، تتقدم الثانية على حساب الأولى.

السؤال الثاني: هذا السؤال يتعلق بعناصر المنهجية العلمية وبنيتها ومنطوياتها ونتائجها. فالمنهجية العلمية تفترض تصوراً معيناً لماهية الطبيعة وعلاقتها بالذات ولطبيعة علاقاتها وترابطاتها ولنوعية وجودها ولمبادئها العامة والضرورية (كمبدأ السببية). فهذه الشروط هي التي تجعل من التحام التجربة مع النظرية والدور الضروري الذي تؤديه التجربة في إنتاج المعرفة أساساً للمنهجية العلمية. فالأخيرة تفترض أن الطبيعة نظام مستقل قائم في ذاته، وأن هذا النظام يتشكل من نظم مادية متنوعة ومتمايزة عن بعضها لكن متفاعلة معاً عبر بعضها، وأن هناك علاقات وميكانيزمات داخلية في هذه الأنظمة تنتج الظواهر والتغيرات، وأن هناك قوانين ميلية مترابطة معاً ومتنوعة العمومية تحكم هذه العلاقات والميكانيزمات، ومن ثم الظواهر، وأن الفروق المقدارية تحكمها اختلافات نوعية. ومن ذلك تنبع سمات معينة للنظرية العلمية ينبغي أن تتحلى بها النظرية حتى تكون علمية، وفي مقدمة تلك أن تكون النظرية قابلة للاختبار، أي تكون قابلة لأن تترجم إلى تجارب ومشاهدات منتقاة محددة الشروط. بذلك فإنّ التجربة هي في جوهرها عملية تصنيع لنماذج مادية تناظر نماذج نظرية معينة. كذلك، فإن النظرية العلمية ينبغي

أن تتحلى ببنية استنتاجية تمكن الباحث من اشتقاق نماذج مطابقة لجوانب منتقاة من الواقع.

إنّ المنصرين الأساسيين للمنهجية العلمية هما النظرية والتجربة. لكن جوهر المنهجية العلمية لا يكمن فيهما في حد ذاتهما، وإنما في العلاقة الجدلية (الضرورية والتبادلية) بينهما والتي تدخل جوهرياً في تشكيلهما. ونعني بالعلاقة الجدلية هنا أن العنصر ينتفي بانتفاء العنصر الآخر ويجسده على صعيد آخر، وأنه باستمرار يتحول إلى الآخر، وأنه مماثل له ومناقض له في آن. فالتجربة العلمية لا تكون علمية إذا لم تكن بنيتها الاستنتاجية تسمح لها بأن تترجم إلى شبكة من الإجراءات العملية (التجريبية) الهادفة. ويمكن تمثيل بنية المنهجية العلمية في الشكل الآتي:



(شكل ٢)

من الملاحظ أن هناك ثلاثة أبعاد للعلاقة الجدلية بين النظرية والتجربة:

(١) **الاستقراء**: وهو فعل نظري موجه صوب مخرجات التجربة والمشاهدة، يسخر أدوات نظرية معينة لاستخراج مفهومات وتعميمات وأحكام من هذه المخرجات. لكن هذه لا تتحول إلى معرفة، أو بالأحرى لا تكتمل عملية تحولها إلى معرفة، إلا بعد أن تدغم استنتاجياً في صلب النظرية العلمية.

(٢) **الاستنتاج**: وهو العملية التي يتم بها إنتاج مدخلات التجربة والاختبار النظري (المنطقي) للأحكام العلمية.

(٣) **المخيال العلمي**: وهو الملكة التخيلية المنضبطة التي يمارسها منتجو الفكر العلمي في جميع ممارساتهم العلمية (من استقراء واستنتاج

وتركيب). وهي المسؤولة عن إنتاج مضمون هذه الممارسات والعمليات من نماذج وأوضاع مثالية. إنها ملكة التجريد التخيلي أو العياني.

(٤) **التركيب**: وهو العملية الرئيسية في الممارسة النظرية، والتي يتم بها التعامل مع مخرجات عمليتي الاستقراء والاستنتاج. وتتضمن دمج عناصر الموروث المعرفي مع بعضها ومع مخرجات عملية الاستقراء في نظم جديدة تحل تناقضات هذا الموروث ومشكلاته. ولعل التركيب الجدلي الذي نفذه نيوتن والآخر الذي نفذه آينشتاين هما أسطع مثالين على هذه العملية. ولعل المنطق الذي يحكم هذه العملية هو المنطق الجدلي، مثلما أن المنطق الذي يحكم عملية الاستنتاج هو المنطق الصوري (أو الرياضي).

السؤال الثالث: المنتج العلمي هو صورة ذهنية إجرائية لجانب من الواقع المادي؛ صورة غير مكتملة أبداً. ويمكن تشبيه هذه العملية بعملية تحميض فلمي مستمرة. هذا على الأقل هو جوهر النظرة الواقعية إلى العلم. لكن هنا رؤى أخرى تشكل في مجموعها أساس ما يسمى فلسفة العلم.

السؤال الرابع: وقد عالجنا ذلك ببعض التفصيل في الفصل الأول.

السؤال الخامس: تطور الفكر العلمي

- علام ينطوي تطور الفكر العلمي؟
- إنّ مفهوم التطور غير مفهوم النمو. فلئن كان النمو يفيد التراكم المقداري، فإن التطور يفيد أيضاً التغير النوعي الهيكلي.
- يعني ذلك أنه ليس ثمة مطلقات ولا هياكل وبنى أزلية في العلم.
- لكن العلم يسعى إلى الكشف عن الحقائق والتعبير عنها وعن آلياتها بالمفهومات والصور التي تعكسها.
- كيف نوفق بين هذين العنصرين؟

- نوفق بينهما بالقول: إن الحقائق العلمية العامة (القوانين والمبادىء والنظريات) أو الصور البنيوية العامة للموضوع هي حقائق أو صور نسبية، بمعنى مشروطة ومحدودة، أي ذات حدود تفقد صحتها بعدها.

- كان الظن السائد قبل مطلع القرن العشرين أن القواعد والمبادىء الأساسية للفيزياء النيوتنية أزلية وأبدية وأنها أساس للعالم المادي على كل المستويات. لكنه تبين في مطلع القرن العشرين أنها ليست كذلك، وأنها مطابقة لبعض مستويات الوجود المادي، وليس لجميع المستويات. وحاول بعض فلاسفة القرنين الثامن عشر والتاسع عشر أن يبنوا صروحاً فلسفية بأكملها على أساس الاعتقاد بأزلية مبادىء الفيزياء الكلاسيكية وأبديتها (الماديون الميكانيكيون وكانط).

- الحقيقة المطلقة هي مفهوم مثالي ولا ينطبق على الواقع. أما المفهوم المادي المطلوب فهو الحقيقة النسبية. فالحقيقة الفعلية نسبية بطبعها، بمعنى أن صحتها لا تتحدد إلا بتحديد حدودها. والخلاصة أنه ليس هناك أسس ميتافيزيقية للوجود المادي، وإنما هناك أسس مادية غير مطلقة.

السؤال السادس: نسق تطور الفكر العلمي

- إننا نفترض أن لتطور الفكر العلمي نسقاً خاصاً يميزه عن غيره من الممارسات الإنسانية.

- معنى ذلك أن للعلم استقلالية نسبية عن القاعدة الاجتماعية والممارسات الاجتماعية الأخرى. إن له خصوصية معينة.

- إنّ مضمون العلم لا يفهم بدلالة غيره أو بدلالة جوهر متنام يشكل العلم لحظة من لحظاته، وإنما يفهم بذاته.

- من ثم، فإنّ العلم لا يكتسب نسق تاريخيته من غيره وإنما من ذاته.

- ولا يجوز اختزال العلم إلى بنى خارجه، كالبنية الاقتصادية والبنية الآيديولوجية.

- إنه مشروط بالمجتمع وقواه وبناه من حيث الوجود، لا من حيث الماهية. فالموضوع هو الذي يحدد ماهيّته. ولولا ذلك لفقد العلم بعده الموضوعي وكونه معرفة مطابقة لموضوعه.
- إنّ تحرر منهجيته ومضمونه من قيود القاعدة الاجتماعية وقواها هو شرط جوهري من شروط ولادته.
- لكن، لما كان العلم فكراً، فإنه يرتبط بهذه القاعدة وقواها عن طريق الآيديولوجيات السائدة. من ثم، فإن تحرره من هذه يتم عن طريق تحرره من تلك.
- إنّ علاقة العلم مع الآيديولوجيا هي العلاقة الأساسية التي تحدد نسق تطور الفكر العلمي وخصوصيته.

السؤال السابع: علاقة العلم بالآيديولوجيا (العلم والفكر)

- تعريف الآيديولوجيا

(أ) من منظور الوعي الاجتماعي: تتكون التشكيلة الاجتماعية من مجموعة من الفئات الاجتماعية والعلاقات الموضوعية المتشعبة القائمة بينها. ولكل فئة اجتماعية وعيها الاجتماعي الذي يتشكل تاريخياً على قاعدة موقع الفئة المعنية ودورها في التشكيلة الاجتماعية. إنّ الآيديولوجيا هي شبكة المرتكزات المستترة والظاهرة للفكر والممارسة والشعور؛ إنها شبكة المعتقدات وآليات الفكر والممارسة والأحابيل التي ترتكز إليها الفئة الاجتماعية في التعامل مع نفسها ومحيطها.

(ب) من منظور الصراع الاجتماعي: الآيديولوجيا هي سيرورة اجتماعية ذهنية (فكرية ووجدانية وسلوكية) تنبع من مؤسسات وفئات معينة في المجتمع، وتتضمن إنتاج نظم الفكر والمخاطبة والسلوك الجماعية من أجل تشكيل الوعي والسلوك الاجتماعي (الذات الاجتماعية) وترسيخ معتقدات معينة في الوعي بما ينسجم ودور هذه المؤسسات والفئات في المجتمع وشروط بقاء ما تمثله من قوى اجتماعية

(المؤسسات والفئات الدينية والتربوية والإعلامية والثقافية بصورة خاصة).

- هدف العلم هو إنتاج المعرفة بصدد موضوع خارجه. من ثم فهو في النهاية مشروط بالموضوع، لا بالذات. أما هدف الآيديولوجيا فهو ترسيخ جملة من المعتقدات في أذهان الناس وتشكيل سلوكهم في أنساق بما يحقق أهدافاً اجتماعية معينة. إنها تنبع من مقتضيات اجتماعية، من مقتضيات الذات (بالمعنى الاجتماعي). ومن هنا تنبع إمكانية التناقض بين العلم والآيديولوجيا.

- إنّ ذلك ينعكس على أسلوبي العلم والآيديولوجيا. ففيما يلجأ العلم إلى التشكيك والاختبار المتواصلين لما ينتجه من أفكار حتى يصل إلى أهدافه، فإنّ الآيديولوجيا تلجأ إلى طمس عناصر الإشكال في أفكارها وإلى إخفائها وسترها وتغليفها بهالة من البديهية والقدسية وإقصائها خارج النقاش والتساؤل وإلى ابتكار الأساليب العقلية وغير العقلية لترسيخ التمسك فيها. أما العلم فهو يحاول دوماً إبراز افتراضاته ومحاولة نفيها ودحضها.

- تتسم الآيديولوجيات ما قبل الرأسمالية في أنها تتضمن في صميمها معتقدات آيديولوجية بصدد الطبيعة وتصورات لا تنسجم والمنهجية العلمية.

- ذلك أنّ الآيديولوجيات تنشأ على هذا الأساس، حيث إنّ الإنسان في فجر تاريخه يكون قريباً من الطبيعة وتتحكم الطبيعة في حياته تحكماً شبه كامل (الصياد، الراعي، الفلاح)، بل تكون الطبيعة بمثابة كائن حي يتفاعل معه وكأنه قوة اجتماعية مباشرة.

- وفي هذا الحال، تناط بصناع الآيديولوجيا وحماتها (الكهنة) وظائف "علمية" مثل الرصد والقياس والمراقبة ووضع التفسيرات الأسطورية والميتافيزيقية لأحداث الطبيعة.

- وعليه، فإن الوعي الاجتماعي الذي تؤطره هذه الآيديولوجيات يكون عاجزاً عن حمل العلم وإفراز المنهجية العلمية. فكما أسلفنا، فإن المنهجية العلمية

تفترض مادية الطبيعة وموضوعيتها، ومن ثم، فإن التنظير الرياضي الدقيق والتجريب في التحامهما الجدلي هما الوسيلة المطلوبة لإنتاج المعرفة بصدد الطبيعة.

- وهذا يعني أنّ نشوء العلم بمعناه الحديث في المجتمع يستلزم صعود نمط آخر من الوعي الاجتماعي مؤطر بنمط جديد من الآيديولوجيا لا يتضمن في بنيته الداخلية معتقدات معينة بصدد الطبيعة، وينطوي على قدر كبير من التعددية الفكرية يسمح بتنامي العلم والتحكم في أثره الفكري في آن، وقادر على حمل تصور مادي موضوعي للطبيعة في صميم بنيته.

- كما رأينا، فإنّ نشوء مثل هذا الوعي وصعوده وتطوره استلزم تطوراً تاريخياً طويلاً، وبخاصة في قوى الإنتاج، وتطوراً فلسفياً معيناً، بالإضافة إلى بناء كثير من العناصر الأساسية التي تدخل في تركيب العلم (طرائق المنطق، الرياضيات، أساليب القياس والرصد والتجريب، وضع النماذج الرياضية وشبه الفيزيائية، وضع النماذج الفلسفية، وتراكم معين للمعلومات والخبرات العملية).

- أما مادية الوعي الجديد، فهي تنشأ بفعل احتياجات الرأسمالية الصاعدة. فالرأسمالية تكون في حاجة إلى علم طبيعي وفي حاجة إلى التعامل مع الطبيعة من أجل استغلالها صناعياً بطريقة لا تنسجم مع التصورات القديمة.

- وتتكون عناصر المنهجية العلمية في بطن الوعي القديم، في بطن الآيديولوجيا.

- عندما ينشأ الوعي الجديد يعمل حاملوه على توحيد العناصر المنتجة في بطن الآيديولوجيا مع عناصر جديدة ضمن إطار التصور الجديد للطبيعة في المنهجية العلمية. بذلك تحرر المنهجية العلمية من إسار الآيديولوجيا والذات ويلد العلم، أي يبدأ بوصفه تياراً اجتماعياً كاسحاً ويتخثر في جملة من المؤسسات المستقلة نسبياً والمرتبطة بصورة أو بأخرى مع عملية الإنتاج.

- والثورة العلمية الكبرى هي عملية ولادة المنهجية العلمية في مجال

الطبيعيات من رحم الآيديولوجيا السائدة.

- بذلك نقسم تاريخ العلم الطبيعي إلى حقبتين رئيسيتين: حقبة ما قبل التاريخ، حيث تتكون كثير من عناصر المنهجية العلمية، وحقبة تاريخ العلم.

الثورات العلمية

- إنّ العلاقة بين العلم والآيديولوجيا تشكل مدخلاً إلى تاريخية العلم، لأن جانباً مهماً من هذه التاريخية يتحدد بهذه العلاقة. فالعلم ينشأ في حضن الآيديولوجيا حتى تنضج الظروف فيتمكن من الإفلات منها لكي يقيم علاقة خارجية معها.

- تختلف الحقبتان من حيث: (١) العلاقة مع القاعدة الاقتصادية، (٢) العلاقة مع الممارسات الآيديولوجية، (٣) نمط تطور المعرفة، (٤) علاقة الناتج الفكري مع موضوعه.

- يعني هذا التقسيم أن العلم ليس أزلياً، وإنما تمت ولادته في حقبة معينة بفعل تراكم الخبرة والمعلومات وتوافر شروط اجتماعية تاريخية معينة.

- في مرحلة ما قبل تاريخ العلم، تنضج كثير من عوامل العلم وعناصره في حضن الآيديولوجيا والمؤسسات الآيديولوجية، لكنها تكون مفككة ومتباعدة وناقصة. وهي لا تلتحم معاً في منهجية موحدة إلا في الثورة العلمية.

- إنّ الانتقال من مرحلة إلى أخرى ليس تدريجياً، وإنما هو ثوري. وهو ليس مجرد ثورة معرفية، وإنما في جوهره نوع من الثورة الاجتماعية. إنه صراع اجتماعي على الصعيد الفكري.

- أطلق على هذا النمط من الثورات الذي تتم بموجبه ولادة علم "سوبر ثورة" لتمييزه عن الثورات العلمية التي تحدث في مرحلة تاريخ العلم، والتي أسميها الثورات الهيغلية لأنها تظهر نسقاً يذكرنا بالنسق الجدلي الهيغلي.

- السوبر ثورة هي ثورة ثقافية تتم بموجبها ولادة علم جديد وتنجم عن صراعات حادة بين قوى اجتماعية رئيسية على النطاق الفكري المعرفي.

- أمثلة: الثورة الهندسية في الحقبة الإغريقية، الثورة العلمية الكبرى في القرن

السابع عشر (١٦٣٢ يوم نشر غاليليو "نظاما العالم الجديدان")، الثورة البيولوجية (تطور داروين).

- تتميز السّوبر ثورة في انعتاق المنهجية العلمية من قيود الآيديولوجيات، واكتساب إنتاج المعرفة استقلالية من حيث الوتيرة والمضمون وخط تطوره الخاص وحياته وديناميته. يعني تنقلب علاقة الهيمنة بين الذات والموضوع (بين الآيديولوجيا والمعرفة) لصالح الأخير.

- تظهر المعرفة الأصيلة في مرحلة ما قبل التاريخ على صورة إرهاصات وطفرات متفرقة. لكنها تتحول إلى تيار اجتماعي كاسح يتخثر في مؤسسات مرتبطة بحياة المجتمع في الثورة العلمية وبعدها.

- بقي أن نعرف طبيعة العلاقة الجديدة بين العلم والآيديولوجيا، وأثر العلم على الثقافة والحياة بعد الثورة العلمية الكبرى، وطبيعة الثورات الهيغلية.

(٣)

المغزى التاريخي للثورة العلمية الكبرى

ناقشنا الشروط الذاتية للإبداع العلمي، ومنها انطلقنا إلى الشروط الاجتماعية التاريخية للإبداع العلمي، فاستعرضنا طبيعة الحضارات في ضوء فرضية معينة وضعناها لتفسير نشوء الفلسفة الطبيعية وطبيعتها ووتيرة نموها وفترات ازدهارها وضمورها. وحددنا الإطار الحضاري العام للثورة العلمية الكبرى والأسباب الرئيسية لاندلاعها.

وبعد مناقشة الأسس الاجتماعية التاريخية لنشوء الفلسفة الطبيعية ونموها، ناقشنا طبيعة الإنتاج العلمي بوصفه إنتاجاً معرفياً، فعالجنا طبيعة الفكر العلمي، ثم أبعاد الممارسة العلمية ومحدداتها (نماذج الإنتاج العلمي)، أي الآلية الجوهرية للإنتاج العلمي وخصوصيته. وعليه، فقد حددنا محاور دراسة العلم بوصفه إنتاجاً اجتماعياً. ومن ذلك اشتققنا جانباً أساسياً من جوانب الثورة العلمية الكبرى ومن الفرق بين الفلسفة الطبيعية وعلم الطبيعة، وذلك بتحديد العلاقة بين العلم والآيديولوجيا. وعلى هذا الأساس وضعنا مخططاً شاملاً لفلسفة العلم، أي حددنا محاور دراسة العلم وهيكليتها.

أما في هذا الفصل، فسنلج باب الثورة العلمية الكبرى عبر معضلة فلسفية معينة هي معضلة لانهايتي باسكال، وسنبين المغزى التاريخي الاجتماعي الفكري للثورة العلمية الكبرى، وسنلقي المزيد من الضوء على تاريخية العلم.

قطبا العلم

ينبع العلم من قلب المجتمع الإنساني (الحضارة الإنسانية)، شأنه شأن غيره من الممارسات والنشاطات الاجتماعية الحضارية. لكنه، على الأقل في مرحلة نضجه، لا يعكس بنى المجتمع في مضمونه، وإنما يعكس بنى الموضوع. إن وجوده مشروط بالمجتمع والذات، لكن ماهيته مشروطة بالموضوع، وإلا ما كان معرفة. فالمعرفة هي صورة لبنى الواقع وآليات ظهوره، وإن كانت تنتج اجتماعياً. ومن هنا تنبع خصوصية العلم، من كونه ذا قطبين: قطب اجتماعي إدراكي مغروس في قلب المجتمع ومشروط به، وقطب مادي موضوعي مغروس في قلب الموضوع. وهناك توتر جدلي بين القطبين.

ما السبيل إلى التوفيق بين القطبين؟ هذه هي قصة الثورة العلمية الكبرى. كيف يمكن أن ينتج وعي اجتماعي تشكل اجتماعياً معرفة أو صورة موضوعية لميكانيزمات ظهور الواقع المادي؟ كيف يمكن لسيرورة إنتاجية تنتجها الذوات الاجتماعية أن تكون مشروطة بالموضوع؟ إن الثورة العلمية الكبرى هي تحقيق هذه الإمكانية.

بليز باسكال (١٦٢٣ - ١٦٦٢م)

هو رياضي وفيزيائي وفيلسوف. له إسهامات فذة في مجال الرياضيات. أما في الفيزياء، فقد اقترح تجربة شهيرة تتمثل في مقارنة قياس البارومتر في أعلى جبل مع قراءته في أسفل الجبل، وذلك للتحقق من نظرية توريتشيلي القائلة بأننا نعيش في بحر من الهواء الذي يضغط في كل اتجاه. وقد كتب على أثرها كتيباً حول ضغط الموائع المرنة وغير المنضغطة بين فيه أن الضغط في نقطة هو نفسه في جميع الاتجاهات، وفرق فيه بين الوزن والضغط، حيث بين أن الضغط الجوي يظل مؤثراً حتى في داخل الأوعية المغلقة.

- لكن إنجازه لم يقتصر على الرياضيات والفيزياء، وإنما تعداهما إلى الفلسفة واللاهوت. وهو يشكل في ذلك إرهاصاً مهماً للتيار الوجودي.

- أهم أعماله الفلسفية اللاهوتية والذي يمثل عصارة فكره هو كتاب الخواطر Pensees.

لانهايتا باسكال (صورة محدثة لمنطق باسكال)

اللانهاية العظمى

- يدعو باسكال القارىء في مقدمة كتابه المذكور إلى تصور وضعه بصفته كائناً بيولوجياً محدوداً على سطح كرة ضخمة هي الأرض.
- ثم يدعوه أن يتصور حجمه بالنسبة إلى هذه الكرة المملاقة.
- ثم يحثه على أن يوسع خياله ليقارن بين الأرض والمجموعة الشمسية.
- ثم ينطلق به من المجموعة الشمسية إلى مجموعات النجوم.
- ثم إلى مستوى المجرة.
- فكلسترات المجرات.

- فالسوبر كلسترات.
- فالكون المرئي.
- ومن الكون المرئي إلى مجموعات الأكوان المرئية المتسعة باستمرار.
- هذه هي اللانهاية العظمى، الكل الذي يبدو الإنسان صفراً إلى جانبه.

اللانهاية الصغرى

- تبدأ بمقارنة الإنسان بحشرة صغيرة تدب بين أقدامنا، فيبدو عملاقاً بالنسبة إليها.
- فإذا انعمنا النظر في الحشرة، تبين لدينا أنها بدورها تشكل عالماً متشعباً من البنى والأجزاء.
- لكن مزيداً من النظر يظهر لنا أن كلا من هذه الأجزاء يتكون من شبكة معقدة من الأنسجة، التي يشكل كل منها خضماً متشابكاً من الخلايا.
- وكل خلية إنما هي خضم من الجزيئات المملاقة.
- ثم إنّ كل جزيء عملاق يتكون من فيض من الذرات المتنوعة.
- وكل ذرة تشكل عالماً من البروتونات والنيوترونات والبيونات والإلكترونات.
- لكننا نكتشف أن كل بروتون ونيوترون يتشكل من حشد من الكواركات والغلوونات.
- فإذا ما غصنا إلى ما دون ١٦-١٠سم، جابهنا عالماً جديداً تتوحد فيه القوة الكهرمغناطيسية والقوة النووية الضعيفة، وتعرفنا إلى خضم من الجسيمات الجديدة.
- وإذا ما غصنا إلى ما دون ١٩-١٠سم، جابهنا عالماً آخر تتوحد فيه جميع القوى باستثناء الجاذبية، وتعرفنا إلى فيض جديد من الجسيمات.
- وهكذا دواليك حتى نصل إلى ٣٣-١٠سم حيث يتحول الزمكان Spacetime إلى رغوة من البذور الأولية التي تشكل كل منها أساساً ممكناً لكون جديد.
- هذه هي اللانهاية الصغرى التي تلتقي بصورة أو بأخرى مع اللانهاية

العظمى. إنها "العدم" الذي يبدو الإنسان كون أكوان بالنسبة إليه.

والنتيجة...

- أنّ الإنسان كائن وسطي محدود يتأرجح بين اللانهايتين، بين الكل والعدم اللذين يعجز عن إدراكهما.
- أنّ الإنسان تعبير مأساوي عن محدودية هلامية وعن وجود ضائع.
- أنّ اللانهايتين تومئان إلى غموض الوضع الإنساني وعبثيته وبؤس الخبرة الإنسانية.
- فالمشكلة تكمن في أن كل شيء يقع في دائرة خبرة الإنسان يقود إلى فكرة اللانهايتين، تلك الفكرة التي يشعر بها الإنسان لكنه يعجز عن استيعابها وفهمها.
- أنّ كل شيء يفهم ويقاس بالنسبة إلى اللانهايتين؛ فهما إذاً قطبا الوجود. لكنهما يقعان خارج حدود إمكانات العقل الذي يتحرك دوماً صوبهما.
- أنّ كل شيء محدود يرتبط في غيره بالضرورة في سلسلة سببية، ومن ثم يرتبط في اللانهايتين. إذاً، فإن كل شيء يتضمنهما في صميمه ويقوم عليهما. إن اللامحدود هو جوهر المحدود ومكمن وجوده. فالأجسام الجاهرية لا تفهم إلا بدلالة الجزيئات وتفاعلاتها. وهذه بدورها لا تفهم إلا بدلالة الذرات وتفاعلاتها. لكن فهم الأخيرة يرتكز إلى الإلكترونات والفوتونات وأنوية الذرات وتفاعلاتها. وهذه الأخيرة تقودنا إلى البروتونات والنيوترونات والبيونات، فالكواركات والغلوونات، فالمجالات الموحدة، وهلم جرا. فلا نصل إلى قرار.
- إذاً، فإن المحدود يقود إلى اللامحدود، ومن ثم فإن معرفة المحدود وهم. فالمحدود لا يعرف حقاً إلا بدلالة اللامحدود الذي يقع خارج المعرفة الإنسانية اليقينية.
- الإنسان عاجز عن المعرفة الكلية والجهل الكلي كليهما، ومن ثم... هلامية المعرفة والتجربة الإنسانية؛ عبثية العلم والمعرفة.

- جدار لانهائي يفصل الإنسان عن عالمه وواقعه.
- الإنسان كائن وحيد ومعزول أبداً، وليس سعيه إلى المعرفة الأكيدة والسعادة الحقة سوى وهم أبدي.
- هذه هي النتائج التي توصل إليها باسكال في مقدمة "الخواطر".

ما الحل؟

الحل الباسكالي: العقل ليس طريق الإنسان إلى اليقين والمعرفة الحقة. قد يكون أداة عملية، لكنه ليس أداة للمعرفة اليقينية.

- الطريق الوحيد لحماية الإنسان من وهج اللايقين وهلامية وجوده وخبرته وجنون اللانهايتين هو الإيمان بمصدرهما، بالذات الوحيدة القادرة على استيعابهما، الذات الإلهية. فوجودهما مؤشر أكيد على وجود هذه الذات.
- إنّ الإيمان بالذات الإلهية وبخيرها المطلق هو الضمانة الوحيدة أمام الكائن البشري في مجابهة تحديات محدوديته. فهي الوسيط الوحيد بين الكائن البشري وعالمه. فاللانهايتان (المبادىء الأولية والكل) تلتقيان في الله وحده.
- القفزة الإيمانية خارج أطر العقل وحدوده (من العقل إلى الغيب) هي الحل.
- إنّ الطريق إلى العالم يمر عبر الذات الإلهية.
- إنّ حل باسكال يذكرنا إلى حد بعيد بالحلول التي كانت سائدة ما قبل الرأسمالية (الغزالي مثلاً)، لكن المعضلة التي يطرحها وطريقة طرحها جديدتان.

المنطويات العلمية لمحنة باسكال

- ما أساس هذا الشعور بلانهائية الوجود؟ ما أرضيته؟ ما القيمة المعرفية لذلك؟ لماذا لم تبرز هذه الحيرة بصدد الوجود بهذه الصورة وهذه الحدة الوجدانية من

قبل؟ إذ لم تكن مشكلة اللانهاية مشكلة حضارية وجدانية من قبل. لماذا برزت في عصر باسكال بالذات؟

- للإجابة عن هذه الأسئلة، علينا تفحص الأداة التي يسخرها باسكال للتوصل إلى فكرة اللانهايتين ومنطوياتها الذهنية والوجدانية والحضارية.

- هذه الأداة هي المخيال (الخيال) البشري المحدد مادياً وتاريخياً.

- كما بين هيوم، فإنّ المخيال البشري ليس مقطوعاً من شجرة، وليس مطلق الحرية يجمح كما يشاء لا يحده حد، وإنما ينبع من الخبرة الإنسانية المشروطة تاريخياً واجتماعياً، من الواقع الاجتماعي الحضاري لأصحاب هذا المخيال. فهو محدد بعناصر هذه الخبرة وإمكانات ربطها في بعضها.

- معنى ذلك أنه إذا أردنا معرفة أساس معضلة اللانهايتين وخصوصيتها، ترتب علينا أن ننعم النظر في التربة الحضارية والواقع الاجتماعي اللذين يفترضهما هذا المخيال: ما الجديد في هذه التربة والذي غيّر من طبيعة هذا المخيال بهذه الصورة الصارخة؟

- إنّ المخيال الباسكالي يفترض أموراً كالآتي: (أ) إقرار الإنسان بمادية الكون، بما يحتويه من كواكب ونجوم وغازات؛ (ب) إمكانية أن تكون المادة موزعة توزيعاً لانهائياً في الكون؛ (ج) إمكانية أن يكون هناك عدة مجموعات شمسية؛ (د) إمكانية ألا تقع النجوم على سطح كرة، وإنما أن تكون موزعة في مكان لانهائي؛ (هـ) كون المسافات بين الكواكب والأرض والشمس والنجوم يمكن أن تكون ضخمة جداً بالنسبة إلى قطر الأرض؛ (و) كون القوانين الأرضية ومادة الأرض لا تختلف من حيث الجوهر عن مثيلتها السماوية.

- لماذا استفزت هذه الافتراضات، التي نتقبلها اليوم بسهولة ونعتبرها بديهية، باسكال إلى هذا الحد؟

- إن هذه الافتراضات لم تكن دوماً هي السائدة، وإنما جاءت كنتيجة لتطورات معينة في القرنين السادس عشر والسابع عشر في نظرة الإنسان إلى الكون، وهي التطورات التي تشكل في مجموعها ما يسمى الثورة العلمية الكبرى.

- معنى ذلك أنّ معضلة باسكال إنما تشكل تعبيراً دقيقاً عن الثورة العلمية

الكبرى. إنها تفترض حدوث هذه الثورة وتومىء إليها وإلى حقيقتها وواقعيتها. وهي في النهاية تعبير عن التوتر الشديد الذي نجم عن لقاء العقل الإنساني مع اللانهاية الفعلية لأول مرة في التاريخ.

- القلق الباسكالي إذاً قلق جديد ناجم عن لقاء عقل "قديم" مع واقع ثوري. وهذا يفسر كون الهاجس الباسكالي حديثاً وكونه شبه منعدم في الفكر الذي كان سائداً ما قبل باسكال. ذلك أن التصورات الكونية التي كانت سائدة ما قبل الثورة العلمية الكبرى لم تكن لتسمح بهذه الانطلاقة المخيالية الصارخة، حيث إنها كانت محدودة في صميمها وفي بنيتها المفاهيمية الأساسية.

- هذا إذاً جانب أساسي من جوانب الفرق النوعي الهائل بين الفلسفة الطبيعية القديمة والعلم الحديث، جانب من جوانب الثورة العلمية الكبرى. ولنستعرض هذا الجانب بمقارنة التصور القديم الرئيسي مع التصور الذي قامت على أساسه الثورة العلمية الكبرى.

جذور الفلسفة الطبيعية والمشروع الأفلاطوني

في مطلع الحقبة الإغريقية نشأ في الواقع مشروعان فلسفيان لدراسة الطبيعة: (أ) المشروع المادي، (ب) المشروع الفيثاغوري الأفلاطوني.

(أ) المشروع المادي:

وقد ولد وازدهر في أيونيا ووصل أوجه في ثريس Thrace على ساحل بحر إيجه. لكنه همش بعد حين حتّى اندثر في حضارات العصور الوسطى. ولم يتم إحياؤه ويثمر إلا في أوروبا الغربية في مطلع الحقبة الحديثة على يدي بيكون وبرونو وغاليليو وغاسندي وهوبز.

أشهر رموزه:

(١) طاليس الأيوني (٦٢٤-٥٤٨ ق.م.)، وأعظم إنجازاته:

(i) معالجة القضايا الهندسية نظرياً، أي بوصفها نتاجات ضرورية لعدد قليل من المسلمات التجريدية. بذلك يمكن اعتباره أبا علم الهندسة.

(ii) اعتباره الكون نظاماً متسقاً من العلاقات والبنى Cosmos. لا مجرد طائفة من الأحداث العشوائية التي تحركها قوى أسطورية مزاجية.

(iii) كان أول من قدم تفسيراً مادياً للظواهر والأحداث المادية. إذ حاول تفسيرها باعتبار الماء جوهر المادة، أي حاول تفسيرها بدلالة البسيط المادي، أي اتباع منهج التحليل والتركيب في فهم الظواهر، وهو أساس المنهج العلمي.

(٢) أنكسمندر الأيوني Anaximander (٦١٠-٥٤٥ ق.م.):

طور نظرية طاليس في جوهر المادة وحاول تقديم تفسيرات أكثر معقولية للظواهر والأحداث. إذ لاحظ صعوبة إرجاع كل ظاهرة مادية إلى الماء، الأمر الذي حداه إلى توكيد وحدة الوجود المادي بإرجاع ظواهره كلها إلى مادة أولية أسماها Apeiron، وهي تعني اللانهائي أو اللامحدود أو اللامحدد أو اللامجرب The Boundless. وهو لامحدد لأنّ كل شيء في حالة الكمون. وتتبع المادة في صورها المحسوسة من Apeiron عبر التحديد وإضفاء الصفات والخصائص على Apeiron. والحركة هي المسؤولة عن هذا التحديد، أي عن فصل الأضداد عن بعضها. وهذه الأضداد هي: الحار والبارد من جهة والجاف والرطب من جهة أخرى. وعلى هذا الأساس تبرز أربعة عناصر أساسية من Apeiron: التراب (الجاف) والماء (الرطب) والهواء (البارد) والنار (الحار). بذلك فإن أنكسمندر كان أول من وضع نظرية العناصر الأربعة التي ظلت تشكل أساس التفكير في المادة لمدة ألفي عام. وقد وضع أنكسمندر نظرية في نشوء الكون ارتكازاً إلى هذه النظرية أشار فيها إلى وحدة الكون وتجانس مادته وإلى مادية الأجرام السماوية.

(٣) أناكسمينيس الأيوني Anaximenes (٥٨٤-٥٢٨ ق.م.):

وقد أكد مادية الكون واستقلاله الذاتي. وحاول تفسير الظواهر المادية بإرجاعها إلى الهواء باعتبار الأخير هو المادة الأولية في الكون.

وبتأثير النقد الذي وجهه التيار الثاني إلى فلسفة أيونيا المادية، نمت الأخيرة وازدادت مفاهيمها دقة وعمقاً حتى وصلت أوجها في:

(٤) إمبدوقليس الصقلي Empedocles (٤٩٢ - ؟):

عاش في صقلية، موطن التيار الفيثاغوري، الأمر الذي حداه إلى تطوير الفكر المادي في ضوء الانتقادات الفيثاغورية. طور نظرية أنكسمندر في العناصر الأربعة ووضحها وفصل معالمها. واعتبر الأجسام جميعاً مركبة من هذه العناصر. لكنه اعتبر ترابط الأجسام والأشياء ناتجاً عن فعل قوتين: العشق والكراهية.

(٥) ديموقريطس Democritus (~ ٤٢٠ ق.م.):

عاش في أبديرا في ثريس Thrace، شمالي بحر إيجه. وهو صاحب النظرية الذرية. فلئن اعتقد الأيونيون أن هناك جوهراً واحداً للعالم المادي، ومال بعضهم إلى الاعتقاد بوجود أربعة جواهر مادية، فقد ارتأى ديموقريطس أن هناك عدداً لا نهائياً من الجواهر المادية التي تسبح في محيط لا نهائي من الخلاء. هذه هي الذرات التي لا تقسم والتي تختلف عن بعضها من حيث الشكل والحجم. ويتشكل كل شيء، بما في ذلك الإنسان والروح، من هذه الذرات. بذلك يكون التيار المادي قد بلغ أوجه في ديموقريطس. بيد أن الذرية الديموقريطية همشت بعد موته وأهملت كلياً لما يقرب من ألفي عام. ولم يتم إحياؤها إلا في القرن السادس عشر على يدي برونو وغاليليو وغاسندي وغيرهم.

(ب) التيار الفيثاغوري الأفلاطوني:

وقد ولد وازدهر في أقصى الغرب الإغريقي، في مستعمرات صقلية وجنوبي

إيطاليا، وبرز منافساً للتيار الأيوني المادي ونقيضاً له. إذ فيما ركز التيار الأيوني على المادة ومكوناتها، فقد ركز التيار الفيثاغوري على العقل ومكوناته ورموزه، واعتبر سر الوجود كامناً في الأفكار التجريدية، وفي مقدمتها الأرقام والرموز الرياضية.

أشهر رموزه:

(١) فيثاغورس (~ ٥٣٠ ق. م.): وقد تصور الكون على صورة آلة موسيقية ضخمة واعتبر النسب بين الكواكب مماثلة للنسب في السلم الموسيقي. كما اعتبر المادة مكونة في جوهرها من أرقام وأشكال هندسية.

(٢) أفلاطون الأثيني (٤٢٨-٣٤٧ ق.م.): وقد تبلور على يديه الأسلوب الفلسفي الميتافيزيقي في التفكير في الطبيعة، ذلك الأسلوب الذي شذبه فيما بعد تلميذ أفلاطون، أرسطوطاليس، وطهره من العناصر المغرقة في المثالية، وبنى به أسس الفلسفة الطبيعية التي ظلت مسيطرة حتى القرن السادس عشر الميلادي. وحتى تتبين لنا معالم هذا الأسلوب وطبيعته، فلنر كيف استعمله أفلاطون لبناء تصوره الكوني في محاورته المعروفة الطيماوس Timaeus.

لقد ارتكز أفلاطون إلى مبادىء فلسفية عامة ومنها اشتق تصوره الكوني من دون الاعتماد على أي مبدأ أو قانون تجريبي. إذ إنه استنتج من كون العالم متغيراً أنه مخلوق. لكن المخلوق يفترض بالضرورة خالقاً هو علة المخلوق. وافترض أفلاطون أن الخالق مطلق الطيبة والخير والكمال. ومن هذه الصفات العامة للخالق استنتج: (i) أن الكون منظم كامل التنظيم؛ (ii) أنه مشكل وفق أنموذج إلهي خالد؛ (iii) أن للكون روحاً وعقلاً، بمعنى أن الكون كائن حي ضخم وكامل، حيث إن الشيء العاقل أفضل من الشيء غير العاقل وإن العقل لا يمكن أن يوجد من دون روح أو نفس تحمله؛ (iv) أنه لا يوجد أكثر من كون واحد؛ (v) لما كان الكون ممتداً ومرئياً ومحسوساً، فهو يتكون بالضرورة من التراب والنار. وهما يلتحمان معاً عبر الهواء والماء. والذي يجمع هذه العناصر معاً هو روح الود والتآلف؛ (vi) أن الحيوان الكوني

أبدي حيث لا يطاله المرض ولا الفساد ولا الانحلال ولا الهرم؛ (vii) أن الكون كروي لأن الكرة هي الشكل الأمثل القادر على احتواء جميع الأشكال الأخرى. وعلى أي حال، فإن الحيوان الكوني ليس في حاجة إلى أعين لأنه ليس هناك شيء يقع خارجه حتى يراه. وللسبب ذاته فهو ليس في حاجة إلى أنف أو أذن ولا إلى جهاز هضمي أو تناسلي ولا إلى أطراف. فهو مكتف ذاتياً؛ (viii) وعليه، فإن الحركة الوحيدة الممكنة للكون والتي تليق به هي الحركة الدائرية بسرعة منتظمة. فهي الأنسب للعقل؛ (ix) أن الكون وحيد، لكنه ليس في حاجة إلى أحد غيره. لذلك فهو يكتفي بأن يحاور ذاته؛ (x) لقد خلق الله الكواكب والنجوم وفق معادلة فيثاغورية على أسس تناسبية موسيقية معينة.

ويمضي أفلاطون على هذا المنوال لمناقشة الزمن والأجرام السماوية وغيرها من الظواهر الطبيعية.

هذا هو أساس المشروع الأفلاطوني المتمثل في اعتبار الحركة السماوية دائرية بالضرورة، وفي اعتبار حركات الأجرام السماوية خليطاً من الحركات الدائرية المنتظمة.

وقد طور أرسطوطاليس الأسلوب الفلسفي الأفلاطوني وطوعه لبناء تصور كوني محكم ومنسجم مع ذاته، وذلك بعد أن شذب الأسلوب الأفلاطوني وسد ثغراته بجانب من منجزات التيار المادي.

المشروع الأفلاطوني لوصف الأجرام السماوية وحركاتها

- كان الحافز لبناء تصور شبه مادي للكون المرئي (بالعين المجردة) هو مشكلة الكواكب.
- كيف برزت المشكلة؟
- لاحظ الأقدمون (المصريون والبابليون) أن جل النجوم تدور حركة دائرية منتظمة وبسيطة حول الأرض في فترة معينة تقل قليلاً عن ٢٤ ساعة. لكنهم لاحظوا أيضاً أن هناك خمسة نجوم بالإضافة إلى الشمس والقمر

تتحرك حول الأرض حركات معقدة بعض الشيء. فهي، وإن كانت تشارك النجوم الأخرى في حركتها اليومية حول الأرض، تتحرك أيضاً بالنسبة إلى النجوم على مدار عام أوأكثر. ولوحظ أنها تقصر حركتها بالنسبة إلى النجوم على شريط محدود العرض يسمى دائرة البروج Zodiac. ولاحظوا أن حركة الكواكب الخمسة التي كانت معروفة لديهم (عطارد، الزهرة، المريخ، المشتري، زحل) تبدي حركة مفادها الآتي: تتحرك الكواكب، مثلها مثل النجوم والشمس، حركة يومية من الشرق إلى الغرب. ولديها أيضاً، شأنها شأن الشمس والقمر، حركة بطيئة تقاس بالشهور والسنين، في اتّجاه الشرق. لكن الغريب في أمر الكواكب أن حركتها البطيئة لا تكون دائماً في اتجاه الشرق. إذ إنها أحياناً تعكس اتجاه حركتها فتتحرك في اتجاه الغرب لفترة وجيزة من الزمان، ثم تعكس اتجاه حركتها مرة أخرى، لتعود وتتحرك في اتجاه الشرق. وقد سميت هذه الحركة الحركة الرجوعية Retrograde Motion. وقد شكلت هذه المشكلة التحدي الأكبر لعلماء الفلك والرياضيات في العالم القديم.

- تمثل هذا التحدي في إيجاد وصف لهذه الحركات قادر على استيعاب الرصدات الماضية والتنبؤ برصدات جديدة، وفي إيجاد "تفسير" لها.

- انبرى الإغريق لهذه المهمة، حيث إنهم ابتكروا أدوات جديدة تمكنهم من ذلك: (أ) الهندسة النظرية، (ب) الفلسفة والمنطق. وقد سخروها ببراعة فائقة لبناء أول نماذج رياضية وشبه فيزيائية للكون.

- وكان التجسيد الأكبر لهاتين الثورتين في وحدتهما الجدلية الفيلسوف الأثيني العظيم أفلاطون، تلميذ سقراط اللامع. وهو الذي وضع المشروع الإغريقي لوصف حركات الأجرام السماوية وتفسيرها. ويمكن القول إنّ أفلاطون هو أول من وضع مشروع أنموذج رياضي للكون، بمعنى وضع أسس مثل هذا الأنموذج. والمعروف أن مثل هذه النماذج هي عنصر أساسي من عناصر النظرية العلمية. وقد تمثل مشروع أفلاطون في إيجاد النماذج

والسبل لوصف الحركات السماوية المعقدة بدلالة مجموعة من الحركات الدائرية المنتظمة، كما أسلفنا.

- لكن ينبغي التنبيه هنا إلى نقطتين: (أ) أن الوصف والتفسير في حال مشروع أفلاطون كانا ملتحمين معاً أو، بالأحرى، مماثلين لبعضهما، (ب) أن التفسير الأفلاطوني ليس مماثلاً للتفسير العلمي بالمعنى الحديث. إذ ارتكز الأول إلى اشتقاق الظاهرة المراد تفسيرها من جملة من المبادىء الفلسفية واللاهوتية والجمالية المسبقة. أما الثاني، فيرتكز إلى اشتقاق الظاهرة من جملة من القوانين الطبيعية التي تعبر عن سلوك أضراب من الميكانيزمات المادية.

- فيما يتعلق بمركز الحركات الدائرية المزمع اللجوء إليها لتفسير حركة الكواكب، فقد كان هناك تياران في العلم الإغريقي: (أ) التيار الفيثاغوري، وقد نفى أن تكون الأرض هي المركز، ومال إلى اعتبار الأرض جرماً سماوياً متحركاً وإلى اعتبار الشمس أو جرم ناري مماثل هو المركز. وقد وصل هذا التيار أوجه في مطلع الحقبة الهلنستية، وبالتحديد في أرستاركوس (القرن الثالث قبل الميلاد) الذي اقترح أن الشمس هي المركز وأن الكواكب تدور حول الشمس وفق الترتيب الآتي: (١) عطارد، (٢) الزهرة، (٣) الأرض، (٤) المريخ، (٥) المشتري، (٦) زحل. أمّا القمر فيدور حول الأرض. وهي الصورة المقبولة حالياً. (ب) التيار الأرسطي، وكان يرى أن الأرض هي التي تقع في مركز الكون. وقد وصل هذا التيار أوجه في كلوديوس بطلميوس (القلوذي) الذي عاش في القرن الثاني الميلادي في الإسكندرية، وفي الفلكيين العرب والمسلمين، أمثال: الصوفي، والبطروجي، والطوسي، والعرضي، والبتاني، والشيرازي، وابن الشاطر.

- يمكن القول إنّ التيار الأرسطي تبوأ مركز الهيمنة والصدارة في الحضارة الإغريقية والهلنستية منذ نشأته، وتمكن من تهميش التيار الفيثاغوري حتى تمكن من إقصائه كلياً في أواخر العصر الهلنستي وفي الحضارتين العربية

الإسلامية والأوروبية المسيحية. ولم يتم إحياء التيار الفيثاغوري في مجال الفلك إلا في القرن الخامس عشر في أوروبا الوسطى على يدي نكولاس كوبر نيكوس.

يودكسوس وكاليبوس وهيراقليدس

- كان أول من انبرى لتنفيذ مشروع أفلاطون على أساس كروية الأرض ومركزيتها تلميذه، الرياضي الفذ يودكسوس Eudoxos (النصف الأول من القرن الرابع قبل الميلاد). وكان أنموذج يودكسوس أول أنموذج رياضي مفصل لنظام طبيعي في التاريخ.
- وصف يودكسوس حركة كل كوكب على أنها محصلة مجموعة من الحركات الدائرية المنتظمة بالكيفية الآتية.
- تصور يودكسوس أن الكوكب المعني يقع على خط استواء كرة ضخمة تحيط بالأرض ويطابق مركزها مركز الأرض وتدور بصورة منتظمة حول محور ثابت.
- وهناك كرة أخرى (فلك آخر) تدور بصورة أخرى حول محور ثابت تحمل محور الفلك الأول معها.
- وإذا تطلب الأمر (أمر إنقاذ الظواهر)، تكون هناك كرة ثالثة تحمل معها محور الفلك الثاني. وهلم جرا.
- تكون حركة الكوكب المعني محصلة مجموع هذه الحركات الدائرية جميعاً.
- لذلك سميت نظرية يوكسوس نظرية الكرات أو الأفلاك المتداخلة.
- وكان مجموع الأفلاك التي لجأ إليها يودكسوس لتفسير حركات الأجرام السماوية جميعها ٢٧ فلكاً. واستطاع على أساسها إنقاذ الظواهر الحركية، وفي مقدمتها الحركة الرجوعية، بصورة تقريبية لكن مرضية.
- وفي الفترة ذاتها وضع الفلكي الإغريقي هيراقليدس البنطي Heracleides of Pontos أنموذجاً رياضياً آخر بديلاً لأنموذج يودكسوس، افترض فيه أن الأرض، وإن كانت مركز الكون، ليست ساكنة، وإنما تدور

حول نفسها مرة في اليوم، وأن كوكبي الزهرة وعطارد يدوران حول الشمس، التي تدور، هي وما تبقى من الكواكب، حول الأرض. لكن هذا الأنموذج بقي هامشياً مهمشاً إلى أن أحيا شبيهاً له لفترة وجيزة العالم الدنماركي تيكو براهه في القرن السادس عشر.

- وفي هذه الأثناء تم تطوير أنموذج يودكسوس في اتجاهين: الاتجاه الرياضي على يدي كاليبوس Callippos، والاتجاه الفيزيائي على يدي أرسطوطاليس.

- طور كاليبوس نظام يودكسوس بإضافة سبعة أفلاك إلى الأفلاك التي اقترحها يودكسوس، محسناً بذلك كثيراً من دقة الأنموذج وانسجامه مع الرصدات.

نظام أرسطو

- أما أرسطو، فقد حاول وضع أساس فيزيائي لأنموذج يودكسوس الرياضي، فوضع أنموذجاً ميكانيكياً للكون مستوحى من أنموذج يودكسوس. ولعله كان أول أنموذج ميكانيكي لنظام طبيعي في التاريخ.

- لكن أنموذج أرسطو لم يكن أنموذجاً ميكانيكياً بحتاً، وإنما تخللته عناصر مثالية وميتافيزيقية جلية.

- لم يكتف أرسطو باعتبار كرات (أفلاك) يودكسوس المتداخلة وسائل رياضية بحتة لوصف الحركات السماوية، وإنما اعتبر أنّ لها وجوداً موضوعياً، بمعنى أنه أكسبها نوعاً من المادية، مع أنه اعتبر مادتها أثيراً إلهياً خالداً لا يطاله التغيير ولا الفناء. وأكسبها أيضاً سمات ميكانيكية، مثل القدرة على التأثير على حركات بعضها بالتلامس.

- وعليه، لم يعد أرسطو في حاجة إلى الافتراض بأنّ لكل كوكب كراته الخاصة المستقلة عن كرات غيره من الكواكب، وإنما اعتبر أنموذج يودكسوس الجزء الظاهر من أنموذج ميكانيكي أكثر تعقيداً، وارتأى أنّ تأثير الفلك الواحد لا يقتصر على كوكب واحد فقط، وإنما يقع على بعضها أو عليها كلها، واعتبر

حركة الكواكب والشمس والقمر مظهراً واحداً لحركة نظام ميكانيكي واحد.

- لذلك فقد أضاف مزيداً من الأفلاك تقع بين أفلاك يودكسوس، أولاً لنقل حركة فلك النجوم إلى الكواكب والشمس والقمر، وثانياً لترشيح (وتصفية) الحركة المنقولة من كوكب إلى آخر.

- والمحصلة أن كون أرسطو تضمن ٥٥ فلكاً متداخلاً تقع بين فلك النجوم، وهو أكبرها وأبعدها عن الأرض، وبين فلك القمر، وهو أصغرها وأقربها إلى الأرض. بذلك تصور أرسطو الكون كأنه بصلة (مجموعة متراصلة من الشرائح).

- ويمكن القول إنّ كون أرسطو اعتمد المبادىء والأسس والعناصر الآتية:

(١) كروية الأرض:

- وقد استنتج أرسطو ذلك من زوايا النجوم وتغيرها مع تغير الموقع على سطح الأرض، بل وكون فكرة قريبة من الواقع حول مقدار قطر الأرض، وقد ساق أرسطو شواهد كالآتية على كروية الأرض في كتابه "بصدد السّماوات": (i) اختفاء النجوم كلياً وظهور نجوم جديدة إذ يتحرك المرء في اتجاه الشمال أو الجنوب. فمثلاً هناك نجوم ترى في مصر وقبرص ولا ترى في أوروبا. (ii) هناك نجوم لا تتخطى أبداً مدى الرؤية ولا تغيب عن الأنظار في الليل مطلقاً في أوروبا، لكنها تشرق وتغرب في مصر وقبرص. ويرى أرسطو أن هذه الشواهد تدل على أنّ قطر الأرض ليس كبيراً (مثلاً بالنسبة إلى الأبعاد الفلكية). وتكهن بإمكانية الوصول إلى الهند من الغرب. أما الرقم الذي ساقه أرسطو لمحيط الأرض فهو ٤٠٠،٠٠٠ ستاد Stades (وحدة مسافة إغريقية).

- كانت الأرقام الإغريقية لمحيط الأرض كالآتي:

أرسطو	٤٠٠،٠٠٠ ستاد.
آرخميدس	٣٠٠،٠٠٠ ستاد.

إراتستنيس ٢٥٢،٠٠٠ ستاد.

بوسايدونيوس ٢٤٠،٠٠٠ أو ١٨٠،٠٠٠ ستاد.

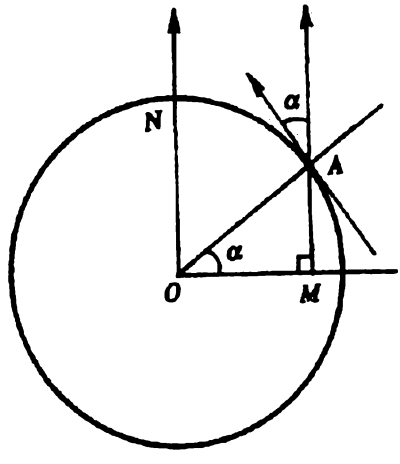
بطلميوس ١٨٠،٠٠٠ ستاد.

بيد أن الستاد لم يكن ثابتاً مكانياً ولا زمانياً. فلا يعرف بالضبط ما يقابله بوحداتنا الحديثة. ويظن بأن رقم إراتستنيس كان الأفضل، وأنه قريب جداً من الرقم الحديث (٢٤،٠٠٠ ميل).

قياس أرسطو

وتتمثل الطريقة المذكورة في كتابات أرسطو بالآتي:

لنفترض أن الأرض كرة تامة وأن النجوم تدور حولها على بعد كبير عنها حول محور يمر في كل من النجم الشمالي الثابت ومركز الأرض الثابت. ولنتدبر الزاوية التي يصنعها النجم الشمالي مع الأفق عند نقطة ما على سطح الأرض (النقطة A).

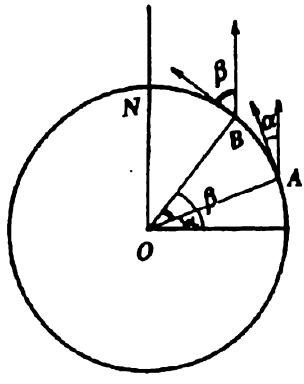


$\alpha + \angle MAO = 90^\circ$

$\angle AOM + \angle MAO = 90^\circ$

$\angle AOM = \alpha$

ولنتدبر الآن نقطتين (A، B) على خط طول واحد على سطح الأرض. ولنقس الزاويتين اللتين يصنعهما النجم الشمالي مع الأفق عند هاتين النقطتين.



C = محيط الأرض.

θ = الزاوية التي يقطعها المسافر من A إلى B.

$$\theta = \beta - \alpha$$

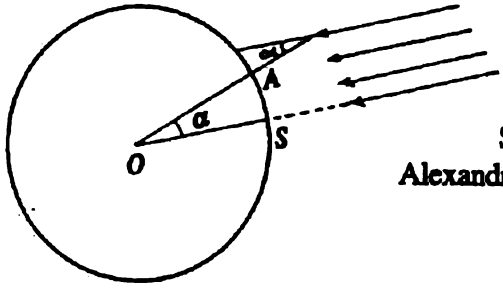
$$\frac{AB}{C} = \frac{\theta}{2\pi}$$

$$C = \frac{2\pi(AB)}{\beta - \alpha}$$

قياس إراتستنيس (٢٤٧ ق.م - ١٩٢ ق.م.)

ينتمي إراتستنيس إلى بداية العصر الهلنستي، وهو جغرافي ورياضي عظيم. ولد في سيرين في ليبيا ودرس في أثينا وقضى عمره في الإسكندرية. قاس محيط الأرض بالطريقة الآتية:

لاحظ إراتستنيس أن المزولة لا تترك أي ظل وقت الظهر في يوم الانقلاب الصيفي (٢١ حزيران) في ساين Sayene قرب أسوان، في حين أنها تترك ظلاً قصيراً في الآن ذاته في الإسكندرية التي تقع إلى الشمال من أسوان على خط الطول نفسه.



S = سايين Syene
A = الإسكندرية Alexandria
زاوية الظل = α.

وقد قاس إراتستنيس زاوية الظل، ومن ثم وجد الزاوية.

ومن الواضح أن:

$$\frac{AS}{C} = \frac{\alpha}{2\pi}$$

$$C = \frac{2\pi}{\alpha} AS$$

وكانت قياسات إراتستنيس:

$$\frac{\alpha}{2\pi} = \frac{1}{50}$$

$AS = 5000$ Stadia,

$C = 250000$ Stadia.

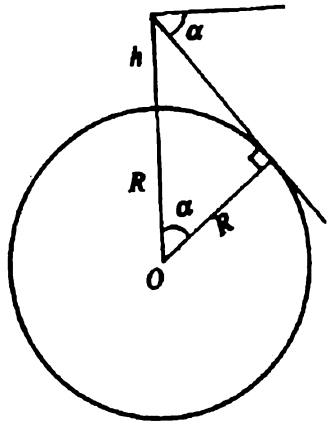
وقد استعمل الرقم ٢٥٢،٠٠٠.

ومع أننا لا نعرف بالضبط مقدار الستاد، إلا أن المقدار التقريبي المستنتج يجعل نتيجة إراتستنيس قريبة جداً من المقدار الحديث. وقد قاس إراتستنيس المسافة بين الإسكندرية وأسوان بالاستعانة بمساح مدرب للسير بخطى متساوية وبعدّها. وافترض إراتستنيس أن أسوان والإسكندرية تقعان بالضبط على خط الطول نفسه، لكننا نعرف اليوم أن الانحراف بين أسوان والإسكندرية يساوي $3^{0}\,4'$. كذلك وجد أنّ الفرق بين خطي عرضهما هو $7^{\circ}\,12'$ (أو $1/50$ من الدائرة الكلية، لكنه في الحقيقة $7^{\circ}\,7'$.

قياس البيروني (٣٦٢هـ/ ٩٧٣م - ٤٤٢هـ/ ١٠٥١م)

هو أبو الريحان محمد بن أحمد البيروني، وهو من مواليد منطقة خوارزم. كان رياضياً وجغرافياً وفيلسوفاً ومؤرخاً عظيماً، بل وطبيباً وصيدلانياً وجيولوجياً أيضاً. قاس نصف قطر الأرض على النحو الآتي (كما ورد في "الكتاب في الأسطرلاب"، وكذلك في كتابه "كتاب تحديد نهايات الأماكن").

يصعد المرء إلى أعلى جبل في محاذاة البحر. وعندما تغيب الشمس يقيس الزاوية التي يصنعها رأس الجبل مع الأفق. ويقيس الارتفاع العمودي للجبل. ومن ذلك يستنتج نصف قطر الأرض.



$$\cos\alpha = \frac{R}{R+h}$$

$$R\cos\alpha + h\cos\alpha = R$$

$$R = \frac{h\cos\alpha}{1-\cos\alpha}$$

وهناك اعتقاد قوي بأن المقدار الذي حصل عليه البيروني = $25000\ ^{2}/_{7}$ ميل، وهو قريب من المقدار الحالي، وما حصل عليه فلكيو المأمون.

(٢) مركزية الأرض:

من حسنات نظرية أرسطو الفيزيائية أنه لم يفترض مركزية الأرض على أساس لاهوتي أو أنثروبولوجي، أي إنه لم يربط مركزيتها بوجود الإنسان عليها، كما فعلت المؤسسة الدينية الأوروبية في العصور الوسطى، وإنما افترضها على أساس نظريته

في الحركة. إذ إنه اعتبر مادة الأرض (التراب) ثقيلة بطبعها، وذات ميل طبيعي نحو مركز الكون. لقد تصور أن هناك مركزاً مطلقاً للكون وألصق فيه مغزى مادياً فيزيائياً أساسياً، حيث إنّ المادة الثقيلة (التراب) تتجه صوبه وتستقر عنده بصورة تلقائية. بذلك فإن مركز الكون سابق منطقياً على الأرض، بمعنى أن الأرض لو كانت مكونة من مواد غير ثقيلة ما استقرت عند مركز الكون. فمركزيتها تنبع من كون مادتها ثقيلة. ولعل حرص أرسطو على تعيين مركز للكون وإكسابه وظيفة دينامية أساسية في كونه كان يعود إلى حرصه على محدودية الكون.

(٣) لا تجانس الكون:

كون أرسطو ليس متجانساً، وإنما يقسم إلى نطاقين يختلفان كيفياً عن بعضهما: نطاق الأرض وغلافها الجوي حتى فلك القمر، ونطاق السماوات الذي يضم الأجرام السماوية. أما النطاق الأول، فتتسم فيه الأشياء بقابليتها للانحلال والموت والنشوء والتغير. وهي تتكون من أربعة عناصر أولية هي: التراب، الماء، الهواء، النار. وأثقلها هو التراب، يليه الماء، فالهواء، وأخيراً النار. ويتحرك التراب تلقائياً نحو مركز الكون ويستقر هناك. أما النار، فتتحرك تلقائياً صوب الطبقات العليا من الجو وتستقر هناك تحت فلك القمر. ويحتل الماء والهواء موقعاً بين التراب والنار، حيث يأتي الهواء فوق الماء. ومعنى ذلك أن الأرض ومحيطها يتكونان من أربع طبقات فوق بعضها. لكن الحركة المستمرة للسماوات تؤدي إلى تعقد الأمر واختلاط المواد الأربع إلى هذا الحد أو ذاك في كل طبقة. ومن هذا الاختلاط ينبع التنوّع المادي والحركي في الأرض ومحيطها. فالأشياء مكونة من العناصر الأربعة، وإن كان كل عنصر هو المهيمن في طبقته. والذي يحدد الأشياء هو العنصر الرئيسي فيها. أما شكل الحركة الرئيسي في الأرض ومحيطها فهو الحركة المستقيمة إلى أعلى أو إلى أسفل. وتكون الحركة طبيعية إذا كان الجسم يتحرك صوب مكانه الطبيعي. لكنها تكون عنيفة إذا اقتلع من مكانه الطبيعي وتحرك بعيداً عنه.

أما السماوات، فهي مكونة من عنصرخامس هو الأثير الإلهي الخالد الذي لا يفنى ولا يطاله التغيير. والحركة الملائمة له هي الحركة الدائرية بسرعة منتظمة.

وعليه، فإن قوانين السماوات تختلف جوهرياً عن قوانين الأرض. وينعكس ذلك على العلم المؤهل لدراسة كل منهما. فعلم الفلك أو الهيئة هو العلم المختص بدراسة السماوات. أما العلم المعني بدراسة الأرض ومحيطها فهو علم الطبيعة أو الفيزياء. فالفرق الجوهري بين السماوات والأرض يعكس نفسه في الفرق الجوهري بين علمي الفلك والفيزياء.

وقد عبر عن هذه المسألة الفلكي العربي مؤيد الدين العرضي المتوفى سنة ٦٦٤هـ (١٢٦٦م) في مقدمة كتابه "كتاب الهيئة" على النحو الآتي: "وأما الذي ليس بثقيل ولا خفيف وهو الأثير فينقسم إلى قسمين: أفلاك، وهي أجرام السماوات، وهي مشفة في الغاية من الشفيف لا تحجب ما وراءها ينفذها الشعاع ولا ينعكس عنها، وإلى أجرام كوكبية غير مشفة تحجب ما وراءها وتقبل الشعاع وينعكس عنها فلا ينفذها. وتسمى هذه الجملة خامساً بمعنى أنها غير تلك الأربعة وتدعى بالأثير، وبالعالم العلوي وبالسماوات. فأما الأجسام العنصرية فالجسم الثقيل منها يتحرك بثقله نحو مركز العالم. ولما كان الثقل هو العلة في طلب المركز فما هو أكثر ثقلاً يكون أشد طلباً مما هو أخف منه. وأشدها ثقلاً يقال له ثقيل مطلق، والذي دونه في الثقل يقال له ثقيل مضاف. فالثقيل المطلق يكون موضعه الطبيعي له مركز العالم. وكل جزء من أجزاء هذا الثقيل يطلب أن يكون المركز في وسطه فتتدافع الأجزاء بثقلها فتتراكم حول المركز بحيث ينطبق مركز ثقل جملتها على مركز العالم. فهي تطلب هذا المركز طبعاً - أعني بما فيها من الثقيل - ولا تبعد عنه إلا قسراً. ولو فرضنا أن هذا العنصر قسر فأزيل عن مكانه وتمكن فيه غيره ثم زال عنه ذلك القاسر لتحرك إليه ودفع ذلك الغير واحتوى على المركز وصار ذلك الغير على ظاهره لكونه أثقل مما سواه من البسائط. وهو جسم كري يقال له التراب والأرض وهو بارد يابس كثيف كمد وشكله بجملته كرة". إلى أن يقول: "وأما الأثير بجملته فجسم كري يحده سطحان كريان متوازيان مركزهما واحد يقال له مركز العالم. السطح منهما محيط بكرة النار والأعلى منهما نهاية العالم فلا يماس شيئاً لأن عنده انتهت جميع الأجسام العنصرية والفلكية. والخلاء محال فليس وراءه خلاء ولا ملاء".

(٤) استحالة الخلاء:

هناك استحالة للخلاء في كون أرسطو. وقد صاغ أرسطو الديناميكا على هذا الأساس. وهو قد اشتق هذه الاستحالة من تحليله المكان ورؤيته له. فلا معنى للمكان في اعتقاده من دون أجسام. فالمكان هو حدود الأجسام. وهي الفكرة التي عاد ليؤكدها، ولكن على أسس أخرى، الفيلسوف الفرنسي رينيه ديكارت في القرن السابع عشر. بذلك، فإن كون أرسطو يمثل في النهاية جسماً واحداً لا تتخلله مسامات. إنه مجموعة من الطبقات المتراصة. وعلى أساس فكرة استحالة الخلاء، فقد وضع أرسطو نوعاً من القانون للسقوط الحر على سطح الأرض. ولعله أول قانون طبيعي في التاريخ، وإن كان خاطئاً وغير دقيق وشبه علمي. إذ رأى أرسطو أن سرعة الجسم الساقط (التي لم يعرفها بدقة كما فعل غاليليو بعده بقرون) تتناسب طردياً مع الوزن (أي القوة النابعة من المركز) ومع المسافة التي قطعها الجسم منذ لحظة سقوطه، وعكسياً مع كثافة الوسط. وهذا يعني أن الأجسام الثقيلة تصل إلى سطح الأرض أسرع بكثير من الأجسام الخفيفة، وأن الجسم يسقط بسرعة لانهائية في الخلاء، الأمر الذي يؤكد أن الخلاء مستحيل. ويلاحظ أن الجسم الساقط يتسارع كلما اقترب من مركز الأرض، مكانه الطبيعي.

وبصورة عامة، اعتبر أرسطو سرعة الجسم متناسبة طردياً مع القوة المؤثرة وعكسياً مع مقاومة الوسط. ومن ذلك نبع إصراره على فكرة استحالة الخلاء. وقد أثار شكوكاً مؤثرة حول هذه العلاقة العالم الهلنستي فيلوبونوس في القرن السادس الميلادي، وطورها في الحضارة العربية الإسلامية كل من ابن سينا في المشرق وابن باجة في المغرب، وانتقلت عبرهما إلى الغرب اللاتيني.

(٥) كروية الكون:

لما كانت الدائرة هي الشكل الأمثل في بعدين، وكانت الكرة هي الشكل الأمثل في ثلاثة أبعاد، فلا بد أن يكون الكون كروياً لأن الخالق لا يمكن أن يكون قد خلق الكون ناقصاً. (يقول مؤيد الدين العرضي المتوفى عام ٦٦٤هـ/١٢٦٦م في كتابه "كتاب

الهيئة" في هذا الصدد: "فالعالم إذاً يقال على جملة مؤلفة من أشياء مختلفة تنقسم أولاً إلى ثقيل وخفيف وما ليس بثقيل ولا خفيف، وشكله كرة").

(٦) محدودية الكون:

الكون محدود بحكم بنيته. فلما كان له مركز محدد يحدده فلك النجوم، فلا بد أن يكون محدوداً. إذ لا معنى لكون لا محدود ذي مركز محدد. ومن جهة أخرى، فإن دوران النجوم برمتها حول الأرض بالسرعة ذاتها استلزم وضعها على فلك واحد يبعد مسافة محدودة عن الأرض. فلا معنى لحركة فلك لانهائي القطر. وهكذا، فإن وجود مركز للكون وحركة النجوم استلزما كوناً محدوداً في صميمه.

(٧) محدودية المكان:

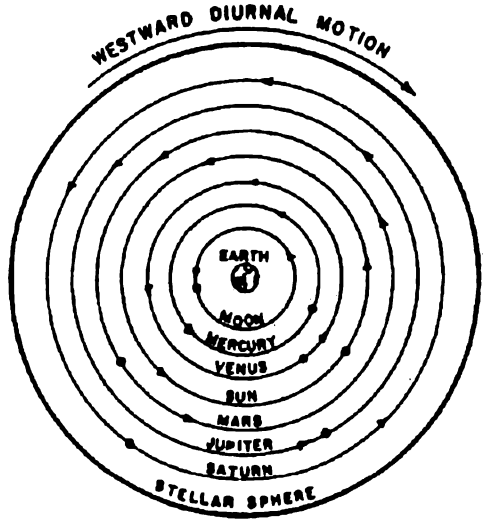
اعتقد أرسطو أن الكون الذي يحده فلك النجوم هو كل ما في الوجود من مادة وأثير ومكان. فلا شيء خارج فلك النجوم على الإطلاق، لا مادة ولا حتى مكان. فالمكان محدود، لأنه برمته يحتويه فلك النجوم. وقد عارض ذلك بعض الفلاسفة العرب والمسلمين، إذ رأوا أن المكان لانهائي وإن كان الكون محدوداً، وذلك لاعتبارات لاهوتية، وأسكنوا الفضاء خارج فلك النجوم بالكائنات الروحانية كالملائكة والنفوس الكلية. ومعنى ذلك أن لانهائية المكان لديهم كان لها وظيفة لاهوتية، لا وظيفة فلكية.

(٨) المحرّك غير المتحرك:

اعتقد أرسطو أن فلك النجوم هو مصدر كل الحركات الأخرى في الكون. فهو الذي يتحرك ذاتياً وتنتقل حركته بالتلامس ميكانيكياً إلى جميع الأفلاك الأخرى حتى تصل إلى الأرض ومحيطها. ويتكلم أرسطو أحياناً عن المحرك غير المتحرك المسؤول عن تحريك فلك النجوم. وقد افترض بعض الفلاسفة والعلماء العرب والمسلمين وجود محيط أو فلك يحرك فلك النجوم لكن لا يتحرك. وافترض بعضهم

الآخر، مثل أخوان الصفا، أن الروح الكلية، روح الكون التي تربض وراء فلك النجوم، هي التي تحرك كل شيء في الكون تماماً مثلما أن روح الإنسان هي التي تحرك كل شيء في جسده.

هذه هي السمات الرئيسية لكون أرسطو الذي ظل مهيمناً في الثقافات الإنسانية المتعاقبة حتى الثورة العلمية الكبرى.



التطورات اللاحقة (أبولونيوس وهباركوس)

لاحظ الفلكيون الإغريق اللاحقون أنّ نظام يودكسوس محدود الدقة ومحدود الفاعلية في الوصف والتنبؤ بالرصدات. وبصورة خاصة، فإنه عجز عن تفسير التغير في شدة إضاءة الكواكب وفي أحجامها. لذلك أخذوا يبحثون عن أساليب ونماذج رياضية أكثر فاعلية ودقة.

وقد طور الرياضيون الإغريق في الفترة الواقعة بين منتصف القرن الثالث قبل الميلاد ونهاية القرن الثاني قبل الميلاد أساليب جديدة لوصف هذه الحركات والتغيرات أصابت قدراً كبيراً من النجاح في ذلك. وكان في مقدمة أولئك الرياضيين

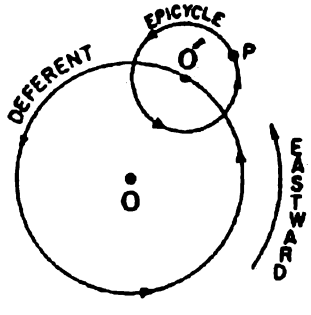
أبولونيوس، الذي عاش في النصف الثاني من القرن الثالث قبل الميلاد، وهيباركوس، الذي عاش في النصف الثاني من القرن الثاني قبل الميلاد، وهذا الأخير هو أعظم فلكي إغريقي.

كلوديوس بطلميوس (القلوذي)

وفي منتصف القرن الثاني الميلادي، تم جمع هذه التطورات الرياضية الفلكية مع تطورات جديدة في كتاب جامع شامل هو ما أسماه العرب لاحقاً كتاب "المجسطي" للرياضي المصري العظيم كلوديوس بطلميوس Claudius Ptolemy. وقد استعمل بطلميوس الأساليب الرياضية الآتية في إقامة أنموذجه الرياضي الذي ظل يشكل محور علم الفلك منذ بداية القرن الثالث الميلادي وحتى القرن السابع عشر الميلادي.

١ - استعمل بطلميوس دوائر لا يقع مركز الواحدة منها في مركز الأرض، وإنما في نقطة قريبة منه. وسميت الدوائر المنحرفة أو أفلاك الموج Eccentrics.

٢ - لكن أعظم أداة رياضية استعملها كانت ما يعرف بأفلاك التدوير Epicycles والأفلاك الحاملة Deferents. ومؤداها أن الكوكب المعني لا يقع بصورة مباشرة على محيط الفلك الحامل الرئيسي الذي يحيط بالأرض، وإنما يقع على محيط دائرة أخرى يقع مركزها على الفلك الحامل ويدور معه.

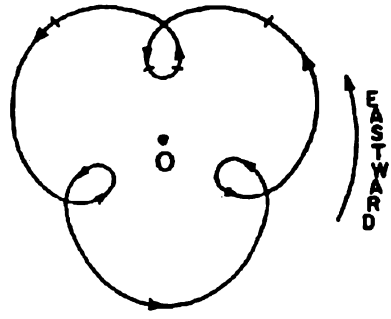


الكوكب = P

مركز فلك التدوير = O'

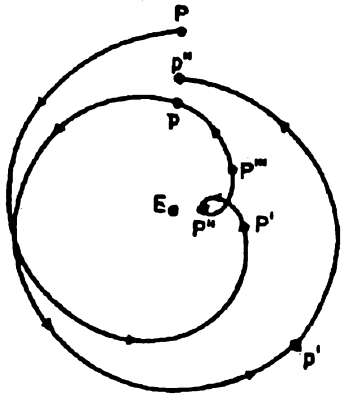
مركز الفلك الحامل = O

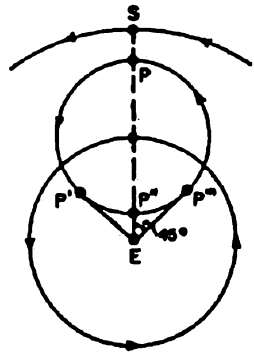
فإذا كان فلك التدوير يدور في اتجاه دوران الفلك الحامل، حصلنا على الوضع الآتي:



هكذا فسر هيباركوس وبطلميوس الحركة الرجوعية للكواكب.

وكان من الممكن أن يحمل فلك التدوير الأول فلك تدوير ثان يحمل بدوره الكوكب. وبهذه الطريقة، وبإجراء التعديلات المناسبة على سرع هذه الدوائر وأقطارها، تمكن بطلميوس من وصف الرصدات والتنبؤ بها بدقة كبيرة نسبياً. وكان هناك نوعان من أفلاك التدوير: أفلاك التدوير الرئيسية المسؤولة عن الحركات الرجوعية، وأفلاك التدوير الثانوية التي استعملت لزيادة الدقة المقدارية للأنموذج. وقد افترض بطلميوس وجود فلك تدوير رئيسي لكل كوكب. ولنأخذ مثلاً على ذلك حركة كوكب الزهرة (P) حول الأرض. وقد افترض بطلميوس في هذه الحال أن الفلك الحامل يدور دورة كاملة في العام وأن فلك التدوير الذي يقع عليه الكوكب يدور دورة كاملة كل ٥٨٤ يوماً. كذلك افترض (اعتباطياً) أن الشمس والأرض ومركز فلك التدوير تقع دوماً على الخطّ المستقيم ذاته، وذلك انسجاماً مع الحقيقة الرصدية أن كلاً من الزهرة وعطارد يظل ملازماً للشمس باستمرار وأنى كانت في السماء. ونلاحظ من الشكل أدناه مدى تعقد مدار الزهرة حول الأرض وعدم انتظامه، ونجاح أنموذج بطلميوس البسيط نسبياً في حسابه وبيان معالمه. إذ تتسم دورات الكوكب حول الأرض في أنها غير منتظمة، لا من حيث طول فتراتها ولا من حيث تفصيلاتها المدارية.





الدورة الأولى
1st. trip

P ——— P′ (219 يوماً)

P ——— P″ (292 يوماً)

P ——— P‴ (365 يوماً)

P ——— p (406 أيام)

الدورة الثانية
2nd. trip

p ——— p′ ——— p″ (295 يوماً)

يصل الكوكب إلى p′ بعد إجراء دورة واحدة لفلك التدوير في 584 يوماً، ويكون عندها في الموقع الأقرب إلى الشمس S.

٣ - نقط المحاذاة Equant Points :

كانت الدوائر التي درج على استعمالها الفلكيون الإغريق تعبر عن حركات دائرية بسرع منتظمة بالنسبة إلى مراكزها (نعني بالسرعة تغير الزاوية التي تمسحها

النقطة المتحركة مع الزمن). أما بطلميوس، فقد ابتكر نوعاً جديداً من الدوائر تعبر عن حركات بسرع غير منتظمة بالنسبة إلى مراكزها، لكنها تكون منتظمة بالنسبة إلى نقط تقع في محاذاة المراكز Equants.

تعليقات حول نظام بطلميوس:

١ - كان نظاماً مرناً يمكن تطويعه لاستيعاب أي رصد جديد.

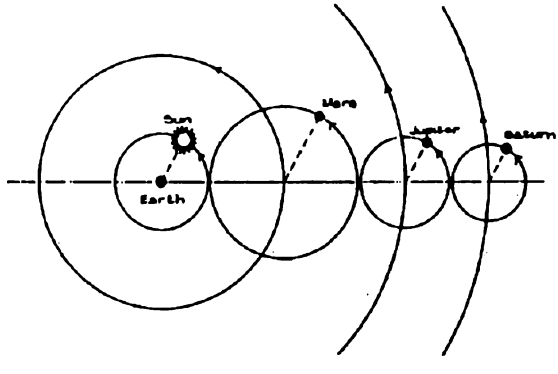
٢ - كان أنجح محاولة للمزاوجة بين مشروع أفلاطون والرصدات المتنامية، لكنه لم يصب نجاحاً كاملاً في هذا المضمار.

٣ - كان معقداً جداً وازداد تعقداً مع الزمن.

٤ - كان من الواضح أنه من الصعب جداً المزاوجة بينه وبين أي أنموذج ميكانيكي، بمعنى أنه كان ذا طابع رياضي لا فيزيائي.

٥ - لم يكن أنموذجاً دقيقاً للتنبؤ، بمعنى أنه إذا عرفنا موضع كوكب وسرعته في لحظة زمنية معينة، لم يكن من الممكن التنبؤ بمساره اللاحق بدقة كبيرة من أنموذج بطلميوس. لقد كان هذا الأنموذج ناجحاً في استيعاب الرصدات القديمة وربطها في بعضها، لكنه لم يكن ناجحاً تماماً في التنبؤ. ومن هنا برزت محدوديته في وضع الأزياج والتقاويم.

٦ - لم يكن من الممكن حساب الأبعاد النسبية للكواكب على أساس أنموذج بطلميوس، وذلك بعكس نظام كوبرنيكوس الشمسي اللاحق.



دورات الكواكب الخارجية وفق بطليموس

٧ - كان يتضمن بعض الانتظامات والعلاقات الاعتباطية التي افترضها اعتباطياً ولم يقدم أي تفسير لها:

(أ) افترض أن الفلك الحامل لكلّ من عطارد والزهرة يدور دورة واحدة في العام الواحد وأن الأرض والشمس ومركز فلك تدوير الكوكب تقع دائماً على خطّ مستقيم واحد، وذلك كيما ينسجم مع حقيقة أن هذين الكوكبين يقمان دوماً قرب الشمس.

(ب) افترض أنه، في حال الكواكب الخارجية، يكون مجموع دورات فلك التدوير والفلك الحامل لكل كوكب في فترة زمنية معينة مساوياً لعدد دورات الفلك الحامل للشمس. مرة أخرى نجد هذا الترابط العجيب بين حركات الكواكب وحركة الشمس.

(ج) لم يستطع أن يفسر لماذا تحدث نقطة التحول في الحركة الرجوعية عندما يكون الكوكب في وضع التعارض، أي عندما يقع فوق الرأس مباشرة عند منتصف الليل.

(د) لم يستطع أن يفسر لماذا تحدث الحركة الرجوعية عندما يكون الكوكب عند إضاءته القصوى.

(هـ) لم يستطع أن يفسر التغيرات الكبيرة التي تحدث في حجم الكواكب وشدة إضاءتها.

وقد استطاع كوبرنيكوس تفسير ذلك كله بصورة طبيعية بافتراض أنموذجه الشمسي، حيث تدور الأرض والكواكب حول الشمس وتدور الأرض حول نفسها ويدور القمر حول الأرض.

علم الهيئة العربي

أدرك بطلميوس جيداً أن أنموذجه الرياضي يتعارض في بعض جوانبه مع الفيزياء

الأرسطية والمشروع الأفلاطوني، أو أنه على الأقل لا ينبع بصورة واضحة من أنموذج أرسطو الميكانيكي. وترك أمر حل هذه المعضلة إلى الأجيال القادمة.

وشكلت هذه المعضلة محور علم الفلك العربي الإسلامي (أو علم الهيئة كما كان يسميه العرب). وقد سارت الممارسات العربية الفلكية والكوزمولوجية في ثلاثة اتجاهات متوازية:

(١) الاتجاه الرصدي

تم إجراء المزيد من الرصدات الأكثر دقة للظاهرات الفلكية ووضع الأزياج (جمع زيج) المفصلة، والزيج جدول يبين مواقع الأجرام السماوية وسرعها الزاوية على مدار الأيام والشهور والسنين. ومن الأزياج المشهورة: الزيج الذي وضعه الخوارزمي (ت٢٣٢هـ)، وزيج محمد بن جابر بن سنان الحراني البتاني (٢٤٠هـ - ٣١٧هـ)، وزيج ابن يونس الصفدي المصري (ت ٣٩٧هـ / ١٠٠٧م) المعروف بالزيج الحاكمي الكبير نسبة إلى الحاكم بأمر الله الفاطمي (ت ٤١١هـ). ومن الفلكيين العرب المشهورين في مجال الرصد: جعفر بن محمد بن عمر البلخي المعروف بأبي معشر الفلكي (ت٢٧٢هـ)، والبتاني، وأعظمهم عبدالرحمن الصوفي الرازي (ت٣٧٦هـ)، صاحب كتاب "صور الكواكب الثابتة"، والقزويني (ت ٦٨٢هـ)، وابن يونس.

(٢) الاتجاه النظري

وتركزت المحاولات في هذا الاتجاه حول ما يسمى معضلة نقطة المحاذاة Equant. إذ وجد الفلكيون العرب في هذه الفكرة البطلمية خروجاً صارخاً على المشروع الأفلاطوني والفيزياء الأرسطية، بل تعارضاً كاملاً معهما. إذ انطوت هذه الفكرة على أن الأفلاك الأرسطية تدور بانتظام حول محاور لا تمر في مراكزها، وهو أمر مستحيل ميكانيكياً. وقد حاول الفلكيون العرب إيجاد بديل لهذه الفكرة ينسجم

مع فيزياء أرسطو من جهة ويعطي وصفاً دقيقاً للرصدات في آن. وبصورة عامة، فقد حاولوا تعديل أنموذج بطلميوس بما ينسجم مع أنموذج أرسطو الميكانيكي، أو اشتقاق صورة معدلة للأول من الثاني ومبادئه. أي حاولوا اشتقاق أنموذج رياضي متطور يتضمن كثيراً من الأساليب البطلمية، من المبادىء الفيزيائية الأرسطية. وقد جرت الكثير من المحاولات في هذا المضمار، يمكن تبويبها في مدرستين رئيسيتين: المدرسة المشرقية وأشهر أعلامها الحسن بن الهيثم (ت١٠٢٨م) وابن سينا وأبو عبيد الجزجاني ومؤيد الدين المرضي وناصر الدين الطوسي (ت١٢٧٤م) وقطب الدين الشيرازي (ت١٣١١م) وابن الشاطر (ت١٣٧٥م)؛ والمدرسة المغربية وأشهر أعلامها ابن باجة (ت١١٣٩م) وابن طفيل (ت١١٨٥م) وابن رشد (١١٢٦-١١٩٨م) والزرقالي والبطروجي (~ ١٢٠٠م) وجابر بن الأفلح (~ ١٢٠٠م). وقد وصلت هذه المحاولات أوجها في ابن الشاطر الدمشقي الذي طور نماذج بديلة أصابت قدراً كبيراً من النجاح في وصف الرصدات من دون أن تعارض الفيزياء الأرسطية.

(٣) الاتجاه الميتافيزيقي

وهو الاتجاه الذي حاول أن يبني كوزمولوجيا على أساس النظريات الفلكية السائدة آنذاك واعتماداً على الفلسفة واللاهوت. لقد حاول أصحاب هذا الاتجاه أن يربطوا بإحكام بين جملة من المبادىء الميتافيزيقية واللاهوتية المستمدة من فيثاغورس وأفلاطون وأرسطو وأفلوطين والأديان السائدة وبين النماذج الفلكية السائدة، وأن يبينوا كيف تنشأ الأخيرة من الأولى. ونذكر في هذا المقام: إخوان الصفا، البيروني، الفارابي، ابن سينا.

كوزمولوجيا الفارابي

وعلى سبيل المثال، فقد استعمل الفارابي نظرية الفيض لأفلوطين لتفسير نشوء الكون الأرسطي. فقسم الموجودات إلى صنفين رئيسيين: واجب الوجود (الله)

وممكن الوجود. واعتبر واجب الوجود هو السبب الأول واعتبر وجود ممكن الوجود دليلاً قاطعاً على وجود واجب الوجود. ورأى أيضاً أن ممكن الوجود يوجد بالفيض من واجب الوجود، بمعنى أنه يفيض عن وجود واجب الوجود. ولما كان واجب الوجود عقلاً بحتاً يشكل وحدة بسيطة واحدة لا تتجزأ، بات لا يفيض عنه إذ يعقل ذاته سوى عقل، وهو العقل الأول وهذا أزلي شأنه شأن واجب الوجود. وتنشأ التعددية من هذه العلاقة الفيضية الأولى. إذ إنّ التعددية تنشأ من تعدد المعقولات. فالعقل الأول يعقل ذاته ويعقل مبدأه (واجب الوجود). ويفيض عن الفعل العقلي الأول كرة سماوية (أو فلك) جرماً ونفساً، وتكون النفس هي مبدأ حركة جرم الفلك. ويفيض عن الفعل الثاني عقل ثان، الذي يفيض عنه إذ يعقل ذاته ومبدأه فلك ثان وعقل ثالث. وهلم جرا حتى نصل إلى العقل العاشر الذي فاض هو وفلك القمر عن العقل التاسع، مروراً بفلك النجوم وأفلاك زحل والمشتري والمريخ والشمس والزهرة وعطارد والقمر بالترتيب. وعند العقل العاشر ينتهي "صدور الأشياء المفارقة التي هي في جوهرها عقول ومعقولات"، كما ينتهي عند فلك القمر "وجود الأجسام السماوية وهي التي بطبيعتها تتحرك دورا". وعوضاً عن ذلك، تصدر عن العقل العاشر النفوس الأرضية والهيولى المشتركة لجميع الأجسام (المادة الأولية). وتتحول الهيولى بفعل حركة الأفلاك إلى العناصر الأربعة (التراب والماء والهواء والنار) التي منها تتكون الأجسام الأرضية. وبمجرد أن يتكون جسم ما على هذا الغرار يفيض عليه العقل العاشر الصورة التي تناسبه (لذلك سمي هذا العقل واهب الصور؛ وسمي أيضاً العقل الفعال). وبذلك يتخذ الجسم شكلاً زائداً على جسميته فيصبح من الكائنات الأرضية (جماد، نبات، حيوان، إنسان).

هكذا يبني الفارابي كوزمولوجيا متكاملة ذات طابع ميتافيزيقي على أساس علم الهيئة الأرسطي البطلمي. وقد بنى ابن سينا أنموذجاً كوزمولوجياً آخر مشابهاً لأنموذج الفارابي وعلى أساس الأخير فيما بعد.

لاحظ أن الجوهر الميتافيزيقي لعلم الهيئة أتاح للفارابي وابن سينا إمكانية

تأسيسه وتعليله وتفسيره ميتافيزيقياً. وبالمقارنة، فإن الجوهر الفيزيائي لعلم الفلك الحديث أتاح المجال أمام علماء اليوم لتأسيسه وتعليله وتفسيره فيزيائياً. إذ فيما ارتكز الفارابي إلى نظرية الفيض الميتافيزيقية في "تفسيره"، فإنّ علماءاليوم يرتكزون إلى النظرية الفيزيائية السائدة (النسبية العامة، ميكانيكا الكنتم، نظرية المجالات) في ذلك.

الطريق إلى كوبرنيكوس

ويبدو أن المحاولات الفلكية العربية لإزالة نقطة المحاذاة من النظام البطلمي، من دون أن يخل ذلك بدقة الوصف، وللتوفيق بين أرسطو وبطلميوس هي التي أقنعت كوبرنيكوس (١٤٧٣م - ١٥٤٣م) فيما بعد باستحالة التوفيق بين المشروع الأفلاطوني والرصدات ضمن إطار نظم مركزية الأرض، الأمر الذي دفعه صوب نظام مركزية الشمس. لكنه أحيا النظام الأخير في ظروف أكثر مواءمة وتطوراً. إذ استعمل لهذه الغاية أدوات أكثر تطوراً من الأدوات التي كانت في حوزة أرستاركوس، وفي مقدمتها الأساليب الهندسية البطلمية وحساب المثلثات العربي. لقد كان كوبرنيكوس مستعداً أن يضحي بمركزية الأرض وميكانيكا أرسطو في سبيل الحفاظ على التبسيط والتناسق الهندسي بالمعنى الأفلاطوني. فمن الواضح أن كوبرنيكوس كان فيثاغورياً أفلاطونياً، وأنه كان يحاول احياء التراث الفيثاغوري في علم الفلك، وهو التراث الذي تم تهميشه في الحضارة الهلنستية والعربية الإسلامية والأوروبية المسيحية. هذا كان هدفه المعلن. أما نتيجة عمله فلم تكن تحقيق هذا الهدف، وإنما كانت إشعال شرارة الثورة العلمية الكبرى التي أتت على الفلسفة الطبيعية القديمة برمتها.

المغزى الاجتماعي الفكري للثورة العلمية الكبرى

ما العناصر والبنى والعلاقات التي أصابها التحويل بفعل الثورة العلمية الكبرى؟

كيف تميز العلم عن الفلسفة الطبيعية القديمة من حيث العلاقات والبنى الداخلية والخارجية؟ يمكن إجمال هذه التحولات في النقاط الآتية:

١ - انعكاس علاقة الهيمنة بين العلم والميتافيزيقا في حقل إنتاج المعرفة: بعد أن كان العلم مشتقاً من الميتافيزيقا وملحقاً بها، أضحت الميتافيزيقا مشتقة منه وملحقة به (غاليليو في مجابهة أرسطو).

٢ - انقلاب منطق سيرورة المعرفة من منطق برهاني إلى منطق اكتشاف (نقد بيكون لأرسطو).

٣ - بروز نمط جديد من المثقفين وهيمنتهم على مؤسسات الفكر والمعرفة (علاقتهم مع النهضة الأوروبية ومع البرجوازية الأوروبية الناشئة).

٤ - نشوء طبقات مؤهلة من حيث الاحتياجات التاريخية والوعي لحمل هذا النمط الجديد من المثقفين وتوفير مستلزمات بناء مؤسساتهم (عن طريق الملكيات المطلقة في مجابهة السلطة الدينية).

٥ - الالتحام الجدلي بين الإنتاج المعرفي والإنتاج المادي وتطور كل منهما ليستوعب احتياجات الآخر: قبل الثورة العلمية الكبرى، يكون تطور العلم رهناً للاحتياجات الحرفية والتجارية والآيديولوجية، فيكون متقطعاً. أما بعد هذه الثورة، فإن العلم يكتسب استقلالية بنيوية تؤهله لأن يغدو مولداً لتلك الاحتياجات.

٦ - الإدراك المنهجي (على صعيد المنهجيّة) لمادية الطبيعة (استقلالها وموضوعيتها ووحدتها الجدلية)، بمعنى إدراك أنها نظام من الميكانيزمات المادية المتفاعلة معاً والمنتجة للظواهر. وينبغي مقارنة ذلك مع التصورات السابقة للطبيعة (الأنثروبولوجية والحيوانية Animistic والجمالية والموسيقية والصوفية والميتافيزيقية).

٧ - اعتبار الخبرة العملية اليومية مجرد مادة خام للإنتاج المعرفي وإيجاد ميكانيزمات خاصة في هذه السيرورة لإنتاج خبرة خاصة بها. ومعنى ذلك أن

العلم يخلق خبرته الخاصة به ولا يرتكز إلى الخبرة التي تخلقها الحياة.

٨ - إدراك جدل المقداري - النوعي في الطبيعة. وبصورة خاصة إدراك أن المظاهر المقدارية هي تعبيرات عن فروق نوعية أعمق. ويرتبط بذلك الإدراك المنهجي لمفهوم التفاعل المادي بين الموجودات المادية، وهو المفهوم الذي يعبر بدقة عن كون الطبيعة وحدة متنوعة، تتنوع على مستويات ويجد هذا التنوع وحدته على صعد ومستويات أخرى.

٩ - التحرر من سلطة السلف، لا بل تحديها، ورفض قدسية الأفكار والتركيز على الاختبار المنطقي والإمبريقيّ وصوغ الأفكار القابلة لذلك. وتستلزم هذه السمة شروطاً اجتماعية تاريخية معينة، مثل نشوء قوى اجتماعية معينة قادرة على (وفي حاجة إلى) تحدي السلطة السائدة (عصر النهضة الأوروبية).

١٠ - تحرير الفلسفة من ميتافيزيقا الطبيعة.

١١ - تحرير المنهجية العلمية من الآيديولوجيا والميتافيزيقا، بمعنى تسخير الاعتبارات الجمالية والميتافيزيقية والآيديولوجية أدوات للاكتشاف وبناء الفرضيات، لا اعتبارها قيوداً وقواعد لاستنباط الحقائق والأحكام.

١٢ - الإدراك المنهجي للانهائي في الطبيعة (لانهايتا باسكال)، وهو ما انطوت عليه نظرية كوبرنيكوس وتحليل غاليليو ونيوتن للحركة. (انظر في هذا الصدد ما يقوله جون ديوي عن ظاهرة العلم).

١٣ - الإدراك المنهجي لمادية الحواس، وحدود فعلها بوصفها أدوات قياس وأدوات تمييز، وعدم اعتبار الخبرة اليومية التي تنتجها الحواس أساساً للمعرفة، وإنما مادة خام فقط لها. ومن هنا تنبع أهمية استعمال أدوات القياس والتحليلات المقدارية الدقيقة. ويرتبط بذلك التمييز بين عالم المظاهر وبين أساسه المادي، بين الظاهر والباطن. فالخلط بينهما يحول دون إنتاج المعرفة العلمية. إنّ العالم الذي تظهره الحواس يومىء إلى الطبيعة

ويشير إليها، لكنه ليس مطابقاً لها. وهذا هو أساس الالتحام الجدلي بين التنظير الرياضي والتجريب في المنهجية العلمية.

١٤ - الإدراك المنهجي للعلاقة المادية التفاعلية بين النظام المادي ومنظومة الظاهرات المراد دراستها وبين شروطها وبيئتها (إدراك مفهومي النظام المادي المغلق والنظام المادي المفتوح).

ويتمثل هذا الإدراك فيما يمكن تسميته المخيال العلمي، الذي تجلى أكثر ما تجلى في التجارب الفكرية لغاليليو وآينشتاين.

ويتسم هذا المخيال بقدرته على التجريد، وفصل العوامل والظروف والميول عن بعضها، وتصور الحدود والحالات الحدودية (المثالية لكن الواقعية في آن)، والتوصل إلى أبسط الأشكال وأكثرها عمومية للقوانين التي تحكم التفاعلات المادية.

١٥ - الإدراك المنهجي للفرق الكيفي بين الخصائص الأولية والخصائص الثانوية واعتبار الثانية مشتقة من الأولى وتعبيراً ذاتياً عنها، والتركيز على بناء مفهومات وتعريفات ملائمة لوصف الخصائص الأولية باستعمال الرياضيات والقياس والتجربة. وينبع من ذلك دور جديد للرياضيات والبناء المفاهيمي. فالرياضيات ليست مجرد أداة لتنظيم القياسات وحساب المشاهدات وليست صورة للغز الوجود، كما هو الحال عند الفيثاغوريين، وإنما هي صورة متنامية لمنطق الطبيعة المتشعب ولغة لصوغ العلاقات والقوانين وأداة لبناء المفهومات والفرضيات العلمية المطابقة لمنطق الواقع المادي. وقد شكل هذا التفريق أساساً لفلسفة القرنين السابع عشر والثامن عشر.

١٦ - إرساء حل المشكلات والتناقضات الظاهرية آلية أساسية من آليات إنتاج النظريات والمعرفة.

١٧ - اعتماد مبدأ نسبية التفسير ونبذ التفسيرات النهائية، بمعنى القبول بوجود مستويات هرمية للطبيعة مستقلة نسبياً عن بعضها والالتزام بمبدأ

عدم القفز عن المراحل أو حرقها.

١٨ - إيلاء المشاهدة المقدارية الدقيقة والتجربة والرياضيات الدور الأساسي في بناء المفهومات والتعريفات المطابقة للواقع والقادرة على وصفه والتعبير عن علاقاته وقوانينه، وعدم الاكتفاء باشتقاقها من مادة الحس المباشر أو من المبادىء الميتافيزيقية والجمالية العامة.

١٩ - جوهر الفرق بين مرحلة ما قبل تاريخ العلم ومرحلة تاريخ العلم يكمن في كيفية بناء المفهومات واشتقاقها في المرحلتين. ففي المرحلة الثانية، يتم اشتقاق المفهومات الأساسية من تدبر الموضوع فكرياً وعملياً، أي من التفكير في الظواهر والسيرورات واستعمال المخيال العلمي (وأدواته الرئيسية التحليل والتجريد) في ذلك وفي إجراء القياسات والاختبارات والتجارب (الفكرية والحقيقية). هكذا يتحدد معنى المفهوم العلمي المطابق للواقع بدقة. أما في المرحلة الأولى، فإن المفاهيم المطبقة على الظاهرات وسيرورات الموضوع ليست مشتقة من الموضوع أو من الممارسة بصدد الموضوع، وإنما مشتقة من موضوع آخر هو الذات والمجتمع ومسقطة إسقاطاً على الموضوع. والنتيجة أن النماذج الكونية والطبيعية في هذه المرحلة لا تكون قابلة لأن تختبر وتترجم إلى مشاهدات واختبارات وتجارب محددة، ولا تشكل أدوات للاستكشاف، وإنما لتعزيز معتقدات وممارسات وشعائر وعواطف معينة، الأمر الذي يدخلها كلياً في إطار الآيديولوجيا، لا العلم.

٢٠ - في مرحلة ما قبل تاريخ العلم يتم تكوين الكثير من العناصر المكونة للعلم، ولكنها تكون متفرقة عن بعضها ومندغمة في أطر آيديولوجية، وتكون لها وظائف أخرى غير الوظائف التي تكتسبها في العلم. ويكمن جوهر الثورة العلمية الكبرى في الطريقة الجدلية التي تحرر بها هذه العناصر من أطرها القديمة وتدمجها معاً في المنهجية العلمية. (مثلاً البرهان الرّياضيّ،

البرهان المنطقي، البرهان الفلسفي، العقل الاستنتاجي، الرصد الدقيق، بناء النماذج الرياضية، التجربة، بعض النماذج العقلانية).

(٤)

الكون المتسع

مقدمة في الكوزمولوجي

اللانهاية

اللانهاية! قد يقول قائل إنّها لازمت الإنسان بوصفها بنية إدراكية واعية منذ فجر التاريخ ملازمة الطفل لأمه (أو ربما الأم لطفلها). إننا نقر بذلك، شريطة أن نتذكر أنها ظلت هائمة في متاهات اللاهوتيات ومجمدة في عالم الرياضيات المجرد، ولم تتفتق فعليّاً، مظهرة هيئتها الكامنة في الطبيعة للبصيرة البشرية برمتها، قبل أن تتفجر ينابيع النهضة الإنسانية في أوروبا إبان القرنين الخامس عشر والسادس عشر. ولعل هذا التصادم المباشر مع اللانهاية الفعلية هو السبب الرئيسي في هيمنة تلك الحيرة القصوى وذلك القلق اللامتناهي على حياة الإنسان الحديث.

وعلى أي حال، فما إن وجه الإنسان تلسكوباته إلى السماء وتفكيره خارج إطار القرون الوسطى التفكيري حتى بدأت اللانهاية تتجلى لعينيه مباشرة مبددة طمأنينة الحنين التي كان يشعر بها من قبل إلى غير رجعة.

ولعل هذا الفصل يرمي، من ضمن ما يرمي إليه، إلى بيان الكيفية المنطقية التي تم بها تفتق اللانهاية الفعلية الممثلة بالكون بوصفه كلا. وهذا بالفعل ما أقصده "بالكون المتسع". ولربما كان من الأدقّ أن أسمي هذا الفصل "الطريق إلى اللانهاية". إذ إن العنوان أعلاه قد يوحي بأنني سأقصر كلامي على النظرية

الكونية الحديثة التي تقول إن الكون برمته يتسع ويتمدد باطراد، مع أن هذه النظرية لن تشكل إلا بنداً واحداً من الفصل. ومن ناحية أخرى، يمكن النظر إلى هذا الفصل على أنه تعريف بالهيكل المنطقي العام لعلم الكون (الكوزمولوجي) والكيفية المنطقية التي ترتبط بها مفهوماته الأساسية. والحقيقة أن التطور المنطقي لهذه المفهومات ليس سوى الانعكاس النظري لتفتق اللانهاية الفعلية.

ومن الطبيعي أننا سنتطرق إلى التاريخ الزمني لتطور هذا العلم، ولكن ليس على أساس أنه كومة من الاكتشافات الفلكية المرتبطة معاً زمنياً فقط، وإنما من وجهة نظر الترّابط المنطقي بين أحداثه الزمنية. وفي اعتقادنا أن هذا النهج يستلزمه عمق المعالجة الذي نصبو إليه.

موضوع الكوزمولوجي

يمكن تحديد موضوع الكوزمولوجي بتحديد نطاقات الطبيعة التي تم التعرّف عليها حتى الآن، وهي نطاقات زمكانية تختلف كيفياً عن بعضها، بمعنى أن لكل منها منطقه الخاص ونسقاً نظرياً خاصاً. وفي ضوء ما تم حتى الآن من تراكم معرفي، فإنه يمكننا تقسيم الطبيعة إلى النطاقات الآتية بدلالة الأطوال المكانية (وهو تقسيم أولي وتقريبي بالطبع):

اسم النطاق	المدى المكاني	الإطار النظري
1. النطاق الكوني	10^{10} سم – محيط الكون المرئي	نظرية النسبية العامة
2. النطاق الجاهري	10^{-4} سم – 10^{10} سم	الفيزياء الكلاسيكية
3. نطاق الذرات والجزيئات	10^{-10} سم – 10^{-4} سم	ميكانيكا الكتم التقليدية
4. نطاق التفاعلات الكهرمغناطيسية بين الجسيمات دون النووية	10^{-15} سم – 10^{-10} سم	الإلكترودينامكا الكتمية
5. نطاق النواة والكواركات	10^{-17} سم – 10^{-15} سم	الديناميكا اللونية الكتمية
6. نطاق التفاعلات الليبتونية	10^{-19} سم – 10^{-17} سم	النظرية الإلكتروضعيفة
7. نطاق التحولات الكواركية الليبتونية	10^{-33} سم – 10^{-19} سم	نظريات المجال الموحد (بما في ذلك الجاذبية الفائقة ونظرية الخيوط الفائقة)
8. نطاق نشوء الزمكان	دون 10^{-33} سم	نظرية الجاذبية الكتمية

ولما كان كل من هذه النطاقات يمثل مرحلة من مراحل نشوء الكون وتطوره (وبالتحديد، لما كانت كل مرحلة من هذه المراحل تنطوي على واحد أو أكثر من هذه النطاقات)، فإن موضوع الكوزمولوجي يغطي النطاقات المذكورة جميعاً، كما أنّ علم الكوزمولوجي يغطي الأطر النظرية المتعلقة بهذه النطاقات جميعاً.

اللحظات الحاسمة في تاريخ الكوزمولوجي

هناك محطات رئيسية في تطور الكوزمولوجي من المهم التعرف عليها إذا أردنا تحديد البنية النظرية المفاهيمية لهذا العلم. ويمكن إجمالها في الآتي:

١ - اكتشاف كروية الأرض وقياس قطرها:

وقد تم ذلك على يد الإغريق في الحقبتين الهلنية والهلنستية. ويذكر في هذا المقام بصورة أساسية اسما أرسطوطاليس وإراتستنيس. وما كان مثل هذا الاكتشاف ممكناً لولا الثورة الهندسية التي حققها الإغريق في القرنين الخامس والرابع قبل الميلاد.

٢ - **ثورة كوبرنيكوس - نيوتن** في القرنين السادس عشر والسابع عشر، والتي كانت نتيجتها أن اعتبرت الشمس مركز الكون بدلاً من الأرض. وقد اقترح كوبرنيكوس أنموذجه الشمسي بناء على الرصدات الفلكية التي كانت متوافرة لديه. واستلزم تأسيس هذا الأنموذج ابتكار المنهجية العلمية ومولد الفيزياء بوصفها علماً مستقلاً. ووجد تفسيره الديناميي المادي على يدي نيوتن (نظرية الحركة والجاذبية).

٣ - على أن نيوتن لم يستطع أن يفسر المجموعة الشمسية بدلالة قوانينه في الحركة والجاذبية فقط. فما كان منه إلا أن أدخل في تفسيره مفهومات لاهوتية غامضة. وكان ذلك بمثابة إقرار مبطن منه بعجزه عن إعطاء تفسير علمي شاف لهذه الظاهرة. وبقي الحال كذلك إلى أن جاء الرياضي الفرنسي "لابلاس" الذي قام بتنقية علمي الفلك والكون من المفهومات اللاهوتية والميتافيزيقية في أواخر القرن الثامن عشر وبإثبات استقرار المجموعة الشمسية رياضياً من دون اللجوء إلى غير المفهومات العلمية. ويحكى بخصوص ذلك أن القائد الفرنسي، نابليون، سأل لابلاس يوماً عقب اطلاعه على نظرية الأخير: "ألم تترك مكاناً ودوراً في الكون للموجودات اللاهوتية؟" فما كان من لابلاس إلا أن أجاب باعتداد: "أيها القنصل

الأول، إنها فرضيات لا تبرز الحاجة إليها في نظرياتي". ولم يكتف لابلاس بذلك، وإنما قام أيضاً بإدخال فكرة النشوء والتطور في علم الكون وإعطائها شكلاً رياضياً علمياً معيناً لأول مرة في تاريخ البشرية. إذ إنه أرسى قواعد ما يسمى النظرية السديمية في أصل المجموعة الشمسية ونشوئها واختلف عن غيره ممن ساهموا في إرساء قواعد هذه النظرية في عصره في أنه قدم معالجة رياضية صارمة لها.

٤ - اكتشاف لامركزية الشمس في الكون

ظل الاعتقاد أن الشمس هي مركز الكون، بمعنى أن النجوم بوصفها كلا بالإضافة إلى الكواكب تدور حول الشمس، سائداً بعد ثورة كوبرنيكوس حتى وجه الفلكي البريطاني وليم هيرشل تلسكوبه إلى السماء في النصف الثاني من القرن الثامن عشر لدراسة حركة النجوم بالنسبة إلى الشمس. فتبين له أنها تتحرك عشوائياً بالنسبة إلى بعضها وإلى الشمس، وأنه ليس لها حركة حول الشمس. وهكذا، أثبت هيرشل أن الشمس ليست مركز الكون، وإنما هي مجرد نجم يتيه في خضم هائل من النجوم العادية الأخرى. وقد فتح هذا الاكتشاف المصيري الباب على مصراعيه أمام دراسة الظواهر السماوية على النطاق الكوني ووسع مجالات البحث الفلكي لتشمل الكون برمته بعد أن كانت منصبة على المجموعة الشمسية وحسب.

٥ - اكتشاف تمدد الكون

ما إن أطل القرن العشرون حتى كانت صورة الإنسان عن مجرة درب التبانة التي نعيش فيها قد اكتملت تقريباً. وكان الاعتقاد السائد آنذاك أن الكون مقتصر على هذه المجرة، إذ لم يكن قد اكتشفت بعد أي من المجرات الأخرى. وبقي الحال كذلك إلى أن وجه الفلكي الأميركي هبل Hubble تلسكوبه إلى السماء لدراسة إحدى الغمامات السديمية الحلزونية التي كان يظن أنها تنتمي إلى مجرتنا. وكان شكلها الحلزوني المحدد الذي ميزها عن غيرها من الغمامات السديمية هو الذي لفت نظر هبل وغيره من الفلكيين آنذاك. وبالأخص، ركز هبل نظره على نجم لامع في

هذه الغمامة الحلزونية من النوع الذي تتغير شدة إضاءته دورياً بانتظام (متغير كيفايد). وكان معروفاً آنذاك العلاقة الرياضية بين شدة الإضاءة المطلقة لهذا النوع من النجوم (أي كمية الطاقة التي يشعها النجم في الثانية) والفترة الدورية لها. وبناء على هذه العلاقة وقياساته للفترة الدورية وشدة الإضاءة النسبية (أي كمية الطاقة التي تصلنا من النجم في الثّانية)، استطاع هبل أن يستنتج المسافة التي تفصلنا عن هذه الغمامة السديمية الحلزونية. فتبين له أن هذه الغمامة تبعد عنا أكثر بكثير مما كان يتوقعه بناء على الفرضية القائلة إن الكون مقتصر على مجرة درب التبانة. وبعبارة أخرى، تبين له أن هذه الغيمة السديمية لا يمكن أن تكون منتمية لمجرتنا، وبذلك فإنها لا بد أن تكون مجرة في حدّ ذاتها (أي مجموعة نجمية مؤلفة من بلايين النجوم) تفصلها مسافات شاسعة عن مجرتنا. وتوالت بعد ذلك اكتشافات هبل لعشرات المجرات الأخرى، الحلزونية منها وغير الحلزونية، وتفتقت أبعاد جديدة للكون مذهلة يتواضع أمامها الخيال الإنساني الجامح نفسه، وتضاءلت مجرتنا فجأة في ضوء هذه الرصدات الثورية حتى غدت كجزيء غاز دقيق يتيه في خضم من الجزيئات الأخرى.

ولم تقف غرابة ما اكتشفه هبل عند هذا الحد. إذ تبين له أيضاً أن الأطياف الضوئية (الكهرمغناطيسية) لهذه المجرات لها إزاحات في اتجاه الضوء الأحمر، بمعنى أن الموجات المكونة لهذه الأطياف أطول من تلك المكونة لطيف الشمس مثلاً. والجدير بالذكر أنه من المسلم به في علم الضوء والموجات أن مثل هذه الإزاحات الضوئية تنتج عن حركة مصادر الموجات بالنسبة إلى أداة القياس. وبناء على ذلك، فقد استنتج هبل أن المجرات تتباعد عن بعضها باستمرار بسرع تتناسب طردياً مع المسافات بينها. وجاء هذا الاستنتاج العلمي مطابقاً للتنبؤات النظرية النابعة من نظرية النسبية العامة. فعندما طبق الرياضي الروسي إسكندر فريدمان هذه النظرية على الكون بوصفه كلا، تبين له أنه لا مفر من الاستنتاج أن الكون بوصفه كلاً يتسع أو يتقلص باستمرار. وقد انبثقت عن هذه الاكتشافات المذهلة سلسلة من النظريات الكونية التي لا تزال قيد البحث والتطوير.

الظاهرات الكونية

بالنظر إلى خصوصية الكوزمولوجي النابعة من كون موضوع دراسته فريداً من نوعه، يبرز السؤال الآتي: على أي أساس رصدي يمكن دراسة الكون وبناء الكوزمولوجي؟

والجواب هو أن هذا الأساس هو حقيقة أن هناك ظاهرات كونية تقف جنباً إلى جنب مع الظاهرات الموضعية المألوفة. ونعني بالظاهرات الكونية تلك الظاهرات التي تعكس البنية العامة للكون والتي تنتجها ميكانيزمات كونية. وفي مقدمة هذه الظاهرات نذكر:

١ - البنية الهندسية المكانية للكون، والتي يمكن استنباطها من الكيفية التي يتحرك بها الضوء على النطاق الكوني.

٢ - نسبة كتلة المادة المرئية إلى كتلة المادة غير المرئية في الكون، والتي يمكن استنباطها من حركات المجرات.

٣ - نسب العناصر في المادة المرئية في الكون.

٤ - نسبة عدد الفوتونات إلى عدد البروتونات في الكون.

٥ - الحركات العامة للمجرات ومجموعاتها في الكون.

٦ - توزيع المادة المرئية في الكون.

٧ - نسبة كتلة المادة إلى كتلة ضديدة المادة.

٨ - عدد الثقوب السوداء الصغيرة في الكون.

٩ - عدد المونوبولات المغناطيسية في الكون.

١٠ - العلاقة بين توزيع المادة المرئية والخيوط الكونية في الكون.

١١ - سرع الكويزرات وأبعادها وخصائصها.

١٢ - الكثافة الموضعية للمادة في الكون.

١٣ - أعمار الكواكب والنجوم والمجرات التي يمكن استنباطها من نسب العناصر فيها، وبخاصة العناصر المشعة.

١٤ - إشعاع الخلفية من حيث طبيعته ودرجة حرارته ودرجة تجانسه.

١٥ - ظلمة السماء.

وسنركز فيما تبقى من هذا الفصل على ظاهرة ظلمة السماء (أو ما يسمى معضلة أولبرز) ومغزاها الكوني.

معضلة أولبرز

كان أولبرز يعلم أن هناك ملايين النجوم في الفضاء المحيط بالأرض. هذا ما دلت عليه رصداته ورصدات غيره من الفلكيين في عصره والعصور التي سبقته. وكان يعلم أيضاً أن مسافات شاسعة تفصل هذه النجوم عن بعضها وعن شمسنا مما يجعل هذه النجوم العملاقة تبدو على هيئة نقط ضوئية باهتة، بمعنى أن جزءاً صغيراً جداً فقط من الطاقات الضوئية التي تشعها يصل إلى سطح الأرض. ولم يفته أن المسافات التي تفصل هذه النجوم عن الأرض تتفاوت كثيراً. وقد فسر التفاوت الملحوظ في شدة الإضاءة بين هذه النجوم على هذا الأساس. إذ إنه اعتبر لمعان النجوم اللامعة دلالة على قربها من الأرض وبهوت النجوم الباهتة دلالة على بعدها عنها.

وقد أثارت هذه المعرفة في ذهنه (وذهن كهلر من قبله) السؤال الآتي: صحيح أن كل نجم على حدة لا يؤثر إلا قليلاً على ظلمة السماء، ولكن ماذا بشأنها مجتمعة؟ ماذا بشأن تلك الطبقات النجمية المحيطة بالأرض التي لا تعد ولا تحصى؟ خذ دقيقة رمل مثلاً. إنك تكاد لا تراها. ولكن اجمع بليوناً منها، تحصل على تلة بحجم القصر.

ولم يكتف أولبرز بالتساؤلات وطرح الظنون، وإنما شحذ همته لحساب مقدار الطاقة الضوئية التي تصلنا من النجوم بناء على افتراضات معقولة لا تتناقض مع المبادىء الفيزيائية السائدة في عصره. وقد اضطر إلى اللجوء إلى افتراضات ذهنية وجمالية بحتة نظراً إلى عدم توافر المعلومات الفلكية الكافية في عصره.

كانت افتراضات أولبرز الأساسية كالآتي:

١- أنّ النجوم هي الدقائق المادية الأولية المكونة للكون.

٢- أنّ معدل عدد الدقائق الأولية ثابت مكانياً وزمانياً، بمعنى أن هذا العدد كما

هو في منطقتنا الكونية لا يختلف عنه كما هو في المناطق الكونية البعيدة عنا، وأنه ظل كما هو عليه عبر بلايين السنين.

٣ - أنّ معدل شدة إضاءة هذه الدقائق ثابت مكانياً وزمانياً، بمعنى أن متوسط لمعان النجوم لا يختلف باختلاف المكان والزمان.

٤- أنّ الكون لامتناه مكانياً وزمانياً، بمعنى أنه يمتد إلى اللانهاية في المكان والزمان. وقد اضطر أولبرز إلى مثل هذا الافتراض، حيث إن الفرضية الثانية تتعارض حسب قوانين نيوتن في الجاذبية مع القول بأن الكون محدود.

٥ - أنّ الكون بوصفه كلاً ستاتيكيّ، بمعنى أنه لا يتقلص ولا يتمدد.

٦ - أنّ قوانين الطبيعة لا تتغير مكانياً وزمانياً، بمعنى أن القوانين التي توصلنا إليها في منطقتنا صالحة في كل مكان وزمان.

وقد بدأ أولبرز حسابه بتقسيم الفضاء المحيط بالأرض إلى طبقات نجمية متساوية في السماكة بحيث يحتوي كل منها على عدد كبير من النجوم. وتبين له بناء على افتراضاته المبينة أعلاه أن مقدار الطاقة التي تصل إلى الأرض من أي من هذه الطبقات لا يعتمد على بعدها عن الأرض (أي، على نصف قطرها)، ولكنه يتناسب طردياً مع سماكتها. وهذا مساوٍ للقول إن مجمل الطاقة الإشعاعية التي تصلنا من جميع الطبقات يتناسب طردياً مع نصف قطر الكون. وهذا بدوره يعني بناء على الافتراض الرابع أن مجمل هذه الطاقة لامتناه، أي إنّ طبقات النجوم الباهتة البعيدة عن الأرض تدعم بعضها لتنير سماء الليل بجهنم بيضاء تخطف الأبصار والأجسام معاً في لمحة بصر.

حاول أولبرز أن يجد حلاً لمعضلته تلك بأن أخذ بعين الاعتبار حقيقة أن الطبقات النجمية القريبة تحجب جزءاً من الأشعة القادمة من الطبقات البعيدة. ومع أن هذا العامل أدى إلى الحصول على قيمة محدودة لمجمل الطاقة (= درجة الحرارة)، إلا أنه لم يخفضها إلى القيمة المطلوبة، وإنما إلى حوالي ١٠،٠٠٠ فهرنهايت. وهذه كفيلة بجعل الأرض تتبخر إلى غاز ملتهب في لحظات معدودة. ما الحل إذاً؟

ليس هناك مفر من الاستنتاج أن ظاهرة ظلمة السماء في الليل دلالة أكيدة على بطلان بعض افتراضات أولبرز إن لم يكن كلها. بيد أن علماء القرن التاسع عشر لم يجرؤوا على التخلي عن هذه الافتراضات نظراً إلى علاقتها الجذرية بالمبادىء العلمية الأساسية السائدة في عصرهم، والخالدة الراسخة في نظرهم. فما كان منهم إلا أن أهملوا هذه المعضلة وإن تركوا شرف بعثها إلى علماء القرن العشرين.

ولننظر الآن إلى هذه الافتراضات في ضوء الاكتشافات الفلكية الحديثة ولنبدأ بالافتراض الثاني.

في أواخر القرن الثامن عشر، قام هيرشل بقياس توزيع النجوم حول الأرض وتبين له أنه أبعد ما يكون عن الانتظام مكانياً.

ولم تقف رصداته عند هذا الحد، إذ إنها دلت على أن الكون متناه وأنه على شكل قرص يدور حول نفسه. وهكذا نرى أن أولبرز وضع افتراضه الثاني والرابع رغماً عن قياسات هيرشل، مضحياً بالقياسات التجريبيّة في سبيل حسه الجمالي.

وقد دلت التطورات اللاحقة في علم الفلك أن حس أولبرز الجمالي كان حقاً أصدق مما أوحت به رصدات هيرشل، وأن العلة كانت تكمن في الافتراض الأول، لا في الافتراضين الثاني والرابع. إذ إنه إذا استبدلنا لفظة مجرة بلفظة نجم في الافتراض الأول، فإن الدقائق الأولية المكونة للكون تكون بالفعل موزعة مكانياً بانتظام. على الأقل، هذا هو أحد الاعتقادات السائدة في المجتمع العلمي حالياً. وكذلك الحال بالنسبة إلى الافتراض الرابع. إذ إن هناك عدداً من النظريات الكونية الحديثة التي لا تزال تعتمده أساساً لها.

أما الافتراض الثالث، فإنه غير صحيح إذا اعتبرنا النجوم الدقائق الأولية المكونة للكون. أما إذا أخذنا بعين الاعتبار التعديل في الافتراض الأول المذكور أعلاه فإنه يغدو ممكناً ومعقولاً.

أما الافتراض السادس، فلا مفر منه في أي نظرية كونية، كلاسيكية كانت أو حديثة. إذ إن القوانين الطبيعية المستقاة من الأحداث الطبيعية في منطقتنا من الكون هي كل ما في حوزتنا من معلومات عامة عن الكون، وإنه من العبث إذاً أن

نلقيها جانباً.

يتضح من ذلك أنه إذا عدلنا الافتراض الأول بحيث تستبدل لفظة مجرة بلفظة نجم، فإن الافتراضات الثاني والثالث والرابع والسادس تغدو معقولة، بمعنى أنها لا تتعارض مع الرصدات الفلكية الحديثة.

يبقى إذاً الافتراض الخامس، وهو لا ريب يتعارض مع اكتشافات هبل ونظرية النسبية العامة، ومع ما تلتها من اكتشافات ونظريات كوزمولوجية أخرى.

ولا يخالجنا أي شك اليوم في أن الكون تركيب ديناميكي، بمعنى أنه يتسع بوصفه كلا وأن إمكانية تقلصه في المستقبل كامنة في الرصدات والنظريات الحديثة.

ويرى بعض العلماء المحدثين أنه إذا استبدلنا الافتراض الخامس بالافتراض أن الكون يتسع باستمرار حسب قانون هبل، وإذا أبقينا الافتراضات الباقية كما هي في نظرية أولبرز باستثناء التعديل في الافتراض الأول المقترح أعلاه، لتوصلنا إلى مقدار لمجمل الطاقة الإشعاعية يتفق وظلمة السماء في الليل. والسبب في ذلك هو: (أ) أن الطاقة التي تصلنا من جسم مشع يبتعد عنا تقل كلما ازدادت سرعته حتى تصل إلى الصفر عندما تصل سرعته سرعة الضوء؛ (ب) أن تمدد الكون يدل على أن عمر الكون محدود، وأن الكون المرئي محدود أيضاً. وهكذا، فإنّ أولئك العلماء يرون أن ظلمة السماء في الليل دلالة شبه أكيدة على أن الكون تركيب ديناميكي يتسع باستمرار. ويرى آخرون بأن محدودية عمر النجوم هي المسؤولة بصورة أساسية عن هذه الظاهرة. وما زال النقاش في هذا الأمر محتدماً.

المراجع الرئيسية

1) أبو النصر الفارابي، كتاب آراء أهل المدينة الفاضلة، دار المشرق، بيروت (1991).

2) الحسن بن الهيثم، الشكوك على بطلميوس، تحقيق د. عبدالحميد صبرة، د. نبيل الشهابي، مطبعة دار الكتب، القاهرة (1971).

3) هشام غصيب، جولات في الفكر العلمي، دار الفرقان، عمّان (1985).

4) هشام غصيب، المغزى الحضاري التاريخي للعلم، الجمعية العلمية الملكية، عمّان، (1986).

5) هشام غصيب، الطريق إلى النسبية، الجمعية العلمية الملكية والمنظمة الإسلامية للتربية والعلوم والثقافة، عمّان (1988).

6) هشام غصيب، جدل الوعي العلمي، الجمعية العلمية الملكية والمؤسسة العربية للدراسات والنشر، عمّان (1992).

7) عمر فروخ، تاريخ العلوم عند العرب، دار العلم للملايين، بيروت (1980).

8) عمر فروخ، بحوث ومقارنات في تاريخ العلم وتاريخ الفلسفة في الإسلام، دار الطليعة، بيروت (1986).

9) مؤيد الدين العرضي، علم الهيئة، سلسلة تاريخ العلوم عند العرب (2)، تحقيق د. جورج صليبا، مركز دراسات الوحدة العربية، بيروت (1990).

10) Al-Bitruji, On the Principles of Astronomy, trans. by Goldstein, B., Yale (1971).

11) Althusser, L., For Marx, trans. by Ben Brewster, New Left Review Editions, London (1997).

12) Althusser, L., Lenin and Philosophy and Other Essays, trans. by Ben Brewster, New Left Review Editions, London (1977).

13) Althusser, L., Reading Capital, Trans. by Ben Brewster, New Left Review Editions, London (1977).

14) Aristotle, The Works of Aristotle, Vols. I and II, Great Books of the Western World, Chicago (1978).

Asimov, I., The Universe, Penguin, London (1971). (15
Bernard Cohen, I., The Newtonian Revolution, Cambridge (16
University Press (1983).
Bernard Cohen, I., Newton's Discovery of Gravity, Scientific (17
American, August 1981.
Bernard Cohen, I., The Birth of a New Physics, Heinemann, (18
London (1968).
Bogomolov, A., History of Ancient Philosophy, Progress, Moscow (1985). (19
Brehme, R., New Look at the Ptolemaic System, American Journal (20
of Physics, Vol. 44, No. 6, June 1976.
Brush, S., History of Physics, American Journal of Physics, 55(8), (21
August 1987.
Copernicus, N., On the Revolutions of the Heavenly Spheres, trans, (22
by Wallis, C., in: Ptolemy, Copernicus and Kepler, Vol. 16, Great Books of the Western World, Chicago (1978).
Descartes, R., Philosophical Writings, Trans. by Anscombe, E., (23
Nelson, London (1969).
Drake, S., Newton's Apple and Galileo's Dialogue, (24
Scientific American,August 1980.
Eddington, A., The Expanding Universe, Cambridge University (25
Press (1952).
Engets, F., Dialectics of Nature, Progress, Moscow (1974). (26
Euclid, The Thirteen Books of Euclid's Elements, trans. by Heath, T., (27
Great Books of the Western World, Chicago (1978).
Evans, J., On the Function and the Probable Origin of (28
Ptolemy`s Equant, American Journal of Physics, 52(12), December 1984.
Franklin, A., Principle of Inertia in the Middle Ages, American (29
Journal of Physics, 44(6), June 1976.
Gamow, G., The Creation of the Universe, Mentor, New York (1957) (30
Galileo Galilei, Dialogue Concerning the Two Chief World (31
Systems: Ptolemaic and Conpernican, trans. by Drake, S., California University Press, Berkeley (1967).

Galileo Galilei, Dialogues Concerning Two New Sciences, trans. by Crew, H. & de Salvio, A., Dover, New York (1954). (32
Galileo Galilei, Discoveries and Opinions of Galileo, trans. by Drake, S., Anchor, New York (1957). (33
Gingerich, O., Islamic Astronomy, Scientific American, April (1980). (34
Grant, E. (ed.), A Source Book in Medieval Science, Harvard (1974). (35
Grant, E., Physical Science in the Middle Ages, John Wiley, New York (1971). (36
Harre, R., The Method of Science, Wykeham, London (1970). (37
Hawking, S. and Israel, W. (eds.), 300 Years of Gravitation, Cambridge University Press (1987). (38
Heisenberg, W., Physics and Philosophy, Allen and Unwin, London (1971). (39
Holmyard, E., Alchemy, Pelican Books, Penguin, England (1968). (40
Hurd, D. and Kipling, J. (eds.), The Origins and Growth of Physical Science, Vols. 1, 2, Penguin, London (1964). (41
Isaac Newton, Mathematical Principles of Natural Philosophy, trans. by Motte, A., and Optics, in: Newton and Huygens, Great Books of the Western World, Chicago (1978). (42
Koestler, A., The Sleepwalkers, Penguin, London (1959). (43
Kuhn, T., The Copernican Revolution, Harvard (1959) . (44
Kuhn, T., The Essential Tension: Selected Studies in Scientific Tradition and Change, Chicago University Press (1977). (45
Kuhn, T., The Structure of Scientific Revolutions, Chicago (1970). (46
Layzer, D., Constructing the Universe, Scientific American Libray, New York (1984). (47
Leibniz, Philosophical Writings, trans. by Morris, M., Dent. London (1984). (48
Losee, J., A Historical Introduction to the Philosophy of Science, Oxford (1972). (49
Nasr, S., Islamic Cosmological Doctrines, Thames and Hudson, London (1978). (50

Pagels, H., Perfect Symmetry: In Search for the Beginning of Time, (51
Bantam, New York (1986).
Pancheri, Pierre Gassendi, A Forgotten but Important Man in the History (52
of Physics, American Journal of Physics, 46(5), May 1978.
Palter, R. (ed.), The Annus Mirabilis of Sir Isaac Newton 1666-1966, (53
M.I.T. (1970).
Pascal, B., Pensees, trans. by Cohen, J., Penguin Classics (1961). (54
Plato, The Dialogues of Plato, Great Books of the Western World, (55
Encyclopedia Britannica, Chicago (1978).
Plotinus, The Six Enneads, trans. by Mackenna, S. & Page, B., Great (56
Books of the Western World, Chicago (1978).
Porter, R. (ed.), Man Masters and Nature, BBC, London (1987). (57
Ptolemy, C., The Almagest, trans. by Taliaferro, R., in: Ptolemy, (58
Copernicus and Kepler, Vol. 16, Great Books of the Western World,
Chigaco (1928).
Roller, D., Greek Atomic Theory, American Journal of Physics, (59
49(3), March 1981.
Rupert Hall, A. & Boas Hall, M., A Brief History of Science, Signet, (60
New York (1946).
Rupert Hall, A., From Galileo to Newton, Bover, New York (1981). (61
Said, H. (ed.), Ibn Al-Haitham, Proceedings of the Celebrations of 1000th. (62
Anniversary Held under the Auspices of Humdard National Foundation,
Pakistan, November 1969.
Sarton, G., A History of Science (Ancient Science Through the (63
Golden Age of Greece), Harvard (1966).
Sarton, G., A History of Science (Hellenistic Science and Culture in (64
the Last Three Centuries B.C.), Harvard (1959).
Scott, G., A History of Mathematics, Taylor and Francis, London (1969). (65
Shea, W., Galileo`s Intellectual Revolution, Macmillan, London (1972). (66
Singh, J., Modern Cosmology, Penguin (1970). (67
Smart, J. (ed.), Problems of Space and Time, Macmillan, (68
London (1964).

Steele, D., The History of Scientific Ideas, Hutchinson, London (1970). (69
Taylor, A., Plato: The Man and His Work, Methuen, London (1960). (70
Thayer, H. (ed.), Newton's Philosophy of Nature, Hafner, (71
New York (1965).
The Project Physics Course, Unit 2, Motion in the Heavens, Holt, (72
Rinehart and Winston, New York (1970.

هل نشأ الكون من العدم؟

المضمون الفكري لنظريّة النسبيّة العامّة لآينشتاين
(الأسس والمبادئ والاختبارات الأولى)

(نشر عام ١٩٩٩)

(١) درب العلم

درب الإبداع في العلم درب شديد الوعورة. وكذلك الأمر بالنسبة إلى درب استيعاب المفهومات العلمية وفهمها. فاستيعاب الأفكار العلمية، التي في جلها تتخطى المألوف والمعتاد، يستلزم اهتماماً وتركيزين متواصلين وتدرّجاً في تقديم المفهومات وبنائها، والأهم من ذلك كله، صبراً كبيراً في تدبّر الأفكار وتحليلها واختبارها وتطبيقها، وتواضعاً جماً في الجزم بصحة هذه الفكرة أو تلك، وتأنياً متناهياً في إطلاق الأحكام والحسم، وتفادي الاستهانة بالأفكار واختزالها وإفراغها من محتواها وتضخيم بعضها على حساب بعضها الآخر. فهناك من يصيبه الغرور المعرفي الذي يولد استهانة بالعلم وأفكاره، فتراه «يدحض» داروين في صفحة أو صفحتين، كما يفعل دعاة الفكر الديني (مثلاً، البوطي). وهناك من يدفعه حماسه لمعتقد ما إلى اختصار الطريق، والظن بأنه ختم العلم واستوعبه لمجرد أنه قرأ كتاباً علمياً مبسطاً أو كتابين، والتسرع في الحسم وإصدار الأحكام انطلاقاً من فهمه المتواضع غير الدقيق للأفكار العلمية (كما يفعل مثلاً سعيد حوى). فالدعاة الدينيون عادة لا ينشدون الدقة في فهم الأفكار العلمية وعرضها ولا يبتغون الحقيقة في تشعبها وتعقدها. إنهم غير معنيين بالحقائق في حدّ ذاتها. أما ما يبتغونه حقاً فهو الأخذ من سطح العلم ما يساعدهم في ترسيخ معتقدات معينة على اعتبار أن الوسيلة تبرر الغاية، وهم بذلك إنما يشوهون العلم ومعتقداتهم النبيلة في آن. بل إن هذه المعتقدات ذاتها تحث على معرفة الحقيقة والالتزام بها، بل والموت في سبيلها. فالمشكلة إذاً لا تكمن في هذه المعتقدات في حدّ ذاتها، وإنما في أولئك الدعاة الذين يخدمون مصالح اجتماعية معينة وينفذون أهدافاً آيديولوجية معينة باسم هذه المعتقدات النبيلة. وهذا بالضبط ما حاول أن يبينه المفكر المصري المعروف نصر حامد أبو زيد، فكان أن انهالت عليه الضربات والهجمات الظلامية من كل حدب وصوب وتعرّض لحصار ظلامي حاقد من جانب المؤسسات اللاهوتية ودعاتها، لا

لشيء إلا لأنه حاول أن يجسد معتقداته في ممارسة موضوعية تلتزم بالعلم وقيمه وشرائطه التزاماً تاماً حيال أي موضوع، بما في ذلك دراسة النص المقدّس.

وإني لأورد هذه الأفكار مقدمة لسلسلة من المجلدات أنوي كتابتها عن علم الكون (الكوزمولوجي) والتطورات المذهلة التي شهدها في العقود الأربعة الأخيرة.

وقد ارتأيت ضرورة إيراد هذه المقدمة، التي تؤكد قيم الصبر والأناة والتدرج، بالنظر إلى ما يزخر به هذا الموضوع من إثارة قد تدفع القارئ إلى الرغبة الجامحة في الوصول إلى النتائج المذهلة من دون أن يكون مستعداً لمجابهتها ومجهزاً بالأدوات الفكرية اللازمة لذلك. فلا سبيل لاستيعاب هذه النتائج ومغزاها الإنساني والكوني من دون استيعاب تدريجي لأفكار تجريدية متعلقة بالمكان والزمان والمادة والهندسة الرياضية والحركة تجد تجسيدها في النظريات الأساسية في الفيزياء: ميكانيك نيوتن، وكهرمغناطيسية ماكسويل، ونسبية آينشتاين، ونظرية الكم. لذلك، فإننا نناشد القارئ أن يتحلى بالصبر، ويقرأ ما سأكتبه في هذه السلسلة بعناية وروية ودقة، ويبذل من الجهد الفكري ما يمكنه من استيعاب الأفكار المطروحة، ويتدرج في فهم هذه الأفكار فيمتنع عن حرق مراحل الفهم، إذا أراد أن يصل إلى فهم حقيقي لأفكار علم الكون ومصّ رحيقه والتمتع الفعلي والعميق باستيعاب نتائجه المثيرة. فبقدر ما يبذل من مجهود جدي، بقدر ما سيشعر بمتعة استيعاب المعرفة العلمية ونتائجها المذهلة بحق.

وأبدأ هذه السلسلة بمجلد يعنى بالمضمون الفكري لنظرية النسبية العامة لآينشتاين، وهي الأداة الرئيسية اليوم في فهم الظاهرات الكونية والفلكية. إذ إنها تشكل القاعدة النظرية الرئيسية لفيزياء النجوم النيوترونية والثقوب السوداء والبيضاء والمعابر النجمية wormholes وأشباه النجوم quasars ونظرية الكون الحديثة (بنية الكون ونشأته). وأنطلق في عرض المضمون الفكري لهذه النظرية من النقد الذي وجهه الفيزيائي والفيلسوف النمساوي، إرنست ماخ، إلى ميكانيك نيوتن في نهاية القرن التاسع عشر. ثم أبين كيف أعاد الفيزيائي الألماني، ألبرت آينشتاين، صوغ هذا النقد بلغة التصور المجالي للمادة، وكيف طوره حتى توصل إلى مبدأ

التكافؤ. وأشرح كيف سخر آينشتاين هذا المبدأ وطبقه على زمكان النسبية الخاصة ليصل إلى أن الزمكان يطيع هندسة غير هندسة إقليدس المستوية المألوفة، والى أن الجاذبية ليست سوى ظاهرة هندسية تعبر عن التركيب الهندسي للزمكان. وأبين كيف قادت هذه التبصرات آينشتاين إلى معادلاته المجالية التي تعبر عن القانون الأساسي للجاذبية في نظرية النسبية العامة. كما أعالج أهم النتائج المبكرة التي تم اشتقاقها من نظرية النسبية العامة والتجارب التي أجريت لاختبارها.

وأنهي هذا المجلد بعرض موجز لتاريخ تكون مفهوم الثقوب السوداء ارتكازاً إلى نظرية النسبية العامة.

أما المجلد الثاني، فسيعنى بتطبيقات نظرية النسبية العامة على الظاهرات الفلكية، مركزاً على فيزياء الثقوب السوداء وأمواج الجاذبية؛ تلك الظاهرات الفلكية التي تشكل أهم وأغرب تنبؤ لنظرية النسبية العامة. لكن التطبيق الأكبر الذي سيعنى به هذا المجلد هو تطبيق النسبية العامة على نظام الكون بوصفه كلاً زمكانياً، مركزاً على نظرية الانفجار الكبير التي جاءت ثمرة الزواج بين نظرية النسبية العامة والفيزياء النووية.

وسيكون تركيزنا في كل ذلك على المضمون الفكري للنظريات التي نعالجها، متفادين المعالجة الرياضية. وهناك سببان رئيسيان لذلك. فالكتاب موجه بصفة أساسية إلى القارىء الجدي المعني بالفكر والأفكار وتنمية الوعي، بغض الطرف عن تخصصه الدقيق. وهو بالتأكيد ليس موجهاً فقط إلى المتخصصين في فيزياء الكون، وإنما إلى كل مثقف يأخذ الفكر وتجديده المتواصل ووحدته على محمل الجد. أما السبب الثاني، والمرتبط عضوياً بالسبب الأول، فهو أننا نريد من هذا الكتاب أن يكون فعلاً ثقافياً، وليس فعلاً أكاديمياً بحتاً. نريده أن يكون أداة في زلزلة الوعي السائد في الوطن العربي وتحريكه وتحديثه، أي سلاحاً في معركة التنمية والتحديث التي يخوضها الوطن العربي اليوم. إننا نريد من الوعي العربي السائد أن يمزق الشرنقة المحدودة التي تكبله لينطلق في رحاب لا نهائية الثورة العلمية. إننا نريده أن يبصر بكل ما أوتي من نظر ثاقب ذلك الصرح الفكري المهيب الذي بناه علماء العصر الحديث،

والذي يؤكد القوة الخلاقة للإنسان ويبعث الاعتزاز والأمل في قلب الإنسان أنى كان. نريده إذاً أن يكون فعلاً ثقافياً مزلزلاً يبعث القلق والتمرد في قلب الوعي المستكين.

(٢) نظرية النسبية العامة

نشر ألبرت آينشتاين أبحاثه الرئيسية التي تضمنت نظرية النسبية العامة في أنضج صورها عام ١٩١٥ في برلين، عاصمة ألمانيا. وجاءت هذه النظرية المحكمة حلاً لتناقضات ميكانيك نيوتن ونظرية النسبية الخاصة بصدد الحركة والجاذبية والمكان والزمان. ومثلما اضطر نيوتن في النصف الثاني من القرن السابع عشر إلى ابتكار حساب التفاضل والتكامل واستعماله من أجل التعبير عن المكيانيك الكلاسيكية وصوغها، فقد اضطر آينشتاين إلى إدخال فروع جديدة في الرياضيات إلى الفيزياء، وفي مقدمتها هندسة ريمان وجبر التنسورات، من أجل التعبير عن أفكار النسبية العامة وعلاقاتها وقوانينها. لكن آينشتاين لم يكن مضطراً لابتكار هذه الفروع، كما كان عليه الحال مع نيوتن، وإنما وجد هذه الفروع جاهزة في بلده ألمانيا، فما كان عليه سوى التنقيب عنها وتبنيها ودراستها ثم تسخيرها بفاعلية للتعبير عن أفكاره الفيزيائية الجديدة. والجدير بالذكر هنا أن آينشتاين لم يتميز عن أقرانه بقدراته الرياضية، بل على العكس من ذلك، فقد كان الكثيرون منهم يتفوقون عليه في هذا المجال. لكنه كان يتفوق عليهم جميعاً في حسه الفيزيائي العميق وقدرته على الغوص في أعماق الطبيعة. لقد كان آينشتاين فيزيائياً (فيلسوفاً من فلاسفة الطبيعة) في المقام الأول، وليس رياضياً. وكان من حسن حظه أن وجد تحت تصرفه فروعاً رياضية متطورة كان قد أبدعها غاوس وريمان وكريستوفل وهلبرت وغيرهم من رياضيي ألمانيا العظام في القرن التاسع عشر ومطلع القرن العشرين، فهضمها وسخرها ببراعة في التعبير عن أفكاره الفيزيائية الجريئة. وكان آينشتاين يلجأ دوماً إلى التعبير عن أفكاره بأبسط طرق رياضية ممكنة. هذا ما سبق أن فعله عام ١٩٠٥ حين وضع نظرية النسبية الخاصة، ونظرية الفوتونات، ونظرية الحركة البروانية، وعام ١٩١١، حين صاغ مبدأ التكافؤ، في الوقت الذي كان يلجأ فيه أقرانه إلى أعقد الأساليب الرياضية للتعبير عن أفكار مشابهة (مثلاً لورنتس، إبراهام، بوانكاريه،

فون لاوه). لكن شمول نظرية النسبية العامة وعمقها دفعه دفعاً إلى إدخال أعقد الفروع الرياضية إلى الفيزياء. فطبيعة الموضوع وحجم الطموح والهدف هو الذي دفعه إلى تبني هذه الفروع المعقدة.

إن نظرية النسبية العامة هي في جوهرها نظرية في المكان والزمان والجاذبية. وهي تفترض علاقات موضوعية معينة بين هذه الأطراف الثلاثة. وهي نظرية مجالية في أساسها، بمعنى أن المفهوم الجوهري فيها هو مفهوم المجال، لا مفهوم الجسيم. ففي الوقت الذي تنطلق فيه ميكانيك نيوتن من مفهوم الجسيم (أي، النقطة المكانية التي تتحرك وتحمل كتلة وطاقة) وتتصور العالم على صورة وعاء مكاني لانهائي يحتوي حشداً كبيراً من الجسيمات المتفاعلة معاً، فإن النسبية العامة تنطلق من مفهوم المجال (امتداد متصل من الطاقة في المكان والزمان) وتتصور العالم، بما في ذلك المكان والزمان، على صورة مجالات ممتدة ومتغيرة تتمظهر بصورة مختلفة. فالعالم وفق النسبية العامة فضاء متعدد الأبعاد (رباعي الأبعاد على الأقل) ذو مضمون مجالي يتمظهر على صورة حشد من الجسيمات المتفاعلة معاً. فالمجال هو الأصل، والجسيم هو المشتق، بعكس ما هو الحال مع ميكانيك نيوتن التي تعتبر الجسيم الأصل في كل مظهر من مظاهر الوجود.

إن النسبية العامة هي تتويج للتصور المجالي للكون، الذي بدأ مع مايكل فرادي، الفيزيائي الانجليزي الذي وصف المجال الكهرمغناطيسي بدلالة ما أسماه «أنابيب القوة»، وتبلور رياضياً على يدي جيمس كلارك ماكسويل، الفيزيائي الإسكتلندي الذي وضع نظام المعادلات التفاضلية الذي يحكم الظاهرات الكهرمغناطيسية، وترسخ على يدي آينشتاين في النسبية الخاصة، ووصل أوجه على يدي آينشتاين أيضاً في النسبية العامة، تلك النظرية التي أثبتت الأيام أنها أداة لا غنى عنها في دراسة الكون بوصفه نظاماً مادياً متكاملاً.

(٣) مبادىء النسبية العامة

تعد نظرية النسبية العامة الأداة النظرية الرئيسية في دراسة الكون بوصفه نظاماً موحداً متكاملاً. بل يمكن القول إن دراسة الكون بوصفها علماً حقيقياً بدأت بالنسبية العامة. فما إن نشر آينشتاين بحثه الرئيسي حول النسبية العامة عام ١٩١٥ حتى ألحقه ببحث آخر يتضمن تطبيقاً للنظرية الجديدة على الكون بوصفه نظاماً موحداً متكاملاً عام ١٩١٧. وكان ذلك إيذاناً ببدء علم الكون، أي دراسة الكون علمياً. وقد سارع آينشتاين إلى تطبيق نظريته على الكون بوصفه كلاً بالنظر إلى الجوهر الكوني لهذه النظرية، إذ إنها تستلزم مثل هذا التطبيق في جوهرها وبنائها الداخلي. إنها نواة لعلم الكون في أساسها وصميمها. فترابطها الداخلي يقضي بتطبيقها على الكون بوصفه كلاً، بمعنى أن النظرية لا تكتمل في أساسها وتظل ناقصة ما لم تطبق على الكون بوصفه كلاً.

وترتكز النسبية العامة إلى المبادىء الأساسية الآتية:

١- مبدأ النسبية العامة: تنطلق هذه النظرية من فكرة أنه ليس هناك مرجع إسناد (أي اطار مادي تجري منه المشاهدات والقياسات) يتميز عن غيره من مراجع الإسناد، وذلك بعكس ما جاء في ميكانيك نيوتن من أن هناك مكاناً مطلقاً أو أثيرا مطلقاً ساكناً يشكل مرجعاً مطلقاً لجميع الأجسام والأجرام والحركات. فالنظرة التي كانت سائدة قبل آينشتاين هي أن قوانين الطبيعة لا تأخذ شكلها الطبيعي المتناسق والبسيط ولا تكتسب معنى فيزيائياً دقيقاً وواضحاً إلا بالنسبة إلى المكان (الأثير) المطلق. أما إذا نظرنا إلى هذه القوانين من مرجع آخر (مثلاً جسم يتحرك بالنسبة إلى المكان المطلق) فسنجد أنها تأخذ أشكالاً معقدة غير متناسقة وعديمة المعنى الفيزيائي الواضح. وبالمقابل، فإن النسبية العامة ترى أنه ليس هناك دليل على وجود مكان مطلق أو أي مرجع إسناد متميز. فلا فرق حركياً بين الأرض والشمس ومجرة آندروميدا. فهي جميعاً مكافئة لبعضها حركياً ومن حيث صلاحيتها مراجع

إسناد للمشاهدة والقياس. وقد حاول العلماء قياس حركة الأرض بالنسبة إلى المكان المطلق (الأثير) في نهاية القرن التاسع عشر، فلم يجدوا أي أثر لمثل هذه الحركة المطلقة (مايكلسون ومورلي مثلاً). لماذا إذاً نتمسك بتصور غامض لا يدعمه أي دليل رصدي أو تجريبي؟ فلنطرحه جانباً إذاً ولنعد صوغ قوانين الطبيعة بما ينسجم وغيابه. ولنؤكد على فكرة أن قوانين الطبيعة ينبغي أن تحافظ على شكلها وبنائها الداخلي بغض الطرف عن مرجع الإسناد المعتمد. ولنصفها على هذا الأساس الذي يعرف باسم مبدأ النسبية العامة. بذلك تحافظ قوانين الطبيعة على شكلها سواء كنا على الأرض أو الشمس أو مذنب هالي أو مجرة تتحرك بسرعة قريبة من سرعة الضوء بالنسبة إلينا. وعليه، تكون هذه القوانين كونية وشاملة بحق. فهي لا تتأثر بموقع المشاهد ولا بحركته في المكان. وقد وجد آينشتاين ضالته في ما يسمى جبر التنسورات لصوغ قوانين الطبيعة بما يضمن ثبات أشكالها مهما كان مرجع الإسناد الذي نجري منه مشاهداتنا وقياساتنا.

٢- وحدة المكان والزمان: ترى النسبية العامة (والخاصة) أن المكان ليس معزولاً عن الزمان، وأنهما يشكلان وحدة هندسية واحدة، أي نظاماً هندسياً واحداً. وهذا يعني أننا إذا انتقلنا من مرجع إسناد إلى مرجع إسناد آخر، فإن الأبعاد المكانية لا تتحول ولا تتغير بمعزل عن الزمان، وإنما بالعلاقة معه. فالزمان بعد هندسي ينتمي إلى النظام الهندسي ذاته إلى تنتمي إليه الأبعاد المكانية. ولما كانت الأبعاد المكانية ثلاثة. وكان الزمان يشكل بعداً واحداً، فإن ذلك يعني أن النظام الهندسي الكوني هو فضاء رباعي الأبعاد، أي يتكون من أربعة أبعاد. ويعرف هذا النظام بالمتصل الزمكاني (الزماني ـ المكاني)

٣- كوننا لاإقليدي، أي إن المتصل الزمكاني لايطيع الهندسة المستوية المألوفة والمرتبطة باسم الرياضي الإغريقي إقليدس، وإنما يطيع هندسة أخرى أكثر شمولاً تعرف بالهندسة الريمانية، نسبة إلى الرياضي الألماني برنهارت ريمان.

٤- إن الجاذبية ليست سوى انعكاس للخصائص الهندسية للمتصل الزمكاني، وبالتحديد فهي درجة انحناء هذا المتصل في نقطة ما.

٥- إن القوى الناتجة عن تسارع الأجسام وقوة الجاذبية تنتمي إلى الطبيعة ذاتها، أي إن مجالاً واحداً يصف هذه القوى جميعاً.

وسنوضح تفصيلياً ما نعنيه بهذه المبادئ العامة في الفصول اللاحقة.

(٤) مبدأ النسبية الخاصة

ذكرنا في الفصل السابق المبادىء الأساسية التي ترتكز إليها نظرية النسبية العامة، أداتنا النظرية الرئيسية في دراسة الكون بوصفه نظاماً مادياً موحداً ومتكاملاً. وكان في مقدمة هذه المبادىء مبدأ النسبية العامة الذي شرحناه باختصار. ولعله من المفيد أن نتوسع في شرح هذا المبدأ بالنظر إلى أهميته القصوى.

تعود جذور مبدأ النسبية العامة إلى الفيزيائي الإيطالي المعروف، غاليليو غاليلي، مؤسس الفيزياء التجريبية، الذي توصل إلى صيغة أولية لهذا المبدأ في سياق دحض تصور أرسطوطاليس لحركة الأجسام وترسيخ التصور الكوبرنيكي (نسبة إلى الفلكي البولندي كوبرنيكوس) للكون (مركزية الشمس بدلاً من الأرض).

وكانت النقطة الأساسية في الدفاع عن نظام كوبرنيكوس الشمسي هي أن المرء لا يشعر بحركة الجسم الذي يقف عليه، ومن ثم لا يفرق بين حالة الحركة وحالة السكون فيما يتعلق بالجسم الذي يقف عليه، إذا كانت حركة الجسم طبيعية. وظن غاليليو خطأ أن الحالة الطبيعية هي حالة الحركة الدائرية المنتظمة حول الشمس.

وقد «صوب» الفيلسوف الفرنسي ديكارت والفيزيائي الإنجليزي نيوتن هذا الأمر باعتبارهما الحركة المنتظمة في خط مستقيم، بالنسبة إلى النجوم «الثابتة»، الحركة الطبيعية للأجسام. وأطلق فيما بعد اسم مراجع الإسناد القصورية على الأجسام التي تتحرك بهذه الطريقة. بذلك أصبح مبدأ النسبية الذي وضعه غاليلو ينص على أن قوانين الحركة (الميكانيك) تحافظ على صورها وبناها الداخلية تماماً بالنسبة إلى جميع مراجع الإسناد القصورية. ومعنى ذلك أن هذه القوانين لا تتغير علاقاتها الجوهرية عند الانتقال من مرجع إسناد قصوري إلى مرجع إسناد قصوري آخر، برغم أن بعض الكميات الميكانيكية (كسرع الأجسام مثلاً) تتغير بفعل هذا الانتقال. وبصورة خاصة، فإن قانون نيوتن الثاني، الذي يشكل جوهر ميكانيك نيوتن والذي

ينص على أن القوة الكلية المؤثرة على جسيم تتناسب تناسباً طردياً مع تسارع (أي معدل تغير سرعة) هذا الجسيم، يظل كما هو وبالصورة ذاتها بغض النظر عن مرجع الإسناد القصوري الذي تتم منه المشاهدة أو القياس والرصد.

ومع ذلك؛ مع أن هذا المبدأ لا ينسجم تماماً مع فكرة وجود مرجع إسناد مميز ومطلق (فضاء مطلق، أثير مطلق) نرجع إليه جميع قوانين الطبيعة، إلا أن نيوتن أصرّ على التمسك بفكرة المكان المطلق برغم أن قوانين الحركة لا تساعدنا في الكشف عنه، بل وتتجاهل وجوده كلياً. كما إنه لم يقدّم تفسيراً لكون قوانين الحركة تطيع مثل هذا المبدأ الغريب. أما سبب تمسك نيوتن بفكرة المكان المطلق برغم مبدأ النسبية المشار إليه، فهو متعلق بطبيعة مراجع الإسناد التي تتسارع بالنسبة إلى النجوم الثابتة، والتي سنعالجها في فصول لاحقة.

وقد ساد المنطق الآتي لدى علماء القرن التاسع عشر: لئن كانت الميكانيك عاجزة عن الكشف عن المكان المطلق (الأثير المطلق)، فما الذي يمنع الكهرومغناطيسية والضوء من الكشف عنه؟ فإذا كان المكان المطلق موجوداً بالفعل، فلا بدّ أن تكون هناك وسيلة مادية للكشف عنه. فإذا عجزت الميكانيك في هذا المضمار، فلا بد أن تفلح الكهرمغناطيسية والضوء في ذلك.

وأجري عدد من التجارب لهذا الغرض في غضون القرن التاسع عشر، لكنها أخفقت جميعاً في الكشف عنه. وحاول بعض العلماء في نهاية القرن التاسع عشر إدخال افتراضات عشوائية لتفسير هذه النتائج السلبية. أما آينشتاين، الذي كان يعمل في مطلع القرن العشرين في مكتب براءة اختراع في بيرن في سويسرا، فقد فسر هذه النتائج على أنه ليس هناك مكان مطلق (أثير مطلق)، وأن قوانين الطبيعية جميعاً، سواء أكانت ميكانيكية أم حرارية أم ضوئية أم كهرمغناطيسية، تطيع مبدأ النسبية. ومعنى ذلك أن قوانين الطبيعة في أصنافها كافة لا تتغير في بنائها الداخلي إذ ننتقل من مرجع إسناد قصوري إلى آخر لأنه ليس هناك مكان (أثير) مطلق.

وسمي هذا التفسير الآينشتايني مبدأ النسبية الخاصة. وافترض آينشتاين مبدأ أساسياً آخر مفاده أن سرعة الضوء في الفراغ ثابت من ثوابت الطبيعة، بمعنى أنها

هي نفسها بالنسبة إلى جميع مراجع الإسناد القصورية. ويشكل هذان المبدآن القاعدة التي بنيت عليها نظرية النسبية الخاصة (١٩٠٥).

(٥) قوى نيوتن الوهمية

لاحظ نيوتن أن قوانين الميكانيك لا تفرق بين مرجع إسناد قصوري وآخر. وعنى نيوتن بمرجع الإسناد القصوري نظاماً مادياً يتحرك بسرعة ثابتة في خط مستقيم بالنسبة إلى «النجوم الثابتة». لكنه، مع ذلك، أصرّ على فكرة وجود مكان مطلق (أو وسط أثيري مطلق) يشكل المرجع الطبيعي لكل القوانين والعلائق والظاهرات. لماذا؟ لماذا أصرّ نيوتن على ذلك برغم أن قوانين الحركة لا تفرق بين هذا المكان المطلق المزعوم وبين أي مرجع إسناد قصوري يتحرك بسرعة ثابتة في خط مستقيم بالنسبة إليه؟ فقوانين الحركة لا تشير إلى وجود مكان مطلق، وإنما إلى مبدأ تناسقي معين هو مبدأ النسبية. فلماذا أصرّ نيوتن إذاً على وجود المكان المطلق؟

لئن أدرك نيوتن أن السرعة النسبية، فإنه اعتقد بأن التسارع، وهو المعدّل الزمني لتغير السرعة، مطلق. ومعنى ذلك أن قوانين الحركة تمكننا من الاستدلال على التسارع بالنسبة إلى المكان المطلق وقياسه، وإن كانت لا تمكننا من الاستدلال على السرعة بالنسبة إلى المكان المطلق. وبالطبع فإن وجود تسارع مطلق هو دلالة على وجود مكان مطلق. لذلك أصرّ نيوتن على فكرة المكان المطلق.

ولنحدد معنى ذلك ولنبين أساس اعتقاد نيوتن بأن قوانين الحركة تشير بصورة مباشرة إلى وجود تسارع مطلق.

لا نريد أن ندخل القارىء في تفصيل تجارب نيوتن الفكرية والأخرى الفعلية التي سخرها في دعم تصوره للتسارع المطلق، وإنما سنكتفي بالقول إننا نشعر بالتسارع لكننا لا نشعر بالسرعة. وعلى سبيل المثال، فإن سبب عدم شعورنا بحركة الأرض حول نفسها وحول الشمس هو صغر تسارع هذا الدوران، برغم أن سرعة الدوران كبيرة. فأي إطار مادي لا يتسارع بالنسبة إلى «النجوم الثابتة»، أي مادة الكون، لا نشعر بحركته. لكنه ما إن يبدأ بالتسارع بالنسبة إلى النجوم الثابتة حتى نبدأ نشعر بالحركة بشكل ملحوظ. وهذا أيضاً ما تؤكده تجربتنا اليومية. فنحن لا نشعر بحركة

الطائرة التي نسافر فيها ما دامت تسير بسرعة ثابتة في خط مستقيم.

لكننا نشعر بها تماماً في فترتي الإقلاع والهبوط، أي عندما تتسارع وتتباطأ. وبتعبير أدق، فإننا نشعر في هذه الحال بتأثير قوى غير محددة المصدر. فعندما ندوس على فرامل السيارة مثلاً، فإننا نشعر بقوى تدفعنا وتدفع كل جسم في السيارة إلى الأمام، وهي قوى غير محددة المصدر. وتسمى هذه القوى غير المحددة المصدر أو التفاعل القوى القصورية أو الوهمية. والحق أن وجود هذه القوى، التي عزاها نيوتن إلى تسارع الأجسام بالنسبة إلى النجوم الثابتة (مادة الكون)، هو الذي أقنع نيوتن بوجود تسارع مطلق، ومن ثم مكان مطلق.

ولنوضح فكرة القوى القصورية بتدبر سطح يدور حول محور ثابت على سطح الأرض. إن الجالسين على هذا السطح المتحرك يشعرون بقوى غير محددة المصدر تؤثر عليهم. وبصورة خاصة، فإنهم يشعرون بأن هناك قوة غير محددة المصدر تدفعهم إلى الخارج. وتسمى هذه القوة القوة الطاردة المركزية. ولعلها أكثر القوى القصورية شهرة بين الطلبة. وقد اعتبر نيوتن مثل هذه القوى دلالة على وجود المكان المطلق، وإن كانت قوانين الحركة تطيع مبدأ النسبية، ومن ثم لا تفيدنا في الكشف عن المكان المطلق والسرع بالنسبة إليه. وعليه، فإن فيزياء نيوتن تفترض ضمناً إمكانية الاستدلال على السرعة المطلقة بطرق أخرى غير الطرق المكيانيكية.

هذا ما حاوله فيزيائيو القرن التاسع عشر، وهذا ما أخفقوا في بيانه، الأمر الذي قاد آينشتاين إلى مبدأ النسبية الخاصة الذي ينفي وجود سرعة مطلقة وينفي وجود مكان مطلق.

بيد أن آينشتاين لاحظ التناقض الظاهري بين مبدأ النسبية الخاصة، الذي بنى عليه نظرية النسبية الخاصة، وبين ظاهرة القوى القصورية، التي بنى عليها نيوتن تصوره للمكان المطلق. ذلك أن مبدأ النسبية الخاصة ينفي وجود مكان مطلق، لكنه يميز بين مراجع الإسناد المتسارعة والأخرى غير المتسارعة، فلا ينطبق إلا على الثانية. فهو من جهة ينفي وجود سرعة مطلقة، لكنه في الآن ذاته يقرّ بوجود تسارع مطلق. إن هذا التناقض هو الذي قاد آينشتاين إلى نظرية النسبية العامة، كما سنبين لاحقاً.

(٦) وحدة الكون وفق ماخ

تحدثنا عن مبدأ النسبية الخاصة، وأشرنا إلى أنه ينطوي على تناقض جوهري في صميم بنائه الداخلي. فهو ينطوي على نفي وجود مكان مطلق بالنظر إلى نفيه إمكانية التمييز بين مرجع إسناد قصوري وآخر. لكنه، في الآن ذاته، يؤكد على وجود مكان مطلق بالنظر إلى تمييزه بين مراجع الإسناد القصورية وبين مراجع الإسناد المتسارعة. فإقراره بوجود تسارع مطلق هو نوع من الإقرار بأن بوجور مكان مطلق. إنه إذاً يؤكد الشيء ونقيضه في آن. وقد لاحظ آينشتاين هذا التناقض منذ اللحظة التي وضع فيها نظرية النسبية الخاصة عام ١٩٠٥، وانصب جلّ جهده في العقد التالي على محاولة حل هذا التناقض. ويمكن القول إن نظرية النسبية العامة (١٩١٥) جاءت حلاً متطوراً لهذا التناقض وغيره من تناقضات الفيزياء الكلاسيكية. وقد أدرك آينشتاين أن جوهر المشكلة يكمن في مشروعية التمييز بين مراجع الإسناد القصورية والأخرى المتسارعة. وتركز بحثه في الفترة (١٩٠٥-١٩١٥) على إيجاد وسيلة منطقية مقنعة لإزالة هذا التمييز. وقد ارتكز نقد آينشتاين لهذا التمييز إلى الوسيلة التي سبق أن اتبعها الفيلسوف والفيزيائي النمساوي إرنست ماخ في نقده لهذا التمييز. وكان الفرق الرئيسي بين طريقة ماخ وطريقة آينشتاين أن الأولى اعتمدت التصور الجسيمي للمادة وتفاعلاتها أساساً لها، فيما ابتعت الثانية التصور المجالي أساساً. ولنبدأ بطريقة ماخ أولاً.

كما أسلفنا، فقد ارتكز نيوتن في تمييزه بين نمطي مراجع الإسناد المذكورين، ومن ثم في تبنيه فكرة المكان المطلق، إلى وجود قوى قصورية (وهمية) في مراجع الإسناد المتسارعة، مثل القوة الطاردة المركزية فكيف فسّر ماخ وجود هذه القوى ارتكازاً إلى نفيه وجود مكان مطلق؟

إن القوى القصورية في نظر ماخ ليست دليلاً على وجود تسارع مطلق، لسبب بسيط، وهو أنه ليس هناك معنى إجرائي لمفهوم التسارع المطلق. فلا معنى بتاتاً

للقول إن هذا الجسم أو ذاك يتحرك أو يتسارع بالنسبة إلى المكان المطلق. بل، وليست هناك حاجة إلى افتراض ذلك لتفسير وجود القوى القصورية. فإذا دققنا في الأمر، وجدنا أن هذا الجسم أو ذاك يتسارع بالنسبة إلى ما أسماه نيوتن، ومن سبقه من علماء، «النجوم الثابتة»، أي مادة الكون في مجملها. فالجسم لا يتسارع بالنسبة إلى فراغ أو مكان مطلق موهوم، وإنما يتسارع بالنسبة إلى مادة الكون التي تحمل معنى إجرائياً محدداً ولها وجود تفاعلي إجرائي محدد. فإذا أقررنا بهذا المعنى، كان من الطبيعي أن نعزو القوى القصورية إلى تأثير مادة الكون على الجسم المتسارع بالنسبة إليها. وهذا يعني أن كل جسم يتفاعل بصورة أو بأخرى مع مادة الكون، وإن هذا التفاعل يعتمد على التسارع النسبي للجسم المعني، أي تسارعه بالنسبة إلى مجمل مادة الكون.

ولنوضح فكرة ماخ هذه بمزيد من التفصيل.

بدلاً من أن نعزو القوى القصورية إلى أثر فراغ تسميه المكان المطلق على الأجسام، فمن الأولى أن نعزوها إلى تفاعل جاذبي قائم بين الجسم المعني وبين مادة الكون المحيطة فيه من كل جانب، آخذين بعين الاعتبار أن هذا التفاعل لا يعتمد فقط على المسافات الفاصلة بين الأجسام المتفاعلة، وإنما يعتمد أيضاً على الحركة النسبية بينها (السرعة والتسارع). فالعلة تكمن إذاً في نظرية نيوتن في الجاذبية (قانون الجاذبية العام). إذ افترض نيوتن أن قوة الجاذبية مطلقة لا تتأثر بالحركة النسبية للأجسام المتفاعلة معاً. لكنه ليس هناك ما يحتم علينا أن نلتزم بهذا الافتراض. بل إن التطورات العلمية في القرنين اللاحقين لنيوتن قللت من احتمال صحة هذا الافتراض، وخصوصاً بالنظر إلى تعرّفنا على تفاعل أساسي تعارض خصائصه هذا الافتراض تعارضاً تاماً، وهو التفاعل الكهرمغناطيسي الذي يعتمد على السرعة والتسارع النسبيين للشحنات الكهربائية المتفاعلة معاً. وعلى سبيل المثال، فلو نظرنا إلى شحنة كهربائية من مرجع إسناد ساكن بالنسبة إليها، لرأينا أن المجال الذي تولده هو مجال كهرستاتيكي يطيع قانون كولم المعروف والذي يشبه قانون نيوتن في الجاذبية. ولكن، لو نظرنا إليه من مرجع إسناد يتحرك بسرعة ثابتة في خط

مستقيم بالنسبة إلى الشحنة، لرأينا أنها تولد مجالاً مغناطيسياً، إلى جانب المجال الكهرستاتيكي، يعتمد على السرعة النسبية. أما إذا كان مرجع الإسناد يتسارع بالنسبة إلى الشحنة، فسنرى أن الشحنة تولد، بالإضافة إلى كل ما سبق، إشعاعاً كهرمغناطيسياً (كالضوء) يعتمد على التسارع النسبي. فإذا كان الأمر كذلك مع التفاعل الكهرمغناطيسي، فلماذا لا يكون كذلك مع التفاعل الجاذبي؟ وإذا كان الأمر كذلك بالفعل، فمعنى ذلك أن مراجع الإسناد المتسارعة لا تختلف من حيث الجوهر عن مراجع الإسناد القصورية. فهي لا تختلف عن الأخيرة إلا من حيث التفاعلات التي تتعرض إليها. وهذا يعني أيضاً أن القوى القصورية هي من طينة قوة الجاذبية. ويعرف تفسير ماخ الآنف ذكره بمبدأ ماخ.

(٧) ماخ بلغة آينشتاين

لعل أكثر فيزيائي تأثر آينشتاين بعمله في صوغ نظريتي النسبية الخاصة والنسبية العامة هو إرنست ماخ (وهو ماخ ذاته الذي جعله لينين موضوعاً لنقده المادي في كتابه المعروف "المادية والنقدية التجريبية"). وبصورة خاصة، فقد تأثر آينشتاين بنقد ماخ للتصور النيوتني للقوى القصورية وبالاقتراح الذي وضعه بصدد مصدر هذه القوى (مبدأ ماخ)، وهو ما عرضناه وشرحناه في الفصل السابق. وقد نبه مبدأ ماخ هذا آينشتاين إلى النقاط الآتية التي ساعدته لاحقاً في صوغ نظرية النسبية العامة:

١ـ نبه ماخ آينشتاين إلى إمكانية إزالة التمييز بين مراجع الإسناد القصورية ومراجع الإسناد المتسارعة.

٢ـ أشار ماخ إلى ضرورة إعادة النظر في نظرية نيوتن في الجاذبية إذا شئنا أن نزيل هذا التمييز.

٣ـ أشار ماخ إلى إمكانية تفسير القوى القصورة بدلالة التفاعل الجاذبي، ومن ثم إلى إمكانية اعتبار القوى القصورية وقوة الجاذبية تفاعلاً واحداً موحداً يتغير شكلاً من مرجع إسناد إلى آخر وليس جوهراً، تماماً كما هو الحال مع التفاعل الكهرمغناطيسي.

٤ـ أوحى ماخ بأن هناك مجالاً جاذبياً كونياً يخضع إليه كل جسم في الكون ويتغير شكلاً حسب مرجع الإسناد الذي ننظر ونقيس منه.

وقد تبنى آينشتاين هذه الأطروحات الماخية، ولكن بعد أن أعاد صوغها على أساس تصوره المجالي للوجود المادي. ذلك أن فلسفة آينشتاين الطبيعية كانت ترتكز إلى فكرة أسبقية المجال على الجسيم وتعتبر الأول الحقيقة الباطنية الجوهرية للوجود المادي، في حين أن وضعية ماخ كانت تدفعه إلى فكرة أسبقية الجسيم على المجال وإلى اعتبار الكون حشداً من الجسيّمات المتفاعلة معاً لحظياً. ومن هذا المنظور،

فقد ظل ماخ ملتزماً بالتصور النيوتني للمادة والكون، في حين أن آينشتاين ابتعد عن هذا التصور لصالح التصور المجالي، الذي بدأ يتبلر على يدي الفيزيائي الإنجليزي مايكل فرادي، واتخذ شكلاً رياضياً محكماً على يدي الفيزيائي الإسكتلندي جيمس كلارك ماكسويل، الذي وضع منظومة المعادلات الرياضية التي تحكم المجال الكهرمغناطيسي، وتعزّز وتمم واحتل مركزاً محورياً في الفيزياء واعتبر أساساً للمادة على يدي ألبرت آينشتاين. وبصورة خاصة، في حين اعتبر أصحاب التصور الجسيّمي للمادة التفاعل الجاذبي والكهرمغناطيسي لحظياً، فقد اعتبره أصحاب التصور المجالي فعلاً مادياً طاقياً ينتقل في المكان بسرعة معينة. فوفق التصور المجالي، فإن الجسيمات لا تتفاعل معاً لحظياً عن بعد، وإنما تتفاعل موضعياً مع المجالات التي تولدها، تلك المجالات التي تنتقل في المكان بسرعة معينة، اكتشف ماكسويل وآينشتاين أنها تساوي سرعة الضوء في الفراغ.

إذاً، قام آينشتاين بترجمة النقاط التي استقاها من مبدأ ماخ إلى لغة التصور المجالي للمادة والكون، فوضع نصب عينيه المهمات الآتية التي شكلت مرشداً لعمله العلمي بين عامي ١٩٠٥، ١٩١٥.

وضع آينشتاين نصب عينيه بناء نظرية مجالية للجاذبية تأخذ بعين الاعتبار محدودية سرعة انتقال التفاعل الجاذبي في المكان، وتبين تفصيلياً تغير شدة المجال الجاذبي في المكان والزمان، وذلك على غرار ما سبق أن فعله ماكسويل بصدد التفاعل الكهرمغناطيسي. ذلك أن ماكسويل استطاع أن يصوغ قوانين التفاعل الكهرمغناطيسي التي كانت معروفة لديه، وأن يكمل هذه القوانين جمالياً ومنطقياً بإضافة مفهومات وعلاقات جديدة إليها، بدلالة التغيرات المكانية والزمانية في المجال الكهرمغناطيسي. وشكلت منظومة المعادلات التي توصل إليها ماكسويل نصراً كبيراً للفيزياء النظرية، وأساساً مكيناً للتطورات اللاحقة في هذا الحقل. وقد تركز طموح آينشتاين في عقده الذهبي (١٩٠٥-١٩١٥) على صوغ منظومة معادلات مجالية تصف المجال الجاذبي على غرار منظومة ماكسويل المذكورة. ففي ضوء نقد ماخ المذكور لنظرية نيوتن في الجاذبية، وفي ضوء صعود التصور المجالي

للوجود المادي، أدرك آينشتاين قصور هذه النظرية من حيث إنها تفترض تفاعلات لحظية عن بعد، ومن حيث إنها تدعم بصورة مباشرة فكرة المكان المطلق، ومن حيث إنها تتناقض مع مبدأ النسبية الخاصة ومبدأ النسبية العامة الذي كان آينشتاين يتلمس الخطى صوبه.

ومن جهة أخرى، فقد وضع آينشتاين نصب عينيه تفسير القوى القصورية جاذبياً، أي بوصفها جزءاً لا يتجزأ من المجال الجاذبي الذي كان يسعى إلى اكتشاف معادلاته المجالية.

ومن جهة ثالثة، فقد سعى إلى التخلص كلياً من فكرة المكان المطلق بصوغ قوانين الطبيعية جميعاً بصورة تضمن ثبات بناها الداخلية بالنسبة إلى أي مرجع إسناد وأي نظام للإحداثيات. بل إنه وجد مفتاح نظريته المجالية في الجاذبية في هذه المهمة بالذات، أي في ما أسماه مبدأ النسبية العامة.

ومن جهة رابعة، فقد نبه ماخ آينشتاين إلى كونية الجاذبية، أي إلى ضرورة أن تكون أي نظرية مجالية شاملة في الجاذبية نظرية في نشوء الكون وتطوره وبنائه الداخلي.

(٨) لغز الكتلة

أبرز الفيزيائي النمساوي إرنست ماخ في نهاية القرن التاسع عشر إمكانية الإطاحة بمفهوم المكان المطلق النيوتني باعتبار القوى القصورية جاذبية الأصل والمصدر. وعلى هذا الأساس، وضع ألبرت آينشتاين نصب عينيه مهمة بيان ذلك، وإقامة نظرية مجالية في الجاذبية على هذه القاعدة. وفي هذا السياق، لاحظ آينشتاين ببصيرته الثاقبة دليلاً قوياً على الأصل الجاذبي للقوى القصورية يتمثل في علاقة تبدو تافهة وكانت معروفة منذ غاليلو ونيوتن. ومع أن هذه العلاقة كانت معروفة لدى علماء أوروبا مذاك، إلا أنهم لم يعيروها اهتماماً كافياً ولم يدركوا مغزاها الكوني، كما فعل آينشتاين. وهذا يشير إلى أن جوهر الممارسات العلمية لا يكمن في تنظيم القراءات والبيانات التجريبية في علاقات تجريبية، كما يدعي أصحاب المدرسة الوضعية في فلسفة العلم، وإنما يكمن في قراءة معنى العلاقات والانتظامات التجريبية والاستدلال عليه على أساس تكوينات وتصورات نظرية معينة.

إن الظاهرة التي اعتبرها آينشتاين مفتاحاً لحل تناقضات النسبية والجاذبية هي ظاهرة سقوط الأجسام على سطح بالتسارع ذاته، بغض النظر عن كتلها، إذا أهملنا مقاومة الهواء. هذه الظاهرة، التي اكتشفها غاليلو في معرض محاولته دحض نظرية أرسطو في الحركة، أثارت حيرة آينشتاين، برغم أنها ظلت تعتبر من البديهيات العادية لمدة ثلاثة قرون متوالية قبل آينشتاين. ولعل مرد هذه الحيرة كان إلى نظر آينشتاين إلى هذه الظاهرة من منظور نظرية المجال الكهرمغناطيسي، وإلى مقارنة هذا السلوك للجاذبية مع السلوك المناظر للمجال الكهرمغناطيسي. إذ إن تسارع الأجسام المشحونة كهربائياً في المجال الكهرستاتيكي مثلاً يعتمد بصورة جلية على كتلها. ولكن، ماذا يعني بالضبط هذا الفرق بين الجاذبية والكهرمغناطيسية؟

الحق أن أساس المسألة يكمن في التمييز الذي بدأ علماء نهاية القرن التاسع عشر يجرونه بين ما يسمى الكتلة القصورية وما يسمى الكتلة الجاذبية. ونعني بالكتلة

القصورية تلك الكتلة المسؤولة عن مقاومة الأجسام لتغيير حالتها الحركية، وهي الكتلة التي تظهر في قانون نيوتن الثاني الذي ينص على أن القوة المؤثرة تساوي حاصل ضرب الكتلة (القصورية) بالتسارع. أما الكتلة الجاذبية، فهي تلك الخاصية المادية التي تولد التفاعل الجاذبي وتجعل الأجسام تتأثر به. وليس هناك سبب منطقي لأن تتساوى هاتان الكتلتان أو الخاصيتان. فالعلاقة بين الكتلة القصورية والكتلة الجاذبية لا تختلف منطقياً عن العلاقة بين الكتلة القصورية والشحنة الكهربائية. ومع ذلك، فإن هاتين الكتلتين تتساويان إلى حدّ مذهل من الدقة، في الوقت الذي تنعدم فيه الصلة المباشرة بين الكتلة القصورية والشحنة الكهربائية.

ذلك أن كون الأجسام تسقط على سطح الأرض بالتسارع ذاته يدّل بوضوح على أن الكتلة القصورية تساوي الكتلة الجاذبية بصورة تامة. وبالفعل، فقد أجرى العالم المجري، البارون فوق إيتفيس، تجربة دقيقة عام ١٨٨٩ بين فيها تساوي الكتلتين ضمن هامش من الدقة بلغ واحداً في المائة مليار. وقد دفع هذا التساوي التام آينشتاين إلى التساؤل: لماذا تتساوى خاصية تخص الوزن مع خاصية تخص القصور الذاتي، أي قدرة الجسم على مقاومة التغير في حالته الحركية؟ إن الكتلة الجاذبية هي بمثابة شحنة جاذبية تولد المجال الجاذبي. والسؤال هو: لماذا تتساوى الشحنة مع الكتلة القصورية في حال الجاذبية، ولا تتساوى في حال الكهرمغناطيسية؟ ألا يدلّ ذلك على وجود علاقة عضوية بين القصور الذاتي والجاذبية؟ بل ألا يدعم ذلك مبدأ ماخ، الذي ينص على أن القوى القصورية (الوهمية) جاذبية المصدر؟ ألا يعدّ ذلك دليلاً واضحاً على صحة مبدأ ماخ، ومن ثم على انطباق مبدأ النسبية العامة على الوجود المادي؟

إن القوى القصورية تشترك مع قوة الجاذبية في أن تسارع الأجسام تحت تأثير أي منها لا يعتمد على الكتلة، أي أن الأجسام جميعاً تتسارع بالتسارع ذاته تحت تأثيرها. فإذا اعتبرنا الكتلة القصورية الشحنة التي تولد القوى القصورية، فإن تساوي الكتلة القصورية والكتلة الجاذبية يعني أن شحنة واحدة تولد القوى القصورية وقوة الجاذبية. وهذا يعني أن هذه القوى، التي تبدو مختلفة، تنتمي إلى المجال ذاته، أي

أنها أشكال مختلفة للمجال ذاته. وهي يعني أيضاً أنه يمكن تحويل القوى القصورية إلى قوى جاذبية، والعكس بالعكس، بتغيير مرجع الإسناد. فما يظهر في مرجع إسناد على صورة قوة قصورية قد يظهر في مرجع إسناد آخر على صورة قوة جاذبية، تماماً كما هو الحال مع الكهرمغناطيسية. فما يظهر على شكل قوة كهرستاتيكية في مرجع إسناد، قد يظهر على صورة قوة مغناطيسية في مرجع إسناد آخر. ومثلما أننا نعتبر هاتين القوتين مظهرين مختلفين للمجال الكهرمغناطيسي، فعلينا اعتبار القوى القصورية وقوة الجاذبية مظاهر مختلفة لمجال جاذبي عام. ومثلما أن معادلات ماكسويل في الكهرمغناطيسية تطيع مبدأ النسبية الخاصة، فإننا نتوقع معادلات آينشتاين في الجاذبية أن تطيع مبدأ النسبية العامة.

(٩) كيف تلغي الجاذبية

اتخذ آينشتاين من تساوي الكتلة الجاذبية مع الكتلة القصورية منطلقاً لما يسمى مبدأ التكافؤ. ونعني بمبدأ التكافؤ تكافؤ القوى القصورية، الناتجة عن تسارع مرجع الإسناد الذي نجري منه قياساتنا بالنسبة إلى مادة الكون، تماماً مع قوة الجاذبية. فهذا التكافؤ هو أساس هذا التساوي المذهل والمحير بين الكتلة الجاذبية والكتلة القصورية. لكن هذا التساوي ليس المظهر الوحيد لهذا التكافؤ. فهو تكافؤ شامل كامل يغطي جميع الظاهرات الممكنة، بما في ذلك الظاهرات الكهرمغناطيسية. وقد استعمل آينشتاين هذا المبدأ، بالمعنى المطروح أعلاه، مفتاحاً لحلّ لغز المجال الجاذبي، أي لمعرفة الطبيعة الجوهرية لهذا المجال ممثلة بمنظومة المعادلات الجالية التي تحكمه. ولكن، وقبل الولوج في هذه المسألة، فلنشرح بمزيد من التفصيل العلاقة بين مبدأ التكافؤ ومبدأ النسبية العامة الآنف ذكره.

لنفترض أن هناك غرفة مغلقة في بقعة في الكون بعيدة عن التجمعات الكثيفة للمادة (المجرات). ولنفترض أن هذه الغرفة تسير بسرعة ثابتة في خط مستقيم بالنسبة إلى مادة الكون. إن هذه الغرفة تشكل مرجع إسناد قصورياً، وفيه ينطبق تماماً قانون نيوتن الأول في الحركة، الذي ينص على أنه إذا كان مجموع القوى محددة المصادر المؤثرة عليه يساوي صفراً، فإما أن يكون الجسم ساكناً وإما أن يتحرك بسرعة ثابتة في خط مستقيم.

ولنفترض أن هناك عشرة أجسام ساكنة متنوعة الكتل تقع ما بين "أرض" الغرفة "وسقفها". والآن بدأت الأجسام العشرة تتحرك بالتسارع ذاته صوب أرض الغرفة، فإن المشاهد في داخل الغرفة يمكن أن يعزو هذه الحركة إلى أي من السببين الآتيين: فإما أن تكون الغرفة قد بدأت تتسارع بالنسبة إلى مادة الكون صوب السقف، وإما أن تكون قد تعرضت إلى مجال جاذبي يجعل أجسام الغرفة تسقط صوب أرض الغرفة. ولما كانت الكتلة القصورية مساوية للكتلة الجاذبية، فلا سبيل إلى التمييز بين هذين

التفسيرين. فالتسارع في هذه الحال مكافىء كلياً لمجال جاذبي. فلا وسيلة من أي نوع (ميكانيكي، حراري، كهربائي، ضوئي، مغناطيسي) يمكن أن تكشف عن الفرق. إن الجاذبية مكافئة تماماً للتسارع. وهذا يؤكد ما ذهب إليه ماخ و أينشتاين من أن القوى القصورية وقوة الجاذبية هما من طينة واحدة ويمكن أن تتحول الواحدة منهما إلى الأخرى بتغيير مرجع الإسناد. فلدينا مجال واحد يظهر بمظاهر مختلفة. كذلك، فإن مبدأ التكافؤ يؤكد على أن مراجع الإسناد جميعاً مكافئة لبعضها من حيث صلاحيتها لبيان قوانين الطبيعة. فليس هناك فرق جوهري بين مرجع إسناد قصوري وآخر يتسارع بالنسبة إليه، حيث أن تسارع الثاني يمكن أن "يزال" باعتباره مجالاً جاذبياً يؤثر على الأجسام. وعليه، فإن مبدأ التكافؤ يقود في الواقع إلى مبدأ النسبية العامة من جهة، ويوجد بين القوى القصورية وقوة الجاذبية في مجال واحد موحّد من جهة أخرى. لكنه يدعو أيضاً إلى بناء نظرية جديدة في الجاذبية تتخطى نظرية نيوتن في الجاذبية، حيث إنه يشير إلى إمكانية وجود مجالات جاذبية لا تطيع قانون نيوتن في الجاذبية.

ويمكن إلقاء مزيد من الضوء على هذه النقطة بتصور الغرفة المذكورة أعلاه تسقط سقوطاً حرّاً في مجال جاذبي لكوكب أو نجم من دون إعاقة لحركتها. عندها سيجد المشاهد الجالس في داخل الغرفة أن قانون نيوتن الأول المذكور آنفاً ينطبق كلياً، تماماً كما هو الحال مع مراجع الإسناد القصورية البعيدة عن التجمعات الكثيفة للمادة. وبصورة خاصة، فإن الأجسام العشرة المذكورة أعلاه تظل معلقة في حالة السكون بين أرض الغرفة وسقفها. من ثم، فإنه يمكن اعتبار الغرفة مرجع إسناد قصورياً، مع أنها تتسارع بالنسبة إلى مراجع الإسناد القصورية البعيدة عن المجرّات. وهذا يؤكد مرة أخرى مبدأ النسبية العامة، أي تكافؤ مراجع الإسناد جميعاً معاً وعد مشروعية التمييز بين مراجع الإسناد القصورية والأخرى المتسارعة، ومن ثم انعدام الحاجة إلى مكان مطلق.

والحق أنه يمكن النظر إلى مسألة المكان المطلق من منظور آخر كالآتي: لئن اعتقد نيوتن أن القوى القصورية تعود إلى تسارع مراجع الإسناد بالنسبة إلى المكان

المطلق، فلا بدّ أن يكون هذا المكان، القادر على التأثير على المادة بهذه الصورة الجلية، كياناً مادياً أو مجالاً من نوع ما. ولكن، إذا كان كذلك، فلا بدّ أن تؤثر المادة عليه، مثلما يؤثر هو عليها. فلا بد أن يكون التأثير متبادلاً. فلئن حدد المكان الكيفية الحركية لسلوك المادة، فلا بدّ أن تحدد المادة طبيعة المكان. ولكن كيف تحدد المادة طبيعة المكان؟ هذا ما أجاب عنه آينشتاين في نظرية النسبية العامة.

(١٠) هل يمكن أن يتوقف الزمن؟

كيف استفاد آينشتاين من مبدأ التكافؤ وكيف سخره مفتاحاً يلج به قارة النسبية العامة؟

للإجابة عن هذا السؤال، نبدأ بالتذكير بنص مبدأ التكافؤ، الذي وضعه آينشتاين عام ١٩١١، والذي ينص على أن التسارع يكافىء الجاذبية تماماً وفيما يتعلق بجميع أصناف الظاهرات الطبيعية. ولتوضيح هذا المبدأ، فلنتدبر مرجعي إسناد مغلقين تماماً (مثل غرفتين). وليكن الأول مرجع إسناد يتسارع بالنسبة إلى مراجع الإسناد القصورية بتسارع الجاذبية الأرضية على سطح الأرض (٩,٨ م/ث٢)، بحيث تسقط فيه الأجسام بهذا التسارع بغض النظر عن كتلها، وليكن الثاني مرجع إسناد مثبتاً على سطح الأرض وخاضعاً، بالطبع، للجاذبية الأرضية، بحيث تسقط الأجسام جميعاً بتسارع الجاذبية الأرضية (٩,٨ م/ث٢) بغض النظر عن كتلها أيضاً. وينقص مبدأ التكافؤ على أن المرجعين متكافئات تماماً ولا يمكن لأي تجربة تجري فيهما أن تميز بينهما فالعلاقات والظاهرات التي تظهر في الأول لا بدّ أن تظهر بصورة مماثلة تماماً في الثاني. فلا نستطيع التمييز مطلقاً بينهما على أساس التجارب والمشاهدات التي تجري فيهما. وعليه، فإذا سلك شيء ما سلوكاً معيناً في أحدهما، فلا بدّ أن يسلك السلوك ذاته في الآخر. ولنركز على بعض الظاهرات والتجارب في المرجع المتسارع، لكي نستنتج سلوك الأشياء تحت تأثير الجاذبية الأرضية. ولنبدأ بالبحث ف سلوك الزمن في المجال الجاذبي.

ولنتصور أننا حصلنا على ساعتين مماثلتين لبعضهما، أي صنعتا بالطريقة ذاتها، وأننا وضعنا واحدة على أرض الغرفة المتسارعة والأخرى عند سقفها. ولنفترض أن هناك مشاهداً عند كل من الساعتين، وأن المشاهدين يتبادلان المعلومات بالإشارات الضوئية. ولنفترض أنه عند كل حركة لعقرب الثواني تنطلق إشارة ضوئية صوب الساعة الثانية. وبمقارنة الفترة المنصرمة بين إشارتين يستطيع أن يقارن كل مشاهد

بين زمن ساعة زميله وبين ساعته. وهنا نورد ملاحظتين مهمتين:

(١) إن سرعة الضوء ثابتة ولا متغيرة بغض النظر عن سرعة مصدرها، (٢) إذا انطلقت إشارة ضوئية من الأرض صوب السقف، فإن السقف يتباعد عن هذه الإشارة الصاعدة بمعدل متزايد بالنظر إلى أن الغرفة متسارعة.

وعليه، فإن إشارة ضوئية ستأخذ وقتاً أطول من سابقتها حتى تصل إلى سقف الغرفة، حيث إن سرعة ابتعاد السقف عن الإشارة الضوئية الصاعدة تتزايد باستمرار بالنظري إلى تسارع الغرفة. وهكذا، تصل الإشارات الضوئية إلى السقف بمعدل أبطأ من معدل تغير الزمن وفق ساعة السقف. لذلك تبدو ساعة أرض الغرفة أبطأ من ساعة سقفها بالنسبة إلى المشاهد عند السقف. وهذا ما يشاهده أيضاً المشاهد عند أرض الغرفة. فأرض الغرفة تسرع بصورة متزايدة صوب الإشارات الضوئية القادمة من سقف الغرفة. لذلك تبدو ساعة السقف أسرع من ساعة الأرض بالنسبة إلى المشاهد عند الأرض. بذلك فهما يتفقان على أن الزمن أبطأ عند أرض الغرفة منه عند السطح، أي إن الزمن عند السقف يمضي بسرعة أكبر منه عند الأرض.

هذه نتيجة مذهلة في حد ذاتها. لكن تطبيق مبدأ التكافؤ عليها يجعلها تقترب من عالم الخيال العلمي، برغم أنها أضحت حقيقة مختبرة. فإذا كان الزمن يمضي بسرعة أكبر عند سقف الغرفة المتسارعة منه عند أرضها، فلا بدّ أن يكون كذلك أيضاً في الغرفة الثابتة المثبتة على سطح الأرض. هذا ما يحتمه مبدأ التكافؤ. فتكافؤ الغرفتين يحتم هذه النتيجة الخارقة للمألوف. وهو يعني أن الزمن يمضي بصورة أبطأ بالنسبة إلى القاطنين في الطابق الأرضي منه في الطوابق العليا. نتيجة مذهلة بحق، لكنها تنبع بالضرورة من مبدأ التكافؤ الذي يؤكده منطق الميكانيك والتجربة العلمية. وبالطبع، فإننا لا نلاحظ ذلك على سطح الأرض لأن الفرق بين الزمنين لا يذكر في حال جاذبية الأرض الضعيفة جداً. لكن النتيجة واضحة لا لبس فيها. إن المجال الجاذبي يبطىء الزمن، ويكون هذا الفرق كبيراً في حال الأجرام التي تولد مجالات جاذبية كبيرة وسريعة التغير، كما هو الحال مع النجوم الكثيفة المادة، أي

الكبيرة الكتلة والصغيرة الحجم (الأقزام البيضاء، النجوم النيوترونية، الثقوب السوداء). فالزمن يسير بتثاقل شديد على سطح نجم نيوتروني بالنسبة إلى الزمن على سطح الأرض مثلاً. لكن الأغرب من ذلك أن الزمن يتوقف كلياً على سطح ثقب أسود (أي عندما يسمى أفق الأحداث). أجل! إنه يتوقف أو يتجمد كلياً بالنسبة إلى مشاهد خارج الثقب الأسود. فإذا اقترب جسم من سطح ثقب أسود. فإننا لا نشاهده يخترق هذا السطح مهما انتظرنا. إنه يقترب ببطء من هذا السطح ويظل يقترب منه، لكنه لا يخترقه، لأن الزمن يتوقف كلياً هناك بالنسبة إلى المشاهد الخارجي.

هذه واحدة من نتائج مبدأ التكافؤ. وسنشرح مزيداً من هذه النتائج في الفصول القادمة.

(١١) انحناء الضوء بفعل الجاذبية

وضع آينشتاين مبدأ التكافؤ المذكور سابقا عام ١٩١١، وما لبث أن شكل هذا المبدأ المهم مفتاحاً لنظرية النسبية العامة وأداة لبناء أفكارها الأساسية. فهو يشكل دعامة أساسية لمبدأ النسبية العامة الذي يشكل عصب نظرية النسبية العامة. وقد بينا في الفصل السابق كيف قاد مبدأ التكافؤ آينشتاين إلى نتيجة في غاية الأهمية، تتعلق بطبيعة الزمان، وهي أن سرعة مضي الزمن تتغير من نقطة مكانية إلى أخرى في المجال الجاذبي. فالمجال الجاذبي يبطىء الزمن حسب شدته. بذلك، فلا يكفي تحديد الزمن في كل مرجع إسناد قصوري، كما هو الحال في نظرية النسبية الخاصة، وإنما علينا أيضاً تعيين الزمن في كل نقطة مكانية بالنظر إلى كونية المجال الجاذبي وشيوعه. ويمكن اختبار هذه النتيجة بالطريقة الآتية.

من المعلوم أن كل صنف من الذرات يبث أو يمتص ألواناً معينة من الضوء تميزه عن غيره. ويتحدد كل لون بتردد موجي معين، ونعني بالتردد الموجي عدد الذبذبات في الثانية الواحدة. والآن، لنفترض أننا وضعنا ذرات عنصر محدد على سطح نجم كثيف شديد الجاذبية. كيف يتمظهر الأثر الزمني للجاذبية الوارد ذكره على الألوان المميزة التي تبثها أو تمتصها هذه الذرات؟ بالنظر إلى بطء الزمن عند سطح النجم والناتج عن شدة المجال الجاذبي هناك، فإن الترددات الموجية للأضواء المنبعثة أو الممتصة من الذرات تقل عن المعتاد على سطح الأرض أو الجاذبية مثلاً. وهذا يعني أن الألوان المميزة لهذه الذرات تنزاح صوب اللون الأحمر، صاحب أدنى تردد موجي. وهذا ما يسمى في الأدبيات الفيزيائية الانزياح الأحمر. وعليه، فإن المجال الجاذبي الشديد عند سطح النجم يؤدي إلى انزياح أحمر للأضواء المنبعثة أو الممتصة من ذرات العناصر هناك. ويمكن بالطبع التحقق من ذلك بقياس الترددات الموجية المناظرة عند سطح الأرض. فإذا أبدت هذه الترددات انزياحاً أحمر بالقدر الذي نتوقعه على أساس مبدأ التكافؤ، كان ذلك اختباراً لصحة هذا المبدأ ولأفكار نظرية

النسبية العامة، وبصورة خاصة الفكرة أثر الجاذبية على سرعة مضي الزمن الآنف ذكرها. وقد أجر بالفعل عدد من التجارب الفلكية والأخرى الأرضية للكشف عن الانزياح الأحمر الجاذبي. وجاءت نتائجها متطابقة تماماً مع توقعات مبدأ التكافؤ، الأمر الذي يؤكد أيضاً أن البعد الزماني يتغير من نقطة مكانية إلى أخرى. كيف يتغير بالضبط، وهل يتغير بالعلاقة مع الأبعاد المكانية؟ هذا ما انبرت نظرية النسبية العامة للإجابة عنه.

والآن نترك الزمان جانباً لنعود إليه لاحقاً، وننتقل إلى المكان والعلاقات المكانية في ضوء مبدأ التكافؤ. ولنتصور الغرفة المغلقة التي ابتدأنا بها وهي ساكنة بالنسبة إلى النجوم الثابتة، أي مادة الكون. والآن إذا سلطنا شعاعاً ضوئياً على الغرفة ومرّ هذا الشعاع من فتحه في أعلى الغرفة، فإنه ينطلق في أعلى الغرفة في خط مستقيم حتى يقع على النقطة المقابلة تماماً للفتحة التي اخترقها، أي يكون مسار الضوء موازياً لأرض الغرفة. ولكن، إذا كانت الغرفة متسارعة، فإن مسار الضوء لا يكون مستقيماً. وإنما منحنياً، كما إنه لا يقع على النقطة المقابلة، وإنما على نقطة أخرى دون النقطة المقابلة، تماماً كما هو الحال مع مسار قذيفة تطلق من سطح عمارة على سطح الأرض. ذلك أن المشاهد الجالس على أرض الغرفة المتسارعة يصعد بسرعة متزايدة صوب الشعاع. فيبدو له الشعاع على شكل منحنى إلى أسفل، أي يبدو منحرفاً إلى أسفل. وإذا طبقنا الآن مبدأ التكافؤ على هذا الوضع، خلصنا إلى نتيجة مفادها أن الظاهرة نفسها ينبغي أن تحدث في الغرفة المثبتة على سطح الأرض بفعل الجاذبية الأرضية. وهذا يعني أن الجاذبية الأرضية تجذب الشعاع الضوئي وتنحيه صوب الأرض. واستنتج آينشتاين من ذلك أن المجال الجاذبي لا يؤثر على الأجسام المادية حسب، وإنما يؤثر أيضاً على الأشعة الضوئية فيجذبها ويحنيها، وذلك خلافاً لما تتوقعه نظرية نيوتن في الجاذبية.

وبالطبع، فإن الانحناء الذي ينجم عن الجاذبية الأرضية أصغر من أن يقاس. لذلك، إذا أردنا التحقق من هذه النتيجة، فعلينا أن نقيس أثر مجال جاذبي كبير نسبياً، كمجال جاذبية الشمس. وبالفعل، فقد كانت أول تجربة أجريت في هذا

المضمار تلك التي أجراها فريق بريطاني بقيادة الفلكي الإنجليزي المعروف، السير أرثر إدنغتون، عام ١٩١٩، أي بعد أربع سنوات من وضع نظرية النسبية العامة، على انحراف أشعة الضوء قرب سطح الشمس. إذ استغنم هذا الفريق فرصة كسوف شمسي كامل في أميركا الجنوبية آنذاك لقياس زاوية انحراف شعاع ضوئي، قادم من نجم معروف الموضع، ويمر قرب سطح الشمس. وقد تبين بالفعل أن زواية الانحراف مماثلة تماماً للقيمة المتوقعة على أساس مبدأ التكافؤ تساوي نصف القيمة المتوقعة على أساس نظرية النسبية العامة المكتملة. بذلك، فإن نتيجة التجربة المذكورة جاءت مؤيدة للأخيرة، لا لمبدأ التكافؤ. لكن آينشتاين كان يعلم أن مبدأ التكافؤ هو مبدأ تقريبي، وأن أهميته تكمن في كونه مرشداً ومفتاحاً لنظرية النسبية العامة.

(١٢) الجاذبية وانحناء المكان

توصلنا في الفصل السابق إلى نتيجة مؤادها أن المجال الجاذبي يحني الأشعة الضوئية تماماً كما يحني مسارات الأجسام، وذلك بالاستعانة بمبدأ التكافؤ الآينشتايني. فإذا مرّ شعاع ضوئي بجانب سطح الشمس مثلاً، فإنه ينحني بزاوية صغيرة جداً، لكن قابلة للقياس الدقيق. ولو كان هذا الشعاع مؤلفاً من جسيمات كتلية تسير بسرعة قريبة جداً من سرعة الضوء، لانحرف وانحنى بالزاوية ذاتها، وذلك بالنظر إلى تساوي الكتلة القصورية مع الكتلة الجاذبية. فالانحناء ليس خاصية من خصائص الشعاع ولا من خصائص التفاعل بين مادة الشعاع ومادة الشمس، وإنما يبدو أنه خاصية من خصائص المكان المحيط بالشمس. فبغض النظر عن طبيعة الشعاع المتأثر، فإن الشعاع ينحرف بالقدر ذاته إذا تحرك بالسرعة ذاتها. بذلك، يبدو أن المكان المحيط بالشمس تأثر بالشمس بطريقة معينة تجعل مساراته منحنية بقدر معين. وهذا مؤشر أولي على العلاقة بين الجاذبية وهندسة المكان، تلك العلاقة التي شكل تحديدها لاحقاً محوراً لنظرية النسبية العامة في صورتها المكتملة، أي محوراً لنظرية آينشتاين في المجال الجاذبي.

ولنستكشف هذه العلاقة بمزيد من العمق باستعمال مبدأ التكافؤ. ونبدأ بذكر واحد من النتائج المذهلة لنظرية النسبية الخاصة التي وضعها آينشتاين عام ١٩٠٥. ومفاد هذه النتيجة أنه إذا قسنا طول قضيب وهو ساكن بالنسبة إلينا، ثم جعلناه يتحرك بسرعة معينة بالنسبة إلينا في اتجاه طوله، فإنه يعاني تقلصاً، أي يبدو متقلصاً، بالنسبة إلى طوله وهو ساكن. وهو ما يعرف بتقلص لورنتس وفتزجيرالد، نسبة إلى الفيزيائي الهولندي لورنتس والفيزيائي الإيرلندي فتزجيرالد، اللذين كانا أول من أشارا إلى إمكانية هذه الظاهرة. وتبين نظرية النسبية الخاصة أن هذا التقلص يزداد بازدياد سرعة القضيب بالنسبة إلينا، وأن طول القضيب يقترب من الصفر باقتراب سرعة القضيب من سرعة الضوء. أما إذا كان القضيب يتحرك في

اتجاه عرضه، أي إذا كان القضيب متعامداً مع اتجاه حركته، فإن طوله لا يتأثر البتة بهذه الحركة، فيبدو كما كان وهو ساكن بالنسبة إلينا.

والآن، لنتصور مرجع إسناد قصورياً، أي مرجعاً بعيداً عن تجمعات المادة الكثيفة ولا يتسارع بالنسبة إلى النجوم الثابتة، أي مادة الكون، بحيث لا تؤثر على الأجسام الثابتة، أو المتحركة بسرعة ثابتة في خط مستقيم، فيه أي قوى جاذبية وقصورية. ولنتصور مرجع إسناد آخر يتطابق مركزه مع المرجع القصوري، لكنه يدور بسرعة زاوية ثابتة بالنسبة إلى المرجع القصوري حول محور يمر في مركزيهما. ولنفترض أن هناك مشاهداً ساكناً بالنسبة إلى كل منهما، ولنسمهما المشاهد القصوري والمشاهد المتسارع. ولنفترض أن المشاهد المتسارع استعمل قضيباً معلوم الطول لتحديد عدد كبير من النقط تقع على البعد ذاته من مركز المرجعين، أي لتحديد دائرة حول المركز المشترك. فلما كانت هذه النقط تقع جميعاً على البعد ذاته من نقطة ثابتة، فلا بد أن تقع على دائرة. وسيرى المشاهد القصوري أيضاً أنها دائرة وبالقطر ذاته الذي يقيسه زميله المتسارع، لأن القضيب الذي يستعمله المشاهد المتسارع في قياس نصف قطر الدائرة لا يعاني أي تقلص، حيث إنه يكون دائماً متعامداً مع سرعة الدوران. فكما هو معلوم، فإن سرعة الدوران، في حال الحركة الدائرية المنتظمة، تكون دوماً متعامدة مع نصف قطر الدائرة. والآن، لنفترض أن المشاهد المتسارع استعمل قضيباً قصيراً لقياس محيط الدائرة بتمريره على المحيط. في هذه الحال يكون القضيب في اتجاه السرعة. بذلك، فإنه يعاني تقلصاً من صنف تقلص لورنتس وفتزجيرالد بالنسبة إلى المشاهد القصوري. لذلك يبدو محيط الدائرة بالنسبة إلى المشاهد القصوري أقصر منه بالنسبة إلى المشاهد المتسارع. وبالنظر إلى أن النسبة بين محيط وقطرها يساوي الرقم "باي" بالنسبة إلى المشاهد القصوري، شأن أي دائرة أخرى بالنسبة إلى أي مشاهد قصوري، فلا بدّ أن تكون هذه النسبة أكبر من "باي" بالنسبة إلى المشاهد المتسارع. لكن ذلك يعارض قواعد الهندسة المستوية المرتبطة باسم الرياضي الإغريقي إقليدس (هندسة إقليديس المألوفة). وعليه، فإن هندسة المكان بالنسبة إلى المشاهد المتسارع ليست هندسة إقليدية. إنها

هندسة لا إقليدية من النوع الذي تكون فيه نسبة محيط الدائرة إلى قطرها أكبر من "باي". والآن، إذا طبقنا مبدأ التكافؤ على هذا الوضع، بحيث اعتبرنا المرجع المتسارع الذي يدور ساكناً واستعضنا عن التسارع بمجال جاذبي، تبين لنا أن المجال الجاذبي يؤثر على المكان بحيث يغير هندسته من هندسة إقليدية إلى هندسة لا إقليدية، بحيث تصبح نسبة محيط الدائرة إلى قطرها أكبر من "باي" تحت تأثير المجال الجاذبي. هذه هي النتيجة الثورية المذهلة التي توصل إليها آينشتاين. إن المكان لا يكون إقليدياً إذا كان هناك مجال جاذبي. ولكن، ما هي بالضبط طبيعة المكان الذي ينجم عن المجال الجاذبي؟

(١٣) هندسة إقليدس

توصلنا إلى نتيجة مهمة مفادها أن هندسة المكان لا تطيع قواعد هندسة إقليدس المألوفة إذا كان هناك مجال جاذبي، ولا ريب أن هذا القول يستلزم شرحاً وتوضيحاً لطبيعة هندسة إقليدس والهندسات البديلة.

نشأت الهندسة المستوية المألوفة، التي أخذت تعرف لاحقاً بهندسة إقليدس، في حضارات شرقي المتوسط القديمة (مصر والهلال الخصيب) وازدهرت هناك، ثم انتقلت إلى أيونيا وأثينا الإغريقتين واتخذت هناك طابعاً أكثر تماسكاً من الناحية المنطقية النظرية. وما إن جاء القرن الثالث قبل الميلاد حتى تبلرت على صورة نظام منطقي علمي متكامل في كتاب للرياضي الإسكندراني الهلنستي المعروف إقليدس أسماه الإغريق "العناصر" أو "الأصول" وأسماه العرب "الاسطقسات". وهو يتكون من ثلاثة عشر جزءاً (أو كتاباً). ويتضمن الكتاب الأول ثلاثة وعشرين تعريفاً وخمس مصادرات وخمس أفكار شائعة، كما أسماه إقليدس. وتشكل تلك أساساً منطقياً لثمان وأربعين قضية رياضية في الكتاب الأول وعدد أكبر منها في الكتب اللاحقة. ويحتوي كتاب "الأصول" على نظام منطقي كامل ومتكامل ومحكم ينبع فيه حشد كبير من القضايا الهندسية من عدد محدود من المسلمات والتعريفات والمصادرات وفق قواعد منطقية صارمة جلية في ذاتها. لذلك اعتبر هذا النظام الهندسي المحكم لمدة ألفي عام المثال الأعظم على المعرفة العلمية اليقينية. فمنطقة محكم صارم من الصعب إثارة أدنى الشكوك حوله. كما إن مسلماته ومصادراته بدت جلية في ذاتها وعصية على الإنكار. لذلك اعتبر فيثاغورس، الذي ساهم مساهمة كبيرة في تأسيس النظام الهندسي الذي اكتمل لاحقاً في "أصول" إقليدس، هذا النظام جوهر الوجود المادي. ولذلك أيضاً اعتبره أفلاطون، الذي يظن أن إقليدس كان ينتمي إلى مدرسته، مفتاحاً لعالم المثالات الخالد. أما في الحضارة الحديثة، فقد اعتبره أبو الفلسفة الحديثة، رينيه ديكارت، المثال الذي يستمد منه منهج إنتاج المعرفة

اليقينية. وصاغ نيوتن كتابه الرئيسي "المبادىء الرياضية للفلسفة الطبيعية" على صورة "أصول" إقليدس ومثالها. وكذلك فعل الفيلسوف إسبينوزا في صوغ كتابه الفلسفي الرئيسي "الأخلاق". أما الفيلسوف الألماني كانط فقط اعتبر نظام إقليدس الهندسي الأداة الحدسية التي يصوغ بها العقل مادة الحس الخام وينظمها في خبرة حسية ذات معنى. واعتبر يقينية هذا النظام نابعة من كونه ركناً جوهرياً من أركان العقل يسلطه على الشيء في ذاته لتشكيل العالم المادي. إلى هذا الحد اعتبر نظام إقليدس يقينياً ومحكماً.

لقد ظل نظام إقليدس يعتبر حقيقة المكان الطبيعي ومثالاً على المعرفة اليقينية الضرورية لمدة تنوف على الألفي عام. ومع ذلك، فقد كانت الشكوك تساور بعض الرياضيين (العرب والأوروبيين) في أثناء هذه الفترة الطويلة بصدد التعريف الثالث والعشرين والمصادرة الخامسة في "أصول" إقليدس. ويعنى هذا التعريف بالخطوط المستقيمة المتوازية معاً. أما المصادر الخامسة فتعنى بخصائص الخطوط المتوازية وعلاقاتها معاً. وينص نظام إقليدس في هذا الصدد على أنه إذا كان هناك خط مستقيم ونقطة خارجة على سطح مستو، فإن خطاً مستقيماً واحداً موازياً له يمر في هذه النقطة على السطح المستوي. ومعنى التوازي هو أن الخطين لا يلتقيان أبداً مهما امتدا. وقد لاحظ بعض الرياضيين أن هذه المصادرة أعقد من غيرها من المسلمات والمصادرات، حيث إنها تتضمن مفهوم اللانهاية. لذلك فضلوا ألا يعتبروها مسلمة أو مصادرة، واعتبروها قضية هندسية مشتقة من المسلمات والمصادرات الأخرى. وحاولوا بالفعل اشتقاقها من تلك الأسس، لكنهم عجزوا عن ذلك، برغم المحاولات المتواصلة لفترة ألفي عام.

ولبيان مدى تعقد مصادرة التوازي بالنسبة إلى غيرها من المصادرات التي تبدو بالفعل جلية في ذاتها، نذكر المصادرة الرابعة التي تنص على أن جميع الزوايا القائمة مساوية لبعضها، والفكرة الدارجة الأولى التي تنص على أن الأشياء المساوية للشيء ذاته مساوية لبعضها أيضاً، والفكرة الدارجة الخامسة التي تنص على أن الكل أكبر من الجزء. فهذه المسلمات هي بالفعل جلية في ذاتها وبسيطة، ومن ثم يصعب

انكارها أو حتى تبسيطها أو اشتقاقها مما هو أبسط منها، الأمر الذي لا نجده في مصادرة التوازي. فهذه الأخيرة تبدو بالفعل أعقد بكثير من المصادرات والمسلمات الأخرى وكأنها لا تنتمي إلى الفصيل ذاته. لذلك لجأ أولئك الرياضيون إلى محاولة اشتقاقها من غيرها. لكن عجزهم عن ذلك لم يذهب سدى، وإنما شكل القاعدة والدافع لبناء بدائل هندسية لا إقليدية، كما سنبين لاحقاً.

(١٤) الهندسة اللاإقليدية

أثارت مصادرة التوازي في نظام إقليدس الهندسي زوبعة عاتية منذ ضمنها إقليدس كتابه "الأصول" أو "الإسطقسات"، استمرت لمدة تنوف على ألفي عام. إذ يظن أن إقليدس نفسه لم يكن مرتاحاً لاعتبارها مصادرة أولية وتردد كثيراً في ذلك، وأنه عندما عجز عن اشتقاها منطقياً من مسلماته الأخرى، اضطر إلى تثبيتها في نظامه بصفتها المصادرة الخامسة. وبالطبع، فقد توالت محاولات اشتقاقها مذاك وطوال العصور القديمة والوسيطة والحديثة، وعلى أيدي الرياضيين الإغريق والعرب والأوروبيين، لكنها أخفقت جميعاً.

وفي العشرينيات من القرن التاسع عشر حصلت انعطافة كبرى في النظر إلى هذه المعضلة تمثلت في عمل غاوس الألماني ولوباتشفسكي الروسي وبلياي المجري. فبدلاً من محاولة اشتقاقها، افترض أولئك الرياضيون الأفذاذ نقيضاً لها، أي افترضوا الآتي: إذا كان هناك خط مستقيم ونقطة خارجة على سطح مستو، فإن هناك أكثر من خط مستقيم يمر في هذه النقطة ويكون موازياً للخط المستقيم، بمعنى لا يتقاطع معه مهما امتدت هذه الخطوط المستقيمة. هذا ما افترضه غاوس ولوباتشفسكي وبلياي في العشرينيات والثلاثينيات من القرن الماضي، وحاولوا بناء نظم هندسية متكاملة على أساس هذا التعديل في نظام إقليدس، وبطريقة إقليدس المنطقية ذاتها. وكان هدفهم من ذلك أن يبينوا ضرورة مصادرة التوازي ببيان استحالة نظام هندسي منطقي متكامل من دونها. لذلك توقعوا أن يوصلهم افتراضهم الجديد إلى طرق منطقية مسدودة والى تناقضات منطقية تفجر نظمهم الجديدة من داخلها. لكنهم فوجئوا بعكس ذلك تماماً. إذ توصلوا إلى نظم هندسية منطقية ومنسجمة مع ذاتها ولا تقل تماسكاً عن نظام إقليدس الهندسي، ولم يصلوا إلى أي طريق منطقي مسدود ولا إلى تناقضات منطقية مربكة. لذلك خلصوا إلى نتيجة ثورية خطيرة مفادها أن نظام إقليدس الهندسي ليس النظام الهندسي الوحيد الممكن، وأن هناك

نظماً هندسية لاإقليدية ممكنة، ومن ثم أن نظام إقليدس لا يمثل حقيقة مطلقة لا يمكن تجاوزها ولا صورة مطلقة للمعرفة اليقينية التي لا يرقى إليها الشك.

فالنظم البديلة محكمة ومنطقية ومتماسكة بالقدر ذاته، وإن اختلفت عن نظام إقليدس في بعض مسلماتها وفي جلّ نتائجها وقضاياها الهندسية. قد لا نستطيع تخيل هذه النظم، كما نتخيل نظام إقليدس ومسلماته وقضاياه. لكن ذلك لا يعني شيئاً فيما يتعلق بالمشروعية المنطقية لهذه النظم. فمسألة تخيل القضايا والعلاقات الهندسية لا تتعلق بالمشروعية المنطقية، وإنما تتعلق بطبيعة ملكة التخيل عند الإنسان وتركيبها وعملية تكونها بالعلاقة مع بيئة الإنسان، وربما أيضاً تتعلق بالطبيعة الهندسية لبيئة الإنسان المحدود. لذلك، فإن قدرتنا على تخيل الهندسة الإقليدية وعجزنا عن تخيل الهندسة اللاإقليدية لا يدعمان معقولية الأولى وينفيان معقولية الأخرى، وإنما لا يدخلان أصلاً في مسألة معقولية النظم الهندسية.

وبالطبع، فما كان من الممكن أن تمر مثل هذه الثورة المدوية على نظام منطقي صاغ العقل الجمعي على صورته ومثاله لمدة ألفي عام، بسلام وهدوء ووئام. لذلك أثر غاوس، المتمرس بشؤون الدنيا، الصمت وأخفى اكتشافه العظيم في أدراجه المغلقة تفادياً لصدام مع قوى الرأي السائد لا تحمد عقباه. أما لوباتشفسكي وبلياي فقد دفعهما حماسهما الكبير لهذا الاكتشاف العظيم إلى المجازفة براحة بالهما وسمعتهما بنشر أبحاثهما في هذا المضمار. وقد صح تخوف غاوس في هذا المضمار. إذ جوبه الرياضيان العظيمان بزوبعة من السخرية والاستهزاء والازدراء، أعقبها إهمال لهما، حتى إن طلابهما أداروا ظهورهم إليهما وابتعدوا عنهما حتى مماتهما. ومع ذلك، فقد ظل هذا الاكتشاف الثوري يتوهج ويصعد نجمه حتى هيمن على الوسط الرياضي الأوروبي وفرض نفسه عنوة عليه، جاراً وراءه عشرات الرياضيين الكبار. وسرعان ما أثبت الرياضي الألماني كلاين أن درجة تماسك النظم الجديدة وانسجامها الداخلي لا تقل عن نظريتها الإقليدية. فكان ذلك وتداً جديداً في مدماك الهندسة اللاإقليدية. وبرز السؤال الخطير عن مدى انطباق الهندسة الإقليدية على العالم المادي، أي على المكان الذي يشكل مسرح الأحداث المادية. إنها بالتأكيد تنطبق

ضمن الخبرة المحدودة التي لا تتخطى المجموعة الشمسية. لكنها إلى أي مدى تنطبق على المسافات الشاسعة؟ فلئن كانت تنطبق موضعياً، فإن ذلك لا يعني بالضرورة أنها تنطبق مجرياً وكونياً. أي نظام هندسي ينطبق على الكون؟ وكيف نجيب عن هذا السؤال؟ بالمنطق والرياضيات أم بالتجربة والقياس؟ هذه هي الأسئلة التي انبثت في الوسط الرياضي إبان القرن التاسع عشر، ووجدت طريقها إلى الفيزياء عبر ألبرت آينشتاين في الخمس الأول من القرن العشرين.

(١٥) هندسة غاوس

كان الظن السائد قبل غاوس ولوباتشفسكي وبلياي أن النظام الهندسي الإقليدي هو النظام الهندسي الوحيد الممكن، ومن ثم أنه يمثل نوعاً من الحقيقة المطلقة التي تنطبق في كل مكان وزمان وعلى جميع الصعد. واعتبر انصياع الأحداث المادية والعلاقات المكانية الفعلية لقواعد هندسة إقليدس مسلمة أساسية لا يرقى إليها الشك. وبلغ الأمر بالفيلسوف الألماني كانط أن اعتبر هندسة إقليدس ركناً جوهرياً من العقل يسقطه العقل ويسلطه على مادة الحس الخام، فيجبلها به على شاكلته ومثاله. لذلك جاء اكتشاف الهندسة اللاإقليدية كوقع الصاعقة على الوسط العلمي الأوروبي، حيث إنه أزال هالة القدسية عن هندسة إقليدس وحوّل الأمر من مسألة منطقية فلسفية إلى مسألة فيزيائية. إذ برز سؤال جديد في علم القرن التاسع عشر، وهو: أي نمط من أنماط الهندسة ينطبق على الأحداث المادية والعلاقات المكانية؟ وهو سؤال فيزيائي في المقام الأول، حيث إنه لا يبت فيه بالمنطق الرياضي وحججه، وإنما بالتجربة الفيزيائية والقياس الفيزيائي في المقام الأول.

وبالفعل، فقد أجرى غاوس وبعض فلكيي القرن التاسع عشر قياسات وتجارب لهذا الغرض، لكنها أخفقت جميعاً بالنظر إلى القصر النسبي للمسافات التي قيست والى النقص النسبي في دقة الأساليب التي استعملت في عملية القياس. لكن السؤال ظل قائماً يلح على عقول الرياضيين والفيزيائيين.

وكان الفضل الأكبر في تطوير الهندسة اللاإقليدية ووضعها في صيغة معممة قابلة للتطبيق على الطبيعة للرياضي الألماني غيوروغ برنهارت ريمان، تلميذ غاوس الذي كان يكبره غاوس بحوالي خمسين عاماً. وقد طوّر ريمان الهندسة اللاإقليدية في اتجاهين. فهو من جهة استطاع أن يطوّر نظاماً هندسياً بافتراض أنه ليس هناك خطوط مستقيمة موازية لبعضها، بمعنى أن جميع الخطوط المستقيمة تلتقي إذا امتدّت لمسافات محدودة. وهو عكس الافتراض الذي وضعه غاوس ولوباتشفسكي

وبلياي. ومن جهة أخرى، فقد طوّر ريمان فكرة بارعة لفاوس تتعلق بطبيعة السطوح في الفضاء الثلاثي الأبعاد. ومفاد هذه الفكرة أنه يمكن معالجة هذه السطوح بدلالة خصائصها الذاتية، وليس بالضرورة بدلالة الفضاء الثلاثي الأبعاد المنفرسة فيه. ومعنى ذلك أنه يمكن دراسة سطح من هذه السطوح بدراسة خصائص الأشكال الهندسية المرسومة عليه وعلائقها المكانية. فإذا فعلنا ذلك، تبين لدينا أن جلّ السطوح لا تطيع هندسية إقليدس، وإنما تطيع أنواعاً مختلفة من الهندسة اللاإقليدية. هناك بالطبع سطوح تطيع قواعد الهندسة الإقليدية، كالسطح المستوي مثلاً، لكن جلها لا يطيعها. وعلى سبيل المثال، فإن الخطوط المستقيمة على السطح المستوي تطيع مصادرة التوازي. أي، إذا رسمنا خطاً مستقيماً على هذا السطح وحددنا نقطة لا تقع على الخط المستقيم، فإن هناك خطاً مستقيماً واحداً فقط يمر في النقطة ويكون موازياً للخط الأول، بمعنى لا يلتقيه مهما امتد الخطان. كذلك، فإذا رسمنا مثلثاً، وجدنا أن مجموع زواياه يساوي مائة وثمانين درجة بغض النظر عن شكل المثلث أو مساحته. وإذا رسمنا دائرة عليه، وجدنا أن نسبة محيط الدائرة إلى قطرها تساوي دائماً الرقم "باي" بغض النظر عن مساحة الدائرة.

والآن، لنأخذ سطح كرة وندرس طبيعته بدراسة الأشكال المرسومة عليه. وبالطبع، فإنه لا يمكن البتة أن نرسم خطاً مستقيماً بالمعنى الإقليدي عليه. ولكن، إذا عممنا تعريف الخط المستقيم بحيث أضحى يعني أقصر مسافة بين نقطتين، كانت الخطوط المستقيمة على سطح كرة هي الدوائر الكبرى، أي تلك التي تساوي أقطارها قطر الكرة نفسها. والآن، إذا رسمنا دائرة كبرى وحددنا نقطة خارجها على سطح الكرة، وجدنا أنه ليس هناك دائرة كبرى تمر في النقطة لا تتقاطع مع الدائرة الأولى أو تلتقيها. وهذا يعني أن سطح الكرة لا يطيع مصادرة التوازي، ومن ثم لا يطيع قواعد هندسة إقليدس. كذلك، فإن رسمنا مثلثاً على سطح الكرة، وجدنا أن مجموع زواياه تنوف على مائة وثمانين درجة، وأن هذا المجموع يزداد بازدياد مساحة المثلث. وإذا رسمنا دائرة حول مركز محدد على السطح الكروي، وجدنا أن نسبة محيط الدائرة إلى قطرها يقل عن الرقم "باي"، بعكس حال الدوائر المرسومة

على سطح مستو والتي تطيع قواعد هندسة إقليدس. كذلك، فإن محيط الدائرة يقترب من الصفر إذ يقترب قطر الدائرة من محيط الدوائر الكبرى. ومعنى ذلك أن زيادة قطر الدائرة المرسومة على السطح الكروي لا تعني الزيادة في محيطها، وإنما تعني اقتراب محيطها من الصفر. وهذه الخصائص جميعاً لا تنصاع إلى قواعد الهندسة الإقليدية، وإنما تعارضها وتبدو غريبة وعجيبة من منظورها. ويمكن أن نستنتج درجة انحناء السطح الكروي (أي نصف قطره) من دراسة الأشكال المرسومة وعلائقها المكانية من دون الإشارة إلى المكان الثلاثي الأبعاد الذي ينغرس فيه السطح الكروي. وهذا يشير إلى أن كل سطح يمثل فضاء ثنائي البعد قائماً في ذاته ومتكاملاً من الناحية الهندسية.

كيف استثمر ريمان هذه الفكرة؟

(١٦) هندسة ريمان

في العشرينيات من القرن التاسع عشر، وضع الرياضي الألماني الكبير غاوس فكرة عبقرية مفادها أنه يمكن تحديد طبيعة السطوح الثنائية البعد المنغرسة في الفضاء الثلاثي الأبعاد بدلالة خصائص الأشكال المرسومة عليها والعلاقات المكانية عليها، من دون الرجوع إلى الفضاء الثلاثي المنغرسة فيه. كذلك، فإن هذه السطوح بصورة عامة لا تطيع هندسة إقليدس، وإنما هندسات لا إقليدية متنوعة. ولاحظ غاوس العلاقة العضوية بين انحناء السطح في نقطة وطبيعة النظام الهندسي المنطبق عند هذه النقطة. ولعله من المفيد توضيح هذه الفكرة ببعض التفصيل.

لنأخذ سطحاً مستوياً يطيع هندسة إقليدس. ولنحدد اتجاهين ثابتين متعامدين معاً يلتقيان فيما يسمى نقطة الأصل أو نقطة الصفر، حيث إن جميع المسافات على السطح تقاس بالنسبة إلى هذه النقطة. ويمكن تحديد موضع كل نقطة على السطح بإنزال عمود منها على كل من الاتجاهين الثابتين. إذ يحدد موضع النقطة بدلالة بعدي العمودين المسقطين عن نقطة الأصل. ويسمى هذان البعدان إحداثيي النقطة. ولنتدبر خطاً مستقيماً قصيراً يصل نقطتين قريبتين من بعضهما. فباستعمال برهانة فيثاغورس، يمكن بيان أن مربع طول هذا الخط يساوي مربع الفرق بين الإحداثيين الأولين للنقطتين مضافاً إلى مربع الفرق بين الإحداثيين الثانيين لهما. هذا هو القانون الذي يحكم المسافة في هندسة إقليدس.

ولنتدبر وضعاً مشابهاً، ولكن على السطح الكروي المنغرس في الفضاء الثلاثي الأبعاد في هذه الحال، فإننا لا نستطيع تحديد اتجاهين ثابتين متعامدين، كما فعلنا مع السطح المستوي. لذلك نلجأ إلى تحديد خطوط الطول وخطوط العرض، تماماً كما يفعل الجغرافيون فيما يتعلق بسطح الأرض. وبتعبير آخر نرسم دوائر صغرى "متعامدة" مع المجموعة الأولى. ونلجأ إلى ترقيم كل دائرة بالتتابع، ومن ثم يتحدد موضع كل نقطة على السطح برقمين؛ رقم ينتمي إلى خطوط الطول والآخر

إلى خطوط العرض. ويمكن اعتبار هذين الرقمين إحداثيي النقطة. ولنتدبر نقطتين على السطح الكروي قريبتين جداً من بعضهما، ولنصلهما ببعضهما بأقصر خط بينهما، وهو الخط الذي يقع على الدائرة الكبرى التي تمر فيهما، كما أسلفنا في فصول سابقة. عند ذاك، سنجد مربع طول هذا الخط يطيع قانوناً آخر غير القانون الإقليدي الذي ينطبق على الخطوط المستقيمة المرسومة على السطوح المستوية.

وبتعبير آخر، فإن مربع طول الخط الواصل بينهما لا يساوي مجموع مربعي الفرق بين إحداثيات النقطتين، كما هو الحال مع الخط المستقيم على السطح المستوي، وإنما يطيع علاقة أكثر تعقيداً. وبالتحديد، فإنه يرتبط بالإحداثيات عبر مجموعة من الاقترانات لهذه الإحداثيات تسمى التنسور القياسي. وتحدد هذه المجموعة خصائص السطح وطبيعته كلياً. ويمكن القول إنها تمثل درجة انحناء السطح، وتحدد طبيعة النظام الهندسي الذي يطيعه السطح. وانطلاقاً من هذا الأساس، فإنه يمكن القول إن التنسور القياسي الإقليدي الذي يربط مربع طول الخط المستقيم بإحداثيات النقطتين اللتين يصلهما ببعضهما هو مجرد ثابتين متساويين. لكنه بصورة عامة مجموعة مكونة من أربعة اقترانات للإحداثيات. وكما أسلفنا، فإنه يمكن اشتقاق جميع خصائص السطح والأشكال المرسومة عليه من معرفة التنسور القياسي للسطح.

بذلك يكون غاوس قد وجد طريقة لدراسة السطوح الثنائية البعد المنغرسة في الفضاء الثلاثي الأبعاد بدلالة نظم الهندسة اللاإقليدية وجبر التنسورات (التنسور هو شكل معمم للمتجه الذي يتحدد بمقداره واتجاهه كالقوة مثلاً). لكن غاوس لم يدرك أنه بهذه الطريقة الجديدة إنما وجد سبيلاً إلى توحيد نظم الهندسة اللاإقليدية ووصفها تفاضلياً. وذهب فضل إدراك ذلك إلى تلميذه اللامع ريمان.

طوّر ريمان فكرة أستاذه غاوس بأن اعتبر سطوح غاوس الثنائية البعد فضاءات ثنائية البعد قائمة في ذاتها، وذلك بالنظر إلى إمكانية وصفها من دون الرجوع إلى الفضاء الثلاثي الأبعاد المنغرسة فيه. وأدرك أن هذه السطوح بإمكاناتها اللانهائية تمثل عدداً لا نهائياً من نظم الهندسة اللاإقليدية. لكنه أدرك أيضاً أن طريقة

وصفها بالتنسور القياسي توّحد هذا الحشد اللانهائي من النظم. فلو كان لدينا سطح اختياري، وعرفنا اعتماد التنسور القياسي على الإحداثيات وكيفية تغيره من موضع إلى آخر، لعرفنا طبيعة هندسة كل بقعة صغيرة على هذا السطح. ونستطيع أن نصف كل النظم الهندسية بدلالة التنسور القياسي، ومن ثم فإن الأخير يوحّد وصف هذه النظم ويوحّد أساليب التعامل معها.

لكن ريمان ذهب إلى أبعد من ذلك. فهو قد عمم هذه الأساليب والنتائج على الفضاءات المتعددة الأبعاد. فلئن كانت الفضاءات الثنائية البعد تتعدد من حيث نظم الهندسة التي تنطبق عليها، فلماذا لا يكون الأمر كذلك بالنسبة إلى الفضاءات الثلاثية الأبعاد والأخرى الرباعية الأبعاد وغيرها؟ وبتعبير آخر، لئن كان لدينا سطوح مستوية وأخرى كروية وأخرى سرجية، فلماذا لا يكون لدينا مكان مستو وآخر كروي وآخر سرجي؟ فليس هناك سبب منطقي لتمييز الفضاء الثنائي البعد عن الفضاءات الأخرى المتعددة الأبعاد. ولما انعدم هذا السبب، فلا شيء يمنعنا من تعميم أسلوب غاوس في معالجة السطوح إلى الفضاءات المتعددة الأبعاد. بذلك يغدو من الضروري وصف الفضاء الثلاثي الأبعاد مثلاً بدلالة تنسور قياسي يتكون من تسعة اقترانات للإحداثيات، ووصف الفضاء الرباعي الأبعاد بدلالة تنسور قياسي آخر يتكون من ستة عشر اقتراناً، وهلمّ جرّاً. وهذه التنسورات القياسية تحدد خصائص الفضاء المعني كلياً. وتسمى هذه الفضاءات اليوم فضاءات ريمان. أما أسلوب معالجتها هندسياً فيسمى هندسة ريمان.

(١٧) كون آينشتاين

في الفصل السابق، خلصنا إلى نتيجة في غاية الأهمية مفادها أن الفضاءات الثلاثية الأبعاد (كالمكان) والأخرى الرباعية الأبعاد (كالمتصل الزمكاني الذي ذكرناه في الفصل الثالث) لا تطيع بالضرورة هندسة إقليدس، وإنما تتعدد هندساتها تعدد السطوح الثنائية البعد المنغرسة في الفضاء الثلاثي البعد. ويمكن توحيد وصف هذه الهندسات وتغيراتها من نقطة إلى أخرى في الفضاء ذاته بدلالة ما يسمى التنسور القياسي، وهو مجموعة اقترانات للإحداثيات تربط مربع طول أقصر خط يصل نقطتين قريبتين بعضهما بإحداثيات هاتين النقطتين. ويحدد التنسور القياسي الخصائص الهندسية للفضاء المعني كلياً، وبغض النظر عن عدد أبعاد هذا الفضاء. إنه يمثل انحناء الفضاء المعني وتغير هذا الانحناء من نقطة إلى أخرى.

وهنا يبرز سؤال فيزيائي مهم سبق وأن طرحه ريمان والرياضي الإنجليزي كليفورد والرياضي والفرنسي بوانكاريه في النصف الثاني من القرن التاسع عشر:

ما هو نمط الهندسات الذي يطيعه المكان المادي الذي نعيش فيه؟ وما الذي يحدد أن يسود هذا النمط أو ذاك؟ وهل هناك علاقة بين المادة وقوى الطبيعة من جهة وبين هندسة المكان من جهة أخرى؟ وبصورة خاصة، هل هناك علاقة بين المادة وقواها وبين التنسور القياسي، وكيف تحددها؟ ثم ما هي علاقة المكان بالزمان؟ وبالتحديد هل يتغير التنسور القياسي، ومن ثم هندسة المكان، مع الزمن؟ فمن الواضح أنه ليس هناك ما يحتم أن يكون المكان إقليدياً، كما كان الظن السائد قبل غاوس ولوباتشفسكي وبلياي، وإن كان كذلك على الصعيد الموضعي، أي على صعيد الأبعاد المألوفة غير الشاسعة. بل إن احتمال أن يكون كذلك على صعيد الأبعاد الشاسعة هو ضعيف بالنظر إلى تعدد الهندسات الممكنة.

لذلك، فالذي سيكون مدهشاً بالفعل هو اكتشاف أن المكان إقليدي. وتفيد الدلائل

اليوم على أن الكون على نطاق الأبعاد الشاسعة قريب جداً من الحالة الإقليدية، وإن لم يكن كذلك قرب تجمعات المادة الكثيفة. وقد أثار ذلك دهشة علماء عصرنا بالنظر إلى إدراكهم ضعف احتمال أن يكون كذلك. لكنهم وجدوا مؤخراً تفسيراً مقنعاً لذلك على أساس ما يسمى نظرية التضخم في الكون، والتي سنعالجها في مجلدات لاحقة.

ولنتصور ماذا سيكون عليه الحال لو كان الكون يطيع هندسة لاإقليدية كروية، أي هندسة ريمانية. أي ماذا لو كانت هندسة المكان تعميماً ثلاثياً للهندسة السائدة على سطح كرة ثنائي البعد؟ وبتعبير أدق، ماذا لو اعتبرنا المكان سطحاً كروياً ثلاثي الأبعاد مغروساً في فضاء رباعي الأبعاد؟ في هذه الحال، سنجد أن المكان سيطيع علاقات وقواعد هندسية شبيهة جداً بالعلاقات والقواعد السائدة على سطح كرة عادية ثنائي البعد. وعلى سبيل المثال، فإذا شكلنا مثلثاً تقع في أحد رؤوسه مجرتنا وتقع في الرأسين الآخرين مجرتان بعيدتان عن بعضهما وعن مجرتنا، لوجدنا أن مجموع زوايا هذا المثلث ينوف على مائة وثمانين درجة. وإذا اخترنا مجرّات أبعد بحيث كانت مساحة المثلث أكبر، وجدنا هذا المجموع يزداد كذلك، إذا شكلنا محيط دائرة من عدد كبير من المجرات البعيدة جداً والتي تقع جميعاً على البعد ذاته من مجرّتنا، بحيث شكلت مجرتنا مركز الدائرة، لوجدنا أن نسبة محيط الدائرة إلى قطرها أقل من الرقم "باي"، ولوجدنا أيضاً أن المحيط يقل كلما زاد بعد المجرات التي تشكل المحيط عنّا حتى يقترب من الصفر. وهي بالفعل ظاهرة غريبة تناقض تجربتنا الأرضية كلياً. والأغرب من ذلك كله هو أنه إذا انطلقت مركبة من مجرتنا في كون كروي، وتحركت في خط مستقيم، أي في اتجاه ثابت، واستمرت في حركتها لمدة طويلة، لوجدت نفسها في النهاية تقترب من مجرتنا، أي نقطة انطلاقها، وتعود إليها. وبالطبع، فإننا لا نستغرب هذا السلوك عندما تتحرك نملة على سطح كرة عادية. فإذا تحركت النملة على دائرة كبرى على السطح، أي في "خط مستقيم" واتجاه ثابت، لعادت بعد فترة إلى النقطة التي انطلقت منها. وهذا ما يحصل أيضاً في المكان الكروي الثلاثي الأبعاد، بالنظر إلى كونه مجرد صورة معممة لسطح الكرة

العادية. فهندسته هي من نوع هندسة الأخير، ومن ثم فإن سلوك مركبة تتحرك فيه لا يختلف من حيث الجوهر عن سلوك نملة تتحرك على سطح كرة عادية. لذلك، فإن حجم المكان الثلاثي الكروي محدود، بعكس حجم المكان الثلاثي الإقليدي مثلاً. ومع ذلك، فليس له حدود. إن الكون الكروي، إذاً، كون محدود لكن من دون حدود ونهايات. إنه كون محدود الحجم لكن عديم الحدود. وبالطبع، فإن هذه الحالة تبدو لا معقولة من منظور الهندسة الإقليدية المألوفة. لكن، إذا حررنا أنفسنا من قيود هذه اللاإقليدية، وجدناها معقولة تماماً. ويسمى هذا النمط من النماذج الكونية أو المكانية كون آينشتاين، لأن آينشتاين كان أول من اقترحه أنموذجاً للكون، وذلك في بحثه الذي نشره عام ١٩١٧ وأرسى فيه دعائم علم الكون الحديث.

(١٨) المكان بوصفه مادة

عام ١٨٥٤ نشر جورج برنهارت ريمان عمله الرئيسي في الهندسة والذي يحمل العنوان: "بصدد الفرضيات الواقعة في أساس الهندسة"، وشكل هذا العمل انعطافه كبرى في تاريخ الهندسة والفيزياء. إذ أرسى ريمان فيه نظرية عامة شاملة في هندسة المكان شكلت هندسة إقليدس وهندسة غاوس ولوباتشفسكي وبلياي وهندسة ريمان الإهليلجية حالات خاصة منها. وقد لخص ألبرت آينشتاين فضل ريمان في هذا الصدد بثلاث نقاط. فريمان كان أول من أشار إلى إمكانية أن يكون الكون كروياً، أي محدود الحجم وبلا حدود في أن واحد، وذلك بابتكاره الهندسة الإهليلجية الموجبة الانحناء والتي لا تتضمن فكرة الخطوط المتوازية معاً. وهي الفكرة التي استثمرها آينشتاين عام ١٩١٧ في بناء أنموذجه الكوني الذي شكل أساساً لعلم الكون الحديث. والنقطة الثانية هي أن ريمان عمم نظرية الهندسة وأرسى قواعد ما يسمى الهندسة التفاضلية التي تأخذ بعين الاعتبار تغير هندسة المكان من نقطة مكانية إلى أخرى ومن لحظة زمانية إلى أخرى، فاتحاً المجال أمام الرياضيين والفيزيائيين للربط بين الهندسة الفيزياء ومجهزاً إياهم بالإطار المفاهيمي اللازم لدراسة المكان الفعلي دراسة تفصيلية دقيقة. إذ أضحى المكان، في ضوء نظرية ريمان، نظاماً مادياً معقداً ذا بناء مجالي متشعب على قدم وساق مع المادة الجسيمية المألوفة. وفتح ريمان المجال لدراسة المكان رصدياً وتجريبياً، شأنه شأن النظم المادية الأخرى. ذلك أن نظريته في الهندسة شكلت اطاراً واسعاً للخصائص الممكنة للمكان الفعلي ولغة محكمة لطرح الأسئلة الصحيحة بصدد خصائصه الفعلية، تاركاً الإجابات للفيزياء والتجربة الفيزيائية. بذلك حوّل ريمان الهندسة إلى نظرية فيزيائية قابلة للاختبار، شأنها شان نظريات الفيزياء الأخرى. إذ فيما كانت الهندسة قبل ريمان جزءاً لا يتجزأ من الرياضيات البحتة، وكان البحث فيها رياضياً بحتاً، فقد أضحت بعد ريمان، في جانب مهم منها، جزءاً من الفيزياء النظرية، وأضحت من ثم قابلة

للاختبار العملي شأنها شأن جميع قضايا الفيزياء النظرية.

أما النقطة الثالثة التي تلخص بها إنجاز ريمان، فهي إدراكه العميق للعلاقة بين مادة الكون وبين خصائص المكان. وبصورة خاصة، فقد أدرك إمكانية أن تكون العلاقات الهندسية بين الأجسام معتمدة على الأسباب والقوى الفيزيائية. وكان ذلك أول إشارة إلى هذا الاعتماد، الذي بلره آينشتاين وفصل معالمه لاحقاً في نظرية النسبية العامة. لكن ريمان لم يكتفِ بالإشارة إلى ذلك، وإنما أورد أيضاً بعض التكهنات الخصبة جداً بصدد التركيبة المجهرية للمكان الفعلي وعدد أبعاده وما إذا كان متصلاً أم غير متصل على الصعيد المجهري. وهي تكهنات مهمة تشكل اليوم مادة أساسية للبحث الفيزيائي والرياضي والنظري. ويظن بأن ريمان حاول أن يقدم تفسيراً هندسياً لخصائص المجال الكهرمغناطيسي وقوة الجاذبية على أساس نظريته العامة في هندسة المكان الثلاثي الأبعاد، إلا أنه أخفق في ذلك. وقد وافته المنية وهو في سن الأربعين في غمرة انشغاله بهذه المسألة.

لكن ريمان لم يكن الرياضي الوحيد في الربع الثالث من القرن التاسع عشر الذي طرح فكرة العلاقة بين قوى الطبيعة والخصائص الهندسية للمكان. إذ شاركه في ذلك الرياضي الإنجليزي وليم كليفورد (١٨٤٥-١٨٧٩). الذي عبّر عن أفكاره في هذا الصدد في كتاب له بعنوان: "المنطق العام للعلوم الدقيقة" صدر بعد موته بست سنوات. وهو كتاب مذهل بحق، حيث إنه توقع العناصر الأساسية لنظرية النسبية العامة قبل وضعها بست وثلاثين سنة! وقد ربط كليفورد بصورة صريحة ما بين انحناء المكان الريماني وبين خصائص المادة وقواها. وتساءل عما إذا كانت قوى الطبيعة، بعضها أو كلها، مظاهر مختلفة للتركيبة الهندسية للمكان. ولفت النظر إلى إمكانية أن تكون بعض الظاهرات المألوفة جداً في بيئتنا تعبيراً عن انحناء في المكان. وبالفعل، فقد تبين لاحقاً في نسبية آينشتاين العامة أن حركة مألوفة كحركة القمر حول الأرض مثلاً إن هي إلا تعبيراً عن انحناء الزمكان السالف ذكره. كما لفت كليفورد النظر إلى إمكانية أن يكون انحناء المكان متجانساً، أي هو نفسه في كل نقطة مكانية، وأن يكون متغيراً في الزمان. وهذا بالفعل ما أكدته نظريات الكون

الحديثة التي تفيد بان الكون يتمدد، أي يتغير انحناؤه مع الزمن. كذلك أشار كليفورد إلى امكانية أن يكون هناك تذبذبات في انحناء المكان تنتقل من نقطة إلى أخرى. وهي التذبذبات التي أخذت تعرف بأمواج الجاذبية التي ما زال البحث عنها على أشده اليوم. وحاول كليفورد تفسير المجال الكهرمغناطيسي بدلالة انحناء المكان، لكنه أخفق في ذلك. لكنه أصرّ على فكرة إمكانية أن يكون الوجود المادي برمته مظهراً لهندسة المكان، وهي الفكرة التي طورها لاحقاً (في النصف الثاني من القرن العشرين) الفيزيائي الأميركي جون ويلر.

وهنا لا بدّ من طرح السؤال: لماذا أخفق ريمان وكليفورد في ربط قوى الطبيعة بهندسة المكان، في حين أفلح آينشتاين في ذلك بعدهم بحوالي أربعين عاماً؟

(١٩) الطريق إلى الزمكان

أنهينا الفصل السابق بطرح السؤال الآتي: لماذا أخفق ريمان وكليفورد في وضع نظرية هندسية شاملة في قوى الطبيعة، في حين أفلح آينشتاين في ذلك، بالنسبة إلى قوة الجاذبية على الأقل، بعدهما بحوالي أربعين عاماً؟

والجواب عن ذلك هو أن ريمان وكليفورد قصراً محاولاتهما على المكان الثلاثي الأبعاد، بمعنى أنهما حاولا تفسير قوى الطبيعة بدلالة خصائص المكان الثلاثي الأبعاد الذي اعتبراه لاإقليدياً (ريمانياً). إذ عمداً إلى تطبيق هندسة ريمان التفاضلية على المكان الثلاثي البعد وحاولا اشتقاق خصائص المجالين الكهرمغناطيسي والجاذبي من هذا التطبيق، وأخفقا في ذلك. أما آينشتاين، فقد أدرك، في ضوء نظريته في النسبية الخاصة، أن الفضاء الطبيعي الموضوعي فعلاً، والذي يتمتع بنوع من الاكتمال الهندسي، هو المتصل الزمكاني الرباعي الأبعاد؛ ذلك المتصل الذي يتكون من ثلاثة أبعاد مكانية وبعد زماني واحد. وقد نبعت فكرة هذا الفضاء الرباعي من نظرية النسبية الخاصة، التي وضعها آينشتاين عام ١٩٠٥، على يدي الرياضي الألماني هيرمان منكوفسكي، الذي فصل معالم هذه الفكرة المهمة عام ١٩٠٨، قبل وفاته بعام واحد.

ولتوضيح معنى هذه الفكرة، تدبر سطحاً مستوياً أفقياً ممتد الأبعاد، وأرسم عليه اتجاهين متعامدين ثابتين يتقاطعان في نقطة نعتبرها نقطة الصفر لنظام الإحداثيات هذا، أي نقيس جميع المسافات عبر الاتجاهين الثابتين انطلاقاً منها وباعتبارها نقطة البدء. ويمكن تحديد موضع أي نقطة على السطح المستوي بإنزال عمود على كل اتجاه (إحداثي) وقياس بعد ساق العمود عن نقطة الأصل. بذلك تتحدد كل نقطة برقمين يمثلان بعدي النقطة المعنية عن نقط الصفر. ويسمى هذان الرقمان إحداثيي النقطة المعنية.

والآن، إذا شكلنا نظام إحداثيات آخر بنقل نقطة الصفر المذكورة أعلاه مسافة

معينة عبر الاتجاه الأول ثم مسافة أخرى عبر الاتجاه الثاني، كيف تتغير إحداثيات النقط المكونة للسطح المستوي؟ وبتعبير آخر، ما هي العلاقة بين إحداثيات النظام الجديد وبين إحداثيات النظام القديم؟ بتحليل هندسي بسيط، يتبين لنا أن إحداثي كل نقطة يظل هو نفسه مضافاً إليه ثابت معين. هذا كل ما يتغير. فعملية النقل هذه لا تخلط الإحداثيات معاً. كل ما تفعله هو أنها تضيف ثابتاً معيناً إلى إحداثي كل نقطة على السطح المستوي.

ولكن، ماذا لو شكلنا نظام إحداثيات جديداً بإدارة النظام القديم حول نقطة الصفر على السطح المستوي نفسه بزاوية معينة؟ ماذا يحدث لإحداثيات النقط في هذه الحال؟ بتحليل الزوايا والمثلثات، نجد في الواقع أن هذه الإحداثيات تختلط معاً.

وبتعبير آخر، فإن إحداثيي كل نقطة بالنسبة إلى النظام الجديد المدار يساوي خليطاً خطياً من إحداثي النقطة بالنسبة إلى النظام الجديد المدار يساوي خليطاً خطياً من إحداثيي النقطة بالنسبة إلى النظام القديم. والآن، لنتدبر خطاً مستقيماً يصل نقطتين على السطح ببعضهما. كما أسلفنا في فصل سابق، فإن مربع طول الخط يساوي مجموع مربعي الفرقين بين الإحداثيين المناظرين. والسؤال هو: هل يتغير طول الخط إذا أدرنا نظام الإحداثيات؟ أي، هل يتغير هذا الطول بتغير إحداثيات النقطتين اللتين يصلهما الخط ببعضهما؟ هل إن الطول بالنسبة إلى نظام الإحداثيات الجديد هو نفسه بالنسبة إلى نظام الإحداثيات القديم؟ إن التجارب العملية وهندسة إقليدس تفيد بأن الطول لا يتغير، برغم اختلاط الإحداثيات معاً وتغيرها. إنه يظل كما هو بغض النظر عن نظام الإحداثيات المدار الذي نعتمده. لذلك نعتبر طول المتجهات والخطوط المستقيمة على السطح المستوي لا متغيراً بالنسبة إلى الدوران.

ويمكن، بالطبع، تعميم هذه النتيجة على حالة المكان الثلاثي الأبعاد، مع الانتباه إلى أن نظام الإحداثيات في هذه الحال يتكون من ثلاثة اتجاهات متعامدة ثابتة، وأن كل نقطة في المكان تتحدد بثلاثة إحداثيات. ونجد أن أطوال المتجهات والخطوط

المستقيمة في المكان هي أيضاً لا متغيرة بالنسبة إلى الدوران، وبرغم اختلاط الإحداثيات معاً.

ولنعد إلى السطح المستوي، ولنتدبر نظام إحداثيات يتحرك عليه بسرعة ثابتة بالنسبة إلى نظام الإحداثيات القديم في الاتجاه الأفقي نحو اليمين مثلاً. ماذا يحدث للإحداثيات في هذه الحال؟ أو، ما هي العلاقة بين الإحداثيات بالنسبة إلى النظام المتحرك وبين نظريتها بالنسبة إلى النظام الساكن؟ كيف تتغير إحداثيات نقط السطح المستوي إذ يتحرك نظام الإحداثيات بهذه الطريقة؟ هنا لا بدّ من إدخال الزمن في الصورة، حيث إن الصورة تتضمن الحركة. وهنا أيضاً نتساءل التساؤل المشروع الآتي: هل إن وتيرة الزمن تتغير إذ ننتقل من نظام الإحداثيات الثابت إلى النظام المتحرك؟ هل إن الزمن هو نفسه لجميع نظم الإحداثيات المتحركة بالنسبة إلى بعضهما، أم أنه يتغير من نظام إلى آخر؟ وفق غاليليو ونيوتن والخبرة اليومية، فإنه هو نفسه بالنسبة إلى جميع المشاهدين (نظم الإحداثيات المتحركة). هذا من ناحية. ومن ناحية أخرى، فإن الإحداثي العمودي لكل نقطة يبقى كما هو إذ ننتقل من النظام الساكن إلى النظام المتحرك. أما الإحداثي الأفقي فيتحول إلى الإحداثي الأفقي في النظام الساكن مطروحاً منه حاصل ضرب سرعة النظام المتحرك بالزمن. وتعرف علاقات التحوّل هذه بنسبة غاليليو. والسؤال هو: كيف تختلف نسبية آينشتاين عن نسبية غاليليو؟

(٢٠) من نسبية غاليليو إلى نسبية آينشتاين

بينا في الفصل السابق بعض عمليات التحول التي تجري على الإحداثيات والأطوال إذ ننتقل من نظام إحداثيات على سطح مستو إلى نظام آخر. وتوصلنا إلى ان الإحداثيات تختلط معا إذ ننتقل من نظام إحداثيات إلى آخر مدار بالنسبة إلى الأول بزاوية معينة. أما أطوال المتجهات فتبقى كما هي. ولكن إذا انتقلنا إلى نظام إحداثيات يتحرك أفقياً صوب اليمين بسرعة ثابتة بالنسبة إلى نظام مثبت على السطح، فان الإحداثيات العمودية لنقط السطح المستوي تبقى كما هي. أما الإحداثيات الأفقية فتصبح مساوية للإحداثيات الأفقية بالنسبة إلى النظام المثبت مطروحاً منها السرعة مضروبة بالزمن، الذي يفترض انه هو نفسه بالنسبة إلى جميع نظم الإحداثيات المتحركة بالنسبة إلى بعضها. وتسمى علاقات التحول هذه نسبية غاليليو، إشارة إلى اسم العالم الذي اكتشفها وبين مغزاها الكوني. ومن نتائجها المألوفة انه اذا كان هنالك نقطة تتحرك أفقياً صوب اليمين بسرعة ما بالنسبة إلى نظام الإحداثيات المتحرك، كانت سرعتها بالنسبة إلى نظام الإحداثيات المثبت مساوية لمجموع سرعتها بالنسبة إلى النظام المتحرك وسرعة النظام المتحرك بالنسبة إلى النظام المثبت. فإذا سار قطاران على خطين متوازيين وكانت سرعة القطار (ذي اللون الأسود مثلاً) عشرين كيلو مترا في الساعة بالنسبة إلى القطار الثاني (ذي اللون البني مثلاً)، وكانت سرعة القطار البني بالنسبة إلى محطة القطارات ستين كيلو مترا في الساعة، كانت سرعة القطار الأسود بالنسبة إلى المحطة ثمانين كيلو متراً في الساعة. هذه هي نسبية غاليليو. ولكن ماذا بشأن نسبية آينشتاين؟

دفعت اعتبارات نظرية وأخرى تجريبية متعلقة بالمجال الكهرمغناطيسي والضوء آينشتاين إلى اعتبار سرعة الضوء هي نفسها بالنسبة إلى جميع نظم الإحداثيات التي تتحرك بسرع ثابتة بالنسبة إلى بعضها. وأدرك آينشتاين أن هذا الاعتبار

يحتم أن نعتبر وتيرة الزمن متغيرة من نظام إحداثيات متحرك إلى آخر، وأن نسبة غاليليو، بما في ذلك قانون جمع السرع، لا تنطبق على الواقع المادي إلا في حال السرع الصغيرة جداً بالنسبة إلى سرعة الضوء.

ولتوضيح هذه الفكرة، فلنفترض أن شعاعاً ضوئياً انطلق من نقطة الصفر أفقياً صوب اليمين في اللحظة التي تطابقت فيها نقطة صفر نظام الإحداثيات المتحرك مع نقطة صفر نظام الإحداثيات الساكن. وفقد مبدأ ثبات الضوء الآينشتايني، فإن سرعة الشعاع هي نفسها بالنسبة إلى النظامين، أي إن المسافة التي يقطعها الشعاع مقسومة على الفترة الزمانية هي نفسها بالنسبة إلى النظامين. ولكن لما كان النظام المتحرك يتحرك أيضاً صوب اليمين، فإن المسافة التي يقطعها الشعاع بالنسبة إليه تكون بالضرورة أصغر من تلك التي يقطعها بالنسبة إلى النظام الساكن. وعليه، فلا بد أيضاً ان تكون الفترة الزمنية المنقضية بالنسبة إلى النظام المتحرك أصغر منها بالنسبة إلى النظام الساكن ومن جهة أخرى، فإنه من الواضح أن قانون جمع السرع لا ينطبق على سرعة الضوء. من ثم، فإن نسبية غاليليو لا تنسجم البتة مع مبدأ ثبات سرعة الضوء الآينشتايني. لذلك بحث آينشتاين عن علاقات تحويلية أخرى للإحداثيات المكانية والزمن، أي عن نسبية أخرى، تنسجم ومبدأ ثبات سرعة الضوء، فتوصل هو والفيزيائي الهولندي لورنتس والرياضي الفرنسي بوانكاريه في الوقت ذاته تقريباً إلى علاقات تحويلية جديدة أخذت تعرف بعلاقات لورنتس التحويلية. وتتضمن هذه العلاقات تناسقاً وتكافؤاً بين الأبعاد المكانية والزمن لا نجدهما في نسبية غاليليو. ففي نسبية غاليليو، فإن البعد المكاني الأفقي في النظام المتحرك يساوي خلطياً خطياً من البعد الأفقي في النظام الساكن ومن الزمن فيه. أما الزمن في النظام المتحرك، فإنه لا يساوي مثل هذا الخليط. إذ يبقى كما هو إذ ننتقل من النظام الساكن إلى النظام المتحرك. أما في نسبية لورنتس وآينشتاين وبوانكاريه، فإننا نجد تكافؤاً واضحاً بين المكان والزمان، حيث إن الزمان في النظام المتحرك لا يبقى كما هو، وإنما يساوي خليطاً من البعد المكاني الأفقي ومن الزمن في النظام الساكن. وبتعبير آخر، فإن المكان والزمان يتغيران بالكيفية ذاتها تقريباً

إذ ننتقل من النظام الساكن إلى النظام المتحرك أو بالعكس، الأمر الذي يوحي بنوع من التجانس الهندسي بينهما. لكن الأمر لا يقف عند هذا الحد. إذ لوحظ أيضاً أن مربع طول الخط المستقيم الواصل بين حدثين في المكان مطرحاً منه حاصل ضرب مربع سرعة الضوء بمربع الفترة الزمنية المنقضية بين الحدثين لا متغير بالنسبة إلى جميع نظم الإحداثيات التي تتحرك بسرع ثابتة في خط مستقيم بالنسبة إلى بعضهما؛ أي أنه يبقى كما هو بالنسبة إليهما جميعاً. وهذا يذكرنا بلا تغير أطوال القضبان الصلبة إذ نديرها في المكان أو ننظر إليها من نظم إحداثيات مدارة في المكان بالنسبة إلى بعضها. إذ يبدو هذه الكمية الزمانية المكانية (الزمكانية) هي نوع من طول مستقيم في فضاء رباعي مكاني زماني، وأن الانتقال من نظام إحداثيات إلى آخر متحرك بسرعة ثابتة في خط مستقيم بالنسبة إليه يكافىء نوعاً من الإدارة في الفضاء الرباعي المشار إليه. هذا على الأقل ما دار في خلد الرياضي الألماني، هيرمان منكوفسكي، إذ تأمل في علاقات لورنتس التحويلية، وهذا ما قاده إلى مفهوم المتصل الزمكاني الرباعي الأبعاد عام ١٩٠٨.

(٢١) جولة في الزمكان

تبين لدينا في الفصلين السابقين أن الزمن يتغير، إذ ننتقل من مرجع إسناد قصوري إلى آخر، بكيفية شبيهة جداً بالكيفية التي تتغير بها الأبعاد المكانية، وذلك وفق علاقات لورنتس التحويلية التي تشكل أساس نظرية النسبية الخاصة. فالأبعاد المكانية والزمن تختلط معاً بالكيفية ذاتها تقريباً إذ يتم مثل هذا الانتقال. وتبين أيضاً أن مربع طول الخط المستقيم الواصل بين حدثين في المكان مطروحاً منه مربع حاصل ضرب سرعة الضوء في الزمن كمية لا متغيرة تظل كما هي بالنسبة إلى جميع مراجع الإسناد القصورية. ويسمى الجذر التربيعي لهذه الكمية الفترة الرباعية. ويذكرنا ذلك بتغير الإحداثيات المكانية إذ ندير نظام الإحداثيات المكانية بزاوية معينة حول محور ثابت. ذلك أن إدارة هذا النظام تؤدي إلى اختلاط الإحداثيات المكانية معاً، لكنها تبقي على الطول كما هو من دون تغيير. ويقودنا هذا التشبيه إلى اعتبار الانتقال من مرجع إسناد قصوري إلى آخر مكافئاً لإدارة نظام إحداثيات رباعي يتكون من ثلاثة أبعاد مكانية وبعد زمني واحد بزاوية معينة في فضاء رباعي مكاني زماني. وقد أسمى الرياضي الألماني هيرمان منكوفسكي هذا الفضاء المتصل الزمكاني، أو الزمكان. كما يقودنا هذا التشبيه إلى اعتبار الفترة الرباعية بمثابة المسافة أو الطول في الزمكان، وإن كانت تتمتع بخصائص طولية غريبة وغير مألوفة. فهي تساوي صفراً في حال حركة الضوء بالنسبة إلى جميع مراجع الإسناد القصورية. وهي يمكن أن تساوي في حالات معينة رقماً تخيلياً، أي رقماً يتضمن الجذر التربيعي لسالب واحد.

والنقطة الجوهرية هنا هي أن الأطوال المكانية والفترات الزمنية لا تحافظ على قيمها، أي أنها تتغير، إذ ننتقل من مرجع إسناد قصوري إلى آخر. أما الكمية المكانية الزمانية التي تحافظ على قيمتها، فلا تتغير، عند إجراء هذا الانتقال، فهي الفترة الرباعية. ويشير ذلك إلى أن الفضاء الطبيعي الذي يحقق نوعاً من الاكتمال

هو الزمكان، وليس المكان الثلاثي الأبعاد. وبتعبير آخر، فإن الزمان يرتبط عضوياً بالمكان، يؤثر فيه ويتأثر به على أساس من التكافؤ بينهما، وكأنه بعد مكاني رابع.

من ثم، فإن المكان الثلاثي الأبعاد لا يشكل نظاماً هندسياً متكاملاً، وإنما يشكل جزءاً من فضاء رباعي الأبعاد يمكن أن يعدّ نظاماً هندسياً متكاملاً. وبالطبع فإن الزمان هو جزء عضوي لا يتجزأ من هذا الفضاء، هذا الزمكان.

ويمكن فهم جميع قوانين النسبية الخاصة ونتائجها "الغرائبية" على أساس الخصائص الهندسية للزمكان. بل يمكن القول إن مبادىء النسبية الخاصة وقوانينها ليست تعبيرات عن خصائص الزمكان (فضاء منكوفسكي) وبناه.

يمكن تمثيل الزماكن على النحو الآتي. نرسم خطاً أفقياً يمتد يميناً ويساراً من نقطة معينة نعتبرها نقطة الصفر (نقطة الأصل). ثم نمد من هذه النقطة خطاً عمودياً إلى أعلى وآخر إلى أسفل. ونعتبر الخط الأفقي تمثيلاً للمكان، أو، بالأحرى، لبعد مكاني واحد. أما الخط العمودي فنعتبره تمثيلاً للبعد الزماني، ماضياً ومستقبلاً.

ويمثل هذا النظام الإحداثي الزمكان تمثيلاً دقيقاً وكافياً فيما يتعلق بجميع الحركات التي تتم في اتجاه مكاني ثابت، أي في بعد مكاني واحد. ويمكن تمثيل الأجسام الساكنة في مرجع إسناد قصوري بخطوط مستقيمة عمودية موازية للبعد الزمني.

أما الأجسام التي تتحرك بسرع ثابتة في خط مستقيم، فنمثلها بخطوط مستقيمة مائلة بالنسبة إلى المحور الزمني. وأخيراً، فإن الأجسام المتسارعة، أي تلك التي تتغير سرعها مع الزمن، نمثلها بمنحنيات. وإذا كان هناك مرجع إسناد قصوري آخر يتحرك بسرعة معينة بالنسبة إلى الأول، مثلناه بنظام إحداثيات من هذه القبيل مدار بزاوية معينة بالنسبة إلى الأول.

والآن، فلنتدبر حدثين متزامنين بالنسبة إلى مرجع إسناد قصوري، لكن تفصل بينهما مسافة مكانية محدودة (مثلاً انفجاري نجمين). لما كان يقعان في اللحظة ذاتها، فإن الفترة الواصلة بينهما يمكن تمثيلها في نظام الإحداثيات الزمكاني، الذي يناظر مرجع الإسناد المعني، بخط مستقيم أفقي موازٍ للمحور المكاني. ولكن،

كيف يبدو هذا الخط من منظور مرجع إسناد آخر يمثله نظام إحداثيات زمكاني مدار بالنسبة إلى الأول؟ إذا أنزلنا من كل طرف من طرفي هذا الخط عموداً على كل من المحورين المدارين، تبين أولاً أن الفرق بين العمودين الواقعين على المحور الزمني لا يساوي صفراً. وهذا يعني أن الأحداث التي تبدو متزامنة بالنسبة إلى مرجع إسناد قصوري لا تبدو كذلك بالنسبة إلى مراجع الإسناد القصورية الأخرى. وهي نتيجة رئيسية من نتائج النسبية الخاصة، تتبدى بجلاء وبصورة مباشرة من منظور الزمكان. كذلك، فإن هذا التحليل الهندسي يظهر بجلاء أن الفرق بين العمودين الواقعين على البعد المكاني المدار يقل عن نظيره في نظام الإحداثيات غير المدار.

وهي نتيجة مهمة أخرى من نتائج النسبية الخاصة، تلك المعروفة بتقلص لورنتس وفتزجيرالد السالف ذكره. وهكذا، فإنه يمكن اشتقاق نتائج نظرية النسبية الخاصة جميعاً، بما في ذلك علاقات لورنتس التحويلية، من خصائص الزمكان على نحو ما بيناه أعلاه.

(٢٢) حياة المادة في الزمكان

خلاصة ما توصلنا إليه هي أن المكان الثلاثي الأبعاد لا يمثل نظاماً هندسياً مكتملاً، وإنما يمثل مقطعاً ثلاثياً من فضاء رباعي الأبعاد هو بالفعل نظام هندسي مكتمل. هذا الفضاء الرباعي هو الزمكان، أو فضاء منكوفسكي.

ومثلما أن كثيراً من الكميات الفيزيائية في الفيزياء النيوتنية يمكن تمثيلها بمتجهات في المكان الثلاثي الأبعاد، فإن الشيء الطبيعي في النسبية الخاصة هو أن نمثل مثل هذه الكميات بمتجهات رباعية في الزمكان. وبتعبير آخر، فإننا نتوقع أن تشكل المتجهات الرباعية، التي يتكون الواحد منها من أربع مركبات، اللبنات الأساسية في بناء قوانين المادة والحركة والمجالات في النسبية الخاصة، مثلما تشكل المتجهات الثلاثية اللبنات الأساسية في بناء قوانين الفيزياء النيوتنية.

وتجدر الإشارة هنا إلى أن القانون الفيزيائي، إذا بنى وتشكل من عدد من المتجهات الرباعية والتنسورات (أشكال معممة من المتجهات) الرباعية، فإنه يكون لا متغيراً بالنسبة إلى علاقات لورنتس التحويلية. ومعنى ذلك أن صورته (بناءه الداخلي) لا تتغير إذ ننتقل من مرجع إسناد قصوري إلى آخر، أي إذ ندير نظام الإحداثيات الرباعي بزاوية معينة في الزمكان. ويعود الفضل في اكتشاف ذلك إلى هيرمان منكوفسكي. وقد اعترف آينشتاين بفضل منكوفسكي واعتبر هذا الاكتشاف إسهامه الأكبر في مجال النسبية.

وعلى هذا الأساس، فإنه يمكن تعميم قوانين الفيزياء النيوتنية بحيث تنسجم وعلاقات لورنتس التحويلية، وذلك بالتعبير عنها وإعادة تركيبها باستعمال المتجهات والتنسورات الرباعية في الزمكان. وبصورة خاصة، فإنه يمكن بناء ميكانيك النسبية وقوانين المجال الكهرمغناطيسي بهذه الكيفية.

يمكن أولاً تشكيل متجهات تعبر عن مواضع الأحداث في الزمكان. ويتكون كل من هذه المتجهات من ثلاث مركبات مكانية ومركبة زمنية. كذلك، يمكن اعتبار الفترة

الرباعية مقسومة على سرعة الضوء، وهي كمية لا متغيرة، نظيراً للفترة الزمنية في المكان النيوتني، أي اعتبارها نوعاً من الزمن الرباعي الخاص بالزمكان، وعلى هذا الأساس، فإنه يمكن تشكيل سرعة رباعية على غرار تشكيل السرعة الثلاثية. فمثلما أن السرعة الثلاثية المألوفة تعرّف بأنها المعدل الزمني لتغير الموضع الثلاثي، فإن السرعة الرباعية تعرّف بأنها معدل تغير متجه الموضع الرباعي مع الزمن الرباعي. ووفق هذا التعريف، فإن السرعة الرباعية هي أيضاً متجه رباعي.

وعلى النحو ذاته، فإنه يمكن وضع تعريف للزخم الخطي الرباعي. فمثلما يعرف الزخم الخطي الثلاثي بأنه حاصل ضرب الكتلة في السرعة الثلاثية، فإن الزخم الخطي الرباعي يعرف بأنه حاصل ضرب كتلة السكون (أي كتلة جسم عندما يكون ساكناً) في السرعة الرباعية. ومثلما أن مجموع الزخوم الخطية الثلاثية في نظام مغلق محفوظ (ثابت)، فإنه يمكن اعتبار مجموع الزخوم الخطية الرباعية في نظام مغلق محفوظاً أيضاً. ويبين التحليل الرياضي لهذا التعريف الجديد بأن الزخم الخطي الرباعي يتكون من الزخم الخطي الثلاثي والطاقة الكلية. من ثم، فإن قانون حفظ الزخم الخطي الرباعي يتكون من قانوني حفظ الزخم الخطي الثلاثي وحفظ الطاقة.

ويمكن إعادة تركيب قانون نيوتن الثاني في الحركة على هذا النحو. وينص هذا القانون على أن مجموع القوى المؤثرة على جسم يساوي المعدل الزمني لتغير الزخم الخطي. ويشكل هذا القانون قلب ميكانيك نيوتن. ويمكن إعادة تركيبه نسبياً بتعريف القوة الرباعية بأنها معدل تغير الزخم الخطي الرباعي مع الزمن الرباعي.

فهذا التعريف يضمن بان تكون القوة الرباعية متجهاً رباعياً.

وانطلاقاً من هذا التركيب الجديد لقانون نيوتن الثاني في الحركة، فإنه يمكن اشتقاق علاقة التكافؤ بين الكتلة والطاقة؛ أي يمكن بيان أن الكتلة هي شكل من أشكال الطاقة، ومن ثم أنها لا تطيع قانون حفظ خاصاً بها، وإنما تشكل جزءاً لا يتجزأ من قانون حفظ الطاقة. فالكتلة تزداد بازدياد طاقة حركة الجسم المعني، أي بازدياد سرعته. وبصورة عامة، فوفق هذه العلاقة، فإنه من الممكن تحويل الأجسام

إلى حركة وضوء وغيرهما من أشكال الطاقة، والعكس بالعكس. إن الكتلة هي شكل من أشكال الطاقة المركزة، كما إن الطاقة هي شكل ممتد من أشكال الكتلة. لذلك فإن الطاقة بصورة عامة تؤثر في الجاذبية وتتأثر بها.

وإذا اتبعنا هكذا النهج في تحليل قوانين الكهرمغناطيسية وإعادة تركيبها، استطعنا أن نوحد كثافة التيار الكهربائي الثلاثية مع كثافة الشحنة الكهربائية في متجه رباعي واحد يمكن وسمه بكثافة التيار الرباعية. كذلك، فإنه يمكن توحيد المجال الكهربائي مع المجال المغناطيسي في تنسور رباعي يمثل المجال الكهرمغناطيسي ويسمى تنسور المجال الكهرمغناطيسي ومن ثم يمكن تلخيص معادلات ماكسويل المجالية التي تصف المجال الكهرمغناطيسي في معادلتين تفاضليتين لهذا التنسور.

وهكذا فإن الزمكان أو فضاء منكوفسكي هو الفضاء الطبيعي المكتمل الذي يرشدنا إلى نهج إعادة بناء الفيزياء الكلاسيكية النيوتنية على أساس مبادىء النسبية.

(٢٣) الزمكان المنحني

استعرضنا في الفصول السابقة مبدأ النسبية الخاصة ومبدأ النسبية العامة.

وفي هذا السياق توصلنا إلى مبدأ التكافؤ الآينشتايني التي أرشدنا إلى بنية المكان والزمان بحضور مجال جاذبي. فوجدنا أن هذه البنية لا تطيع قواعد هندسية إقليدس، أي أنها لاإقليدية. وقادتنا هذه النتيجة المذهلة إلى شرح لأسس هندسة إقليدس ومفارقة التوازي في هذه الهندسة، تلك المفارقة التي قادت إلى بناء نظم هندسية لاإقليدية. وبينا كيف وحّد ريمان هذه النظم وعممها، محولاً بذلك الهندسة إلى نوع من الفيزياء النظرية. وأشرنا إلى أن سبب إخفاق ريمان وكليفورد في تفسير قوى الطبيعة باستخدام هندسة ريمان هو أنهما طبقاً هذه الهندسة على المكان الثلاثي الأبعاد واكتفيا بذلك. وبالطبع، فما كان بالإمكان عمل أكثر من ذلك في عصرهما. لكن آينشتاين بين بعدهما بحوالي خمسين عاماً أن مشروعهما التفسيري لا يفلح في تفسير القوة والمادة إلا إذا طبقت هندسة ريمان على فضاء منكوفسكي الرباعي الأبعاد، أي الزمكان، الذي يتكون من ثلاثة أبعاد مكانية وبعد زمني واحد.

لذلك كان من الضروري شرح مفهوم الزمكان، فبينا كيف تقود نظرية النسبية الخاصة، وبخاصة مبدأ ثبات سرعة الضوء، إلى ضرورة الزمكان بوصفه الفضاء الطبيعي المكتمل للأحداث المادية، أي بوصفه نظاماً هندسياً مكتملاً. ثم بينا كيف يمكن إعادة تركيب الفيزياء النيوتنية برمتها بما ينسجم ومبادىء النسبية الخاصة باللجوء إلى المتجهات الرباعية في الزمكان، وأشرنا إلى أن بناء قوانين الفيزياء من متجهات وتنسورات رباعية يضمن لا تغير هذه القوانين بالنسبة إلى جميع مراجع الإسناد القصورية. ويمكن وسم هذا المبدأ بمبدأ لا تغير الصورة. وقد اكتشفه هيرمان منكوفسكي. لكن الفضل يعود إلى آينشتاين في إبراز أهميته وتعميمه.

وهكذا، فقد كان على آينشتاين تحقيق المهمات الآتية:

١ـ تطبيق هندسة ريمان على الزمكان، أي اعتبار فضاء منكوفسكي حالة هندسية

خاصة لزمكان ريماني؛

٢ـ التعبير عن المجال الجاذبي بدلالة التنسور القياسي السالف ذكره للزمكان الريماني؛

٣ـ تحديد العلاقة بين المادة والطاقة من جهة وبين هندسة الزمكان من جهة أخرى؛

٤ـ إعادة تركيب قوانين الميكانيك والكهرمغناطيسية بما ينسجم مع مبدأ لا تغير الصورة السالف ذكره؛ أي إعادة تركيب هذه القوانين من متجهات وتنسورات رباعية في الزمكان الريماني.

هذه هي المهمات التي وضعها إينشتاين نصب عينيه تنفيذاً لمبدأ النسبية العامة ومشروعي ماخ وريمان وكليفورد.

ابتدأ آينشتاين باعتبار الزمكان فضاء رباعياً يطيع هندسة ريمان المعممة. ولهذا الغرض ربط مربع الفترة الرباعية بإحداثيات الزمكان عبر تنسور قياسي يتكون من عشرة اقترانات تعتمد على الإحداثيات الأربعة. وكنا قد ذكرنا في فصول سابقة أن التنسور القياسي يتكون من أربعة اقترانات في حال الفضاءات الثنائية البعد، وتسعة اقترانات في حال الفضاءات الثلاثية، وستة عشر اقتراناً في حال الفضاءات الرباعية. لكن هناك أوجه تناسق في الزمكان الريماني تخفض عدد الاقترانات إلى عشرة. وتحدد هذه الاقترانات العشرة طبيعة هندسة الزمكان في كل نقطة فيه، أي تحدد انحناءه في كل نقطة. وفي الحالة الخاصة التي تكون فيها ستة من هذه الاقترانات مساوية للصفر وتكون الأربعة الباقية ثابتة في المكان والزمان، تحصل على فضاء منكوفسكي، أي زمكان النسبية الخاصة.

والنقطة الجوهرية هنا هي أن الفترة الرباعية في الزمكان الريماني لا متغيرة بالنسبة إلى جميع نظم الإحداثيات الرباعية، ومن ثم جميع مراجع الإسناد الممكنة. وتكسبها هذه الخاصية موضوعية كاملة تفيض على الزمكان برمته وتصبغه بصبغتها.

وفيما يتعلق بالطابع الريماني للبقاع المختلفة في الزمكان، فإنه يمكن التمييز

بين حالتين أساسيتين. فهناك بقاع يمكن فيها اختزال التنسور القياسي العام إلى التنسور القياسي الخاص بفضاء منكوفسكي الوارد ذكره أعلاه، وذلك باختيار مناسب لنظام الإحداثيات الرباعي. ويسمى الزمكان في هذه الحال زمكاناً منبسطاً أو مستوياً، أي يعد شبه إقليدي. لكن هناك بقاعاً لا يمكن اختزال زمكانها إلى فضاء منكوفسكي، أي لا يمكن إيجاد نظام إحداثيات رباعي يحقق هذا الاختزال. وفي هذه الحالات يسمى الزمكان زمكاناً منحنياً.

وقد بين آينشتاين أن الزمكان يكون منبسطاً في البقاع الخالية من المادة والطاقة والبعيدة جداً عن التجمعات الكثيفة للمادة والطاقة. ففي هذه البقاع يمكن العثور على نظام إحداثيات رباعي يختزل التنسور القياسي الريماني إلى التنسور القياسي الخاص بفضاء منكوفسكي. وهذا مكافىء للقول إنه يمكن العثور في هذه البقاع على مرجع إسناد قصوري لا يتسارع بالنسبة إلى مادة الكون. أما بالقرب من المادة والطاقة وفي أوساطهما، فيكون الزمكان منحنياً، وليس هناك طريقة إحداثية لاختزاله إلى فضاء منبسط. وهذا بالطبع هو شكل من أشكال التمييز بين المجالات الجاذبية النابعة من المادة والطاقة وتلك النابعة من التسارع (القوى القصورية) لكنه، بالطبع، ليس تمييزاً مطلقاً، كما هو الحال لدى نيوتن. وسنناقش هذا التمييز بمزيد من التفصيل في الفصول القادمة.

(٢٤) قانون نيوتن الأول وفق أينشتاين

سنعالج في هذا الفصل الكيفية التي عمم بها آينشتاين قانون نيوتن الأول في الحركة وأعاد تركيبه وفق مبادىء النسبية العامة الآنف ذكرها. ذلك أن قانون نيوتن الأول في صيغته الأصلية لا يطيع هذه المبادىء، ومن ثم لا يعد مؤهلاً لأن يكون قانوناً طبيعياً بالفعل. لذلك كان على أينشتاين أن يؤهله بإعادة تركيبه وفق هذه المبادىء.

وبتعبير أدق، فقد وضع آينشتاين نصب عينيه مهمة إعادة تركيب هذا القانون بما ينسجم مع كون الزمكان زمكاناً ريمانياً ومع مبدأ لا تغير الصورة، الذي ينص على ضرورة أن تكون صورة القانون الطبيعي لا متغيرة بالنسبة إلى جميع نظم الإحداثيات الرباعية، وإلا فقد القانون صفته الموضوعية الكونية. ولنحلل قانون نيوتن الأول في ضوء هذين المبدأين.

ينص قانون نيوتن الأول على أنه إذا كان مجموع القوى المؤثرة على جسيم يساوي صفراً، فإن الجسيم إما أن يكون ساكناً وإما أن يكون متحركاً بسرعة ثابتة في خط مستقيم. ويسمى هذا القانون أحياناً مبدأ القصور الذاتي. وقد اكتشفه غاليليو في سياق تحطيمه نظام أرسطو الطبيعي، لكن ديكارت كان أول من صاغه بدقة ووضوح. أما نيوتن فقد أظهر مغزاه الحركي الكوني بدغمه ركناً أساسياً في نظريته الشاملة في الحركة.

وأول ما يتبادر إلى الذهن عند قراءة نص القانون هو السؤال: بالنسبة إلى أي مراجع إسناد ونظم إحداثيات ينطبق هذا القانون؟ فالنص لا يعني شيئا في الواقع إذا لم نحدد مراجع الاسناد التي ينطبق القانون فيها. فما الذي يضمن ألا تتغير القوى من مرجع إسناد إلى آخر؟ كذلك، فإننا نعلم أن السرعة واتجاهها يتغيران إذ ننتقل من مرجع إسناد إلى آخر. وعليه، فإن مرجع الاسناد يدخل جوهرياً في تثبيت معاني العناصر الأساسية المكونة لنص القانون. وبتحليل بسيط للقانون يتبين لنا أن

نص القانون يسري فقط بالنسبة إلى مراجع الإسناد القصورية التي تتحرك بسرع ثابتة في خطوط مستقيمة بالنسبة إلى بعضها والى مادة الكون. إذاً، من الواضح أن قانون نيوتن الأول غير مؤهل لأن يعتبر قانوناً كونياً شاملاً من منظور مبادىء النسبية العامة. فالقانون لا يسري بالنسبة إلى مراجع الإسناد المتسارعة بالنسبة إلى مادة الكون. كذلك فهو يسري موضعياً بالنسبة إلى مراجع الإسناد الساقطة سقوطاً حرّاً في المجالات الجاذبية (مبدأ التكافؤ الآينشتايني). فهو إذاً ينطبق كلياً في عائلة من مراجع الإسناد، وجزئياً في عائلة أخرى، ولا ينطبق البتة في عائلة ثالثة. إنه إذا يخالف مبدأ لا تغير الصورة بشكل جلي. أضف إلى ذلك أن مفهوم الخط المستقيم يفقد معناه في الزمكان الريماني، ومن ثم فإن نص قانون نيوتن الأول يتهاوى في ضوء اعتماد الزمكان الريماني أساساً للأحداث المادية. بذلك، فإن قانون نيوتن الأول في الحركة يخالف المبدأين الرئيسيين في النسبية العامة، ومن ثم لا يجوز اعتباره أكثر من حالة خاصة لقانون فعلي ومؤشر على قانون فعلي.

كيف نعمم هذا القانون بحيث ينطبق بالنسبة إلى جميع مراجع الإسناد ونظم الإحداثيات الرباعية؟ إن مفتاح الحل يكمن في تعريف الخط المستقيم. وبالتحديد، ما هو التعريف المعمم للخط المستقيم في الزمكان الريماني، والذي يقترب من الخط المستقيم الإقليدي إذ يقترب الزمكان الريماني من فضاء منكوفسكي؟ وبتعبير آخر، إذا تدبرنا حركة جسيم في الزمكان الريماني بين نقطتين (حدثين)، فما هو المسار الزمكاني الذي يسلكه الجسيم؟ وهو سؤال قديم في الميكانيكا وعلم الضوء سبق وأن طرحه بالنسبة إلى الحركة في المكان الثلاثي فيرما وموبرتي ولاغرانج وهاملتون، وصاغوا ميكانيك نيوتن برمتها عل أساسه.

أما الجواب الذي توصل إليه آينشتاين على أساس دمج مبدأ التكافؤ مع ميكانيك النسبية الخاصة، فهو أن الجسيم يتبع أقصر مسار بين نقطتين رباعيتين.

ولئن كان هذا المسار خطاً مستقيماً في الفضاءات الإقليدية وشبه الإقليدية، بما في ذلك فضاء منكوفسكي، فإنه بصورة عامة ليس كذلك في الزمكان الريماني، وغيره من الفضاءات الريمانية. بذلك يصبح قانون نيوتن الأول المعمم كالآتي: في

غياب القوى الكهرمغناطيسية والنووية، فإن الجسيم يسلك أقصر مسار رباعي بين نقطتين رباعيتين في الزمكان الريماني؛ أي إنه يسقط سقوطاً حرّاً في المجال الجاذبي بين النقطتين. ويبين التحليل الرياضي أن هذا المسار لا متغير بالنسبة إلى جميع مراجع الإسناد ونظم الإحداثيات الرباعية. وعليه، فإن القانون الأول بهذه الصيغة الآينشتاينية يطيع مبدأ لا تغير الصورة.

وإذا دققنا النظر في هذه الصيغة، تبين لدينا أن هندسة الزمكان هي التي ترشد الجسيم في حركته في الزمكان. فالجاذبية إذاً ليست قوة بالمعنى النيوتني، وإنما هي انحناء في الزمكان. فالجسيم يسلك مسارات منحنية في الزمكان ليس بفعل قوة تؤثر عليه وتحرفه عن الخط المستقيم، وإنما لأن هندسة الزمكان تقضي بذلك، ولأن أقصر مسار في الزمكان الريماني هو مسار منحن، وليس خطاً مستقيماً. ومن الواضح أن نص القانون ينطبق بالنسبة إلى جميع مراجع الإسناد ونظم الإحداثيات والمجالات الجاذبية (الحالات المختلفة لهندسة الزمكان الريماني). من ثم فهو مؤهل تأهيلاً كاملاً لأن يحمل لقب قانون وفق مماييز النسبية العامة. فبغض الطرف عن نظام الإحداثيات الرباعي المتبع، فإن الجسم يتبع أقصر مسار ممكن بين نقطتين رباعيتين. وبالطبع، فإن الذي يحدد ذلك هو التنسور الرباعي الذي يحدد طبيعة هندسة الزمكان وتغيرها من نقطة إلى أخرى.

(٢٥) الجاذبية: من أرسطو إلى نيوتن

رأينا في الفصل السابق كيف عمم آينشتاين قانون نيوتن الأول بحيث ينطبق بالنسبة إلى أي مرجع إسناد، قصورياً كان أو متسارعاً. إذ عدّل آينشتاين هذا القانون بحيث أصبح ينص على أنه في غياب التأثيرات الكهرمغناطيسية والنووية على اختلاف أنواعها، يتبع جسيم ما أكثر المسارات استقامة في الزمكان الريماني (أقصرها، إن شئت). وينطبق ذلك بالنسبة إلى جميع مراجع الإسناد. ولئن كان المسار الأكثر استقامة خطاً مستقيماً في زمكان منكوفسكي شبه الإقليدي، فإنه خط منحن بصورة عامة، أي في زمكان ريمان. ويمكننا هذا المبدأ من تسخير مسارات الجسيمات في الزمكان مساراً لدراسة هندسة الزمكان وعلاقتها بتوزيع المادة فيه.

أي يمكن استعماله أداة لبناء نظرية هندسية في الجاذبية تطيع مبدأ النسبية العامة.

ولكن، لماذا شعر آينشتاين بالحاجة إلى وضع نظرية جديدة في الجاذبية؟ لماذا لم يكتف بنظرية نيوتن في الجاذبية، التي كانت وما زالت تعد بحق واحدة من أكثر النظريات دقة ونجاحاً في تاريخ المعرفة؟ لماذا شعر آينشتاين بالحاجة إلى نبذ نظرية كانت تنسجم بدقة مع جميع الرصدات والمشاهدات والتجارب المعروفة في عصره، باستثناء حالة واحدة يكاد الانحراف فيها أن لا يذكر؟ وباختصار، فإن نظرية نيوتن في الجاذبية لم تكن نظرية فاشلة في الخمس الأول من القرن العشرين، وإنما كانت مثالاً ساطعاً على النظريات الناجحة. فلم يكن هناك مسوغ لتعديلها أو تطويرها أو تعميمها أو نبذها. ولم تكن تمر في أزمة خانقة، كما كان عليه حال فيزياء الذرة والضوء آنذاك. ومع ذلك، فقد شعر آينشتاين بضرورة تخطيها صوب نظرية جديدة في الجاذبية. لماذا؟

بالطبع، كان هناك مبررات ومسوغات عميقة ومشروعة جداً لهذا الشعور الآينشتايني. ولم تكن تقل أهمية عن تلك التي كانت تدعوه إلى تعديل قانون نيوتن الأول.

ولنبدأ بالتذكير بالمعالم الأساسية لنظرية نيوتن في الجاذبية.

كان الظن السائد قبل غاليليو وكبلر، المفجرين الرئيسيين للثورة العلمية الكبرى في القرن السابع عشر، أن فيزياء سطح الأرض لا تمت بصلة إلى فيزياء السماوات، وأن قوانين الأولى تختلف كيفياً عن قوانين الأخرى. إذ كان يظن أن الحركة الطبيعية للأجسام بين سطح الأرض وبين فلك القمر هي الحركة في خطوط مستقيمة، في حين أن الحركة الطبيعية للأجرام السماوية، التي تقع بين فلك القمر وفلك النجوم الثابتة، هي الحركة الدائرية المنتظمة. وكان يظن بأنه ليس هناك أدنى صلة بين الحركتين. وسبب هذا الظن هو الاعتقاد بأن الحركة المستقيمة للاجسام الأرضية تكمن في الطبيعة الجوهرية لهذه الأجسام، وليس في التفاعل المادي بينها وبين محيطها المادي. إذ كان مفهوم التفاعل المادي غائباً عن الفلسفة الطبيعية القديمة. كذلك، كان يظن بأن الحركة الدائرية المنتظمة للأجرام السماوية تنبع من طبيعتها الجوهرية الأثيرية الكاملة، وليس من تفاعلها معاً ومع الشمس. وعليه، كان لا بدّ أن يغيب الفكر القديم العلاقة بين نمطي الحركة المذكورين. لقد أدرك الأقدمون من إغريق وعرب وأوروبيين أن الأجسام الثقيلة تميل إلى السقوط في خطوط مستقيمة صوب مركز الأرض. لكنهم لم يعزوا هذا الميل إلى تفاعل بين مادة الأرض وهذه الأجسام، وإنما عزوها إلى الطبيعة الجوهرية للاجسام الثقيلة والمتمثلة في سعي هذه الأجسام إلى مركز الأرض من أجل الاستقرار فيه بحكم طبيعتها الداخلية.

ولكن مع صدور كتاب كوبرنيكوس المتعلق بدوران الكواكب والأرض حول الشمس عام ١٥٤٣، ومع تنامي التيار المادي الذري في أوروبا، تنامي الإدراك لفكرة أن مادة السماوات لا تختلف جوهرياً عن مادة الأرض، وأن الأرض والسماوات تخضع جميعاً إلى قوانين كونية واحدة. وجاءت رصدات غاليليو الفلكية التلسكوبية لتؤكد هذه الفكرة وتدعمها. وفي هذه الأثناء تمكن غليليو من اكتشاف القوانين الفعلية لحركة الأجسام قرب سطح الأرض (قوانين السقوط الحر والقذائف) على أنقاض نظرية أرسطو في الحركة. كما تمكن يوهانس كبلر من اكتشاف القوانين الدقيقة لحركة الكواكب حول الشمس وحركة الأقمار حول الكواكب. ومع ذلك، ظل توحيد فيزياء

الأرض مع فيزياء السماوات ناقصاً وغير مكتمل. ذلك أنه بدت قوانين غاليليو الأرضية وكأنها لا تمت بصلة إلى قوانين كبلر السماوية، أي بدت وكأنها تنتمي إلى صنف مختلف كلياً عن صنف قوانين كبلر. فظل الشرخ بين الأرض والسماوات قائماً برغم نظرية كوبرنيكوس والمادية الذرية ورصدات غاليليو وتأملات ديكارت. وهكذا، فما إن جاء النصف الثاني من القرن السابع عشر حتى تبوأت مشكلة توحيد قوانين كبلر وقوانين غاليليو مركز الصدارة في فكر الأوساط العلمية الأوروبية آنذاك، وخصوصاً في بريطانيا، التي كانت تمر في مرحلة ثورتها البرجوازية التحديثية.

وبرغم أهمية إسهامات الهولندي هويغنز والانجليزي هوك في هذا المضمار، إلا أن الفضل الرئيسي في توحيد قوانين كبلر مع قوانين غاليليو يعود إلى الإنجليزي إسحق نيوتن. إذ أدرك نيوتن وبين أن القوة المسؤولة عن الحركة الإهليلجية الكبلرية للكواكب هي ذاتها المسؤولة عن سقوط الأجسام وحركة القذائف على سطح الأرض. لقد أدرك نيوتن وبين أن الكواكب تسقط حول الشمس تماماً كما تسقط الأجسام على سطح الأرض بفعل قوة كونية واحدة هي قوة الجاذبية.

كيف يتم ذلك، وما طبيعة هذه القوة الكونية.

(٢٦) جاذبية نيوتن

كما أسلفنا، فقد حقق نيوتن ثورة كبرى في الفيزياء والفلك بتوحيده قوانين غاليليو الأرضية مع قوانين كبلر السماوية، وبيانه أن حركات الكواكب والأجسام الأرضية مظاهر مختلفة لقوة كونية واحدة، هي قوة الجاذبية. فالقوة المسؤولة عن حركة القمر حول الأرض هي نفسها المسؤولة عن سقوط الأجسام على سطح الأرض، وهي من طينة القوى المسؤولية عن حركة الكواكب حول الشمس. إنها قوة كونية تنشأ عن التفاعل المادي عن بعد بين أي كتلتين أو أكثر. وهي قوة شاملة تؤثر أنى وجدت المادة وكيفما تمظهرت. فهي ملازمة للمادة ملازمة الكتلة لها. بل إن الكتلة هي الشحنة التي تولدها. من ثم فإن الأجسام تؤثر جاذبياً على بعضها أنى وجدت.

وقد حدد نيوتن بدقة مقدار هذه القوة واتجاهها بدلالة خصائص الجسيمات المتفاعلة مماً جاذبياً. إذ بين أن مقدار قوة الجاذبية التي يؤثر بها جسيم على آخر تتناسب طردياً مع حاصل ضرب كتلتيهما وعكسياً مع مربع المسافة بينهما، وتكون هذه القوة في اتجاه مركز الجسيم المؤثر. فإذا اعتبرنا الشمس مثلاً مركزاً كتلياً ثابتاً (بالنظر إلى كتلتها الكبيرة التي تطغى على جميع الكتل الأخرى في المجموعة الشمسة)، واعتبرنا كوكباً ما نقطة كتلية تتحرك بالقرب من الشمس، تبين لدينا أن تسارع الكوكب، أي المعدل الزمني لتغير سرعته، يتناسب طردياً مع كتلة الشمس وعكسياً مع مربع بعده عن مركز الشمس، ويكون متجهاً صوب مركز الشمس في أي لحظة من حركته، وذلك ارتكازاً إلى قانون نيوتن الثاني في الحركة، والذي ينص على أن القوة المؤثرة على جسيم تساوي حاصل ضرب كتلته في تسارعه.

وقد سخر نيوتن ببراعة خارقة الحسبان (حساب التفاضل والتكامل)، الذي ابتكره لحل مشكلات الميكانيك، لاشتقاق قوانين كبلر السماوية من هذه العلاقة بين التسارع اللحظي للكوكب وبعده عن مركز الشمس. وقد أفلح في اشتقاق هذه القوانين في صورة معممة أكثر دقة من الصورة الكبلرية الأصلية. إذ تبين لنيوتن

أن الكوكب ينبغي أن يتحرك في قطع مخروطي على سطح مستو ثابت. فإما أن يكون مساره إهليلجياً (قطعاً ناقصاً)، كما هو الحال مع كواكب المجموعة الشمسية المعروفة، وذلك كما ينص قانون كبلر الأول في حركة الكواكب حول الشمس، وإما قطعاً مكافئاً، وإما قطعاً زائداً. وفي الحالتين الأخيرتين، فإن الكوكب أو الجسم يقضي فترة قصيرة بالقرب من الشمس، ثم يغادرها إلى غير رجعة. وتعتمد هذه الاحتمالات الثلاثة على السرعة الابتدائية للكوكب المعني، أي على السرعة التي يقترب بها من الشمس.

وبين نيوتن أيضاً أن المعدل الزمني للمساحة، التي يمسحها الط الواصل بين مركز الشمس والكوكب، ثابت لا يتغير. وهو قانون كبلر الثاني. وأخيراً وليس آخراً، فقد بين أن مربع فترة دورة كاملة للكوكب حول الشمس يتناسب تناسباً طردياً مع مكعب متوسط بعد الكوكب عن الشمس. وهو قانون كبلر الثالث.

وهكذا، فقد تمكن نيوتن من التوصل نظرياً، على أساس نظريته في الجاذبية والحركة، إلى ما سبق أن توصل إليه كبلر رصدياً (بتحليل الرصدات والمشاهدات الفلكية المتراكمة عبر العصور).

كذلك، تمكن نيوتن من تفسير ظاهرة المد والجزر وغيرها من الظاهرات المألوفة على أساس نظريته في الجاذبية. وأفلح الفلكي الإنجليزي، إدموند هالي، الذي كان معاصراً لنيوتن، في التنبؤ الدقيق بأوقات ظهور مذنب أخذ يعرف باسمه (مذهب هالي) على أساس نظرية نيوتن في الجاذبية. وجاءت الرصدات الفلكية لتؤكد دقة هذه التنبؤات، ومن ثم دقة النظرية العلمية التي ترتكز إليها.

وتوالت انتصارات نظرية نيوتن في الجاذبية بعد ذلك. وطوّر تطبيقها حتى وصل أوجه في كتاب "الميكانيك السماوي" للرياضي الفرنسي بيير دي لابلاس، وذلك في مطلع القرن التاسع عشر. وفيه أخذ لابلاس بعين الاعتبار التفاعلات الجاذبية بين جميع الأجرام السماوية المعروفة لديه والمكونة للمجموعة الشمسية، وليس فقط التفاعل الجاذبي بين كل كوكب على حدة وبين الشمس. وبتطبيقه الأساليب المتطورة للحسبان التفاضلي، التي طورها رياضيو فرنسا وأوروبا الأفذاذ إبان القرن الثامن

عشر، على هذا النظام المعقد، تمكن لابلاس من تفسير استقرار المجموعة الشمسية والتفصيلات الدقيقة لحركة الكواكب والأقمار.

وفي منتصف القرن التاسع عشر، لوحظت اضطرابات في حركة الكوكب أورانوس تحرفه عن مساره النيوتني النمطي. وعزا كل من الإنجليزي أدامز والفرنسي ليفرييه هذه الانحرافات إلى وجود كوكب مجهول يتحرك في مسار قريب من مسار أورانوس. وباستعمال نظرية نيوتن في الجاذبية تمكناً من تحديد كتلته ومواضعه وبينا كيفية الاستدلال على وجوده. وسرعان ما اكتشف الفلكس الألماني "غاله" وجوده بالكتلة وفي الموضع اللذين تنبأ بهما أدامز وليفرييه. أما في النصف الثاني من القرن العشرين، فقد تجلت عظمة نظرية نيوتن في الجاذبية في نجاح البشرية في ايصال إنسان إلى القمر على أساسها وباستعمالها في حساب مسارات المركبات الفضائية.

ومع ذلك كله، فقد شعر آينشتاين بقصور هذه النظرية. لماذا؟

(٢٧) لغز عطارد بين نيوتن و آينشتاين

كما أسلفنا، فقد تمكن علماء القرن التاسع عشر من حل جل المسائل بصدد حركة الكواكب والأقمار والمذنبات في المجموعة الشمسية. ولم يبقَ في نهاية القرن المذكور سوى عدد محدود جداً من المسائل المعلقة، تركزت في حركة القمر وعطارد. ويمكن القول إنها ما زالت معلقة حتى الآن لصعوبة الحسم رصدياً في أمرها. فهناك أكثر من طريقة مقنعة لتفسيرها تفصيلياً، لكن أمر الحسم بين هذه الطرائق ليس بالمسألة السهلة بالنظر إلى صعوبة قياس الانحرافات الصغيرة المعنية.

وبالتحديد، فإن حركة عطارد حول الشمس شكلت حلبة صراع رئيسية بين نظريتي نيوتن و آينشتاين في الجاذبية، منذ وضع نظرية النسبية العامة وحتى اليوم.

إذ لوحظ منذ القرن التاسع عشر أن مدار عطارد ليس مداراً إهليلجياً مغلقاً تماماً، كما ينص قانون كبلر الأول، وإنما ينحرف قليلاً عن ذلك. ويبدو هذا الانحراف على صورة حركة بطيئة جداً لمحور إهليلج عطارد في اتجاه حركة الكوكب نفسه؛ أي إن المدار الإهليلجي نفسه يدور حول الشمس بحركة بطيئة جداً. وهذا يعني أن الكوكب لا يعود إلى النقطة ذاتها بعد إكمال عدد صحيح من الدورات، وإنما يعود إلى نقطة أخرى قربها. وبالتحديد، فقد وجد أن حضيض مدار عطارد، أي أقرب نقطة على مداره من الشمس، يدور حول الشمس بزاوية لا تتعدى جزءاً صغيراً من الدرجة في القرن الواحد. ومع أن هذه الزاوية صغيرة جداً، إلا أن الرصدات الفلكية وصلت حداً من الدقة في القرن التاسع عشر مكنها من تحديد هذا الانحراف.

وتنشأ مثل هذه الانحرافات عن انحرافات في قانون القوة عن الاعتماد العكسي على مربع المسافة. إذ تبين، بصورة عامة، أن مسار الجسم الخاضع للقوة لا يكون مساراً مغلقاً كالدائرة والإهليلج إلا في حالتين: حالة اعتماد القوة عكسياً على مربع المسافة، وحالة اعتمادها طردياً على المسافة نفسها. وفيما عدا ذلك يكون المسار مفتوحاً. وعليه، فإن الانحراف المذكور في مسار عطارد يشير إلى أن قوة الجاذبية

المؤثرة عليه تنحرف قليلاً جداً عن الاعتماد العكسي على مربع المسافة.

وعزا علماء القرن التاسع عشر هذا الانحراف إلى تأثيرات الكواكب الأخرى على عطارد، والتي تحدث اضطرابات طفيفة في حركته. وبالفعل، فإن هذه الاضطرابات تفسر جزءاً كبيراً من الانحراف المذكور، لكنها لا تفسر الانحراف كله. لذلك، قدّم علماء آخرون تفسيرات أخرى، مثل أثر انحراف شكل الشمس قليلاً عن الشكل الكروي التام. واقترح الفلكي الألماني، زيلفر، في مطلع القرن العشرين تعديلاً طفيفاً على قانون نيوتن في الجاذبية لهذا الغرض. واعتقد بعضهم أن هناك كوكباً مجهولاً بين الشمس وعطارد، لكن الرصدات عجزت عن الكشف عن مثل هذا الكوكب. لذلك ظلت حركة حضيض عطارد مسألة معلقة لأن التفسيرات المدّمة لم تكن مقنعة تماماً. وظل الحال كذلك حتى عام ١٩١٦، يوم استطاع آينشتاين تفسير هذا الانحراف تماماً بصورة طبيعية ومن دون افتراضات اعتباطية، وذلك باستعمال نظرية النسبية العامة، التي كان قد وضعها لتوه. وكان ذلك نصراً كبيراً للنظرية الجديدة، واعتبر دليلاً قوياً على جدية النظرية وواقميتها. وظن العلماء آنذاك أن صفحة حضيض عطارد قد طويت إلى الأبد، وأن الأمر قد حسم لصالح نظرية آينشتاين في الجاذبية على حساب نظرية نيوتن. لكن الأمر لم يكن بهذه البساطة. إذ، بقدوم الستينيات والنهوض العارم الذي شهدته في حقل القياسات والرصدات الفلكية والأدوات الالكترونية الفائقة الدقة، فتح ملف حضيض عطارد من جديد، وتوالت القياسات الهادفة إلى تحديد إسهام كل عامل مؤثر، وبخاصة الإسهام النابع من انحراف الشمس عن الشكل الكروي التام. وتضاربت بعض هذه القياسات، الأمر الذي عزز الاعتقاد بأن هذه المسألة المعلقة لما تحسم. وما زال النقاش محتدماً في هذا الأمر.

وكذلك الحال بالنسبة إلى الاضطرابات في حركة القمر. فمع أن جلّ هذه الاضطرابات يفسرها أثر جاذبية الشمس عليه، إلا أن هناك جزءاً لما يحسم أمره.

ولعل المد والجزر الأرضي من ضمن المؤثرات الرئيسية في هذا المضمار. لكن هناك قدراً من اللايقين في حساب هذا الأثر، بالنظر إلى تعقده.

وهكذا، فباستثناء هذه الانحرافات البسيطة، فإن حركات مكونات المجموعة

الشمسية مفهومة تماماً وبدقة كبيرة على أساس نظرية نيوتن في الجاذبية. وحتى هذه الانحرافات، فإنها ما زالت معلقة، ولما تحسم تماماً لصالح نظرية النسبية العامة على حساب نظرية نيوتن.

إذاً، ليس هناك مبرر رصدي قياسي تجريبي لنبذ نظرية نيوتن ووضع بديل لها. وعليه، فلا بدّ أن يكون هناك مبررات من نوع آخر لذلك.

(٢٨) كون نيوتن

تفترض ميكانيك نيوتن، بما في ذلك نظريته في الجاذبية، تصوراً معيناً للكون (المادة، والمكان، والزمان). وجوهر هذا التصور هو أن المكان هو وعاء إقليدي لا نهائي الامتداد ومطلق. ونعني بلفظة "مطلق" أنه أزلي وأبدي وثابت الخصائص بحيث لا تتأثر هذه الخصائص بالأحداث المادية التي تقع فيه ولا تؤثر فيها. ويتضمن هذا الوعاء المكاني حشدا(ربما لا نهائياً) من الجسيمات الأولية التي تتفاعل معاً بطرائق معينة، فتؤثر على بعضها بقوى متنوعة. وهذه القوى هي التي تحدد حركاتها وروابطها معا. ويتمتع الوعاء المكاني بأسبقية وجودية على الجسيمات المادية، حيث إن هذا الوعاء يمكن أن يوجد فارغاً من كل جسيم. أما الجسيمات فلا يمكن أن توجد من دون مكان. إذ يمكن أن نتصور المكان من دون مادة، لكننا لا نستطيع أن نتصور المادة من دون مكان.

هذا هو جوهر التصور النيوتني للكون. ولكن، كيف تصور نيوتن التفاعلات بين الجسيمات الأولية؟ أو، بالأحرى، ما هو التصور الذي تنطوي عليه ميكانيك نيوتن للتفاعلات المادية؟

لقد صنف نيوتن التفاعلات المادية على ثلاثة أصناف رئيسية. هناك أولا التلامس والتصادم. فالجسيمات تؤثر على بعضها عبر التلامس والتصادم. وهناك أيضاً الفعل (الأثر، التفاعل) عن بعد. فالجسيمات تؤثر على بعضها عن بعد، أي حتى عندما تفصل بينها مسافات كبيرة، كما هو الحال مع الجاذبية والكهربائية والمغناطيسية. وكما بين نيوتن، فإن سقوط الأجسام على سطح الارض، وترابط المجموعة الشمسية، لهما دليلان ساطعان على الفعل الجاذبي عن بعد. كذلك، فقد أشار نيوتن إلى صنف ثالث من القوى، وهو القوى القصورية أو الوهمية الناشئة عن تسارع مراجع الإسناد بالنسبة إلي مادة الكون، وهي القوى التي شكل لغزها نقطة انطلاق نظرية النسبية العامة، كما بينا في الفصول السابقة (ماخ، آينشتاين).

ولنركز على مفهوم الفعل عن بعد.

تصور نيوتن هذا التفاعل على أنه تفاعل مباشر بين الجسيمات، تماماً كالتلامس والتصادم. ومعنى ذلك أن الجسيمات تؤثر على بعضها لحظياً حتى وهي بعيدة عن بعضها. من ثم، فلا شأن للمكان في هذا التفاعل، مع أنه يفصل بين الجسيمات المتفاعلة. فهذه الجسيمات تتفاعل معا جاذبياً وكهربائياً ومغناطيسياً وكان المكان غير موجود. ومع ذلك، فإن شدة هذه التفاعلات تقل كلما ازدادات المسافات الفاصلة بين الجسيمات المتفاعلة. إنه بالفعل لأمر محير. إن الجسيمات تتفاعل معاً وكأن المكان غير موجود، لكن المكان يؤكد وجوده عبر تناقص شدة التفاعل بتزايد المسافات الفاصلة. بذلك، فإن مفهوم الفعل عن بعد هو مفهوم متناقض مع ذاته. فهو يتجاهل وجود المكان ويؤكده في آن. فهو تفاعل مباشر بين الجسيمات لا شأن للمكان فيه، لكن شدته تعتمد على المكان. وقد أدرك مبتكر هذا المفهوم، أعني نيوتن، هذا التناقض. لذلك، أبدى استنكاره ورفضه لهذا المفهوم واشمئزازه منه مرارا وتكراراً، برغم أنه كان مبتكره وكان يدرك جيدا أن الميكانيك التي أنشأها تفترضه وتنطوي عليه. وقد علق عليه نيوتن بسخرية مريرة ورعب منطقي جلي، واعتبره تجسيدا للامعقول. ومع ذلك، ظل هذا المفهوم يربض فيقلب ميكانيك نيوتن، ولم يفلح نيوتن في التخلص منه. وعلى إياه وإدراك لا معقوليته وفضائحيته المنطقية. لقد كان وضعاً مؤلماً بحق لنيوتن: أن يقبل بالامعقول أساسا لنظريته المحكمة في الحركة وأسبابها. وبالطبع، فإن نيوتن لم يلجأ إلى إخفاء هذه المفارقة، وإنما عبّر عنها بكل صدق وجلاء، وحاول إيجاد آليات مادية مقنعة لهذا النمط من التفاعل، لكنه أخفق في ذلك، لأن عصره لم يكن مهيأ لذلك مفاهيمياً وفكرياً. ولعله من المناسب الإشارة هنا إلى فقرة وردت في رسالة بعثها نيوتن إلى بنتلي في مطلع عام ١٦٩٢، ويقول فيها نيوتن: "إنك أحياناً تتكلم عن الجاذبية بصفتها جوهرية وأساسية في المادة. أرجوك ألا تعزو هذه الفكرة إليّ. ذلك أن سبب الجاذبية هو ما لا أزعم معرفته، ومن ثم أحتاج إلى مزيد من الوقت لتدبره".

وبرغم تحفظات نيوتن الكبيرة على مفهوم الفعل اللحظي عن بعد، إلا أنه لم يدع

هذه التحفظات تؤثر على نظريته الرياضية في الحركة والجاذبية، تلك النظرية التي مكنته من اشتقاق قوانين كبلر في حركة الكواكب والأقمار وقوانين غاليليو في السقوط الحر على سطح الأرض، وتعديلها صوب مزيد من الدقة، وتفسير جلّ الظاهرات الفلكية المتعلقة بالمجموعة الشمسية والمعروفة في عصره. إن النجاح الكبير الذي أحرزته هذه النظرية الرياضية أحاطها بهالة من الهيبة حالت دون أن يعبث بها حتى مطلع القرن العشرين. لذلك ميز نيوتن بين النظرية الرياضية وقاعدتها المفاهيمية، فعزل الأولى عن الثانية وأطلق العنان لمخياله وشكوكه بصدد القاعدة بمعزل عن النظرية العلمية. لكنه لم يتوصل إلى نتيجة مقنعة في هذا الصدد.

لذلك، ظلّ قلقاً بشأن لا معقولية هذه القاعدة حتى مماته، وكأنه أدرك أن في هذه القاعدة المفاهيمية مقتل نظريته الرياضية. إذ إن مفهوم الفعل عن بعد كان الحافز الرئيسي الذي دفع آينشتاين إلى الإطاحة بنظرية نيوتن في الجاذبية والاستعاضة عنها بنظرية النسبية العامة.

(٢٩) التصور المجالي لجاذبية نيوتن

لم يكن نيوتن الوحيد الذي ضاق ذرعاً بمفهوم الفعل عن بعد، ذلك المفهوم المحير الذي ارتكزت إليه نظرية نيوتن الرياضية في الحركة والجاذبية. فما إن أشرف القرن الثامن عشر على الانتهاء حتى أخذ علماء أوروبا ورياضيوها يكثفون جهودهم لخلق بدائل معقولة لهذا المفهوم، سواء بالنسبة إلى الجاذبية أو الكهرمغناطيسية. وكان في طليعتهم لابلاس وبواسان الفرنسيان في حال الجاذبية، وفرادي الإنجليزي وماكسويل السكتلندي في حال الكهرمغناطيسية، الذين أسهموا مساهمة أساسية في بناء مفهوم المجال، البديل الحقيقي لمفهوم الجسيم وتفاعلاته اللحظية، مع الإشارة إلى أن مفهوم المجال لم يكتمل ويتبوأ مركز الصدارة إلا على يدي آينشتاين. وحتى يتسنى لنا أن نفهم معنى هذا البديل، فلنلق مزيداً من الضوء على مفهوم الجسيم وخصائص الميكانيكية.

وجد نيوتن أن قوانين الحركة والجاذبية تأخذ أبسط صورها وأدقها وأوضحها من حيث المعنى الفيزيائي حين يتم صوغها بدلالة الجسيّمات والكميات والخصائص التي تحملها. هذه هي الصيغة المعيارية لهذه القوانين. والجسيم، وفق نيوتن، هو نقطة هندسية (لا أبعاد لها) تتحرك وتحمل كميات ميكانيكية متنوعة، كالكتلة والزخم الخطي والزخم الزاوي وطاقة الحركة وطاقة الوضع. أما القوة فهي ليست خاصية من خصائص الجسيم، وإنما هي خاصية من خصائص التفاعلات بين الجسيّمات. فالقوة تؤثر على الجسيّمات، لكن الأخيرة لا تملكها ولا تحملها. وحين تؤثر قوة على جسيّم، فإنها تولد في حركته تسارعاً، أي تغيراً في سرعته المتجهة، يساوي القوة المؤثرة مقسومة على كتلة الجسيم، وذلك وفق قانون نيوتن الثاني في الحركة.

ونعني بالزخم الخطي حاصل ضرب كتلة الجسيم في سرعته المتجهة. وتولد القوى المؤثرة تغيراً في هذه الكمية بحيث يساوي المعدّل الزمني لتغير الزخم مجموع القوى

المؤثرة. أما الزخم الزاوي، فهو كمية متجهة أخرى تعبر عن مدى انحراف حركة الجسيم عن الخط المستقيم. ووفق ميكانيك نيوتن، فإن طاقة الحركة تساوي نصف حاصل ضرب الكتلة في مربع السرعة، ويكون مجموعها ثابتاً (محفوظاً) في حال التصادمات المرنة بين الجسيمات. ويعبر التغير فيها عن الشغل الذي تبذله القوى المؤثرة على الجسيم في أثناء حركته. أما طاقة الوضع، فهي طاقة يكتسبها الجسيم بحكم موضعه في بقعة تخضع لتأثير قوى معينة. وفي حال الجاذبية الأرضية مثلاً، فإن طاقة الوضع هذه تزداد كلما ابتعدنا عن سطح الأرض. وفي غياب الاحتكاك ومقاومة الهواء، يكون مجموع طاقة الحركة وطاقة الوضع ثابتاً، وهذا ما يعرف بقانون حفظ الطاقة الميكانيكية. ويبين القانون كيف تتحول طاقة الوضع إلى طاقة حركة، والعكس بالعكس، وتميل الجسيمات إلى التحرك من مواضع طاقة الوضع العالية إلى مواضع طاقة الوضع المنخفضة. لذلك تسقط الأجسام على سطح الأرض.

وقد أخذ الفيزيائيون في مطلع القرن التاسع عشر ينظرون إلى التفاعل الجاذبي على أنه تفاعل موضعي، وليس تفاعلاً عن بعد، على النحو الآتي: تصور أولئك الفيزيائيون أنه يحيط بكل جسيم يحمل كتلة تأثير جاذبي يمتد إلى ما لا نهاية.

وهذا التأثير أو المجال الجاذبي يتغير من نقطة مكانية إلى أخرى. كما إنه يحمل الكميات الميكانيكية المذكورة أعلاه، لكنها لا تكون متمركزة في نقط معينة، كما هو الحال مع الجسيمات، وإنما تكون موزعة بصورة متصلة في جميع البقاع الميكانيكية التي يحتلها المجال. فالمجال الجاذبي إذاً هو مخزن ممتد للزخم الخطي والزخم الزاوي والطاقة. وعليه، فإذا وضعنا جسيّماً اختيارياً في موضع معين في مجال جاذبي، فإنه لا يتفاعل مباشرة مع مصدر هذا المجال تفاعلاً عن بعد، وإنما يتفاعل بصورة مباشرة مع المجال الجاذبي موضعياً، أي في الموضع الذي يكون فيه الجسيّم. أما الكمية الأساسية التي تمثل المجال الجاذبي وتحدد كيفية تغير خصائصه الميكانيكية في المكان، فهي ما يسمى الجهد الجاذبي. وهو اقتران للموضع يمكن اشتقاق جميع الخصائص الميكانيكية للمجال منه. وهو عبارة عن طاقة وضع

لكل وحدة كتلة. لذلك تكتسب الجسيمات طاقات وضع بحكم مواضعها في المجال الجاذبي. فإذا وضعنا جسيماً في موضع ما في مجال جاذبي، فإنه يكتسب طاقة وضع مساوية لحاصل ضرب كتلة الجسيم في الجهد الجاذبي عند الموضع المعني. وتؤثر قوة الجاذبية لكل وحدة كتلة على أي جسيّم في الموضع المعني في الاتجاه الذي يبلغ عند تناقص الجهد الجاذبي أقصى مداه، وهي تساوي معدل تناقص الجهد الجاذبي في هذا الاتجاه. ولكن، لما كانت القوة لكل وحدة كتلة هي التسارع نفسه لأي جسيم في الموضع المعني، فإنه يمكن اعتبار المجال الجاذبي مجال تسارع لجميع الجسيمات يبين تغير التسارع من نقطة مكانية إلى أخرى، واعتبار التسارع في موضع ما مساوياً لمعدل تناقص الجهد الجاذبي في اتجاه أكبر تناقص عند الموضع المعني. بذلك نربط ما بين حركة جسيم والخصائص الموضعية للمجال الجاذبي، أي نبين كيف يحدد المجال الجاذبي حركة الجسيمات المتأثرة به موضعياً.

ويبقى السؤال المهم: كيف يعتمد المجال الجاذبي موضعياً على المادة؟ أي، ما هي المعادلات التي تحكم العلاقة بين الجهد الجاذبي والكثافة الموضعية للمادة التي تولد المجال الجاذبي؟ ما هي العلاقة بين المجال الجاذبي ومصدره؟

(٣٠) قانون المجال الجاذبي النيوتني

في الفصل السابق، بينا كيف طوّر فيزيائيو القرن التاسع عشر طريقة جديدة للنظر إلى القوى المؤثرة عن بعد، وهي الطريقة المجالية. إذ تصوروا الجاذبية مثلاً على أنها أثر أو مجال متصل يمتد في المكان ويختزن في باطنه الزخم والطاقة بصورة متصلة وممتدة. ويتحدد هذا المجال بدلالة اقتران واحد للمكان، وهو ما يسمى الجهد الجاذبي. ولا تتفاعل الجسيّمات جاذبياً معاً بصورة مباشرة، وإنما عبر المجال الجاذبي. وهذا يعني أنها تتفاعل موضعياً مع المجال الجاذبي، بحيث تميل إلى التحرك من مواضع الجهد العالي إلى مواضع الجهد المنخفض، وبحيث يساوي تسارع الجسيم في موضع ما معدل تناقص الجهد الجاذبي عند هذا الموضع في اتجاه أكبر تناقص. وقد طور الفيزيائي الإنجليزي مايكل فرادي والفيزيائي السكتلندي جيمس كلارك ماكسويل هذا التصور وطبقاه على الظاهرات الكهرمغناطيسية، الأمر الذي قاد إلى تحديد المجال الكهرمغناطيسي بدلالة أربعة اقترانات (جهود كهرمغناطيسية) للمكان والزمان تترابط معاً هندسياً كما تترابط معاً مركبات المتجهات الرباعية. وفي الخمس الأول من القرن العشرين، بين أينشتاين أننا نحتاج إلى عشرة جهود، وليس إلى جهد واحد، لتحديد المجال الجاذبي.

ولنعد أدراجنا إلى مطلع القرن التاسع عشر ولنرَ كيف حدد الفيزيائيان الفرنسيان لابلاس وبواسان المعادلات التفاضلية التي تحكم الجهد الجاذبي على أساس نظرية نيوتن في الحركة والجاذبية. لنبحث في العلاقة ما بين المجال الجاذبي ومصدره، أي العلاقة ما بين الجهد الجاذبي وكثافة المادة التي تولد المجال الجاذبي. ولعل أبسط طريقة توصلنا إلى تحديد هذه العلاقة وفهمها هي الطريقة التي اتبعها مايكل فرادي في فهم المجال الكهرمغناطيسي ودراسته.

تصور فرادي المجال الكهربائي مثلاً على صورة عروق أو أنابيب تملأ المكان، وتنبع من الشحنات الموجبة لتصب في الشحنات السالبة، وتسري فيها القوة الكهربائية

لكل وحدة شحنة. وإذا تدبرنا سطحاً صغيراً تمر فيه هذه العروق بصورة متعامدة معه، مثلت كثافتها، أي عددها مقسوماً على مساحة السطح الصغير، مقدار القوة الكهربائية المؤثرة لكل وحدة شحنة، ومثل اتجاه العروق اتجاه هذه القوة ويقودنا ذلك إلى مفهوم الدفق الكهربائي، وهو عدد العروق المجالية التي تمر عمودياً في سطح ما. وقد تبين بالتحليل الرياضي أن الدفق الكهربائي على أي سطح مغلق (سطح كرة مثلاً) يتناسب طردياً مع إجمالي الشحنة الكهربائي التي يحتويها السطح. وهو ما أخذ يعرف ببرهانة غاوس. فإذا حسبنا مقدار الدفق الكهربائي لكل وحدة حجم عند موضع مكاني، وجدنا أنه يتناسب طردياً مع كثافة الشحنة الكهربائية عند هذا الموضع. وهذا يعني رياضياً أن مجموع معدلات تغير مركبات القوة لكل وحدة شحنة مع الأبعاد المكانية التي تنتمي إليها يتناسب طرديً مع كثافة الشحنة الكهربائية عند هذا الموضع.

ويمكن تطبيق هذه الطريقة على المجال الجاذبي، مع الأخذ بعين الاعتبار أنه لا توجد شحنتان في هذه الحال، وإنما شحنة سالبة واحدة، هي الكتلة. وعليه، فإن العروق المجالية تصب جميعاً في الكتلة. إذ ليس هناك كتل تنبع منها عروق المجال على غرار الشحنات الكهربائية الموجبة. فالكتل الموجودة جميعاً تشكل مصبات للعروق المجالية، وليس هناك كتل تشكل منابع لهذه العروق. لذلك، فليس هناك كتل تتنافر مماً جاذبياً، على غرار الشحنات الكهربائية المماثلة لبعضها. فالكتل تجذب بعضها دوماً.

وفي هذه الحال، وباتباع طرقة فرادي، نحصل على علاقة مماثلة بين الجاذبية لكل وحدة كتلة وبين الكثافة الموضعية للمادة. إذ نجد أن مجموع معدلات تغير مركبات قوة الجاذبية لكل وحدة كتلة مع الأبعاد المكانية التي تنتمي إليها يتناسب طردياً مع الكثافة الموضعية للمادة. فإذا أخذنا بعين الاعتبار أن قوة الجاذبية لكل وحدة كتلة تساوي معدل تناقص الجهد الجاذبي في اتجاه أقصى تناقص، حصلنا على علاقة رياضية بين الجهد الجاذبي والكثافة الموضعية للمادة. ونعبر عن هذه العلاقة رياضياً بالقول إن مجموع المشتقات الثانية للجهد الجاذبي بالنسبة إلى الأبعاد

المكانية الثلاثة يتناسب طردياً مع الكثافة الموضعية للمادة. وتعرف هذه المعادلة بمعادلة بواسان. وإذا كانت الكثافة الموضعية تساوي صفراً، تعرف المعادلة بمعادلة لابلاس. وتعد معادلة بواسان الصيغة المجالية المتطورة لقانون نيوتن في الجاذبية. إذ إنها تقوم على أساس مفهوم المجال الجاذبي والتفاعل الجاذبي الموضعي، في حين أن قانون نيوتن في الجاذبية يقوم على أساس مفهوم الفعل عن بعد بين الجسيّمات المادية. لذلك، فإن أينشتاين اتخذ معادلة بواسان، وليس قانون نيوتن في الجاذبية، أساساً لنظريته الهندسية في الجاذبية، كما سنبين لاحقاً.

(٣١) نقد آينشتاين لجاذبية نيوتن

في الفصول السابقة، بينا مدى الدقة التي تنطبق بها نظرية نيوتن في الجاذبية على ديناميكا المجموعة الشمسية والنجاحات الكبيرة التي أحرزتها هذه النظرية في تفسير الظاهرات الفلكية واكتشاف مزيد من الأجرام السماوية (مذنبات وأقمار وكواكب ونجوم). ومع ذلك، ومع أن هذه النظرية ما زالت تحرز نجاحات كبيرة على صعيدي تفسير الظاهرات الفلكية ورحلات الفضاء، فقد شعر آينشتاين بضرورة تعديلها جذرياً، الأمر الذي قاده في النهاية، وبعد عشر سنوات من الجهد المضني المتواصل، إلى الإطاحة بها كلياً واستبدال نظرية جديدة هندسية الطابع بها، وهي النظرية التي أخذت تعرف بنظرية النسبية العامة.

لماذا شعر آينشتاين بهذه الحاجة الملحة.

لنبدأ بالتذكير بنص قانون الجاذبية النيوتني. ثم، فلنحلله وفق تبصرات النسبية الخاصة والنسبية العامة.

كما أسلفنا، إذا تدبرنا أي جسيمين ماديين، فإن كلا منهما يؤثر على الآخر بقوة جاذبية تتناسب طردياً مع حاصل ضرب كتلتيهما وعكسياً مع مربع المسافة بينهما، وتكون متجهة صوب الجسيم المؤثر. ولما كان نيوتن قد افترض أن الكتلة والطول المكاني كميتان مطلقتان، فقد اعتبر أيضاً قانون الجاذبية قانوناً مطلقاً ينطبق في كل مكان وزمان وبالنسبة إلى جميع مراجع الإسناد الممكنة. من ثم، اعتقد نيوتن أن قوة الجاذبية لا تعتمد على سرع الأجسام المتفاعلة ولا على تسارعاتها النسبية.

بيد أن هذه الافتراضات لا تنسجم البتة مع مبدأ النسبية، الخاصة أو العامة سواء بسواء. إذ نلاحظ أن اللبنات الأساسية في قانون الجاذبية النيوتني هي الكتل والمسافات. ولكن هذه اللبنات كميات نسبية تتغير عند الانتقال من مرجع إسناد قصوري إلى آخر. فما بالك حين يكون الانتقال من مرجع إسناد متسارع إلى آخر!

فكتلتا الجسيمين المتفاعلين جاذبياً معاً تزدادان مع ازدياد سرعتيهما بالنسبة إلى المشاهد وفق النسبية الخاصة. أما المسافة بينهما، فهي تتقلص بازدياد سرعتيهما

(تقلص لورنتس وفتزجيرالد الآنف ذكره). وبصورة عامة، فإن هذا التقلص يعتمد على الزمن. وهكذا، فإن قانون نيوتن في الجاذبية يتغير بصورة مربكة مع الحركة، ويفقد معناه المحدد، ويصبح ملتبساً ومبهماً في ضوء مبدأ النسبية. كما إنه لا يطيع مبدأ لا تغير الصورة الآنف ذكره، والذي اعتبره آينشتاين أساساً لأي على الحالة بهذا الاسم. لذلك وجب تعديله أو تغييره. فهو في النهاية لا ينطبق إلا على الحالة السكونية التي تكون فيها الأجسام المتفاعلة جاذبياً ساكنة بالنسبة إلى بعضها وإلى مادة الكون. لكنه لا يعلمنا شيئا حين تكون هذه الأجسام متحركة. كما إنه لا يأخذ بعين الاعتبار المجالات الجاذبية المتولدة عن تسارع الأجسام بالنسبة إلى مادة الكون وفق مبدأ التكافؤ الآينشتايني. فنحن نتوقع، في ضوء نظرية المجال الكهرمغناطيسي، أن تولد الكتل المتحركة مجالات شبيهة بالمجال المغناطيسي، بالإضافة إلى المجال النيوتني السالف ذكره. وعليه فإن نظرية نيوتن في الجاذبية نظرية ناقصة لا تغطي سوى جانب صغير من جوانب الجاذبية. ولا بد من وضع نظرية جديدة تأخذ بعين الاعتبار أثر الحركة على الجاذبية والمجالات الناجمة عن التسارع، بالإضافة إلى أثر الجاذبية على هندسة الزمكان.

وهناك سبب آخر لرفض آينشتاين نظرية نيوتن في الجاذبية لا يقل أهمية عن الأسباب المذكورة، وهو أن نظرية نيوتن تفترض أن التفاعل الجاذبي ينتقل لحظياً، أي بسرعة لا نهائية، من مكان إلى آخر. وهذا الافتراض لا يمكن قبوله مطلقاً من منظور نظرية النسبية. ذلك أن هذه النظرية تقوم على مسلمة مفادها أنه لا يمكن لأي أثر مادي، لأي طاقة، أن ينتقل بسرعة لا نهائية كما تفترض نظرية نيوتن، وإنما لا بد أن ينتقل بسرعة لا تتجاوز سرعة الضوء. من ثم، لا بدّ من تغيير قانون نيوتن في الجاذبية بحيث يأخذ بعين الاعتبار هذه الحقيقة. والسبيل إلى ذلك هو بناء نظرية مجالية في الجاذبية على غرار نظرية ماكسويل المجالية في الكهرمغناطيسية. ذلك أن ماكسويل أعاد صوغ قوانين الكهرباء والمغناطيسية بدلالة التغيرات المكانية والزمانية في المجال الكهرمغناطيسي (أي المجالين الكهربائي والمغناطيسي المرتبطين معاً عضوياً وجدلياً). وعندما دمج هذه القوانين بهذه الصيغة الموضعية مع قانون

حفظ الشحنة الكهربائية، إذا به يكتشف أن التفاعل الكهرمغناطيسي ينتقل في الفراغ بسرعة الضوء، الأمر الذي قاده إلى اعتبار الكهرمغناطيسي ينتقل في الفراغ بسرعة الضوء، الأمر الذي قاده إلى اعتبار الضوء أمواجاً كهرمغناطيسية. علينا، إذاً، أن نجد طريقة مجالية للتعبير عن المجال الجاذبي تأخذ بعين الاعتبار داخلياً محدودية سرعة انتقاله في المكان.

لقد شكل قانون نيوتن في الجاذبية أنموذجاً للقوى المؤثرة عن بعد في أثناء القرن الثامن عشر. فكان أن صاغ الفيزيائي الفرنسي كولم قانون القوة بين شحنتين ساكنتين على غرار قانون نيوتن في الجاذبية. لكن الدراسات الكهربائية والمغناطيسية سرعان ما تخطت هذا الأنموذج في النصف الأول من القرن التاسع عشر حتى وصلت إلى نظرية ماكسويل المجالية في الكهرمغناطيسية في النصف الثاني من القرن التاسع عشر. فأخذت هذه النظرية تشكل أنموذجاً جديداً للقوى المجالية، فصار لزاماً على العلم إعادة بناء نظرية الجاذبية على أساس هذا الأنموذج الجديد. وهذا ما فعله ألبرت آينشتاين في نظرية النسبية العامة.

(٣٢) انحناء الزمان

رأينا في فصل سابق كيف عمم آينشتاين قانون نيوتن الأول بحيث ينطبق بالنسبة إلى أي مرجع إسناد، قصورياً كان أو متسارعاً. ووفق آينشتاين، فإن الجسيم يتبع أكثر المسارات استقامة في الزمكان الريماني (أقصرها، إن شئت). ولئن كان هذا المسار خطاً مستقيماً في زمكان منكوفسكي شبه الإقليدي، فإنه خط منحنٍ بصورة عامة، أي في زمكان ريمان. ويمكننا هذا المبدأ من تسخير مسارات الجسيّمات في الزمان مساراً لدراسة هندسة الزمكان وعلاقتها بتوزيع المادة فيه.

ولنتدبر، على سبيل المثال، حركة الأرض السنوية حول الشمس، وهي حركة دائرية تقريباً تتم في سطح مستوٍ ثابت تقريباً. وإذا تتبعنا حركة الأرض في الزمكان، آخذين بالاعتبار بعدين مكانيين والبعد الزمني، ومهملين البعد المكاني المتعامد مع السطح المستوي الذي يتضمن حركة الأرض، وجدنا أن المسار الزمكاني للأرض هو أقرب ما يكون إلى اللولب، الأمر الذي يشير إلى أن الزمكان حول الشمس زمكان ريماني لا إقليدي. فأكثر المسارات استقامة حول الشمس في الزمكان هو مسار لولبي، وليس مستقيماً. وهذا يعني أن كتلة الشمس تحني الزمكان حول الشمس بطريقة معينة وتحرفه عن زمكان منكوفسكي شبه الإقليدي. وهو ما يدعم النتيجة التي سبق أن أوصلنا إلينا مبدأ التكافؤ فيما يتعلق بالعلاقة بين الجاذبية وهندسة الزمكان. فالجاذبية إذاً هي انحناء في الزمكان ينتج عن وجود الكتلة.

فالشمس مثلاً تحني الزمكان بحيث تتحرك الكواكب في الزمكان المحيط فيها في مسارات لولبية. وإذا أسقطنا هذه المسارات على السطح المستوي الذي يمثل المكان في صورتنا للزمكان، أخذت شكل دائرة أو إهليلجات فيه، وبدت، من ثم، وكأنها منجذبة صوب الشمس بقوة عن بعد نابعة من الشمس نفسها.

إذاً، فإن الزمكان المحيط بالشمس أو الأرض هو زمكان ريماني منحنٍ. لكن جلّ هذا الانحناء الريماني يأتي من البعد الزماني. فانحناء الزمان هو الذي يتجلى على صورة مجال جاذبي نابع من الأرض أو الشمس. وبصورة عامة، فإن جميع المجالات

الجاذبية الضعيفة تنبع بصورة رئيسية من انحناء تلزمان، لا من انحناء المكان. فلا يبدأ انحناء المكان يتجلى بصورة ملموسة إلا في حال مجالات الجاذبية القوية (مثلاً قرب سطوح الأقزام البيض والنجوم النيوترونية والثقوب السوداء).

وأكبر دليل على ذلك أن الأشعة الضوئية تنتقل في المجموعة الشمسية بالقرب من الشمس وتوابعها من الكواكب في خطوط مستقيمة إلى حد كبير من الدقة، الامر الذي يدل على أن المكان المحيط بالشمس وتوابعها يكاد أن يكون مكاناً إقليدياً إلى حدّ كبير من الدقة. أما الزمكان، فهو بالطبع ريماني منحنٍ، وإلا لما انجذبت أجرام المجموعة الشمسية إلى بعضها. إن زمكان المجموعة الشمسية زمكان ريماني منحنٍ، أما مكانها فيكاد أن يكون إقليدياً منبسطاً، حيث إن جلّ الانحناء في الزمكان يعود إلى البعد الزماني.

وهنا يبرز السؤال الآتي: لئن كان المجال الجاذبي الضعيف يتحدد بالجهد الجاذبي السالف ذكره، وكانت مسارات الجسيّمات الخاضعة له تبدي انحناء في البعد الزمني، فما العلاقة بين الجهد الجاذبي وانحناء الزمان؟ وبتعبير آخر، ما هي العلاقة بين الجهد الجاذبي النيوتني وبين ذلك الجزء من التنسور القياسي المتعلق بالزمن وانحنائه؟ ونذكر القارىء الكريم هنا بان التنسور القياسي هو مجموعة مكونة من عشرة اقترانات للمكان والزمان وتتحدد بموجبها هندسة الزمكان، حيث إنها تربط ما بين الفترة الرباعية والتغيرات الصغيرة في إحداثيات الزمكان. وتشكل هذه المجموعة بناء متماسكاً تترابط أجزاؤه من الاقترانات عضوياً بحيث تختلط هذه الاقترانات معاً عند الانتقال من نظام إحداثيات رباعي إلى آخر.

إذا انطلقنا من الصيغة النسبية المعممة لقانون نيوتن الأول، وأجرينا بعض التحليلات الرياضية عليها، فإننا نستطيع أن نشتق منها معادلة للتسارع الزمكاني الرباعي شبيهة من حيث البناء العام بالمعادلة النيوتنية التي تربط التسارع الثلاثي المادي بالجهد الجاذبي. وتربط هذه المعادلة النسبية التسارع الرباعي بالتنسور القياسي ومشتقاته الأولى. والآن، إذا افترضنا أن المجال الجاذبي ضعيف بحيث اعتبرنا انحناء الزمكان طفيفاً، أي إذا افترضنا أن التنسور القياسي يساوي

التنسور التنسور القياسي لزمكان منكوفسكي المنبسط شبه الإقليدي مضافاً إليه اضطراب ضعيف، توصلنا إلى أن التسارع الثلاثي العادي يتناسب طردياً مع معدل تناقص الجزء الزماني من التنسور القياسي في اتجاه أقصى تناقص. وبالمقابل، فإن هذا التسارع، وفق نظرية نيوتن، يتناسب طردياً مع معدل تناقص الجهد الجاذبي. ويدل ذلك على أن الجهد الجاذبي النيوتني يكافىء الجزء الزماني من التنسور القياسي. أو قل إن الجزء الزماني من التنسور القياسي هو نوع من الجهد الجاذبي. ولكن، لما كانت أجزاء التنسور القياسي ترتبط عضوياً في بعضها، بحيث لا يمكن معالجة جزء بمعزل عن الأجزاء الأخرى، كما أسلفنا، بات لزاماً علينا أن نعتبر جميع اقترانات التنسور القياسي جهداً جاذبية. وبتعبير آخر، فإن نظرية نيوتن لا تأخذ بعين الاعتبار سوى جهد واحد من عشرة جهود جاذبية، ومن ثم فهي مجرد نظرية تقريبية لا تنطبق إلا على المجالات الجاذبية الضعيفة. فلئن كان المجال الكهرمغناطيسي ينطوي على أربعة جهود مجالية، فإن المجال الجاذبي ينطوي على عشرة جهود، لا على جهد واحد. وهكذا، توصل آينشتاين إلى نتيجة ثورية مؤادها أن اقترانات انحناء الزمكان العشرة هي جهود المجال الجاذبي.

(٣٣) ١٩١٥

توصل آينشتاين إلى نتيجة مذهلة مؤداها ان المجال الجاذبي لا ينطوي على جهد جاذبي واحد ،وإنما ينطوي على عشرة جهود جاذبية تشكل في ترابطها الهندسي التنسور القياسي، الذي يحدد الزمكان الريماني. هكذا وحد آينشتاين الفيزياء والهندسة الرياضية معا، محققا حلم ريمان وكليفورد.

وفي ضوء هذه النتيجة، يبرز السؤال الجوهري:

بالنظر إلى العلاقة البنوية ما بين الجهد الجاذبي النيوتني المكافئ لاقتران انحناء الزمان وكثافة المادة، وهي العلاقة التي تعبر عنها معادلة بواسان السالف ذكرها، فلا بد أن تكون هناك علاقة معممة ما بين التنسور القياسي وكثافة المادة والطاقة تشكل القانون المعمم للجاذبية، ولا بد أن تكون معادلة بواسان صورة تقريبية لجزء من هذه العلاقة المعممة. ما هي هذه العلاقة؟ أي، ما هو قانون المجال الجاذبي وفق النسبية العامة؟

ينبغي الإشارة هنا إلى أن المعادلات الأساسية في الفيزياء لا تشتق، وإنما تكتشف. وبالطبع، فإن طرائق الاكتشاف تتعدد. وقد ابتكر آينشتاين طريقة رياضية تركيبية جديدة في الاكتشاف النظري، أوصلته في النهاية، وبعد محاولات عديدة فاشلة ومضنية، إلى قانون المجال الجاذبي (عام ١٩١٥) . وفي الآن ذاته، توصل الرياضي الألماني الفذ، ديفيد هلبرت، إلى القانون ذاته، ولكن بأسلوب آخر يعود في جذوره إلى الرياضيين فيرما وموبرتي ولاغرانج وهاملتون. بيد أن بحث هلبرت لم يلفت نظر الفيزيائيين لانه استعمل وافترض طرائق رياضية متطورة (مستمدة من الرياضي الألماني غستاف مي) لم تكن مألوفة لدى فيزيائي ذلك العصر، مع أنها غدت مألوفة لدى بعضهم في عصرنا. كذلك، فإن هذا البحث أخفق في جذب انتباه الرياضيين آنذاك بفعل الجرعة الفيزيائية الكبيرة التي تضمنها، والتي لم يكن رياضيو ذلك العصر مستعدين لها. أما بحث آينشتاين، فقد كان موجهاً بدقة إلى فيزيائي عصره وأخذ بعين الاعتبار حدود معرفتهم وإلمامهم ومحدودية معرفتهم

الرياضية. لذلك، فإن آينشتاين لم يتفرض في بحثه ذاك أن قارئه ملم بما يسمى حسبان التنسورات، وهو ذلك الفرع من الرياضيات الذي طوره في النصف الثاني من القرن التاسع عشر ومطلع القرن العشرين عدد من الرياضيين الطليان والألمان مثل ريتشي وبيانشي وكريستوفل، والذي وجد فيه آينشتاين اللغة المناسبة للتعبير عن أفكار نظرية النسبية العامة. إذ لم يكن هذا الحسبان مألوفاً لدى فيزيائيي ذلك العصر. لذلك عمد آينشتاين إلى شرحه في بحثه المذكور تدريجياً وتفصيلياً، بأناة وصبر، حتى يضمن حداً أدنى من الفهم لدى فيزيائيي عصره. ومع ذلك وجد أولئك الفيزيائيون ذلك البحث صعباً للغاية، ولم يفهمه تماماً آنذاك سوى حفنة صغيرة من الفيزيائيين، لكن عدداً منهم أدركوا على الأقل بعض الأفكار الأساسية في البحث وأهميتها وثوريتها، وشعروا أنهم بإزاء نمط ثوري جديد في التنظير والتفكير العلمي. ويروى في هذا الصدد عن السير ارثر إديفتون، الفلكي الإنجليزي المعروف، أنه حين سأله صحفي آنذاك ما إذا كانت نظرية النسبية العامة من الصعوبة بحيث لا يفهمها في العالم كله سوى ثلاثة فيزيائيين، شرد إدنغتون قليلاً ولم يعط جواباً. وحين بادره الصحفي بالسؤال عن شروده وصمته، أجابه إدنغتون: "لقد كنت شارداً أفكر من هو ثالثنا!"

وهناك سبب آخر في نجاح بحث آينشتاين المذكور في لفت نظر المجتمع العلمي إليه، وهو أن آينشتاين ضمنه تطبيقات يمكن اختبارها عملياً. فهو لم يكتف ببناء النظرية التجريدية، وإنما سخر مفهوماتها في معالجة بعض الحالات الخاصة التي اختارها بدقة على أساس قابليتها للاختبار الرصدي العملي، وعلى أساس أن النسبية العامة تعطي نتائج في هذا المضمار مغايرة بصورة قابلة للاختبار للنتائج المناظرة التي تعطيها نظرية نيوتن في الحركة والجاذبية. وهذا ما حرّك المجتمع العلمي وآثار اهتمامه إلى حدّ تشكيل فرق خاصة من الباحثين لاختبار نتائج النظرية الجديدة.

أضف إلى ذلك أن النسبية العامة لم تأت على هامش عمل آينشتاين، كما كان عليه الحال مع هلبرت، وإنما جاءت تتويجاً لجهد مضنٍ قام به آينشتاين لمدة

تنوف على عشر سنوات متواصلة، وتجسيداً شبه مكتمل لفلسفة آينشتاين الطبيعية ورؤيته العامة للوجود المادي. ذلك أن النسبية العامة جاءت تحقيقاً لهدف آينشتاين الاستراتيجي المتمثل في تحطيم مفهومي المكان والزمان المطلقين من جهة، وفي بناء نظرية مجالية شاملة للمادة والجاذبية.

لقد انصب عمل آينشتاين العلمي منذ بداية القرن العشرين على حلّ التناقضات الجوهرية في الفيزياء الكلاسيكية ببناء نظرية مجالية شاملة وموحدة.

واستطاع أن يحل بنجاح بعض هذه التناقضات ببنائه نظريتي النسبية الخاصة والفوتونات (١٩٠٥). لكن كثيراً من التناقضات الجوهرية ظلت قائمة ومعلقة. بل إن النظريتين المذكورتين ساهمتا في تفاقم هذه التناقضات بالكشف عن أعماقها وجذورها في الفيزياء الكلاسيكية. لذلك لم يكتفِ آينشتاين بهما برغم النجاح الفائق الذي أحرزتاه في تفسير كثير من الظاهرات والتنبؤ بها. فكان أن كثف نشاطه بعد ١٩٠٥ للتغلب على التناقضات الجوهرية التي كانت تنخر جسد النظرية الفيزيائية آنذاك. وجاءت نظرية النسبية العامة تتويجاً لهذا النشاط المكثف الذي دام عشر سنوات متواصلة.

(٣٤) كيف ركب آينشتاين قانون المجال الجاذبي

أدرك آينشتاين القصور النظري المنطقي لنظرية نيوتن في الجاذبية، وأنها نظرية تقريبية ناقصة لا تأخذ بعين الاعتبار سوى المجالات الجاذبية الضعيفة والسكونية. لذلك وضع نصب عينيه بناء نظرية مجالية دينامية شاملة في الجاذبية تأخذ بعين الاعتبار المبادىء والتبصرات السابق ذكرها في الفصول السابقة.

واسترشد آينشتاين بالمبادىء الآتية في تركيبه النظري لقانون المجال الجاذبي:

١ـ أخضع آينشتاين قوانين الفيزياء لمبدأ لا تغير الصورة أو مبدأ النسبية العامة السالف ذكره. وهو المبدأ الذي ينص على ضرورة أن يكون القانون الفيزيائي العام لا متغيراً بالنسبة إلى جميع نظم الإحداثيات الرباعية، ومن ثم بالنسبة إلى جميع مراجع الإسناد، القصورية والمتسارعة سواء بسواء. وأدرك آينشتاين، ارتكازاً إلى هرمان منكوفسكي السالف ذكره، أن بناء قوانين الفيزياء من التنسورات، وهي أشكال معممة للمتجهات (كالقوة والتسارع مثلاً)، يضمن بصورة تلقائية أن تطيع هذه القوانين مبدأ لا تغير الصورة ومبدأ النسبية العامة. لذلك سعى آينشتاين إلى بناء القانون العام للمجال الجاذبي من تنسورات رباعية تنتمي إلى زمكان ريمان الرباعي المنحني.

٢ـ أدرك آينشتاين أن هناك عشرة جهود للمجال الجاذبي، لا جهد جاذبي واحد كما هو الحال في نظرية نيوتن. وأدرك أيضاً أن هذه الجهود هي الاقترانات العشرة للتنسور القياسي الرباعي السالف ذكره والذي يحدد هندسة الزمكان الريماني الرباعي. بذلك أدرك أن المجال الجاذبي ليس سوى انحناء الزمكان الرباعي.

٣ـ افترض آينشتاين أن الزمكان في البقاع البعيدة عن تجمعات المادة والطاقة الكثيفة وبالنسبة إلى مراجع الإسناد القصورية، أي تلك التي تتحرك بسرع ثابتة في خطوط مستقيمة بالنسبة إلى مادة الكون، يكون زمكان منكوفسكي شبه الإقليدي، أي غير المنحني. وهو افتراض شبه نيوتني. وبتعبير آخر، افترض آينشتاين أنه، في حال البقاع البعيدة جداً عن التجمعات الكثيفة للمادة والطاقة، فإنه يمكن دوماً

إيجاد نظام إحداثيات رباعي (أو مرجع إسناد) يختزل الزمكان الريماني إلى زمكان منكوفسكي. ذلك أن الزمكان بصورة عامة يكون منحنياً حتى في الأماكن الخالية من المادة والطاقة والبعيدة عنها، وذلك بالنظر إلى مبدأ التكافؤ. فالزمكان يبدو منحنياً بالنسبة إلى مراجع الإسناد المتسارعة بالنسبة إلى مادة الكون، حتى في البقاع النائية، لأن التسارع يكافىء (أو يولد) مجالاً جاذبياً يحني الزمكان. لكنه يمكن إيجاد مراجع قصورية في هذه البقاع النائية تختفي فيها المجالات الجاذبية، ومن ثم يختزل فيها زمكان ريمان إلى زمكان منكوفسكي. لذلك نقول إن الزمكان في هذه البقاع النائية زمكان منبسط. أما في البقاع التي تتضمن مادة وطاقة أو تكون قريبة منها، فلا يمكن إيجاد نظام إحداثيات رباعي أو مرجع إسناد فيها يختزل زمكان ريمان المنحني إلى زمكان منكوفسكي. إن الزمكان في هذه الحال ريماني منحنٍ في جوهره ويفعل تأثير المادة والطاقة. لذلك نقول إنه زمكان منحنٍ. وعليه يمكن التمييز بين الجاذبية التي يولدها التسارع وحده وتلك التي تولدها المادة والطاقة. صحيح أنه ليس تمييزاً مطلقاً وكيفياً، كما هو الحال في ميكانيك نيوتن، لكنه تمييز على أي حال؛ تمييز من حيث الحالة وليس من حيث النوع. ويمكن اشتقاق الشرط الرياضي لأن يكون الزمكان منبسطاً. ويتمثل هذا الشرط في اعتبار تنسور معين، يسمى تنسور ريمان ـ كريستوفل ويعتمد على التنسور القياسي وحده، صفراً لجميع نظم الإحداثيات الرباعية ومراجع الإسناد. فإذا كان هذا التنسور صفراً، كان الزمكان بالضرورة منبسطاً، والعكس بالعكس. وعليه، فإنه يمكن اعتبار هذا الشرط قانون المجال الجاذبي في حال المجالات المتولدة عن التسارع وحده. هكذا توصل أينشتاين إلى قانون المجال الجاذبي لصنف معين من أصناف المجالات الجاذبية. وقد استوحى قانونه العام من هذا القانون الخاص.

٤ـ أدرك آينشتاين أن الجهد الجاذبي النيوتني هو شكل تقريبي لواحد من الاقترانات العشرة للتنسور القياسي، وهو الاقتران المرتبط بانحناء الزمان تحديداً. وعليه، أدرك أن معادلة بواسان الآنف ذكرها هي شكل تقريبي لجانب من القانون العام للمجال الجاذبي. ونذكر القارىء الكريم بأن معادلة بواسان تنص على أن

مجموع المشتقات الثانية للجهد الجاذبي النيوتني بالنسبة إلى الأبعاد المكانية الثلاثة يتناسب طردياً مع الكثافة الموضعية للمادة. وعليه أدرك آينشتاين أنه لا بدّ أن تكون هناك بنى مشتركة بين القانون العام للمجال الجاذبي وبين معادلة بواسان. لذلك وضع آينشتاين نصب عينيه تعميم معادلة بواسان بما ينسجم مع المبادىء الأخرى التي اعتمدها أدوات لتركيب القانون العام للمجال الجاذبي. فتبادر إلى ذهن آينشتاين أسئلة كالآتية: ما هو الشكل المعمم للكثافة الموضعية للمادة في النسبية العامة. وما هو الشكل المعمم لمجموع المشتقات المكانية الثانية للجهد الجاذبي النيوتني؟

وبالطبع، فإن الإجابة عن هذين السؤالين لم تأتِ في ليلة وضحاها، وإنما استلزمت ثلاث سنوات من الجهد المضني والمحاولات الفاشلة، توصل آينشتاين في نهايتها إلى القانون العام للمجال الجاذبي.

(٣٥) قانون آينشتاين العام للمجال الجاذبي

في الفصل الاخير توصلناالى السؤال: كيف عمم آينشتاين معادلة بواسان للجهد الجاذبي وفق مبدأ النسبية العامة، وبما ينسجم مع كون تنسور ريمان ـ كريستوفل صفراً في حال المجالات الجاذبية المتولدة عن التسارع بالنسبة إلى مادة الكون؟

ولنتدبر أولاً الكثافة الموضعية للمادة والتي تشكل الطرف الأيمن من معادلة بواسان. ولنسأل أنفسنا: ما هو الشكل المعمم للكثافة الموضعية للمادة في النسبية العامة؟ ويكمن مفتاح الإجابة عن هذا السؤال في حقيقة أن نظرية النسبية توحد ما بين الكتلة والطاقة والزخم توحيداً جدلياً محكماً بحيث يتعذر عزل هذه الكميات عن بعضها واعتبارها مستقلة عن بعضها. فالزخم والطاقة في نظرية النسبية يشكلان مركبات مختلفة لمتجه رباعي واحد. كما إن الكتلة هي شكل من أشكال الطاقة بحيث يمكن تحويل الكتلة إلى طاقة والعكس بالعكس. لذلك، وفي ضوء مبدأ التكافؤ، فإننا نتوقع أن تساهم الطاقة والزخم والضغط في توليد الجاذبية جنباً إلى جنب مع الكتلة.

ونتوقع، من ثم، وعلى أساس مبدأ لا تغير الصورة، أن يكون الشكل المعمم للكثافة الموضعية للمادة تنسوراً عاماً يضم بين ثناياه الكتلة والطاقة والزخم والضغط. وبالفعل، فإن نظرية النسبية الخاصة تمكننا من تركيب تنسور من هذا القبيل للمجال الكهرمغناطيسي وللموائع المادية المختلفة (الغازات والسوائل). ويسمى هذا التنسور تنسور الطاقة ـ الزخم. وهو يتكون من عشر كميات مترابطة معاً هندسياً. ويمكن بسهولة تعميمه بحيث ينسجم مع مبدأ النسبية العامة وزمكان ريمان. ويتم ذلك بالتعبير عنه بدلالة التنسور القياسي لزمكان منكوفسكي، ومن ثم باستبدال التنسور القياسي لزمكان ريمان به. وفي حال مائع نمطي، فإن تنسور الطاقة ـ الزخم يعتمد على الكثافة والضغط والسرعة الرباعية الموضعية للمادة بالإضافة إلى اعتماده على التنسور القياسي لزمكان ريمان. وعليه، فإن انحناء الزمكان يدخل في تعريف المادة والطاقة، الأمر الذي يشير إلى تلك العلاقة العضوية الحميمة

بين المادة والجاذبية. ويشير تركيب تنسور الطاقة ـ الزخم إلى أن المادة بجميع خصائصها المادية والحركية تدخل في تحديد المجال الجاذبي، وليس فقط بخاصية واحدة (الكثافة الموضعية للمادة) كما هو الحال في نظرية نيوتن.

وتجدر الإشارة هنا إلى أن تنسور الطاقة ـ الزخم يطيع معادلة تفاضلية تعبر عن قانوني حفظ الطاقة والزخم في النسبية العامة، وهما قانونان أساسيان في الفيزياء ينطبقان في جميع مراحل تطور الفيزياء (المرحلة النيوتنية والآينشتاينية والكنتمية). وينص هذان القانونان على أن كلاً من مجموع الطاقة ومجموع الزخم الخطي (حاصل ضرب الكتلة بالسرعة في حال ميكانيك نيوتن) في نظام مغلق ومعزول يظل ثابتاً، برغم التحولات التي تجري في داخله. ويمكن اختصار هذين القانونين وغيرهما من قوانين الحفظ الأساسية في معادلة تفاضلية واحدة يطيعها تنسور الطاقة الزخم.

ولنتدبر الآن الطرف الأيسر من معادلة بواسان، وهو مجموع المشتقات المكانية الثانية للجهد الجاذبي النيوتني ولنسأل أنفسنا: ما هو الشكل المعمم لهذا الطرف والذي يأخذ بعين الاعتبار الجهود الجاذبية العشرة التي تشكل في مجموعها التنسور القياسي للزمكان الريماني؟

في ضوء ما تقدم من شروط الفصول السابقة، فإن هذا الشكل المعمم للطرف الأيسر من معادلة بواسان ينبغي:

١ـ أن يكون تنسوراً، وذلك بالنظر إلى مبدأ لا تغير الصورة ومبدأ النسبية العامة.

٢ـ أن يركب تنسور ريمان ـ كريستوفل الآنف ذكره بحيث ينطوي على أن تنسور ريمان ـ كريستوفل يساوي صفراً في البقاع البعيدة عن المادة والطاقة، أي ينطوي على أن الزمكان الريماني يقترب من زمكان منكوفسكي في تلك البقاع.

٣ـ أن يركب من التنسور القياسي والمشتقات الزمكانية الأولى والثانية فقط لهذا التنسور، وذلك بالنظر إلى البنية الرياضية للطرف الأيسر من معادلة بواسان.

٤ـ لما كان الطرف الأيمن المتمثل بتنسور الطاقة ـ الزخم يطيع معادلة تفاضلية

تعبر عن قوانين حفظ الكميات الميكانيكية الرئيسية كما أسلفنا، فلا بدّ أن يطيع الطرف الأيسر المعمم مثل هذه المعادلة أيضاً.

هذه الاعتبارات وغيرها من الاعتبارات الرياضية قادت آينشتاين إلى تمثيل الطرف الأيسر المعمم بتنسور مركب من تنسور ريمان. كريستوفل والتنسور القياسي أخذ يعرف بتنسور آينشتاين.

هكذا ركب آينشتاين القانون العام للمجال الجاذبي. وهو ينص باختصار على أن تنسور آينشتاين الذي يعبر عن انحناء الزمكان الريماني يتناسب طردياً مع تنسور الطاقة ـ الزخم. ويعبر هذا القانون عن العلاقة الجدلية بين المادة بخصائصها المتنوعة وبين الزمكان بخصائصه الهندسية المتنوعة أيضاً. فالمادة تدخل في تحديد الخصائص الهندسية للزمكان مثلما يدخل الزمكان في تحديد الخصائص الدينامية للمادة. إنها علاقة جدلية حميمة بين كيانين ماديين أساسيين: نظم الجسيمات المادية الأولية من جهة والزمكان من جهة أخرى. فليس الزمكان مجرد إطار أو وعاء للأحداث المادية، كما في نظرية نيوتن، وإنما هو مجال أو نظام مادي أساسي يقوم على قدم وساق مع نظام الجسيمات المادية الأولية. وهناك علاقة جدلية حميمة بين النظامين. وسنعلق بمزيد من التفصيل على هذه العلاقة في فصول لاحقة.

(٣٦) الزمكان من أرسطو إلى آينشتاين

في الفصل السابق، بينا كيف توصل آينشتاين، باستعمال جملة من المبادىء الفيزيائية والرياضية العامة، إلى القانون العام للمجال الجاذبي. وهو ينص في جوهره على أن انحناء الزمكان في نقطة زمكانية يتناسب طردياً مع كمية موضعية تعبر عن المادة والطاقة والحركة في النقطة الزمكانية المعنية.

والنقطة الجوهرية هنا هي أن الزمكان ليس مجرد إطار مطلق وثابت للاحداث المادية، وإنما هو مجال مادي يؤثر في المادة والطاقة ويتأثر بهما. فالمادة ـ الطاقة ـ الحركة ـ تحني الزمكان حولها وتحرفه عن زمكان منكوفسكي صوب مزيد من الانحناء. وفي الوقت ذاته، فإن الزمكان المنحني هو الذي يرشد الجسيّمات المادية في حركتها ويحرفها عن الخط المستقيم، ومن ثم يدخل في تحديد مضمونها الحركي الطاقي. فهناك إذاً تفاعل مادي جلي بين المادة، بمعناها العام الذي يتضمن الطاقة والحركة، وبين الزمكان. فالواحد يدخل في تحديد خصائص الآخر وحالته الدينامية. إننا هنا بإزاء نظامين ماديين يتفاعلان معاً على قدم وساق وتتغير خصائصهما وحالاتهما الدينامية وفق هذا التفاعل المادي. ومثلما يتم وصف الجسيّمات المادية (الإلكترون الكوارك والفوتون والنيوترينو وغيرها) بدلالة مجالات معينة، فإنه يتم وصف الزمكان بدلالة مجال معين مستمد من هندسة ريمان. فالنسبية العامة ليست مجرد نظرية مجالية في الجاذبية، على غرار نظرية ماكسويل في الكهرمغناطيسية، وإنما هي أيضاً نظرية مجالية في المكان والزمان.

والحق أن مفهوم المجال هو المفهوم المحوري في فلسفة آينشتاين الطبيعية. فاعتبار التفاعل الكهرمغناطيسي نظاماً مادياً مجالياً هو الذي قاد آينشتاين إلى نظرية النسبية الخاصة، كما بينت في كتاب لي صدر عام ١٩٨٨ بعنوان: "الطريق إلى النسبية". كما إن اعتبار الجاذبية نظاماً مجالياً هو الذي دفع آينشتاين إلى مبدأ النسبية العامة. وبلغ به التزامه بالتصور المجالي للوجود المادي أن اعتبر الزمكان نفسه مجالاً مادياً يتفاعل مع غيره من المجالات المادية على قدم وساق، فاتحاً بذلك الطريق لتفسير

الزمكان بدلالة عناصر أكثر جوهرية منه. إنها لثورة في الفكر قلّ نظيرها.

لقد نظر أرسطو إلى المكان على أنه حدود الأجسام، أي جعله مرتكزاً إلى مفهوم الجسد الممتد. بذلك ربطه ربطاً محكماً بالمادة من حيث الوجود. فلا مكان من دون أجسام في فلسفة أرسطو الطبيعية. إن المكان هو خاصية من خصائص المادة ملازمة لها بالضرورة. لذلك فهو ينعدم بانعدامها. وعلى هذا الأساس، فقد تصور أرسطو الكون على صورة كرة محدودة الحجم يستحيل فيها الخلاء وتحتوي كل مكان ممكن. فليس هناك مكان "خارجها"، أي إنها ليست كرة معلقة في مكان لا متناهٍ، وإنما تتضمن هذه الكرة الكونية كل مادة وكل مكان في الوجود. لكنه مع ذلك لم يربط خصائص المكان بالمادة. إنه لم ينظر إلى المكان بوصفه شكلاً من أشكال المادة، وإنما بوصفه خاصية أساسية من خصائص المادة.

ومع أن ديكارت، فيلسوف الحقبة الحديثة، تصور المكان على أنه فضاء إقليدي لانهائي الامتداد، إلا أنه أبقى على فكرة أرسطو بأن الخلاء مستحيل، واعتبر الامتداد، أي المكان، جوهر المادة. لذلك عمد إلى تسمية المادة الجوهر الممتد. لكن ذلك لم يدفعه إلى ربط خصائص المكان بخصائص المادة، وإنما اعتبر خصائص المكان خصائص مطلقة وثابتة زمانياً.

أما نيوتن، فقد أجرى فصلاً قاطعاً ما بين المادة والمكان. إذ إنه اعتبر المكان وعاء إقليدياً لانهائياً ومطلقاً للمادة لا يتأثر بما يدور فيه من أحداث ولا يؤثر فيها.

لذلك، فإن له أسبقية على المادة. إذ نستطيع أن نتصور المكان من دون مادة، لكننا لا نستطيع أن نتصور المادة من دون مكان. وبتعبير آخر، فإنه يمكن للمكان أن يوجد من دون مادة، ومن ثم فإن الخلاء ممكن، بعكس ما نادى به أرسطو وديكارت، لكنه لا يمكن للمادة أن توجد من دون مكان. فالمكان ليس تابعاً للمادة، كما ظن أرسطو. كما إنه ليس جوهر المادة، كما ظن ديكارت. إنه شرط جوهري لوجود المادة، لكنه ليس جوهرها. وهو ما حدا نيوتن إلى اعتباره في بعض كتاباته مجس الله الذي به يعي الله موجوداته ويرشدها ويحركها ويحتويها.

وقد دفع هذا الفصل القاطع، الذي أجراه نيوتن بين المادة والمكان، الفيلسوف

الألماني كانط إلى اعتبار المكان من طينة أخرى غير طينة المادة. إذ إنه اعتبره تعبيراً عن فاعلية عقلية، أي اعتبره بناء عقلياً بحتاً يسوده منطق الضرورة، لا المنطق التجريبي المرضي، شأنه في ذلك شأن البنى العقلية الأخرى. وبتعبير أدق، فقد اعتبره شكلاً من أشكال حدسنا الخارجي. فهو يمثل حدساً عقلياً بحتاً يصوغ به العقل خبرتنا الحسية.

وقد عارض هذا التصور النيوتني معاصر نيوتن، الفيلسوف والرياضي الألماني لايبنتز، الذي أنكر وجود المكان بوصفه كياناً قائماً في ذاته بمعزل عن المادة، واعتبره مجمل العلائق القائمة بين الأجسام. فالمكان، وفق لايبنتز، ليس خاصية ضرورية من خصائص المادة، لكنه مجمل العلائق القائمة بين الأجسام المادية.

وقد تخطى آينشتاين هذه التصورات كلها بفكرته الثورية أن الزمكان هو كيان أو نظام مادي يرتبط عضوياً بأشكال المادة الأخرى، ويتفاعل معها على قدم وساق، مؤثراً فيها ومتأثراً بها من حيث الخصائص والحالة.

(٣٧) غرائب المجال الجاذبي

حتى يتسنى لنا تحديد المجال الجاذبي كما عبر عنه آينشتاين في نظرية النسبية العامة، فإنه من المفيد عقد مقارنة بين هذا المجال وبين المجال الكهرمغناطيسي كما عبر عنه ماكسويل ولورنتس.

يلاحظ أن المجال الكهرمغناطيسي يطيع معادلات ماكسويل الخطية. وهذا يعني أنه إذا أثرت مجموعة من الشحنات الكهربائية في مكان ما، فإن المجال الكهربائي عند نقطة في هذا المكان يساوي مجموع المجالات الكهربائية التي تولدها هذه الشحنات منفردة. فكل شحنة كهربائية تؤثر على النقطة المعنية بمعزل عن الشحنات الأخرى وبصورة مستقلة عنها. وبالطبع، فإن هذه السمة تبسط نسبياً التعامل مع المجال الكهرمغناطيسي وحلّ معادلات ماكسويل الكهرمغناطيسية.

أما المجال الجاذبي فهو يطيع معادلة آينشتاين اللاخطية الآنف ذكرها. وبالنظر إلى كون هذه المعادلة لاخطية، فإنها لا تتسم بالسمة الآنف ذكرها. وهذا يعني أن المجال الجاذبي الذي تولده كتلة ما يتأثر بوجود كتلة أخرى في جيرتها ويتغير بفعلها. من ثم، فإن المجال الجاذبي عند نقطة مكانية لا يساوي مجموع المجالات الجاذبية التي تولدها الكتل المؤثرة منفردة، حيث إن هذه المجالات تتفاعل معاً مشكلة مجالاً جديداً معقداً. وبالطبع، فإن ذلك يعقد كثيراً حلّ معادلة أينشتاين للمجال الجاذبي، حتى لأبسط الحالات والنظم.

وترتبط هذه السمة بحقيقة أن المجال الكهرمغناطيسي لا يحمل شحنة كهربائية، في حين أن المجال الجاذبي يحمل شحنة جاذبية. فلما كانت الطاقة هي الشحنة التي تولد المجل الجاذبي، وكان المجال الجاذبي يحمل طاقة بالضرورة، كان المجال الجاذبي يحمل شحنة جاذبية. وهذا هو أساس الطابع اللاخطي لمعادلة آينشتاين المجالية. فالكتلة تولد مجالاً جاذبياً. لكن طاقة هذا المجال تولد مجالاً جاذبياً ثانياً. أما المجال الكهرمغناطيسي، فإنه لا يولد مجالاً كهرمغناطيسياً آخر لانه لا يحمل شحنة كهربائية. وينعكس ذلك كله في تركيبة المعادلات المجالية للكهرمغناطيسية

والجاذبية. فتأخذ معادلات الكهرمغناطيسية شكلاً خطياً بسيطاً، فيما تأخذ معادلات الجاذبية شكلاً لاخطياً معقداً.

ويكن التعبير عن هذا الاختلاف بدلالة الفرق بين سلوك الأمواج الكهرمغناطيسية وسلوك أمواج الجاذبية. فالأمواج الكهرمغناطيسية، كالضوء مثلاً، لا تتفاعل معاً عندما تتداخل معاً، وإنما تمر عبر بعضها من دون إحداث أي تغيير فيها. لذلك نجد أنه، عندما يعترض شعاع ضوئي طريق شعاع ضوئي آخر، فإن كلا من الشعاعين يمر بسلام عبر الآخر من دون أي تغيير أو تبعثر. إنهما لا يبعثران بعضهما ولا يؤثران على بعضهما. كذلك، نجد أن المجالات الكهربائية لا تؤثر على الأشعة الضوئية ولا تحرفها عن مساراتها المستقيمة، لان هذه الأشعة لا تحمل شحنة كهربائية. وبالمقابل، فإن الأمواج الجاذبية تتفاعل معاً عندما تتداخل معاً. فإذا اعترض شعاع من الأمواج الجاذبية طريق شعاع آخر، فإن الشعاعين يبعثران بعضهما ويحدثان تغييرات ملموسة في بعضهما. كذلك، فإن المجالات الجاذبية تحرف الأمواج الجاذبية عن مساراتها المستقيمة. وتجدر الإشارة إلى أن الأمواج الجاذبية هي تغيرات دورية في هندسة المكان تنتقل من نقطة مكانية إلى أخرى بسرعة الضوء.

وتعد هذه السمة سمة جوهرية للمجال الجاذبي لا سبيل إلى تفاديها أو تجاهلها، برغم أنها تعقد معادلة المجال الجاذبي وحلولها. إذ حاول بعض العلماء بناء نظريات مجالية للجاذبية على أساس نظرية النسبية الخاصة، على غرار نظرية ماكسويل في المجال الكهرمغناطيسي. وقد أفلحوا في ذلك، لكنهم أخفقوا في تفادي حقيقة أن المجال الجاذبي يحمل شحنة جاذبية، ومن ثم أن معادلة المجال الجاذبي هي بالضرورة معادلة لا خطية معقدة. فمع إنهم بنوا نظريتهم على أساس زمكان منكوفسكي شبه الإقليدي، وتفادوا زمكان ريمان، إلا أنهم أخفقوا في تفادي سمة اللاخطية في معادلة المجال الجاذبي.

وقد تبين لاحقاً أن هناك قوى أخرى تشترك مع المجال الجاذبي في هذه السمة، وهي القوى النووية. وعلى سبيل المثال، فإن المجال النووي القوي الذي تولده الكواركات في داخل البروتونات والنيوترونات يحمل شحنات نووية قوية.

والجدير بالذكر هنا أن الكواركات هي المكونات الأساسية للبروتونات والنيوترونات التي تشكل أنوية الذرات. وهي تحمل أجزاء من شحنة الإلكترون. وبفضل هذه السمة للمجال النووي القوي (أو ما يسمى المجال اللوني)، فإن المعادلاتالتي تحكمه لا تقل تعقيداً عن معادلة آينشتاين للمجال الجاذبي. بل إنها أكثر تعقيداً.

وبفضلها أيضاً، فإن المجال النووي القوي يتمتع بخصائص غريبة لا تقل غرابة عن خصائص المجال الجاذبي الآينشتايني. ومن هذه الخصائص أن القوة النووية القوية المؤثرة بين الكواركات تزداد كلما ازدادت المسافة بينها، بعكس الجاذبية والكهرمغناطيسية. فهي تكان أن تكون معدومة عندما تكون الكواركات قريبة جداً من بعضها. لكنها تتزايد بصورة كبيرة إذ تبتعد الكواركات عن بعضها. وهذا هو سرّ التماسك الكبير الذي يبديه البروتون ويفسرّ إخفاق العلماء في الكشف عن كواركات حرة حتى الآن.

(٣٨) حقول تطبيق النسبية العامة

إذا نظرنا إلى النسبية العامة بوصفها صرحاً نظرياً مكتملاً، أو من باب كونها أداة نظرية في عملية إنتاج المعرفة العلمية الطبيعية، رأينا أنها تتألف من أربعة قوانين عامة تناظر قوانين نيوتن في الحركة والجاذبية. هذه القوانين العامة هي:

١ـ قانون الهندسة الريمانية الذي يربط الفترة الرباعية بالإحداثيات الزمكانية الأربعة عبر التنسور القياسي. وهو أقرب إلى التعريف منه إلى القانون.

٢ـ الصورة المعممة لقانون نيوتن الأول في الحركة. وينص هذا القانون على أن الجسيمات غير الخاضعة إلى قوى كهرمغناطيسية ونووية تتحرك بين أي نقطتين في الزمكان بحيث تسلك أكثر المسارات الزمكانية استقامة. والذي يحدد مدى انحراف هذه المسارات عن الخطوط المستقيمة الإقليدية هو التنسور القياسي، أي مدى انحناء الزمكان.

٣ـ قوانين حفظ الطاقة والزخم، بما في ذلك قانون نيوتن الثالث، الذي ينص على أن لكل فعل ردّ فعل مساوياً له في المقدار ومعاكساً له في الاتجاه. وتأخذ هذه القوانين في النسبية العامة شكل معادلة تفاضلية لما يسمى تنسور الطاقة ـ الزخم.

٤ـ القانون العام للمجال الجاذبي، والذي ينص على أن انحناء الزمكان ممثلاً بما يسمى تنسور آينشتاين يتناسب تناسب طردياً مع تنسور الطاقة ـ الزخم الذي يعبر مقدارياً عن المادة والطاقة الحركة. فالطاقة تحني الزمكان، والزمكان المنحني يرشد الطاقة في حركتها وانتقالها.

وقد تبين لاحقاً أن الصورة المعممة لقانون نيوتن الاول لا تشكل قانوناً مستقلاً، وإنما تنبع بالضرورة من القانون العام للمجال الجاذبي. فالقانون الأخير من العمومية بحيث يبين كيف تحني المادة الزمكان وكيف يرشد الزمكان المادة في حركتها في آن واحد. ويؤكد ذلك أن محور نظرية النسبية العامة يكمن في قانون أينشتاين العام للمجال الجاذبي. لذلك تغدو المهمة الأولى أمام الباحثين في هذا المجال إيجاد حلول دقيقة أو تقريبية لمعادلة أينشتاين للمجال الجاذبي لنظم وحالات مختلفة، ثم اختبار

صحة هذه الحلول ومدى مطابقتها للواقع المادي.

لكن هناك مشكلتين كبيرتين في تنفيذ هذه المهمة. أما المشكلة الاولى، فهي أن معادلة أينشتاين معادلة تفاضلية لاخطية معقدة جداً. لذلك، فإنه من الصعوبة بمكان إيجاد حلول دقيقة لهذه المعادلة. وحتى وقت قريب، لم يتمكن العلماء من إيجاد حلول دقيقة لها إلا بصورة محدودة جداً وضمن أطر ضيقة جداً. وجل هذه الحلول تستثمر تماثلات وتناسقات معينة في نظم تجريدية خاصة. لذلك، فلا بدّ من الاعتماد، في كثير من الأحيان، على الحلول التقريبية. وهنا تبرز المشكلة الثانية، وهي أن هذه الحلول لا تكاد أن لا تختلف البتة عن نتائج نظرية نيوتن في الجاذبية ونظريات الجاذبية الأخرى المنافسة التي برزت في النصف الثاني من القرن العشرين. لذلك، فإن اختبارها يستلزم قياسات في غاية الدقة وقادرة على التمييز بدقة بين النسبية العامة وغيرها من نظريات الجاذبية. لكن هذه القياسات تستلزم أدوات قياس غاية في الدقة وتطوراً ممياً في التقانة، تقانة الفضاء والتقانة الإلكترونية تحديداً. ولم تبدأ هذه التقانة تأخذ مجراها وتنتشر إلا منذ ستينيات القرن العشرين، لذلك، نلاحظ أنه، بعد المحاولات المحدودة الأولى لاختبار النسبية العامة عقب نشرها عام ١٩١٥، انعدمت محاولات اختبارها تقريباً. ودام هذا الحال حتى مطلع ستينيات القرن العشرين، حين تفجر نشاط اختبار النسبية العامة وتنامى بصورة محمومة حتى يومنا هذا. ومع أن بعض النتائج لما تحسم، إلا أن جلّ هذه الاختبارات الدقيقة جاءت مؤيدة لنتائج النسبية العامة. وكما أسلفنا، فإن أحد الأسباب الرئيسية لهذا التفجير الاختباري هو ازدهار التقانة الإلكترونية والتقانة الفضائية، بما في ذلك تقانة الحاسوب. وفي مقدمة الأسباب الأخرى التقدم الكبير الذي تم إحرازه في الهندسة الرياضية في الفترة المنصرمة بين مطلع عشرينيات القرن العشرين ومطلع ستينياته، وتنامي الإدراك للمعنى الفيزيائي للحلول الرياضية لمعادلة آينشتاين للمجال الجاذبي، والتخلي التدريجي عن التحيزات الموروثة من حقبة الفيزياء الكلاسيكية. ويمكن القول إن تطبيقات النسبية العامة واختباراتها تركزت بصورة رئيسية في المجالات الآتية:

١ـ اختبار مبدأ التكافؤ الآينشتايني؛

٢ـ اختبار كون المجال الجاذبي يتناسب عكسياً مع مربع البعد عن مصدره،

٣ـ اختبار قانون نيوتن الثالث الذي ينص على أن لكل فعل ردّ فعل مساوياً له في المقدار ومعاكساً له في الاتجاه، علماً بأن هذا القانون يدخل في تركيبة النسبية العامة؛

٤ـ اختبار مدى ثبات ثابت الجاذبية الذي يدخل في نظريتي نيوتن و آينشتاين في الجاذبية؛

٥ـ حركات الكواكب، وبخاصة حركة عطارد والقمر؛

٦ـ حركة الأشعة الضوئية قرب الأجرام الفلكية ذات الكتل الكبيرة وظاهرة العدسات الجاذبية؛

٧ـ حركات النجوم في النظم النجمية الثنائية؛

٨ـ انزياح الأطياف الضوئية صوب اللون الأحمر بفعل المجال الجاذبي؛

٩ـ ظاهرة انهيار النجوم؛

١٠ـ سلوك النجوم النيوترونية؛

١١ـ الثقوب السوداء وخصائصها وسلوكها؛

١٢ـ أمواج الجاذبية؛

١٣ـ ظاهرة الكون بنية ونشوءاً وتطوراً.

وسنعلق في فصول ومجلدات لاحقة على بعض هذه التطبيقات الدراماتيكية.

(٣٩) أثر الجاذبية على الفوتونات

من الشهور المميزة في تاريخ العلم شهر تشرين الثاني من عام ١٩١٥. إذ شهد هذا الشهر نشر ثلاثة أبحاث متتالية لألبرت آينشتاين هزت أركان الفكر والمعرفة من جذورها وأساساتها، وقوّضت ثوابت الفكر التقليدي، وفتحت آفاقاً جديدة لا حد لها أمام تطور المعرفة. وقد تضمن البحثان الأولان الأسس الفكرية والرياضية لنظرية النسبية العامة وقوانينها الأساسية المذكورة سابقاً. أما البحث الثالث، فقد تضمن تطبيق آينشتاين نظريته الجديدة على حركة كوكب عطارد، التي لوحظ منذ عام ١٨٥٩ أنها تبدي سمات عصية على التفسير على أساس نظرية نيوتن في الجاذبية.

والملفت للنظر في هذه الأبحاث المصيرية أن آينشتاين لم يكتف فيها بوضع الأسس الفكرية والرياضية لنظريته الجديدة، تاركا أمر تطبيقها واختبارها إلى غيره من العلماء، وإنما عمد رأسا إلى وضع نظريته هذه موضع الاختبار. واختار آينشتاين لهذه الغاية ثلاثة تطبيقات لنظريته كان من الممكن إيجاد حلول معقول لمعادلاته بصددها، ومن الممكن اختبارها بدقة كافية على أساس التقانة التي كانت سائدة في عصره. هذه التطبيقات هي:

١ـ تأثر ألوان الأطياف الضوئية بالمجال الجاذبي؛

٢ـ حركة عطارد حول الشمس؛

٣ـ تأثر مسارات الضوء بالمجالات الجاذبية.

ولنبدأ بالتطبيق الأول.

لقد سبق وأن عالجنا تأثر ألوان الأطياف الضوئية بالمجال الجاذبي باستعمال مبدأ التكافؤ الآينشايني، فبينا أن الطيف الضوئي المنبعث من ذرة في مجال جاذبي يعاني انخفاضاً في تردده الموجي بفعل هذا المجال وتبعاً لشدته. من ثم، فإن الأطياف المنبعثة من سطح نجم كبير الكتلة تبدو مزاحة صوب اللون الأحمر (المنخفض التردد الموجي بالنسبة إلى الألوان الأخرى). وبينا أيضاً أن هذا الانزياح يرتبط بتباطؤ الزمن في المجال الجاذبي. لكن معالجتنا تلك لم تكن معالجة مقدارية. إذ استعملنا

مبدأ التكافؤ الآينشايني بصورة كيفية غير مقدارية.

ويمكن معالجة هذه الظاهرة بصورة مقدارية ومبسطة في آن، باستعمال قانون حفظ الطاقة الميكانيكية وقانون بلانك ببطاقة وقانون آينشتاين للملاقة بين الكتلة والطاقة، على النحو الآتي.

تدبر جسيم ضوء (فوتوناً) قرب سطح نجم كبير الكتلة. لقد بين الفيزيائي الألماني، ماكس بلانك، في مطلع القرن العشرين أن الطاقة الداخلية للفوتون (طاقة حركته، إن شئت) تساوي ثابتاً كونياً يدعى ثابت بلانك مضروباً بالتردد الموجي للون الذي يعبر عنه الفوتون. وبالنظر إلى قانون آينشتاين بصدد العلاقة بين الطاقة والكتلة، والذي ينص على أن الطاقة تساوي الكتلة مضروبة في مربع سرعة الضوء في الفراغ، فإنه يمكن القول إن الفوتون يحمل كتلة تساوي ثابت بلانك مضروباً بالتردد الموجي ومقسوماً على مربع سرعة الضوء في الفراغ. وعليه، فإنه يمكن معاملة الفوتون وكأنه جسم عادي يخضع إلى تأثير المجال الجاذبي.

ولنطبق قانون حفظ الطاقة الميكانيكية على فوتون قرب سطح نجم كبير الكتلة وينص هذا القانون على أن مجموع طاقتي الحركة والوضع لجسيم في مجال جاذبي محفوظ، أي ثابت، بغض النظر عن حركة الجسيم وموضعه. فإذا طبقنا هذا القانون على فوتون ينطلق من ذرة تقع على سطح نجم صوب موضع بعيد جداً عن سطح النجم حيث يتم التقاطه وحيث يكون الجهد الجاذبي للنجم صفراً، توصلنا إلى العلاقة الآتية: إن حاصل ضرب ثابت بلانك في تردد الفوتون عند سطح النجم مضافاً إلى كتلة الفوتون (التي تساوي حاصل الضرب هذا مقسوماً على مربع سرعة الضوء في الفراغ) مضروبة في الجهد الجاذبي للنجم عند سطحه يساوي حاصل ضربي ثابت بلانك في تردد الفوتون عند الموضع البعيد جداً حيث يتم التقاطه. فإذا أخذنا بعين الاعتبار أن الجهد الجاذبي يكون سالباً على سطح النجم، استنتجنا أن تردد الفوتون لحظة التقاطه في الموضع البعيد يكون أقل من تردده لحظة انطلاقه، أي أن الفوتون بماني انزياحاً صوب اللون الأحمر. وبناء على العلاقة المذكورة، فإن نسبة هذا الانزياح إلى التردد الذي ينبعث به الفوتون تساوي مقدار الجهد الجاذبي

عند سطح النجم مقسوماً على مربع سرعة الضوء في الفراغ. وبتعبير آخر، فإن هذه النسبة تساوي ثابت الجاذبية الكوني مضروباً في كتلة النجم ومقسوماً على نصف قطر النجم وعلى مربع سرعة الضوء في الفراغ. وهي نسبة صغيرة جداً في حال جل النجوم التي يمكن قياس أطيافها الضوئية. لكنها مع ذلك قابلة للقياس، على الأقل في حال الأقزام البيضاء ذات الكثافة العالية جداً. وعلى سبيل المثال، فإن هذه النسبة تساوي حوالي اثنين في المليون في حال شمسنا، وتساوي مائتين في المليون في حال القزم الأبيض المرافق للشعرى اليمانية. وتعد النسبة الثانية قابلة للقياس الدقيق. لكن الذي يعقد عملية القياس هو أن هناك أيضاً انزياحاً صوب اللون الأحمر بتأثير حركة القزم الأبيض، ومن الصعب التمييز بين التأثيرين. ومع ذلك، فقد تمكن العلماء من إيجاد طريقة ناجحة لذلك. أضف إلى ذلك أنهم تمكنوا من إيجاد طريقة دقيقة جدا لقياس هذه الظاهرة بدقة كبيرة في المختبر على سطح الأرض، برغم أن النسبة المذكورة في هذه الحال لا تتعدى اثنين ونصفا في المليار مليار. وقد جاءت القياسات في كلتا الحالتين مؤيدة تماماً لتنبؤات نظرية النسبية العامة في هذا المضمار.

(٤٠) مشكلة حركة حضيض عطارد

في الفصل السابق، ذكرنا أن المرحلة الأولى من مراحل تطور نظرية النسبية العامة، والتي جاءت مباشرة عقب نشر آينشتاين أسس نظريته، شهدت ثلاثة تطبيقات رئيسية قابلة للاختبار لهذه النظرية. وبدأنا بشرح التطبيق الأول المتعلق بانزياح أطياف الأضواء المنبعثة من سطوح النجوم صوب اللون الأحمر.

وسنخصص هذا الفصل لشرح تطبيق النسبية العامة على حركات الكواكب حول الشمس، وبخاصة كوكب عطارد، الكوكب الأقرب إلى شمسنا.

ولنبدأ بمقارنة نتائج النسبية العامة بنتائج نظرية نيوتن في الحركة والجاذبية في حال نظام مغلق يتضمن جسيماً واحداً يتحرك تحت تأثير مجال جاذبي متناسق كروياً مصدره جسيم كتلته أكبر بكثير من كتلة الجسيم المتحرك. وفي هذه الحال، فإنه يمكن إهمال أثر الجسيم صغير الكتلة على الجسيم كبير الكتلة ومجاله الجاذبي، ومن ثم يمكن اختزال النظام المادي المعني إلى حركة جسيم واحد يتحرك تحت تأثير مجال جاذبي متناسق كروياً، أي مجال لا يتغير بتغير الاتجاه.

وإذا طبقنا نظرية نيوتن في الحركة والجاذبية على هذا النظام المثالي البسيط، توصلنا إلى قوانين كبلر الثلاثة المتعلقة بحركة الكواكب حول الشمس في صورتها المعممة. وينص القانون الأول على أن الجسيم يتحرك في قطع مخروطي اعتماداً على الشروط الابتدائية لحركته. فهو إما أن يتحرك في قطع ناقص (إهليلج) بحيث يحتل مركز المجال إحدى بؤرتي الإهليلج، كما هو الحال مع الكواكب والأقمار والمذنبات، وإما أن يتحرك في قطع متكافىء أو قطع زائد. أما القانون الثاني والثالث، فهما يتعلقان بالحالة الأولى، أي حالة الحركة الإهليلجية. وينص القانون الثاني على أن الخط الواصل بين الجسيم المتحرك ومركز المجال يمسح مساحات متساوية في أزمان متساوية. ويعكس هذا القانون مبدأ أساسياً من مبادىء الحفظ في الميكانيك، وهو مبدأ حفظ ما يسمى الزخم الزاوي، الذي يشكل خاصية أساسية من خصائص الحركات الدورانية. أما القانون الثالث، فهو ينص على أن مربع فترة

دورة كاملة للجسيم حول مركز المجال يتناسب تناسباً طردياً مع مكعب المحور الأكبر للإهليلج.

وهنا تجدر الإشارة إلى نقطتين أساسيتين:

١ـ إن الجسيم المتحرك في هذه الحال يتحرك في مسار مغلق (الإهليلج) إذا توافرت الشروط الابتدائية الملائمة. وهذه نتيجة مدهشة بالفعل. فالمسارات المفتوحة أكثر احتمالاً بكثير بصورة عامة. وقد تبين بالفعل أن هناك نمطين من القوة فقط يقودان إلى إمكانية مسارات مغلقة، وهما نمط القوة الذي يتناسب عكسياً مع مربع البعد عن مركز القوة، ونمط القوة الذي يتناسب طردياً مع هذا البعد. وفيما عدا ذلك، فإن جميع أنماط القوى تقود بالضرورة وفي جميع الأحوال إلى مسارات مفتوحة.

٢ـ يشكل النظام المادي المذكور مجرد تقريب مثالي لنظام المجموعة الشمسية، ومن ثم فإن قوانين كبلر تشكل تقريباً مثالياً لقوانين حركة كواكب المجموعة الشمسية وأقمارها ومذنباتها وكويكباتها. ذلك أن كل كوكب أو قمر أو مذنب لا يتأثر بالمجال الجاذبي الذي تولده الشمس فقط، وإنما يتأثر أيضاً بالمجالات الجاذبية التي تولدها الكواكب الأخرى. ولكن، بالنظر إلى صغر كتل الكواكب بالنسبة إلى كتلة الشمس، فإن هذه المؤثرات الكوكبية تظهر على شكل اضطرابات طفيفة في مسارات الكواكب تحرفها قليلاً عن قوانين كبلر. وكنتيجة لهذه الاضطرابات، فإن كوكباً مثل عطارد، وهو أقرب كوكب إلى الشمس، لا يتحرك في مسار إهليلجي مغلق تماماً. فهو لا يكرر تماماً الدورة الواحدة. ويتمظهر ذلك على صورة دوران بطيء لنقطة الحضيض (أي أقرب نقطة إلى الشمس يمر فيها عطارد) في اتجاه دوران الكوكب حول الشمس. وقد تمكن علماء منتصف القرن التاسع عشر من تفسير الجزء الأكبر من هذه الظاهرة باستعمال نظرية نيوتن في الحركة والجاذبية على أساس هذه الاضطرابات الكوكبية. وفي عام ١٨٥٩ أعلن الفلكي الفرنسي لفرير أن جزءا كبيراً يفسر بالفعل بهذه الكيفية، لكن هناك جزءاً صغيراً من هذه الحركة عصيّاً على مثل هذا التفسير. ومع أن هذا الجزء لا يتجاوز ثلاثاً وأربعين ثانية قوسية لكل قرن (أي جزءاً صغيراً جداً من الدرجة لكل قرن)، إلا أنه أثار قلق علماء النصف الثاني

من القرن التاسع عشر بالنظر إلى ما وصلت إليه القياسات الفلكية، وتطبيقات نظرية نيوتن في الحركة والجاذبية على الظاهرات الفلكية، من دقة كبيرة في ذلك العصر. لذلك كله لم يستهن علماء ذلك العصر بهذا الجزء الصغير، وإنما شمروا عن سواعدهم من أجل إيجاد تفسير مقنع لهذا الانحراف الطفيف. وحاول بعضهم أن يفسروه بافتراض وجود كوكب عاشر أقرب إلى الشمس من عطارد ويحدث اضطراباً في مسار عطارد يؤدي إلى هذا الانحراف.

وأسموه "فلكان". لكن القياسات الدقيقة عجزت عن الكشف عن هذا الكوكب المفترض. وحاول بعضهم تفسير الانحراف بافتراض وجود حزام من الكويكبات يقود إلى مثل هذا الانحراف. لكن ذلك ظل مجرد افتراض. وفي نهاية القرن التاسع عشر، حاول الفلكي "نيوكم" تفسيره بتعديل قانون نيوتن في الجاذبية قليلاً وجعله ينحرف قليلاً عن التناسب الطردي مع مربع البعد عن مركز المجال الجاذبي. لكن هذا التفسير لم يعدّ تفسيراً مقنعاً بالنظر إلى طابعه الاعتباطي غير المبرر خارج إطار الظاهرة المراد تفسيرها. وخلاصة القول إن هذه التفسيرات جميعاً خلقت من المشكلات أكثر مما حلت، أو إنها اتسمت بالاعتباطية والعشوائية، الأمر الذي أبقى مشكلة دوران حضيض عطارد معلقة، حتى تمكن آينشتاين من حلها بصورة مقنعة وطبيعية عام ١٩١٥ على أساس النسبية العامة، وهو التفسير الذي سنتناوله في الفصول القادمة.

(٤١) حركات الكواكب وفق النسبية العامة

في الفصل السابق، شرحنا معالجة نيوتن لحركة جسيّم يتحرك تحت تأثير مجال جاذبي متناسق كروياً وينبع من نقطة، وأشرنا إلى أن تلك المعالجة قادت نيوتن إلى قوانين كبلر الثلاثة المتعلقة بحركة الكواكب حول الشمس، وبالتحديد إلى النتيجة أن الجسيم في هذه الحال يتحرك في مسار إهليلجي مغلق يكرر ذاته باستمرار. ولئن لم تكن المسارات الفعلية للكواكب مغلقة تماماً، فمرد ذلك إلى الاضطرابات الجاذبية التي يحدثها كل كوكب في حركة الكواكب الأخرى. لذا يبدو مسار الكوكب وكأنه يدور في حركة دورانية بطيئة في اتجاه حركة الكوكب حول الشمس. وتتضح هذه الظاهرة أكثر ما تتضح في كوكب عطارد، أقرب كوكب إلى الشمس.

كيف عالج آينشتاين حركة جسيم يتحرك تحت تأثير مجال جاذبي متناسق كروياً؟ وما هي النتائج المتوقعة لمثل هذه المعالجة؟

نذكر القارىء أولاً بما سبق أن قلناه من أن الكتلة لا تشكل المصدر الوحيد للمجال الجاذبي في النسبية العامة. فالمجال المتولد يولد بدوره مجالاً جاذبياً. وهذا الأخير يولد بدوره مجالاً آخر، وهلمّ جرّاً. وتكون محصلة كل هذه المجالات منحرفة قليلاً عن قانون التربيع العكسي النيوتني. ويمكن التعبير عن هذه المحصلة بمتسلسلة لانهائية من الحدود أو المجالات. وبالطبع، فإن كل مجال من هذه المجالات يكون أضعف كثيراً من سابقه. من ثم، فإنه يمكن النظر على أنها تقريبات متتابعة للمحصلة. ويشكل قانون التربيع العكسي النيوتني التقريب الأول لهذه المحصلة النسبية. وإذا كان المجال الجاذبي ضعيفاً، فإننا يمكن أن نكتفي بمجموع التقريبين الأول والثاني، وإهمال باقي التقريبات، التي تكون أصغر من أن تقاس، وذلك من أجل المقارنة بين نتائج النسبية العامة ونتائج نظرية نيوتن في الحركة والجاذبية. وفي هذه الحال، يكون الانحراف عن قانون التربيع العكسي صغيراً جداً، لكنه يكون قابلاً للاختبار والقياس. وبالطبع، وكما أسلفنا، فإن مثل هذا الانحراف يؤدي إلى الانحراف قليلاً عن المسار الإهليلجي المغلق، أي إلى فتح المسار قليلاً، ويقود من ثم إلى ظاهرة من

نوع ظاهرة دوران حضيض عطارد. إننا إذاً نتوقع أن تقود المعالجة النسبية العامة لحركة جسيم يتحرك في مجال متناسق كروياً إلى نتيجة مؤادها أن حضيض مسار الجسيّم يدور ببطء، حتى في غياب اضطرابات نابعة من جسيّمات أخرى تدور حول المركز. ولكن، هل تتطابق النتيجة التي تتوصل إليها نظرية النسبية العامة تماماً مع حركة حضيض عطارد؟

إذا افترضنا أن المجال الجاذبي المعني مجال ضعيف، وأنه متناسق كروياً، وأن سرعة الجسيم الذي يتحرك تحت تأثيره صغيرة جداً مقارنة بسرعة الضوء في الفراغ، ثم طبقنا قانون نيوتن الأول المعمم وقانون آينشتاين العام للمجال الجاذبي على هذا النظام المادي على أساس هذا الافتراض، توصلنا إلى معادلة لمسار الجسيم حول مركز المجال قريبة جداً من معادلة الإهليلج النيوتنية الكبلرية، مع فارق بسيط وهو أن بعد الجسيّم عن مركز المجال لا يعتمد على جيب تمام الزاوية التي يصنعها الخط الواصل بين الجسيم ومركز المجال مع نصف المحور الأكبر للإهليلج، كما هو الحال في معادلة كبلر ونيوتن، وإنما يعتمد على جيب تمام هذه الزاوية مضروباً بكمية تعتمد على كتلة الجسيّم الجاذب في مركز المجال وعلى الخصائص الرئيسية للإهليلج. ولئن كانت هذه الكمية قريبة جداً من الواحد، إلا أنها ليست واحداً تماماً. وتكون نتيجة ورود هذه الكمية في معادلة الإهليلج أن حضيض الإهليلج يدور ببطء في اتجاه حركة الجسيم في المسار الإهليلجي بسرعة زاوية معينة. وتعتمد هذه السرعة الزاوية على كتلة الجسيّم الجاذب في مركز المجال وعلى الخصائص الرئيسية للإهليلج. فإذا اعتبرنا الجسيم الجاذب الشمس، واعتبرنا الجسيم المتحرك تحت تأثير المجال الجاذبي للشمس الكوكب عطارد، حصلنا على سرعة زاوية تتطابق تماماً مع القيمة الفعلية المرصودة التي كان أول من لفت النظر إليها الفلكي الفرنسي ليفرير، كما ذكرنا في الفصل السابق. وبتعبير آخر، فإن القيمة النظرية تبلغ ثلاثاً وأربعين ثانية قوسية، تماماً كما هو الحال مع القيمة المرصودة لحركة حضيض عطارد.

إنه تطابق مذهل بحق، لذلك لا عجب أن اعتبر نصراً عظيماً لنظرية النسبية

العامة وصانعها، ألبرت آينشتاين، في ذلك الوقت (١٩١٥ ـ ١٩١٦). والحق أن المشيرة العلمية لم تستيقظ من نشوتها بهذا الانتصار حتى عام ١٩٦٧، يوم بدأت الشكوك تساور بعض العلماء بصدد هذه النتيجة. إذ بدأت القياسات الدقيقة تشير إلى إمكانية أن يكون جزء ملموس من حركة حضيض عطارد ناتجاً عن تفلطح طفيف للشمس ناجم عن دورانها حول نفسها. ذلك أن مثل هذا التفلطح يمكن أن يسبب حركة في حضيض عطارد أو أي جسيم قريب من الشمس. ونشط الفيزيائيون والفلكيون في إجراء التجارب والرصدات لتحديد مدى تفلطح الشمس. وتوصل بعضهم إلى نتائج تضع نتائج النسبية العامة موضع التساؤل والشك وتسبب حرجاً كبيراً لهذه النظرية.

إلا أنه سرعان ما برزت نتائج جديدة أكثر دقة جاءت داعمة لنتائج النسبية العامة ومقللة من أثر تفلطح الشمس على حركة حضيض عطارد. لكن المشكلة ما زالت قائمة والجدال ما زال محتدماً حولها. ومع ذلك، فإن النتائج تميل بصورة عامة إلى تأييد نظرية النسبية العامة.

(٤٢) تحدب المكان بفعل المادة

عام ١٩١٥، تنبأ آينشتاين بأنه، إذا مرّ شعاع ضوئي قادم من نجم بعيد صوب الأرض بالقرب من سطح الشمس، فإنه ينحرف عن الخط المستقيم بزاوية صغيرة جداً تساوي واحداً وثلاثة أرباع ثانية قوسية، علماً بأن الثانية القوسية تساوي واحداً مقسوماً على ثلاثة آلاف وستمائة من الدرجة. ومع أن هذه الزاوية صغيرة جداً، إلا أنه كان من الممكن قياسها آنذاك بدقة كافية، برغم الصعوبات الهائلة التي كانت تعترض طريق ذلك. وكان من ضمن هذه الصعوبات ضرورة إجراء هذا القياس عند حدوث كسوف كلي للشمس، حيث إنه يتعذر رؤية النجوم المعنية في غياب ذلك. وشاء حسن طالع آينشتاين أن يقع كسوف كلي للشمس عام ١٩١٩ في موقعين، هما الساحل البرازيلي وغرب إفريقيا الوسطى. وشاء حسن طالعه أيضاً أن يقع ذلك عام ١٩١٩ عقب انتهاء الحرب العالمية الأولى في أجواء اتسمت برغبة في تعزيز أركان السلام الأوروبي والعالمي وترميم ما انقطع من علائق وصلات بين الأمم الأوروبية المتصارعة. فكان أن أوفدت الحكومة البريطانية بعثتين علميتين إلى الموقعين المذكورين لقياس الظاهرة المذكورة التي تنبأ بها الألماني ألبرت آينشتاين. وكان أبرز قادة هاتين البعثتين الفيزيائي والفلكي البريطاني المعروف، السير أرثر إدنغتون، الخبير الأكبر في نظرية النسبية العامة (بعد آينشتاين بالطبع) وفي نظرية النجوم.

لكن من الخطأ الظن بأن آينشتاين كان أول من تنبأ بانحراف أشعة الضوء المارة بالقرب من سطح الشمس بفعل جاذبية الشمس. إذ تنبأ العديدون قبله بنوع من الانحراف على أساس نظرية نيوتن في الحركة والجاذبية. بل إن هذه التنبؤات بدأت بنيوتن نفسه. إذ ورد في التساؤل الأول في كتاب "البصريات" لنيوتن: "ألا تؤثر الأجسام على الضوء عن بعد، وألا تحني أشعته بفعلها، وأليس هذا الفعل أشد ما يكون عند أقل مسافة؟". وتجدر الإشارة هنا إلى أن نيوتن وضع تساؤله هذا على أساس نظريته الجسيمة في الضوء، حيث إن نيوتن اعتبر الأشعة الضوئية سيولاً من

الجسيمات الدقيقة السريعة الحركة.

وفي نهاية القرن الثامن عشر، تدّبر كل من العالم الإنجليزي ميتشيل والعالم الفرنسي المعروف لابلاس جسماً تبلغ كتلته حدّ أن تساوي سرعة الإفلات منه سرعة الضوء في الفراغ. وارتكازاً إلى نظرية نيوتن الجسيمة في الضوء، توصلا إلى فكرة أن جاذبية مثل هذا الجسم تمنع الضوء من الإفلات منه، فتتعذر رؤيته، ولا يستدل على وجود إلا من الأثر الكبير لجاذبيته. وكان ذلك أول ذكر في التاريخ لفكرة الثقوب السوداء.

وفي الوقت ذاته، وعلى أساس نظريتي نيوتن في الجاذبية والضوء، أجرى العالم الإنجليزي كفنديش حساباً للزاوية التي ينحرف بها شعاع ضوئي قادم من نجم صوب الأرض عندما يمر بالقرب من الشمس. إلا أنه لم ينشر حسابه ذلك. وظل عمله ذاك مجهولاً حتى عام ١٩٢١، يوم عثر عليه بين مخطوطاته غير المنشورة.

وكان أول عمل منشور في هذا الصدد هو العمل الذي نشره العالم الألماني زولدنر عام ١٨٠٢. وفيه تدّبر زولدنر جسيماً ضوئياً، يحمل كتلة معينة، ويتحرك بسرعة الضوء المعروفة في مسار يمر بالقرب من سطح الشمس. وبين أن المسار في هذه الحال يكون قطعاً زائداً منفرجاً يقع رأسه قرب سطح الشمس. تبين لديه على هذا الأساس أن زاوية انحراف هذا المسار عن الخط المستقيم يساوي ضعف كتلة الشمس مضروباً في ثابت الجاذبية الكوني ومقسومة على نصف قطر الشمس وعلى مربع سرعة الضوء في الفراغ. من ثم تبين لديه أن زاوية الانحراف تساوي حوالي تسعة أعشار الثانية القوسية، أي نصف الزاوية التي تنبأ بها آينشتاين عام ١٩١٥ على أساس نظرية النسبية العامة.

وفي عام ١٩١١، ومن دون علم مسبق بعمل زولدنر، توصل آينشتاين، باستعمال مبدأ التكافؤ، إلى النتيجة التي سبق أن توصل إليها زولدنر. لكنه عاد وحسب هذه الزاوية عام ١٩١٥ باستعمال نظريته الكاملة في النسبية العامة، فحصل على ضعف هذه النتيجة، كما أسلفنا. وجاءت نتائج البعثتين البريطانيتين برئاسة إدنغتون السابق ذكرهما مؤيدة وداعمة للنتيجة المحسوبة على أساس نظرية النسبية العامة. والنقطة الجوهرية هنا لا تكمن في أن آينشتاين تنبأ بانحراف الضوء وانحنائه بتأثير

الجاذبية. فقد سبقه إلى ذلك عدد من العلماء. لكن الجوهري في الأمر هو أن تنبؤ آينشتاين بزاوية الانجراف جاء مغايراً لجميع المحاولات السابقة التي تمت على أساس نظرية نيوتن في الجاذبية بما في ذلك محاولته هو عام ١٩١١، وأن النتائج التجريبية جاءت مؤيدة لهذا التنبؤ الجديد. لذلك، فما إن أعلن عن نتائج البعثتين البريطانيتين حتى سطع نجم آينشتاين عالمياً وتفجرت شهرته في كل مكان بعد أن كانت محصورة في الوسط العلمي الفيزيائي الأكاديمي.

ويكمن سرّ هذا الاختلاف البيّن بين النتيجة النيوتنية والنتيجة الآينشتاينية في أن الأولى لا تأخذ بعين الاعتبار سوى انحناء البعد الزمني بتأثير المادة، في حين أن الثانية تأخذ بعين الاعتبار انحناء المكان بالإضافة إلى انحناء الزمان. وفي حال الضوء يكون أثر انحناء المكان مساوياً لأثر انحناء الزمن. وقد سبق أن بينا أن الجهد الجاذبي النيوتني يكافىء ذلك الجزء من التنسور القياسي الذي يعبر عن انحناء الزمان، ومن ثم أن نظرية نيوتن في الجاذبية لا تأخذ بعين الاعتبار الأجزاء التسعة الأخرى المكونة للتنسور القياسي، في حين أن نظرية النسبية العامة تعمم نظرية نيوتن بأخذها بعين الاعتبار جميع الجهود الجاذبية العشرة المكونة للتنسور القياسي. ومن ذلك بالضبط تنبع أهمية تجربة إدنغتون وفريقه. فهي دليل على ضرورة التعميم الآينشتايني وعلى انحناء المكان بفعل المادة.

(٤٣) الثقوب السوداء وفق نظرية نيوتن

لا نبالغ إن قلنا إن الحقل الطبيعي لاختبار نظرية النسبية العامة هو حقل فلك النجوم وحقل الظاهرات الكونية. ولعل أهم ظاهرتين في هذين الحقلين حققت نظرية النسبية العامة نجاحاً واضحاً في دراستهما هما: ظاهرة الثقوب السوداء وظاهرة تمدد المكان الكوني. وسنخصص الفصول القادمة لمعالجة ظاهرة الثقوب السوداء ودور نظرية النسبية العامة في فهمها وتركيب صورتها المفصلة.

ولكن، برغم أن النسبية العامة كانت أساسية في فهم ضرورة وجود الثقوب السوداء وتكونها وفي فهم بنائها الكامل، إلا أن أول تنبؤ بها لم يأتِ في سياق النسبية العامة، وإنما في سياق نظرية نيوتن في الجاذبية. وقد تم ذلك في نهاية القرن الثامن عشر على أيدي الفيزيائي الإنجليزي جون متشيل والرياضي الفرنسي الكبير بيير دي لابلاس. وجاء تنبؤ متشيل ولابلاس هذا في سياق دراستهما مفهوم سرعة الإفلات من سطوح الأجرام السماوية الممكنة وفق نظرية نيوتن في الجاذبية.

أما سرعة الإفلات من سطح جرم سماوي، فهي السرعة الدنيا اللازمة التي ينبغي أن ينطلق بها جسم من هذا السطح حتى يتسنى له أن يفلت من القبضة الجاذبية لهذا الجرم. فإذا كانت سرعة الجسم أقل من هذه السرعة، من هذا السقف، فإنه لا يفلت من قبضة الجرم السماوي، وإنما يعود القهقري إلى سطحه. ويمكن حساب سرعة الإفلات على النحو الآتي. تدّبر جسماً بعيداً جداً عن سطح جرم سماوي، ولنفترض أنه ساكن. في هذه الحال تكون طاقته الميكانيكية الكلية صفراً، حيث إن كلا من طاقة حركته وطاقة وضعه الجاذبية تساوي صفراً. وإذا جعلناه يسقط سقوطاً حراً صوب سطح الجرم السماوي، ظلت طاقته الميكانيكية صفراً، بالنظر إلى قانون حفظ الطاقة المكانيكية الكلية، لكن طاقتي حركته ووضعه تغيرتا، بحيث ازدادت الأولى وانخفضت الثانية تباعاً دون الصفر. من ثم، فإن طاقة حركته عند أي موضع تساوي مقدار طاقة وضعه عند هذا الموضع. ويمكن، على هذا الأساس، حساب السرعة التي يصل إليها الجسم عند سطح الجرم. إنها، في الواقع، تتناسب

طردياً مع نصف قطر الجرم، باعتبار كثافة الجرم ثابتة. وتساوي هذه السرعة مقدارياً سرعة الإفلات من سطح الجرم السماوي، لاعتبارات تناسقية. وبتعبير آخر، فإنه ينبغي إطلاق جسم من سطح الجرم بهذه السرعة حتى يتسنى له أن يفلت منه صوب أماكن بعيدة جداً عنه. إن سرعة الإفلات، إذاً، تتناسب طردياً مع نصف قطر الجرم، باعتبار كثافة الجرم ثابتة. والحق أن مربعها يساوي ضعف ثابت الجاذبية الكوني مضروباً في كتلة الجرم السماوي ومقسوماً على نصف قطره.

ماذا يعني ذلك؟ إنه يعني أن سرعة الإفلات تزداد طردياً بازدياد نصف قطر الجرم. عند أي نصف قطر تصل سرعة الإفلات إلى سرعة الضوء في الفراغ؟ بالنظر إلى علاقة التناسب بين سرعة الإفلات وبين نصف قطر الجرم السماوي، فإن نصف قطر الجرم، الذي تساوي سرعة الإفلات منه سرعة الضوء، مقسوماً على نصف قطر الشمس يساوي سرعة الضوء مقسومة على سرعة الإفلات من الشمس، وذلك بافتراض أن كثافة الجرم المعني تساوي كثافة الشمس. فإذا علمنا أن سرعة الضوء في الفراغ تساوي ثلاثمائة مليون متر في الثانية وأن سرعة الإفلات من سطح الشمس تساوي حوالي ستمائة ألف متر في الثانية، تبين لنا أن نصف قطر الجرم المعني ينبغي أن يساوي حوالي خمسمائة مرة قدر نصف قطر الشمس حتى تكون سرعة الإفلات منه مساوية لسرعة الضوء. ولكن ماذا يعني ذلك بالنسبة إلى الضوء المنبعث من سطح هذا الجرم أو النجم المملاق؟ لقد اتبع متشيل ولابلاس خطى نيوتن في افتراض أن الأشعة الضوئية تشكل سيولاً من الجسيمات الدقيقة التي تحمل كتلة. لذلك افترضنا أن الجاذبية تؤثر على الضوء تماماً مثلما تؤثر على الأجسام العادية. وعليه، فقد استنتجا أن الضوء لا يستطيع الإفلات من سطح النجم المملاق السابق ذكره. وبتعبير آخر، فإن نجماً عملاقاً، له كثافة الشمس ذاتها ونصف قطر أكبر من نصف قطر الشمس بخمسمائة مرة على الأقل، يكون أسود سواد المكان الخالي المحيط فيه، ومن ثم لا يرى، لكون الضوء المنبعث من سطح لا يفلت منه، وإنما يعود إليه. فهو لا يستدل على وجوده من ضوئه، كما هو الحال مع النجوم العادية، وإنما من أثره الجاذبي فقط. ولم يرَ متشيل ولابلاس ما

يمنع أن يكون هناك العديد من مثل هذه النجوم المملاقة السوداء.

وتعتبر هذه المعالجة أو لتنبؤ في التاريخ بالثقوب السوداء، التي برزت مؤخراً الدلائل الفلكية على وجودها. لكن هذا التنبؤ العظيم أهمل في حينه وطوال القرن التاسع عشر، وخصوصاً بعد أن سادت النظرية الموجية في الضوء على حساب نظرية نيوتن الجسيمية منذ مطلع القرن التاسع عشر.

ومع مجيء نظرية النسبية العامة عام ١٩١٥، تفتحت آفاق جديدة أمام هذه الفكرة الجريئة. لكنها لم تستثمر جيداً في هذا المضمار حتى مطلع الستينيات من القرن العشرين، لأسباب تتعلق بمستوى تطور الرصد الفلكي ونظرية المادة. لكن الثلاثين سنة الأخيرة شهدت من التطورات والاكتشافات في هذا الحقل ما أرسى ظاهرة الثقوب السوداء على أسس راسخة لا تقل رسوخاً عن الأسس التي تحكم سلوك النجوم العادية.

(٤٤) الثقوب السوداء في النسبية العامة

بعد موجة الانتصارات التي حققتها نظرية النسبية العامة عقب وضع أسسها (١٩١٥-١٩١٦)، تلك الانتصارات التي تمثلت في تفسير حركة حضيض عطارد، وفي التنبؤ بانحراف الأشعة الضوئية المارة قرب الشمس بزاوية معينة، وفي التنبؤ بانزياح الأطياف الضوئية المنبعثة من سطوح النجوم صوب اللون الأحمر. أقول: بعد موجة الانتصارات تلك، أصاب البحث في حقل النسبية العامة نوع من الجمود دام حوالي أربعين عاماً. ثم، وفي مطلع الستينيات من هذا القرن العشرين، تفجر نشاط محموم في هذا الحقل على جميع الصعد، وفي الاتجاهين النظري والتجريبي، وبخاصة في مجال دراسة الكون والنجوم المنهارة تحت وطأة جاذبيتها. وكانت الثمرة الرئيسية لهذا الجهد إكمال بناء الجسم الأساسي لنظرية الثقوب السوداء وتحديد طرائق الكشف الرصدي عنها؛ هذا، بالطبع بالإضافة إلى الإنجازات النظرية والرصدية الهائلة التي تم إحرازها مذاك في مجال دراسة الكون. ومع ذلك، فلا يجوز إهمال الإنجازات القليلة نسبياً التي تم إحرازها في الفترة المنصرمة بين عامي ١٩٢٠، ١٩٦٠، برغم الركود النسبي في هذا المضمار.

لقد ابتدأت قصة نظرية النسبية العامة مع الثقوب السوداء مباشرة عقب نشر آينشتاين أبحاثه الرئيسية في النسبية العامة عام ١٩١٥، وبالتحديد في الشهر الأخير من عام ١٩١٥، يوم نشر الفلكي الألماني كارل شفارتزشيلد بحثاً تضمن أول حلّ دقيق واقعي لمعادلة آينشتاين المجالية في الفراغ في حال كون المجال الجاذبي متناسقاً كروياً، أي لا يفرق بين الاتجاهات المكانية. وبتعبير آخر، فقد توصل شفارتزشيلد إلى التعبير الرياضي عن تركيبة الزمكان المحيط بجسيم يولد مجالاً جاذبياً يتمتع بتناسق كروي. وبالتحديد، فقد وجد الكيفية التي تعتمد بها الفترة الرباعية على الإحداثيات الزمكانية من منظور مشاهد يقع بعيداً جداً عن الجسيم وتأثيره. ولم يدرك شفارتزشيلد يومها أنه توصل بحله ذاك إلى مفهوم الثقب الأسود وخصائصه الرئيسية وضرورة وجوده. وتوفي شفارتزشيلد بعد نشر بحثه

ذاك ببضعة أشهر في ساحة الوغى إبان الحرب العالمية الأولى وهو في الأربعين من عمره، تاركاً حل لغز ما أنجزه إلى الأجيال القادمة. ولم تبدأ العشيرة العلمية تدرك علاقة حل شفارتزشيلد بالثقوب السوداء إلا منذ مطلع ستينيات القرن العشرين، إذا استثنينا بعض التبصرات النافذة المنفردة لبعض العلماء في الفترة المنصرمة، والمقترنة باسم لانداو الروسي وليميتر البلجيكي وتزفيكي السويسري والأمريكيين أوبنهايمر وسنايدر، في الثلاثينيات من القرن العشرين تحديداً.

ولكن، لماذا تأخر إدراك ذلك؟ لماذا عجز خبراء عمالقة في النسبية العامة، مثل آينشتاين نفسه وإدنغتون، عن إدراك ذلك؟ بل يمكن القول إن أولئك العمالقة ساهموا مساهمة أساسية في هذا التأخير. لماذا؟

يعود ذلك أولاً إلى طبيعة العلاقة بين البناء الرياضي والمعنى الفيزيائي في نظرية النسبية العامة. إذ، في حين أن هذه العلاقة تتميز بشفافية وبديهية ملحوظة في حال نظرية نيوتن في الجاذبية والحركة، فإنها تتميز بتعقيد كبير وضبابية كثيفة في حال النسبية العامة، الأمر الذي يدفعنا إلى الظن بأن النسبية العامة لم تكتمل على يدي آينشتاين، وإنما وجدت فيه منصة انطلاقها. والمشكلة الرئيسية هنا تكمن في التأويل الفيزيائي للإحداثيات الرباعية المستعملة في التعبير عن حلول معادلة آينشتاين المجالية. فكما أسلفنا القول، فإن هذه المعادلة تطيع مبدأ لا تغير الصورة، ومن ثم فهي لا تتغير إذا انتقلنا من نظام إحداثيات رباعي (زمكاني) إلى آخر. بذلك تبرز مشكلة تحديد المعنى الفيزيائي لنظام الإحداثيات الرباعي المستعمل في التعبير عن حلول معادلة آينشتاين المجالية. ولا يبرز المعنى عفوياً من الشكل الرياضي، وإنما من تدبر حالات خاصة وبالمقارنة مع نتائج نظرية نيوتن ونظرية النسبية الخاصة.

كذلك، فقد تبرز نتوءات شاذة في الحل الرياضي الدقيق، وليس من السهل معرفة ما إذا كانت هذه النتوءات تعبر عن واقع فيزيائي أو خلل في النظرية نفسها أو نقص في نظام الإحداثيات المستعمل. وعلى سبيل المثال، فقد برز مثل هذا النتوء الشاذ في حلّ شفارتزشيلد، فظن جل العلماء في حينها أنه تعبير عن قصور في الحل نفسه،

وربما في النظرية نفسها، لكنه تبين في مطلع ستينيات القرن العشرين أن المشكلة تكمن في نظام الإحداثيات الذي استعمله شفارتزشيلد، وأن النتوء يختفي في نظم إحداثيات رباعية أخرى ويترك مكانه سمة جوهرية من سمات الثقوب السوداء. والملفت للنظر أن أكثر من تأثر بهذا الارتباك وساهم في تفاقمه آينشتاين وإدنغتون، أكبر خبيرين في النسبية العامة في النصف الأول من القرن العشرين.

وهناك سبب آخر لهذا التأخير الطويل في إدراك المعنى الفيزيائي لحل شفارتزشيلد، وهو غرائبية فكرة الثقوب السوداء وبعدها الهائل عن المألوف، الأمر الذي جعل كثيراً من علماء النصف الأول من القرن العشرين، بما في ذلك الثوريون منهم أمثال آينشتاين وإدنغتون، ينفرون منها ويقاومون الاعتراف في إمكانية تحققها الطبيعي. وقد احتاجت الجماعة العلمية إلى جهود كبيرة على مرّ عقود من الزمان لكي تحرر وعيها من التصور الكلاسيكي الحسي للمادة، ذلك التصور الذي ظل راسخاً في عقول جلّ العلماء، وعلى رأسهم الثوري الأكبر ألبرت آينشتاين.

(٤٥) إشكالية اللانهاية في النظرية الفيزيائية

قلنا إن قصة النسبية العامة مع الثقوب السوداء ابتدأت مباشرة عقب وضع آينشتاين أسس النسبية العامة، حين وجد كارل شفارتزشيلد أول حل رياضي دقيق وتام لمعادلة آينشتاين المجالية في الشهر الأخير من عام ١٩١٥. وهو الحل المتعلق بالمجال الجاذبي الذي يولده جسيم معزول في الفراغ. وقد تبين أن هذا لحل يتضمن بالضرورة مفهوم الثقب الأسود ويعبر بدقة عن الثقوب السوداء التي لا تدور حول نفسها. لكن ذلك لم يبدأ يتبين بالفعل إلا بعد مضي نصف قرن تقريباً على اكتشاف شفارتزشيلد المذكور. وفي غضون ذلك، حارت الجماعة العلمية في أمر المعنى الفيزيائي لحل شفارتزشيلد ونفرت نفوراً شديداً من المعاني المباشرة التي كان يوحي بها. ولكن، ما هي إشكالات حل شفارتزشيلد التي استفزت العلماء إلى هذا الحد؟ ما هي أوجه الغرابة والصعوبة في هذا الحل؟ ما هي السمات الخاصة في هذا الحل التي جعلت علماء كبار، مثل آينشتاين وإدنغتون، يشكون في وجود تطابق بين المعنى الفيزيائي والصورة الرياضية لهذا الحل؟

إذا أردنا أن ندرك إشكالات حل شفارتزشيلد، فعلينا أن ندرك أولاً معنى المنفردات Singularities في الرياضيات والفيزياء. ويمكن تعريف المنفردات بأنها النقط أو السطوح التي يأخذ عندها اقتران ما قيماً لا نهائية. وفي الفيزياء تحديداً، فإنها تعرّف بأنها النقط أو السطوح الزمكانية التي تأخذ عندها الكميات الفيزيائية، كالكتلة والطاقة والكثافة ودرجة الحرارة والانحناء الزمكاني والجهد المجالي والقوة، قيماً لانهائية. وبصورة عامة، فإن ورود المنفردات في النظريات والنماذج والحلول الفيزيائية هو مؤشر أكيد على قصور أو خلل أو إشكال فيها. لكنه إشكال صحي يحمل في داخله بذور تطورات جديدة في النظرية. فالمنفردات هي آلية أساسية من آليات تطور النظرية الفيزيائية.

وفي حال حل شفارتزشيلد، فإنه يبدو أن هناك نقطة منفردة تقع في مركز المجال الجاذبي، بالإضافة إلى سطح منفرد يساوي البعد المكاني عنده كمية معينة تسمى

نصف قطر شفارتزشيلد أو نصف القطر الجاذبي. ويساوي نصف القطر المذكور ضعف كتلة الجسيم المولد للمجال الجاذبي مضروباً في ثابت الجاذبية الكوني ومقسوماً على مربع سرعة الضوء.

ويعدّ مركز المجال الجاذبي نقطة منفردة لأن انحناء الزمان وقوة الجاذبية يزدادان بلا حدود عند الاقتراب منه، أي يصبحان لانهائيين عنده. أما سطح شفارتزشيلد فأمره أكثر تعقيداً. فهو من جهة يبدي بعض خصائص المنفردات، لكنه من جهة أخرى يحمل خصائص النقط غير المنفردة. فعند هذا السطح يصبح انحناء الزمان صفراً، وكأن الزمان يتوقف أو ينعدم، في حين يصبح انحناء المكان لا نهائياً. أما قوة الجاذبية فتبقى عنده محدودة، بعكس ما يحدث معها عند النقطة المنفردة في مركز المجال. وعليه، فإن سطح شفارتزشيلد يحمل خصائص متناقضة مع بعضها، الأمر الذي حير علماء النصف الأول من القرن العشرين وجعلهم يتساءلون: هل إن السلوك الشاذ للجاذبية عند سطح شفارتزشيلد يعود إلى خلل في نظرية النسبية أو في أنموذج الجسيم المعزول المولد للمجال الجاذبي، أم إنه يعود إلى إخفاق نظام الإحداثيات الذي استعمله شفارتزشيلد؟ لكنه لم يكن من السهل الإجابة عن هذا السؤال، الأمر الذي أدى إلى تعدد الإجابات والمراوحة في المكان ذاته لمدة نصف قرن تقريباً منذ شفارتزشيلد قبل أن تقدم إجابة حاسمة عن هذا السؤال.

ومما لا شك فيه أن غرائبية نتائج حل شفارتزشيلد ساهمت إلى حدّ كبير في ذلك الاضطراب والإرباك.

ومن هذه النتائج:

١ـ من منظور مشاهد بعيد عن سطح شفارتزشيلد، يبدو الزمن متوقفاً عند هذا السطح. لذلك، إذا سقط جسيم صوب هذا السطح، فإنه لا يصل إليه أبداً، بمعنى أنه يقترب منه، لكنه يحتاج إلى فترة زمنية لانهائية حتى يصل إليه. أما من منظور مشاهد يسقط سقوطاً حراً في المجال الجاذبي المعني، فإن فترة الوصول إلى سطح شفارتزشيلد تكون محدودة، ومن ثم فإن المشاهد يخترق هذا السطح ويصل إلى النقطة المنفردة في مركز المجال في غضون فترة قصيرة جداً. والسؤال هو: كيف

نوفق بين المنظورين؟

٢ـ من منظور الخارج، فإن لا شيء يصل إلى سطح شفارتزشيلد. أما من منظور الداخل، فلا شيء يستطيع الخروج منه.

٣ـ بعد اختراق سطح شفارتزشيلد صوب الداخل، يتحول المكان إلى زمان ويتحول الزمان إلى مكان. كيف نفسر ذلك؟ كيف نفهمه.

٤ـ مع أن الانحناء المكاني لانهائي عند سطح شفارتزشيلد، إلا أن بعد هذا السطح عن مركز الجسيم محدود.

٥ـ وفق حل شفارتزشيلد، فإن النقطة المنفردة في المركز وجميع النقط التي تقع دون سطح شفارتزشيلد تتحرك بسرع تفوق سرعة الضوء. أما عند سطح شفارتزشيلد، فإن كل نقطة تتحرك بالضرورة بسرعة الضوء. ما معنى ذلك؟

٦ـ يقود حل شفارتزشيلد إلى نتيجة لا معقولة مفادها أن شخصاً، إذ يخترق سطح شفارتزشيلد، يقابل نفسه يتحرك صوب الماضي. كيف يعقل ذلك؟

وسنبين في الفصل القادم كيف اربكت هذه الغرائبيات كبار علماء النصف الأول من القرن العشرين، وفي مقدمتهم ألبرت آينشتاين نفسه.

(٤٦) آينشتاين والثقوب السوداء

في الفصل السابق ناقشنا بعض الصعوبات والغرائبيات المتعلقة بحل شفارتزشيلد، وأشرنا إلى الدور الذي أدته هذه الصعوبات والغرائبيات في الاضطراب والإرباك الذي دب في صفوف علماء النصف الأول من القرن العشرين بصدد تحديد المعنى الفيزيائي لهذا الحل. وكان الخطأ الأكبر الذي وقع فيه أولئك العلماء آنذاك هو الاعتقاد بأن شطح شفارتزشيلد سطح منفرد. إذ قادهم ذلك إلى اعتباره خالياً من المعنى الفيزيائي وخارج نطاق البحث الفيزيائي، بمعنى أنهم مالوا إلى اعتباره نتاجاً للاواقعية الأنموذج الفيزيائي الذي اعتمده شفارتزشيلد في حله، وليس صورة مطابقة لواقع فيزيائي. لذلك، ساد الاعتقاد بينهم بصواب حل شفارتزشيلد ومطابقته للواقع خارج سطح شفارتزشيلد، وبانهيار هذا الحل وفشله عند سطح شفارتزشيلد ودونه. وتجدر الإشارة هنا إلى أن آينشتاين نفسه استعمل شكلاً من أشكال حل شفارتزشيلد في دراسة حركات الكواكب حول الشمس في النسبية العامة.

وقد انقضى نصف قرن من الزمان على ايجاد شفارتزشيلد حله الشهير قبل أن يدرك العلماء خطأ اعتبار شطح شفارتزشيلد سطحاً منفرداً، وأن العلة تكمن في نظام الإحداثيات الذي اتبعه شفارتزشيلد، لا في نظرية النسبية ولا في الأنموذج المستعمل. فمنذ مطلع الستينيات من القرن العشرين، أخذ العلماء يدركون أن هناك نقطة منفردة واحدة في حل شفارتزشيلد، أعني مركز المجال الجاذبي. أما سطح شفارتزشيلد فأخذ يعرف بأفق الأحداث، حيث إنه يعزل البقعة التي تحيط بالنقطة المنفردة كلياً عن باقي الكون بحيث تنعدم إمكانية اتصال هذه البقعة بالعالم الخارجي، وكأنها تحمي العالم الخارجي من أثر النقطة المنفردة في مركزها. إنه سطح مميز، لكنه ليس سطحاً منفرداً بالتأكيد.

هذا بالنسبة إلى النصف الثاني من القرن العشرين. أما في النصف الأول منه، فقد كان الميل العام صوب تجاهل سطح شفارتزشيلد وإهماله واعتباره فائضاً

رياضياً لا لزوم فيزيائياً له. وقد ابتدأ هذا الميل واضحاً مع كارل شفارتزشيلد نفسه. إذ اعتقد أنه لا يمكن ضغط جسم إلى ما دون تسعة أثمان نصف قطره الجاذبي (نصف قطر شفارتزشيلد)، حيث اعتقد أن الضغط في مركز الجسم يصبح لانهائياً عند نصف القطر المذكور. وفي الوقت ذاته تقريباً (١٩١٦)، نشر العالم الهولندي يوهانس دروشته بحثاً في مسارات الضوء المتحرك في مجال شفارتزشيلد، توصل فيه إلى أن مسارات الضوء حول مركز المجال تغدو دائرية عند ثلاثة أنصاف نصف القطر الجاذبي، وأن جسماً ساقطاً صوب المركز يأخذ زمناً لانهائياً حتى يصل إلى سطح شفارتزشيلد. لكن دروشته اعتقد خطأ أن هذه النتائج تبيح لنا إهمال المنطقة الداخلية المتضمنة داخل سطح شفارتزشيلد. وقد أيده في ذلك الفلكي الإنجليزي المعروف السير أرتر إدنغتون الذي اعتقد أن الجسيم يملأ هذه المنطقة الداخلية برمتها، الأمر الذي يمنع النفاذ إليها. وتوصل علماء كبار آخرون، مثل الرياضي الألماني هيرمان فيل و أينشتاين نفسه والفيزيائي الألماني فون لاوه، إلى نتائج مشابهة مفادها أن المنطقة الداخلية التي يحتويها غشاء (سطح) شفارتزشيلد عديمة المعنى الفيزيائي، إما لأن النقط الزمكانية المنتسبة إليها مجرد نقط رياضية ليس هناك ما يقابلها فيزيائياً، وإما لأن أي كتلة لا يمكن ضغطها إلى نصف قطرها الجاذبي أو ما دون ذلك.

بيد أن فكرة الحجم الأدنى للانضغاط واجهت منذ نهاية عشرينيات القرن العشرين تحدياً عاتياً فرضته عليها نظرية موت النجوم. ذلك أن الرصدات الثورية والتطور المذهل لنظرية الذرة وميكانيك الكم (الكنتم) في الثلث الأول من القرن العشرين مكن العلماء من دراسة النجوم عند نفاد وقودها النووي. وبصورة خاصة، حين طبق العالم الهندي تشاندراسيكار والعالم الروسي لاندا و مكيانيك الكم النسبي على النجوم المستنفدة وقودها، وجداً أنه إذا تخطت كتلة النجم حداً معيناً (حوالي مرة ونصف قدر كتلة شمسنا)، فليس هناك قوة قادرة على إيقاف انهياره الجاذبي أو إدخاله في حالة اتزان واستقرار. وهذا يعني أنه ليس هناك حجم أدنى لانضغاط نجم. وهي نتيجة معاكسة تماماً لنتائج شفارتزشيلد و آينشتاين وغيرهما من علماء

النسبية العامة في النصف الأول من القرن العشرين.

ومثلما قاوم علماء النصف الأول من القرن العشرين فكرة الثقب الأسود المتضمنة في حل شفارتزشيلد، فقد قاوموا، وبالضراوة ذاتها، فكرة الانهيار الجاذبي المتواصل (فكرة تشاندراسيكار ولانداو). وكان في مقدمة المقاومين لنظرية تشاندراسيكار السير آرثر إدنغتون، الفلكي البريطاني المعروف والآنف ذكره، الذي كان لهجومه على هذه النظرية أثر كبير في تجاهلها ردحاً من الزمان، برغم صحتها، كما بينت التطورات الفلكية في النصف الثاني من القرن العشرين.

ومع ذلك كله، فقد تم إحراز إنجازات مهمة على درب فهم الثقوب السوداء في النصف الأول من القرن العشرين.

(٤٧) الثقوب السوداء: من أوبنهايمر إلى هوكنغ

شهد النصف الأول من القرن العشرين ثلاثة إنجازات نظرية كبرى أشارت إلى مفهوم الثقب الأسود وضرورة تكونه في الطبيعة، لكنها لم تستثمر جيداً آنذاك في بناء هذا المفهوم وترسيخه لأسباب أتينا على جلها في الفصول السابقة. هذه الإنجازات هي:

١ـ حل شفارتزشيلد الآنف ذكره والذي تضمن مفهوم الثقب الأسود وخصائصه الرئيسية، وإن ظل هذا المفهوم مستتراً بفعل قصور نظام الإحداثيات الذي استعمله شفارتزشيلد عن التعبير عنه بصورة متماسكة وشاملة.

٢ـ اكتشاف الفيزيائي الهندي تشادراسيكار أن النجم المستنفد الطاقة لا يستقر البتة، بل يعاني انهياراً جاذبياً متواصلاً، ولا يجد أي قوة قادرة على إيقافه، إذا زادت كتلته على حد معين (ما يسمى حد تشاندراسيكار). وقد نبع هذا الاكتشاف من تطبيق ميكانيك الكم النسبي على نظم النجوم، وجابه منذ الإعلان عنه عاصفة من الاستنكار من جانب عتاة الفيزياء الفلكية آنذاك، وفي مقدمتهم الفلكي البريطاني الكبير السير آرثر إدنغتون.

٣ـ عقب اكتشاف الفيزيائي البريطاني تشادويك النيوترون في مطلع الثلاثينيات من القرن العشرين، اقترح السويسري فرانتز تزفيكي (عام ١٩٣٤) فكرة النجم النيوتروني الذي يتكون جله من نيوترونات متراصة معاً، الأمر الذي يؤدي إلى كثافة هائلة تكاد أن تكون خيالية. ورأى تزفيكي ببصيرته النافذة أن النجم النيوتروني هو الناتج النهائي الأكثر احتمالاً للسوبر نوفا (النجم المنفجر) وهي فكرة جريئة أكدتها الرصدات منذ عام ١٩٦٨.

وسرعان ما برز السؤال عما إذا كان هناك حد أعلى لكتلة النجم النيوتروني شبيه بحد تشاندراسيكار. وأدرك العلماء آنذاك أن الإجابة عن هذا السؤال استلزمت تطبيق نظرية النسبية العامة على نظم النجوم بالنظر إلى شدة المجالات الجاذبية التي يولدها النجم النيوتروني. وهذا ما قام به عام ١٩٣٩ العالم الأمريكي

أوبنهايمر ومساعداه فولكوف وسنايدر. وتوصل أولئك العلماء الأميركيون إلى نتيجة مذهلة مفادها أن هناك بالفعل حداً أعلى لكتلة النجم النيوتروني، وأن النجم الذي تفوق كتلته هذا الحد ينهار جاذبياً بصورة متواصلة حتى يقطع كل اتصال مع العالم الخارجي.

وتبين لأوبنهايمر ومساعديه أن مادة النجم، من منظور مرجع إسناد يتحرك مع المادة المنهارة، تنهار إلى منفردة شفارتزشيلد في مركز النجم وتختفي هناك مخلفة وراءها مجال شفارتزشيلد الآنف ذكره. بذلك يكون أوبنهايمر ومساعداه قد توصلوا إلى مفهوم الثقب الأسود وضرورة حدوثه، أي ضرورد مجال شفارتزشيلد بوصفه حالة نهائية للنجم المعني.

ومع ذلك كله، فلم تقتنع الجماعة العلمية آنذاك بفكرة الثقب الأسود، فأهمل عمل تشاندراسيكار وتزفيكي وأوبنهايمر لفترة عقدين كاملين من الزمان، ويعود السبب في ذلك إلى العوامل الآتية:

١ـ جاء عمل تزفيكي في سياق محاولات تفسير مصدر طاقة النجوم. وفي عام ١٩٣٩ تمكن الفيزيائي الألماني هانزبيته من تفسير طاقة النجوم بدقة وبصورة محكمة ومقنعة على أساس التفاعلات النووية في داخل النجم، الأمر الذي أدى إلى انحسار الاهتمام بالتفسيرات الأخرى، وفي مقدمتها تلك المتعلقة بتكون النجوم النيوترونية. وأدى ذلك بدوره إلى إهمال عمل أوبنهايمر ومساعديه بصدد الثقوب السوداء وتكوينها.

٢ـ عقب نشر أوبنهايمر عمله المذكور اندلعت نيران الحرب العالمية الثانية في أوروبا، فانصبت جل الجهود العلمية في مجال تطوير أسلحة الدمار، بما في ذلك تطويع الطاقة النووية في ذلك الاتجاه. فكان أن تبعثر فريق أوبنهايمر، ونقل أوبنهايمر نفسه إلى مشروع مانهاتن المتعلق بتطوير القنبلة النووية.

٣ـ أثار عمل أوبنهايمر ومساعديه الكثير من الأسئلة والتساؤلات التي عجزوا عن الإجابة عنها، وتضمن ثغرات كان من الصعب جداً سدها في ذلك الزمان.

لذلك كله، أهمل هذا العمل الريادي حتى نهاية الخمسينيات القرن العشرين، حين

تفجر الاهتمام مجدداً في هذه المسألة بخاصة، وفي النسبية العامة بصورة عامة، وذلك على أساس التطورات التقانية التي انطلقت آنذاك في مجالي الإلكترونيات والحاسوب، والتي ضاعفت قدرة العلماء على الرصد الفلكي وإجراء الحسابات النظرية المعقدة.

ويعود الفضل في هذا البحث إلى ثلاث مدارس في الفيزياء الفلكية:

(١) المدرسة الأمريكية وعلى رأسها الفيزيائي النظري جون ويلر؛

(٢) المدرسة السوفييتية وعلى رأسها ياكوف زلدوفيتش؛

(٣) المدرسة الإنجليزية وعلى رأسها روجر بنروز وستيفن هوكنغ.

ويعود الفضل في حسم أمر الثقوب السوداء من حيث الخصائص والضرورة إلى ثلاثة إنجازات رئيسية وقعت في ستينيات القرن العشرين، وهي:

١- عام ١٩٦٠، توصل الفيزيائي الأمريكي كرسال والرياضي المجري جكيرز إلى نظام إحداثيات أظهر مجال شفارتزشيلد على حقيقته، ودل بصورة قاطعة على أن غشاء شفارتزشيلد ليس سطحاً منفرداً، وأزال التناقضات الظاهرية لحل شفارتزشيلد.

٢- عام ١٩٦٣، توصل الرياضي النيوزلندي روي كير إلى حل دقيق تحليلي آخر لمعادلة آينشتاين المجالية، يمثل ثقباً أسود يدور (يبرم) حول محور يمر في مركزه.

٣- في النصف الثاني من ستينيات القرن العشرين، وضع روجر بنروز وستيفن هوكنغ عدداً من الثقوب السوداء، وبعض القوانين العامة التي تطيعها الثقوب السوداء.

أما الإنجاز التجريبي الرصدي الذي عزز صدقية نظرية الثقوب السوداء فكان اكتشاف أول نجم نيوتروني، والذي تم في بريطانيا عام ١٩٦٨.

المراجع الرئيسية التي اعتمدها المؤلف

الكتب:

(1 Adler, R., Bazin, M. and Schiffer, M., Introduction to General Relativity, McGraw-Hill, Tokyo (1975).

(2 Bernstein, j., Einstein, Fontana, London (1973).

(3 Cassirer, E., Substance and Function and Einstein's Theory of Relativity, Dover, NewYork (1953).

(4 Clark, R., Einstein: The Life and Times, Hodder and Stoughton, London (1979).

(5 d'Abro, A., The Evolution of Scientific Thought: From Newton to Einstenin.2nd Edition , Dover , New York (1950).

(6 Coleman, j., Relativity for the Layman, Penguin (1954).

(7 Davies ,P., God and the New Physic ,Dent ,London (1982).

(8 Davies ,P., Superforce: The Search for A Grand Unified Theory of Nature, Heinemann, London (1984).

(9 Davies ,P., The Accidental Universe, Cambridge Univ. Press (1982).

(10 Davies ,P., The Mind of God, Simon and Schuster, London (1984).

(11 Dingle, H., The Special Theory of Relativity , Menthuen, London(1955).

(12 Eddington, A., Space Time and Gravitation, Cambridge Univ. Press (1966).

(13 Eddington, A., The Expanding Universe, Cambridge Univ. Press (1952).

(14 Eddington, A., The Mathematical Theory of Relativity, Cambridge Univ. Press (1965).

(15 Eddington, A., The Nature of the Physical World, Cambridge Univ. Press (1932).

(16 Einstenine, A., Relativity : The Speccial and the General Theory , Methuen , London (1962).

(17 Einstenine, A., The Meaning of Relativity Methuen , London (1951).

(18 Flint.H.T., The Quantum Equation and Theory of Fields, Methuen , London (1966).

(19 Gibanov et. Al., Einstein and the Philosophical Problems of 20th Century Pghysics, Progress, Moscow (1983).

(20 Gribbin ,H., Spacewarps, Penguin(1983).

(21 Gupta, B., Mathematical Physics, Vicase, New Delhi (1996).

Hawking, S. and Eliis, G, The Large Scale Structure of Spacet- (22
ime, Cambridge Univ. Press (1973).
Hawking, S. and Israel, W., 300 Years of Gravitation, Cambridge (23
Univ. Press (1987).
Hawking, S., A Brief History of Time, Bantam, London (1988). (24
Hoffmann, B., Relativity and its Roots, Scientific American Books, (25
Freeman, New York (1983).
Jammer,M., Concepts of Space. The History of Space in Physics, (26
Harvard (1954).
Irvine,J., The Basis Of Modern Physics, Oilver and Boyd, (27
Edinburgh(1954).
Kaku, M., Hyperspace, Doubleday , London (1994). (28
Kaufmann III, W., Black Holes and Warped Spacetime, Freeman (29
,San Franciso(1979).
Landau, L., D. and Lifeshitz, E. M. The Classical Theory of (30
Fields, Trans. By Morton Hamermesh, 3rd. Edition, Pergamon, Oxford
(1971).
Lawden, D., Tensor Calculus and Relativity: An Introduction , (31
Methuen, London (1968).
Layzer, D., Constructing The Universe, Scintific American Li- (32
beary, New York (1981).
Longair, M. S., High Energy Astrophysics, Cambridge Univ. (33
Press(1981).
Lorentz et. Al., The Principle of Relativity, Dover New York (34
(1981).
Luminet, J., Black Holes, Cambridge Univ. Press(1992). (35
McVittie, G. C., General Relativity and Cosmology, Champan and (36
Hall, London (1965)
Moller, C., The Theory Relativity, Clarendon, Oxford (1972). (37
Narlikar, J. V., The Lighter Side of Gravity, Freeman, New York (38
(1982).
Pagels., H., Perfect Symmetry, Bantam, New York (1986). (39
Pagels. H., The Cosmic Code, Bantam, New York (1983). (40
Prkerm B., Enistein's Dream, Pelnum, London (1988). (41
Peebles , P., Principle of Pgysical Cosmology, Princeton (1993). (42
Raine, D., The Isotropic Universe , Bristol(1981). (43
Reichenbeach, H., From Copernicus to Einstein, Dover New York (44
(1970).

Reichenbeach, H., Space and Time Trans. by Maria Reichenbeach and John Ferund , Dover New York (1958). (45
Rohrlich, F., From Paradox to Reality , Cambridge Univ. Press (1987). (46
Rosser, W., An Introduction to the Relativity, London (1971). (47
Sachs, M., Ideas of the Theory of Relativity John Wiley, New York (1974). (48
Sciama, D. W., The Physical Foundations of General Relativity, Doubleday, London (1969). (49
Sing, J., Modern Cosmology , Pelican, Penguin (1970). (50
Smart, J., Problems of Space and Time, Macmillan , London (1968). (51
Tolman, R., Relativity Thermodynamics and Cosmology, Oxford (1934). (52
Ugarov,V.,Special Theory of Relativity, Mir, Moscow (1979). (53
Valdimir, Yu., Mitskievich, N. and Horsky, J., Space Time Gravitation, Mir, Moscow (1987). (54
Wald, R., Space. Time a Gravity, Chicago (1977). (55
Wheeler, J., A Journey into Gravity and Spacetime, Scientific American Library (1990). (56
Wheeler., J., Thorne, K., and Misner, C., Gravitation Freeman, NewYork (1971). (57

مقالات وبحوث ومحاضرات

Andersen, M., Geometry Around Black Holes, Cramer's Homepage, 1996, internet. (1
Baez, J., General Relativity Tutorial, Internet, http:// mathe.Ucr. Edu/home/beaz/gr/gr.html. (2
Baird ,E., General Relativity , Internet, http://ourwrold.compusve. com/homepage/eric baierd/homebage.html (3
Biswas, t., Minimally Relativity Newtonian Gravity, Am . J. Pgys.56(11), Nov. 1988. (4
Brouwer, W., Einstein and Lorentz: The Structure of a Scientific Revolution, Am. J. Phys. 48 (6), 1980. (5
Burrows, A., The Birth of Neutron Stars and Black Holes, Physics Today, vol.40, no.9, 1987. (6
Callan, C. et. Al., Cosmology and Newtonian Mechanics, Am. J. Phys., 1964. (7

Campbell, W. and Morgan, T., Maxwell Form of the Linear Theory of Gravitaion, Am.J. Phys., vol. 44, no,. 4, 1976. (8
Chandrasekhar, S., Einstein and General Relativity: Historical Perspectives, Am. J. Phys. 47 (3), 1979. (9
Clement, G., Hollow Cosmic String: The General Relativistic Hollow Cylinder, Physical Review D, vol.50,No.12, 1994. (10
Comer, R. and Lathrop, R., Principle of Equivalence and the Deflection of Light by the Sun, Am. J. Phys, 46 (8), 1978. (11
Davies, P., Mach's Principle, File 940915 Machtl, Go2 archive, Guardian Online, internet. (12
Detweiler, S., Resource letter BH-1: Black Holes, Am. J. Phys. 49(5), 1981. (13
Dunsby, P., Tensors and Relativity, On-line course of Lectures, 1997, internet. (14
Einstein, A. and Rosen, N., The Particle Problem in the General Theory of Relativity, Phys, Rev., vol. 48, PP. 73-77, 1935, internet. (15
Einstein, A., Does the Inertia of a Body Depend upon its Energy Content?, Annalen der Physik, 18. PP. 639-641, 1905, internet. (16
Einstein, A., Ether and the Theory of Relativity (address), University of Leyden (1920), internet. (17
Einstein, A., Geomety and Experience, (address), Prussian Academy of Sciences (1921), internet. (18
Einstein, A., On the Generalized Theory of Gravitation, Scientific American, April 1950, vol. 188, No. 4, PP. 13-17. (19
Einstein, A., On the Infuence of Gravitation on the Propagation of light, Annalen der Physics, 35, 1911, internet. (20
Einstein, A., On the Method of Theoretical Physics, (Lecture), Oxford (1933), internet. (21
Einstein, A., On the Theory of Relativity, (Lecture), King's College, London (1921), internet. (22
Einstein, A., Principles of Research, (address), Berlin Physics Society (1918), internet. (23
Einstein, A., Principles of Theoretical Physics, (address), Prussian Academy of Sciences (1914), internet. (24
Einstein, A., Spacetime, Encyclopedia Britannica, (article), 1940, internet. (25
Einstein, A., The Foundation of the General Theory of Relativity, Annalen der Physics 49, 1916, internet. (26

Einstein, A., The Fundamefts of Theoretical Physics, (article), 1940, internet. (27
Einstein, A., The General Theory of Relativity, (Lecture), Prineton Univ. (1921), internet. (28
Einstein, A., What is the Theory of Relativity? (article), London Times (1919), internet. (29
Fang, L., Topology of Spacetime A Remains of Genesis, ASPAP News, vol. 1, no. 1, 1986. (30
Feigenbaum, M. and Mermin, D., E= mc2, Am. J. Phys. 56 (1), 1988. (31
Geroch, R., General Relativity in the Large, General Relativity and Gravitation, vol.2, no.1, 1971. (32
Gleyzal, A., Relative Tensor Calculus and the Tensor Time Derivative, Foundations of Physics, vol.4, no.1, 1974. (33
Gribbin, J., An Anniversary of Some Gravity, New Scientist, 12, Nov. 1987, PP. 44-47. (34
Gibbin, J., The people Who Put the Geometry into Relativity, John Gribbin's Homepage, internet. (35
Hammond, R., Rescue from Falling into a Black Hole, Am. J. Phys. 56 (1), 1988. (36
Hawking, S. and Penrose, R., The Nature of Space and Time, Scientific American, 7/96. (37
Hettel, R. and Helliwell, T., Tachyons in a Gravitational Field, Il Nuovo Cimento. vol. 13B, 1973. (38
Higbie, J., Gravitational Lens, Am. J. Phys. 49 (7), 1981. (39
Higbie, J., Mach's Principle in General Relativity, General Relativity and Gravitation, vol. 3, no. 2, 1972. (40
Holton, G., Einstein's Search for the Weltbild, (Lecture), 1979. (41
Israel, W., Event Horizons and Gravitational Collapse, General Relativity and Gravitation, vol. 2, no. 1, 1971. (42
Janossy, L., A New Approach to the Theory of Relativity, Foundations of Physics, vol. 1, no. 2, 1970. (43
Kobus, J., A Strictly Geometric Interpretation of Gravitation in General Relativity, Foundations of Physics, vol. 3, no. 1, 1973. (44
Kobus, J., Cosmological Implications of a New Law of Gravitation, Foundations of Physics, vol. 4, no. 1, 1974. (45
Morris, M. and Thorne, K., Wormholes in Spacetime and their Use for Interstellar Travel: A Tool for Teaching General Relativity, Am.J. (46

Phys. 56 (5), May 1988.
Okamoto, 1., Albert Einstein in Japan: 1922, Am.J. Phys. 49 (10), 1981. (47
Prokhovnik, S., Cosmology versus Relativity The Reference Farme Paradox. Foundations of Physics, vol. 3, no. 3, 1973. (48
Pullin,J., General Relativity, internet, hhttp://Vishnu. Nirvana. Phys. Pus. Edu/444/nodel.html. (49
Rider, T., The Observer Dependent Principle in Cosmology, 1996, internet. (50
Rosen, J., Extended Mach Principle, Am. J. Phys. 49(3). 1981. (51
Ruffini, R. and Wheeler, J., Introducing the Black Hole, Physics Today, vol. 24, no. 1, 1971. (52
Sachs, M., A New Theory of Elementary Matter (I and II), Int. J. Theoretical Phys., vol. 4, no. 6, 1971. (53
Salgado, R., The Einstein-Minkowski Spacetime: Introducing the Light Cone, internet, http://www.Phys.syr.edu/courses/modules/LIGTCONE/minkowski.html. (54
Silverman, M., Gravitational Deflectio of Relativistic Massive Particles, Am. J. Phys. 48 (1). 1980. (55
Thirring, W., Why is Gravitation an Exciting Subject?, General Relativity and Gravitation, vol. 1, no. 1, 1970. (56
Tomozawa, Y., Mach's Principle, Mass, and the Fine Structure Constant, Foundations of Physics, vol. 2., no. 1, 1972. (57
Treder, H., Global and Local Principles of Relativity, Foundations of Physics, vol. 1, no. 1, 1970. (58
Volkov, A., An Action-at-a-Distance Theory of Gravitation, Ganadian Journal of Physics, 49, 201 (1971). (59
Weisberg, J.et.al., Gravitational Waves from an Orbiting Pulsar, Scientific American, vol. 245. (60
Weisstein, E., Black Hole, internet, http://www.astro.Virginia.edu/~ewwbn/Physics/Blackhole.html. (61

ملحق

(١) مولد النجوم البدائية

في الفصول الأربعة الأخيرة من كتاب « هل نشأ الكون من العدم؟»، بيّنا المعالم الرئيسية لتاريخ مفهوم الثقب الأسود في النسبية العامة، ملقين الضوء على جذور هذا المفهوم وكمونه في حلّ شفارتزشيلد وحدّ تشاندراسيكار، وعلى المعوقات التي حالت دون خروج هذا المفهوم من كمونه في النصف الأول من القرن العشرين. ثم بينا كيف أدت تطورات رياضية ورصدية في نهاية الخمسينيات من هذا القرن إلى انفلات هذا المفهوم من قمقمه وانطلاقه بزخم متزايد في رحاب البحث الفسيح، بحيث إنه ما إن انتصف العقد السابع من هذا القرن، حتى اكتملت صورة الثقب الأسود من حيث التكون والخصائص والقوانين الأساسية التي تحكمه ومظاهره التي يمكن رصدها والتعّرف عليها. وبلغ اكتمالها حدّ أن أخذت تقارن بالديناميكا الحرارية، المثال الأكبر على العلوم المكتملة. وبدأ العلماء مذاك يعدون العدة للكشف التجريبي والرصدي عن الثقوب السوداء، وهو ما تم بالفعل في العقدين الأخيرين.

وسنبين، في هذه المقالة والمقالات التالية، المعالم الرئيسية لصورة الثقوب السوداء والتي جاءت حصيلة هذا الجهد النظري الجبار. وسنبدأ بالحديث عن تكون النجوم، ثم ننتقل إلى المآل الذي تنتهي إليه النجوم. وسيقودنا ذلك إلى مسألة تكون الثقوب السوداء بأنواعها المختلفة، ومسألة خصائصها وقوانينها وزمكانها ومغزاها الكوني.

ولنبدأ بالحديث عن المكونات الرئيسية لمجرتنا، مجرة درب التبانة. إن مجرتنا تتكون من قلب كروي من النجوم والغازات تنبثق منه أذرع لولبية من النجوم والغازات تدور حول هذا القلب. وتوجد بين هذه الأذرع غمامات سدَيمية مكونة من الغاز والغبار تمتد الواحدة منها مليارات المليارات من الأميال في جميع الاتجاهات. هذه الغمامات هي مسقط رأس نجوم المستقبل. فهي تتضمن كمية هائلة من المادة

(الهيدروجين والهيليوم بخاصة) كفيلة بخلق مئات النجوم الضخمة. ولكن، بالنظر إلى امتدادها الكبير، فإن كثافتها لا تتعدى العشر ذرات للسنتمتر المكعب الواحد، وهي أقل بكثيرمن كثافة أفضل فراغ يمكن خلقه في المختبر. وجل هذه الذرات من الهيدروجين. وهناك ذرة هيليوم لكل ست عشرة ذرة هيدروجين. أما ذرات العناصر الأخرى فهي نادرة جداً في مثل هذه الغمامات السديمية . فلا تتعدى درجة حرارة هذه الغمامات المائة فوق الصفر المطلق . فهي شديدة البرودة . ومع ذلك ، فمنها تنبثق كتل النيران المستعرة المعروفة بالنجوم. وبالطبع، فإن جاذبيتها الداخلية تكون أصغر من أن تغير في تركيبها الداخلي، فتظل رابضة مكانها من دون حراك تنتظر حدثاً كونياً يلهب كيانها. أما هذا الحدث الكوني المنتظر، فهو مرور ذراع لولبي محمل بالأمواج الصدمية عبر غمامة سديمية ، الأمر الذي يقود إلى رصّ ذرات الغمامة معاً وتقليص المسافات الفاصلة بينها. إذّاك تتحول الغمامة من شبه فراغ شفاف إلى غمامة قاتمة لا تسمح للضوء بالنفاذ عبرها. ويمكن الاستدلال على بعض الغمامات القاتمة في مجرتنا، وفي مقدمتها ما يسمى غمامة رأس الحصان، التي سميت كذلك لأنها تشبه بالفعل رأس الحصان.

ولما كانت الغمامة القاتمة لا تسمح للضوء بالنفاذ عبرها، فإنها تزداد برودة وتقترب من الصفر المطلق، ومن ثم تقل سرعة الذرات المكونة لها حتى تكاد لا تتحرك البتة بالنسبة إلى بعضها. لذلك، تبدأ قوة الجاذبية بين الذرات تتحكم بالبناء الداخلي للغمامة ، برغم الضعف الشديد لهذه القوة .

وهنا ينبغي أن نلاحظ أن كثافة الغمامة القاتمة لا تكون منتظمة تماما، بمعنى أن بعض المواضع تكون أكثر كثافة بقليل من مواضع أخرى، الأمر الذى يزيد أيضاً من قوة الجاذبية المؤثرة عندها. من ثم، فإن هذه المواضع تجذب صوبها عدداً أكبر من ذرات الغمامة القاتمة بقوة الجاذبية . وهذا بدوره ينمي قدرتها على جذب المزيد من الذرات. هكذا تتفشى بقع الكثافة الأعلى وتتنامى حتى تبدأ الغمامة القاتمة تتكسر وتتجزأ إلى تكتلات عالية الكثافة نسبياً، أي إلى كريات مكثفة Globules.

وعند تشكلها، يصل قطر الكرية المكثفة النمطية إلى عدة مليارات من الأميال

وتبلغ كتلتها عدة مرات قدر كتلة شمسنا ، علماً بأن كتلة شمسنا تبلغ حوالي مليار مليار مليار طن.

بيد أن الكرية المكثفة لا تكون مستقرة، بمعنى أنها لا تكون قادرة على «رفع» وزنها الهائل، فتنهار تحت تأثير وزنها وتتقلص بتسارع متواصل. لكن ذلك يحوّل طاقة وضع جزيئات الغاز المكون للكرية المكثفة إلى طاقة حركة، ومن ثم تتزايد طاقة حركة هذه الجزيئات بصورة مطردة، الأمر الذي يرفع درجة حرارة قلب الكرية المكثفة بصورة متزايدة. ذلك أن درجة حرارة جسم إن هي إلا مظهر لمتوسط طاقة حركة جزيئاته. ومع تزايد درجة حرارة قلب الكرية، تبدأ الكرية تتوهج كالجمر بلون أحمر داكن، معلنة عن مولد النجم البدائي Protostar. لكن النجم البدائي لا يكون مستقراً، وإنما يستمر بالانهيار والتقلص، الأمر الذي يزيد من توهجه ويرفع درجة حرارته. وبالطبع، فإنه كلما ازدادت درجة الحرارة ازدادت فرص اصطدام الجزيئات معاً واختراقها مجالات بعضها، ومن ثم ازدادت فرص التحام بعضها معاً ودخولها في تفاعلات نووية تفجر فيضاً من الطاقة الضوئية. وعند وصول درجة حرارة قلب النجم البدائي إلى حوالي أربعة عشر مليون درجة مئوية، يبدأ الاحتراق النووي للهيدروجين على نطاق واسع مطلقاً مقادير هائلة من الفوتونات (ذرات الضوء) التي يعمل ضغطها على إيقاف الانهيار الجاذبي للنجم البدائي. إذّاك يتحول النجم البدائي غير المستقر إلى نجم مستمر مستقر. وسنتكلم في المقالة القادمة عن مرحلة الاستقرار هذه، أي مرحلة الاحتراق النووي للهيدروجين في قلب النجم.

(٢) لماذا لا تنفجر الشمس ولا تنهار؟

لماذا لا تنفجر الشمس ولا تنهار؟ أي، لماذا تستقر الشمس من دون انهيار ولا انفجار لمليارات السنين، ذلك الاستقرار الذي لولاه لما كان الوقت كافيا لنشوء الحياة، والحياة العاقلة تحديداً، على سطح الأرض؟ ويقودنا هذا السؤال إلى السؤال الإجرائي الآتي: كيف نتعامل مع كتلة غازية ضخمة من الهيدروجين والهيليوم تتكثف ثم تنهار ثم تستقر لفترة طويلة لكي تعود إلى الانهيار بعد ذلك، تحت تأثير جاذبيتها الذاتية؟

لقد نجحت فيزياء القرن العشرين أيما نجاح في معالجة ظاهرة الشمس وغيرها من النظم النجمية، تلك الظاهرة الكونية التي طالما أرقت العقول وسحرت القلوب. إذ توصل العلم الحديث إلى تحديد مصادر النجوم (مادتها الخام)، ومصادر طاقتها الهائلة، وآليات تكونها واستقرارها وديمومتها وانهيارها ومواتها، ومآلها، وآليات انتقال الطاقة فيها، وأطياف كتلها الممكنة. بذلك أوصلنا العلم الحديث إلى فهم دقيق وعميق وكامل تقريبا لظاهرة النجوم، باستثناء بعض التفصيلات، محققا انتصاراً للعقل البشري قلّ نظيره في التاريخ. فهذه الظاهرة التي حيرت أعتى العقول على مدار التاريخ ومنذ نشوء الإنسان على الأرض، وجدت أخيراً حلها المقنع في فيزياء القرن العشرين. إنه لانتصار عظيم للعقل البشري يؤكد قيمة العلم وقيمة الإنسان وقدراته الخلاقة العاتية.

هناك العديد من الدلائل الجيولوجية والفلكية التي تدل على أن الشمس لم تتغير بصورة بنيوية ملموسة لمليارات السنين وأنها سوف تظل كذلك لمليارات السنين القادمة. وأساس هذا الاستقرار المكين، وفق فيزياء القرن العشرين، هو التوازن بين قوتين: قوة الانهيار الجاذبي التي تدفع مادة الشمس صوب مركزها، وقوة ضغط الغاز التي تدفعها بعيداً عن المركز. فإذا تدبرنا وحدة كتلة من مادة الشمس على بعد معين من مركزها، وجدنا أن قوة الجاذبية المؤثرة عليها صوب المركز تتناسب طرديا مع الكتلة المحتواة ضمن الغشاء الكروي عند هذا البعد، وعكسيا مع مربع

هذا البعد. إذ سبق وبين نيوتن أن جسيماً مزروعاً داخل كرة من المادة لا يتأثر بالحلقات الكروية للمادة الواقعة فوقه، وإنما فقط بتلك الواقعة تحته، والتي تؤثر عليه وكأنها جميعاً مركزة في المركز.

أما قوة ضغط الغاز، فهي في المحصلة تؤثر على الكتل المكونة للشمس صوب الخارج وتعتمد على انحدار الضغط، أي معدلّ تغيره مع البعد عن المركز. وهناك ثلاثة مصادر لهذه القوة. هناك أولاً الحرارة التي تزيد سرع الجزيئات المكونة لمادة الشمس، ومن ثم ضغط الغاز المكون منها. وتنتج هذه الحرارة بصورة أساسية من التفاعلات النووية في قلب الشمس، كما أسلفنا في مقالات سابقة. وتنبع نسبة صغيرة منها من تحول طاقة الوضع الجاذبي لمادة الشمس إلى طاقة حرارية بفعل انهيارها الجاذبي.

أما المصدر الثاني لقوة ضغط الغاز فهو الإلكترونات، أو الغاز الإلكتروني. فالإلكترونات لها خاصية موجية بالإضافة إلى خاصيتها الجسيمية. فإذا وصل متوسط المسافة بين إلكترون وآخر، بفعل ارتفاع كثافة المادة، حداً قريبا من طول الموجة الإلكترونية، أخذ الغاز الإلكتروني يؤثر بضغط كبير يقاوم الانهيار الجاذبي للمادة، وازداد هذا الضغط بازدياد كثافة المادة من دون ارتفاع في درجة الحرارة. وهذا الضغط الإلكتروني هو المسؤول عن استقرار نمط من النجوم العالية الكثافة المسماة الأقزام البيضاء، وهي الحالة التي سوف تؤول إليها شمسنا بعد ما ينوف على خمسة مليارات عام. وهو مسؤول أيضا عن استقرار ما يسمى الأقزام البنية التي تقل كتلها عن ثمانية بالمائة من كتلة الشمس، والتي عجزت عن التحول إلى نجوم ساطعة بفعل الاحتراق النووي.

أما المصدر الثالث لقوة الضغط، فهو النيوترونات أو الغاز النيوتروني. فهذا الغاز أيضا يبدأ يؤثر بضغط هائل معاكس للانهيار الجاذبي إذا وصل متوسط المسافة بين النيوترونات حداً قريبا من طول موجة النيوترون. وهو يزداد بازدياد كثافة المادة. وهو الضغط المسؤول عما يسمى النجوم النيوترونية الهائلة الكثافة والتي تتبدى أحيانا على صورة نوابض Pulsars تبث أمواجاً راديوية بانتظام مذهل.

وإذا تساوت قوة الانهيار الجاذبي لكل حلقة من حلقات النجم مع قوة ضغط الغاز، استقر النجم وظل مستقراً ما ظلت القوتان متساويتين، أي ما ظل مصدر قوة ضغط الغاز فاعلاً. فالنجم يظل مستقراً وساطعاً ما ظل التفاعل النووي في قلبه قائماً يزود جزيئات الغاز بالطاقة الحرارية. كذلك، فإن القزم الأبيض يظل مستقراً لمليارات مليارات السنين بفعل التوازن المستديم بين القوتين، ولأن قوة الانهيار الجاذبي لا تكون قادرة على التغلب على ضغط الالكترونات. وكذلك الحال مع النجم الإلكتروني الذي تعجز قوة الانهيار فيه عن التغلب على ضغط النيوترونات.

لكن العالم الهندي تشاندراسيكار بين عام ١٩٣٠ أنه إذا زادت كتلة قلب النجم عن حد معين، يعجز ضغط الإلكترونات والنيوترونات عن التغلب على قوة الانهيار الجاذبي، ومن ثم يستمر هذا القلب بالانهيار الجاذبي، فلا يستقر أبداً، وإنما تستمر المادة بالانهيار حتى تتحول إلى نقطة منفردة Singularity، مخلفة وراءها كرة من المجال الجاذبي الهائل،، وهي الحالة التي أخذت تعرف بالثقب الأسود منذ عام ١٩٦٨.

(٣) لغز الطاقة الشمسية

في المقالة السابقة، بيّنا كيف يتكون النجم البدائي Protostar، وأنهينا المقالة بالقول إنه عندما تصل درجة حرارة قلب النجم البدائي إلى حوالي أربعة عشر مليون درجة مطلقة (كلفن)، يبدأ ما يسمى الاحتراق النووي للهيدروجين على نطاق القلب كله، محولاً النجم البدائي غير المستقر (المنهار) إلى نجم مستقر ساطع، حيث إن ضغط الغاز والضوء يصل حداً بفعل الاحتراق النووي يفلح عنده في إيقاف انهيار النجم البدائي.

ولكن كيف توصل العلماء إلى فكرة أن الاحتراق النووي للهيدروجين هو المسؤول عن استقرار النجوم وعن هذا الفيض الهائل من الطاقة الذي تبثه النجوم عبر مليارات السنين؟ ولنأخذ الشمس أنموذجاً للنجوم، بالنظر إلى قربها النسبي منّا. ولنبدأ بذكر أهم خصائص الشمس.

يبلغ قطر الشمس حوالي ١,٢٩ مليون كيلومتر، أي ١٠٨ مرة قدر قطر الأرض. أما كتلتها فتبلغ حوالي ألفي مليار مليار مليار كيلوغرام، أي حوالي ثلاثمائة وثلاثة وثلاثين ألف مرة قدر كتلة الأرض. وتبلغ درجة حرارة سطح الشمس خمسة آلاف وسبعمائة وثمانين درجة مطلقة (كلفن). أما درجة سطوع الشمس، أي مقدار الطاقة التي تبثها الشمس في الثانية الواحدة، فتبلغ حوالي ثلث مليار مليار مليار واط. ويقدّر عمر الشمس بحوالي خمسة مليارات سنة. وينسجم هذا التقدير مع القياسات المباشرة التي تمت لعمر الصخور على سطحي الأرض والقمر. إذ يبلغ عمر أقدم صخور على الأرض حوالي ٣,٨ مليار سنة. أما نظيرتها على القمر فتبلغ حوالي ٤,٣ مليار عام. ويبلغ عمر النيازك والصخور القادمة من الشريط الواقع بين المريخ والمشتري ٤,٥مليار عام. أما الحياة على سطح الأرض فيبلغ عمرها ٣,٥ مليار عام. ومن المعلوم أن الشمس هي كتلة هائلة من الغاز. لكنها مع ذلك عديمة الشفافية وضعيفة النفاذية للضوء بفعل كثافتها العالية. فالضوء المنطلق من قلبها يأخذ وقتا طويلا جداً (مليون عام في المتوسط) حتى يصل إلى السطح ويخرج من

إطارها.

ما سرّ هذه الطاقة الهائلة التي تدلّ البينات على أنها استمرت بالتدفق من الشمس بهذا المعدل الهائل المذكور أعلاه لمدة خمسة مليارات عام؟ هذا هو اللغز المحير الذي بدأ يجابه العلماء منذ القرن التاسع عشر. وكانت أول محاولة جدية لتفسير هذا اللغز هي تلك التي وضعها الفيزيائي الإنجليزي اللورد كلفن والفيزيائي الألماني هرمان فون هيلمهولتز في الستينيات من القرن الماضي. وارتكزت تلك المحاولة إلى الافتراض بأن المصدر الوحيد لهذه الطاقة هو المجال الجاذبي للشمس، أي إن هذه الطاقة هي نتاج تحول الجاذبية إلى حرارة. فمع انكماش الشمس تتحول طاقة الوضع الجاذبية لجزيئات الغاز المكون للشمس إلى طاقة حركة، يتمظهر ازديادها على صورة ارتفاع في درجة حرارة الغاز. ويمكن لهذا الانكماش (الانهيار) الجاذبي أن يرفع درجة حرارة قلب الشمس إلى أربعين مليون درجة مطلقة (كلفن). وعلى هذا الأساس، فإن الشمس تنكمش باستمرار لكي تعوض عن الحرارة التي تفقدها باستمرار لمحيطها. وقد حسب كلفن وهيلمهولتز معدل الانكماش اللازم لإنتاج ما تفقده الشمس من طاقة (ثلث مليار مليار مليار واط، كما أسلفنا)، فوجدا أنه يساوي حوالي عشرين متراً في السنة. ثم حسبا عمر الشمس على هذا الأساس، فوجدا أنه يبلغ مائة مليون سنة. وإعتبرا هذا العمر معقولاً في ضوء المعلومات التي كانت متوافرة آنذاك. وبصورة عامة، فقد رضي علماء ذلك العصر بهذا التفسير وإعتبروه معقولاً. لكنه أخذ يتهاوى بصورة متسارعة في مطلع القرن العشرين، حين بدأ يتبين للعلماء أن صخور الأرض أقدم بعدة مرات من هذا العمر المزعوم للشمس. وبدأوا يدركون أنه لا يمكن أن تكون الجاذبية المصدر الوحيد لطاقة الشمس. فلا بد أن يكون هناك مصدر آخر لهذا الفيض الهائل من الطاقة المنبعثة، ولا بد أن يفوق هذا المصدر الجاذبية قدرة بكثير. لكن اكتشاف هذا المصدر استلزم التطورات الكبيرة التي شهدتها الفيزياء في النصف الأول من القرن العشرين، وفي مقدمتها اكتشاف تركيب الذرات ومكوناتها ، وبناء نظرية النسبية، وبناء ميكانيك الكم (الكونتم) ، واكتشاف النيوترون، واكتشاف القوة النووية القوية وقانونها ، ومعرفة

آليات التفاعلات النووية، وإكتشاف حقيقة أن الهيدروجين هو العنصر الطاغي في مادة الشمس والنجوم.

وكانت أول خطوة رئيسية على درب معرفة المصدر الرئيسي لطاقة الشمس هي تلك التي خطاها الفلكي البريطاني الكبير السابق ذكره، السير آرثر إدنغتون ، عام ١٩٢٦ ارتكازاً إلى معادلة آينشتاين المشهورة التي تربط الكتلة بالطاقة($E=mc^2$). وهي المعادلة التي تعبر عن إمكانية تحويل الكتلة إلى طاقة والعكس بالعكس. إذ لاحظ إدنغتون أن كتلة ذرة الهيليوم أقل قليلاً من مجموع كتل مكوناتها المنفردة (أربع ذرات هيدروجين) . وعزا هذا النقص إلى تحول جزء صغير من كتلة مكوناتها الى فيض من الطاقة عند التحامها معاً لتشكيل الهيليوم. ووجد أن هذا النقص يساوي حوالي سبعة أجزاء بالألف من كتلة ذرة الهيليوم. وعليه، فإذا تسنى تحويل أربع ذرات هيدروجين إلى ذرة هيليوم، حصلنا على طاقة هائلة من فرق الكتلة. ويمكن الحصول على إشعاعية الشمس الفعلية بتحويل ستمائة مليار كيلوغرام من الهيدروجين إلى هيليوم في الثانية الواحدة . وقد يبدو هذا الرقم خياليا، لكنه في الواقع لا يتعدى ثلثاً في المليار مليار من كتلة الشمس . وعليه، فإذا افترضنا أن الشمس في جلها مكونة من الهيدروجين، يكون في مقدورها أن تسطع بهذه الإشعاعية العالية لمدة مائة مليار عام. بذلك يكون إدنغتون قد أعطى تفسيراً مقنعاً لطاقة الشمس في ضوء عمرها المديد. لكن إدنغتون لم يجب عن سؤالين كبيرين أثارتهما فرضيته ، وهما: (١) هل يمكن اعتبار الهيدروجين العنصر الطاغي في الشمس؟ (٢) هل يمكن حدوث الاحتراق النووي للهيدروجين في باطن النجم ، وكيف يتم هذا الاحتراق إذا كان حدوثه ممكناً؟ وسنعالج الإجابات عن هذين السؤالين في المقالة القادمة.

(٤) مادة الشمس وطاقتها

في المقالتين السابقتين، ناقشنا الكيفية التي تتولد بها الطاقة الكهرمغناطيسية والنيوترينوية التي تبثها الشمس بصورة متواصلة ، والتي تبقي الشمس (وأبقتها) مستقرة ومحافظة على حجمها لفترة طويلة من الزمان . لكننا لم نناقش كيف يحافظ تولد هذه الطاقة الهائلة على استقرار أقرب نجم إلينا ، ولم نناقش أصلاً ماهية نظام الشمس ولا حالة المادة التي تسود الشمس . كل ما قلناه هو أن حوالي ثلاثة أرباع كتلة الشمس هي من الهيدروجين وأن حوالي ربع كتلتها هو من الهيليوم-٤. أما العناصر الأخرى ، فلا تكاد نسبتها أن تصل إلى واحد بالمائة من كتلة الشمس. لكننا لم نناقش حالة المادة التي يوجد فيها الهيدروجين والهيليوم المكونان للشمس . فهل يكون هذان العنصران في الحالة الغازية ، أم يكونان في حالة السيولة أو الصلابة ؟ هل إن الشمس حجر كبير ملتهب ، كما ادعى قديما بعض فلاسفة الإغريق ؟ أم إنها حمم سائلة كاللافا البركانية ؟ فلندقق في بعض المعطيات ولنرَ كيف تقودنا إلى إجابات حاسمة عن هذه الأسئلة .

أولاً ، يمكن قياس بعد الشمس عنا بدقة كبيرة باستعمال أمواج الرادار . وباستعمال هذه المعلومة وقانون نيوتن في الجاذبية ، يمكن أن نحسب بدقة كبيرة كتلة الشمس. وبقياس القطر الظاهري للشمس ، يمكن أن نحسب حجم الشمس الفعلي بدقة كبيرة. وعلى هذه الأسس ، نجد أن كتلة الشمس تبلغ حوالي مليوني مليون مليون مليون مليون كيلوغرام ، وأن نصف قطرها يبلغ سبعمائة ألف كيلومتر . بذلك فإن متوسط كثافة مادة الشمس يبلغ حوالي (١ر٤) غرام لكل سنتمتر مكعب ، أي إنه يفوق كثافة الماء . فهل يعني ذلك أن الشمس كتلة من السائل الملتهب ؟ فلنتريث قليلا قبل أن نصدر حكما قاطعاً ، على الأقل حتى يتسنى لنا حساب متوسط درجة حرارة الشمس . ولكن كيف نقدّر هذه الكمية ؟

إن هذا السؤال يفترض سؤلاً أعمق ، وهو : ما الذي يبقي الشمس مستقرة لمليارات السنين من دون أن تنهار أو تتبدد ؟ فالمفروض أن تنهار هذه الكتلة المملاقة تحت

وطأة وزنها ، أي جاذبيتها . لماذا لا تفعل ذلك ؟ لا بدّ أن هناك قوة تعاند وزنها ، أي تؤثر في اتجاه معاكس لاتجاه وزنها . وفي ضوء ما قلناه سابقاً ، فلا بدّ أن يكون مصدر هذه القوة ضغط الإشعاع المنبعث من الاحتراق النووي في قلب الشمس وضغط مادة الشمس الناتج عن حركة مكوناتها (البروتونات والإلكترونات وأنوية الهيليوم بشكل رئيسي) . وللتبسيط ، فنهمل (مؤقتا) ضغط الإشعاع ولنركز على طاقة حركة مكونات مادة الشمس . عند ذاك نستطيع أن نقول إن حالة الاستقرار تقضي بأن تكون طاقة الوضع الجاذبي لمادة الشمس مساوية لطاقة الحركة الحرارية لهذه المادة . فإذا افترضنا أن الشمس هي كرة منتظمة الكثافة ، وجدنا أن مجمل طاقة الوضع الجاذبي للشمس يساوي خمسي ثابت الجاذبية الكوني مضروباً في مربع كتلة الشمس ومقسوماً على نصف قطرها. من ثم فهو يساوي عشرة للقوة (٤٨) إرغ . وعليه تبلغ طاقة الوضع الجاذبي للشمس لكل غرام من مادتها خمسمائة ألف مليار إرغ . أما طاقة الحركة الحرارية لكل غرام من مادة الشمس فتساوي نصف مربع متوسط سرعة جزيئاتها. فإذا ساوينا هذه الكمية بتلك ، وجدنا أن متوسط سرعة جزيئات الشمس يساوي حوالي ثلاثمائة كيلومتر في الثانية . وهي سرعة هائلة بالطبع . وتناظر متوسطاً لدرجة الحرارة يبلغ حوالي خمسة ملايين درجة مطلقة (كلفن) . وتكمن أهمية هذه النتيجة في أنها تشير إلى أن الهيدروجين عند درجة الحرارة هذه يكون متأينا في جله ، أي لا يكون على شكل ذرات أو جزيئات وإنما على شكل بروتونات حرة وإلكترونات حرة ، وذلك بفعل التصادمات العنيفة والمتكررة لهذه الذرات والجزيئات معاً . لكن هذا الحشد من البروتونات والإلكترونات الحرة لا يسلك سلوك السائل عند كثافة (١ر٤) غرام لكل سنتمتر مكعب ، وإنما يسلك سلوك الغازات التامة . فعند هذه الكثافة ، يبلغ متوسط المسافة بين البروتونات حوالي واحد في المائة مليون من السنتمتر . ومع أن هذه هذه المسافة قريبة من قطر ذرة الهيدروجين، إلا أنها أطول بكثير من قطر البروتون أو الإلكترون . وعليه ، فإنه يمكن اعتبار الشمس كتلة ملتهبة من الغاز التام ، الأمر الذي يبسط كثيراً دراسة الشمس . فلو كانت الشمس سائلاً أو صلباً ، لكان بناؤها أعقد بكثير . لكن الغاز المكون

للشمس غاز أكمد يكاد يكون عديم الشفافية ، بمعنى أن نفاذيته للضوء والفوتونات ضعيفة جداً . ذلك أن متوسط المسافة التي يقطعها الفوتون (جسيم الضوء) من دون أن يتعرض لتصادم مع إلكترون أو بروتون لا يتعدى السنتمتر الواحد . لذلك ، فإن الفوتون الواحد المتولد في باطن الشمس يأخذ في المتوسط أكثر من مليون عام حتى يصل إلى سطح الشمس لينطلق بعيداً عنها ، وذلك بفعل اصطداماته المتكررة مع مكونات الغاز الشمسي . كذلك ، فإن الفوتون الذي يتولد في باطن الشمس على صورة فوتون غاما الشديد الطاقة يخرج من سطح الشمس على صورة حشد من الفوتونات المنخفضة الطاقة نسبيا، وكأن الفوتون الأصلي يتشظى ويتكسر إلى ألف شظية في المتوسط قبل أن يخرج من الشمس بفعل تصادماته المتكررة . ولولا هذه الخاصية للشمس لتعرضنا باستمرار إلى وابل من أشعة غاما القاتلة .

وفي ضوء ما قلناه أعلاه تبرز أسئلة كالآتية :

ما هو التركيب الداخلي للشمس ، وكيف تتغير درجة الحرارة انطلاقا من مركز الشمس ، وعند أي بعد

من المركز تتوقف التفاعلات النووية المسؤولة عن توليد الشمس؟ هذا ما سنجيب عنه في المقالات القادمة .

(٥) النجوم والأقزام البنية

قلنا إن جوهر وجود النجم يكمن في التوازن الدقيق بين قوة الانهيار الجاذبي للكتلة الغازية الملتهبة المكونة للنجم وبين قوة ضغط الغازات المتنوعة الموجودة في هذه الكتلة (غاز البروتونات والإلكترونات والنيوترونات بصفة خاصة).

وفي المرحلة الأولى التي ينهار فيها النجم الأولي Protostar إلى نجم عادي كالشمس، تتم عملية الانهيار بوتيرة سريعة، فيتقلص نصف قطر النجم الأولي من حوالي مليون مليار متر (أي مليون مرة قدر نصف قطر الشمس) إلى حوالي مائة مليار متر (أي مائة مرة قدر نصف قطر الشمس) وذلك في زمن لا يتعدى عشرين ألف سنة فقط. ويعود السبب في ذلك إلى أن طاقة الانهيار الجاذبي في هذه المرحلة لا تتحول إلى طاقة حرارية لجزيئات الغاز، وإنما يستهلك جلها في تحطيم جزيئات الهيدروجين وتأيين ذراته، أي فصل ذرات الهيدروجين المكونة لجزيئاته عن بعضها من جهة، وفصل الإلكترونات عن البروتونات في ذراته من جهة أخرى. لذلك لا يبرز في النجم الأولي، إذ ينهار، ضغط قادر على إيقاف الانهيار أو إبطائه.

ويعقب هذه المرحلة إبطاء جلي في الانهيار، حيث إن عملية تأيين الهيدروجين تكون قد اكتملت تقريبا في نهاية المرحلة الأولى، فتبدأ طاقة الانهيار الجاذبي تتحول إلى طاقة حرارية للبروتونات والإلكترونات. كذلك، ففي نهاية المرحلة الأولى تصل كثافة النجم حدّاً يجعل من النجم كتلة كمداء، الأمر الذي يحد كثيراً من فقدان الإشعاعات المتكونة في النجم. وهذا بدوره يحافظ على حرارة الغاز النجمي، ومن ثم قوة ضغطه.

إذاً، يتباطأ انهيار النجم، في الوقت الذي تتعاظم فيه درجة حرارة باطن النجم. فإذا فاقت كتلة النجم المنهار ثمانية في المائة من كتلة الشمس، وصلت درجة حرارة باطن النجم درجات الحرارة اللازمة لبدء الاحتراق النووي قبل أن يبدأ تأثير ضغط الغاز الإلكتروني، ومن ثم توقف الانهيار واستقر النجم بوصفه مفاعلاً نوويا ضخما لمليارات السنين، وذلك بفعل قوة ضغط الغاز التي تغذيها طاقة الاحتراق النووي بصورة متواصلة. أما إذا كانت كتلة النجم دون (٠,٠٨) مرة قدر كتلة الشمس، بدأ

تأثير ضغط الغاز الإلكتروني قبل أن تصل درجة حرارة باطن النجم إلى الملايين السبعة من الدرجات اللازمة لبدء الاحتراق النووي بين البروتونات. ومن المعلوم أن ضغط الغاز الإلكتروني لا يعتمد بصورة ملموسة على درجة الحرارة، كما إنه يتزايد إذ يستمر النجم في الانهيار من دون أن يصاحب ذلك تزايد في درجة الحرارة. لذلك فإن درجة حرارة باطن النجم تصل أوجها عندما تصل كثافته حدّاً يسمح لضغط الغاز الإلكتروني بالبدء بالتأثير على انهيار النجم. فإذا كان الحد الأقصى لدرجة الحرارة دون الملايين السبعة من الدرجات اللازمة لبدء الاحتراق النووي، تعذر تحول الكتلة المنهارة إلى نجم عادي مشع كالشمس، وحصلنا بدلاً من ذلك على ما يسمى قزماً بنيا، وهو «نجم» صغير الحجم بالنسبة إلى الشمس وخافت النور يكاد لا يرى بتاتاً. وهو يقع في الواقع ما بين الكواكب العملاقة، كالمشتري، والنجوم الصغيرة المشعة. فهو أكبر من أن يكون كوكبا عملاقاً وأصغر من أن يكون نجما عاديا مشعاً. وقد تمكن التلسكوب الفضائي «هابل» Hubble في غضون العام المنصرم من الكشف عن قزم بني تقل كتلته بالفعل عن ثمانية في المائة من كتلة الشمس. أما إذا فاقت كتلة النجم هذا الحدّ، وصلت درجة حرارة باطن النجم إلى أكثر من سبعة ملايين درجة، الأمر الذي يتيح حدوث الاحتراق النووي في باطن النجم لمليارات السنين، أي تحول الكتلة إلى نجم عادي مشع طويل العمر. وبالطبع، فإن النجوم العادية كثيرة التنوع من حيث كتلها وأحجامها وطاقاتها الإشعاعية وأعمارها. وبصورة عامة، فإنه كلما زادت كتلة النجم، زاد حجمه وطاقته الإشعاعية ونقص عمره. إذ تبين الحسابات والقياسات أن الطاقة الإشعاعية المنبعثة من النجوم تتناسب طرديا مع مكعب كتلة النجم. وعليه، فإنها تزداد بوتيرة متسارعة كلما زادت كتلة النجم. لذلك فإن النجوم العملاقة تستهلك وقودها بسرعة كبيرة نسبيا، الأمر الذي يقصر من أعمارها بالنسبة إلى النجوم العادية والصغيرة. وعلى سبيل المثال، فإن عمر شمسنا يبلغ حوالي عشرة مليارات سنة. أما النجوم التي تبلغ كتلة الواحدة منها نصف كتلة شمسنا، فتفوق أعمارها خمسين مليار عام. وفي المقابل، فإن النجوم التي تبلغ كتلة الواحد منها عشرة أمثال كتلة شمسنا، لا يتجاوز عمرها مائة مليون عام فقط. وعليه، فإن النجوم العادية والصغيرة تعيش حياة هادئة مديدة، وتموت

موتا بطيئا. أما النجوم المملاقة، فهي تعيش حياة صاخبة قصيرة، وتموت موتا سريعاً وصاخبا، كما سنبين في مقالات لاحقة.

ولئن كان الحد الأدنى لكتلة النجم هو ثمانية في المائة من كتلة شمسنا، فإن الحد الأقصى هو حوالي مائة مرة قدر كتلة شمسنا. فإذا تخطت كتلة النجم هذا الحد، أضحت كتلة الغاز النجمي غير مستقرة وتناثرت بعيداً عن بعضها. وهذا ما تؤكده القياسات والحسابات المبنية على نظرية النسبية. وتجدر الإشارة هنا إلى أن معظم النجوم تبلغ كتلة الواحدة منها حوالي نصف كتلة الشمس، وأن حوالي عشرة في المائة من النجوم قريبة جداً من شمسنا من حيث الكتلة. أما النجوم العملاقة، فهي نادرة. ومع ذلك، فهي بادية جليا للعيان، حيث إنها تعلن عن نفسها بصورة دراماتيكية قل نظيرها في الكون. فجلها ينهي حياته بانفجارت عظيمة يطفى وميضها على وميض المجرة برمتها.

هل يمكن أن ينشأ الكون من العدم؟

علم الكون: آليات تطوره

(نشر عام ٢٠٠١)

شهدت البشرية حتى اليوم (مطلع الألفية الثالثة) ثلاثة أصناف من التصورات الكونية، أي تلك التصورات المعنية بالموجودات بصفتها كلاً أو نظاماً كليا تترابط مكوناته مكانيا وزمانيا وأصلاً ونوعاً. هذه الأصناف هي:

١- التصورات الأسطورية التي تعتبر الكون مسرح فعل الأرواح والآلهة.

٢- التصورات الفلسفية التي تعتبر الكون نتاجاً لمبادىء عقلية موضوعية أولية، فلسفية وجمالية وأخلاقية (مثلاً: كون أفلاطون، كون أرسطو، كون أفلوطين، كون الفارابي وابن سينا، كون السهروردي).

٣- التصورات العلمية التي ترتكز إلى نظريات الفيزياء والرصدات الفلكية.

وقد انحسر الصنفان الأولان انحساراً شبه تام في القرون الأربعة الأخيرة، وحل محلهما الصنف الثالث من حيث المشروعية والتزام النخب المعرفية. لكن هذا الصنف ابتدأ مثقلاً بالتناقضات والاستحالات القاتلة وظل كذلك طوال قرنين من الزمان، الأمر الذي حال دون تكونه علماً، وإن كانت قاعدته الفيزيائية علمية. وبالتحديد، فإن الفيزياء الكلاسيكية، التي أرسى قواعدها نيوتن في القرن السابع عشر، لم تكن قادرة على توفير أساس متسق منطقيا لعلم الكون. لذلك ظلت التصورات العلمية تراوح مكانها مثقلة بتناقضاتها الداخلية حتى عام ١٩١٧، يوم نشر ألبرت آينشتاين ورقته المشهورة، التي طبق فيها نظريته في النسبية العامة (١٩١٥) على الكون (أو، قل: الزمكان) بوصفه كلا عضويا مترابطاً. وكان نشر هذه الورقة إيذانا بانطلاقة الدراسة العلمية للكون، أي ببدء علم الكون، بوصفه علماً بالمعنى المتعارف

عليه اليوم، كالفيزياء والكيمياء والبيولوجيا والجيولوجيا. ذلك أن نظرية النسبية العامة هي نظرية كونية في جوهرها، فلا تكتسب تناسقها الداخلي إلا بكونيتها وتطبيقاتها الكونية. ولئن أعاق الفصل المطلق بين المكان والزمان والمادة في نظرية نيوتن اعتمادها قاعدة لعلم الكون، فإن ربط هذه الموجودات عضويا في بعضها في نظرية النسبية العامة أتاح المجال، لأول مرة في التاريخ، لمعالجة الكون علميا بوصفه نظاماً ماديا واحداً موحداً.

لكن تطور علم الكون في غضون القرن العشرين أثبت أن نظرية النسبية العامة تشكل جزءاً من قاعدة علم الكون، وليس القاعدة كلها. كان على علماء القرن العشرين أن يرفدوا نظرية النسبية العامة بالفيزياء النووية، ثم بنظرية المجال الكونتمية، ثم بنظريات التوحيد المجالية الحديثة (نظريات التوحيد المهيبة GUT's، نظريات الخيوط الفائقة، نظرية أم النظريات M-Theory، وغيرها)، حتى يتسنى لهم التغلب على مفارقات علم الكون وتفسير فيض الظاهرات الكونية الذي تفجر على الساحة العلمية في النصف الثاني من القرن العشرين.

وتكمن مشكلة نظرية النسبية العامة في أنها نظرية جزئية وغير مكتملة. فهي نظرية في بنية المكان والزمان، وليست نظرية شاملة في المادة. وكان أكثر من أدرك هذا النقص في النظرية هو مبدعها الرئيسي، ألبرت آينشتاين، نفسه، الأمر الذي قاده، منذ نشر نظرية النسبية العامة وحتى لحظة وفاته، إلى تركيز قدراته الذهنية الخارقة على محاولة بناء نظرية مجال موحد شاملة تشكل إطاراً نظريا مكتملاً لفهم جميع الظاهرات المادية، بما في ذلك المجال الكهرمغناطيسي والجسيمات دون النووية. لكنه أخفق في ذلك، وترك الأمر للأجيال اللاحقة، التي ما زالت ماضية على هذا الدرب بزخم ومثابرة. ولكون نظرية النسبية العامة نظرية في المكان والزمان فقط، فإن تنبؤاتها الكونية جاءت مقصورة على المكان والزمان، ولم تمس المادة وظاهراتها الغنية. إذ تنبأت أن المكان إما أن يكون متمدداً، وإما أن يكون متقلصا، في الزمان، إذا كان توزيع المادة فيه متجانساً، أي إذا كانت كثافة المادة لا تتغير من موضع إلى آخر. وقد وضع هذا التنبؤ لأول مرة عام ١٩٢٢ على يدي الرياضي

الروسي، ألكسندر فريدمان. وجاءت أبحاث الفلكي الأميركي، إدوين هابل، بعد ذلك بسبع سنوات لتدعم فكرة أن المكان يتمدد، حيث اكتشف هابل أن المجرات تتباعد عن بعضها بسرع تتناسب طرديا مع المسافات بينها، تماماً كما تنبأ فريدمان على أساس نظرية النسبية العامة.

لكن نظرية النسبية العامة قادت أيضا إلى فكرة أن الكون محدود في العمر، وإن عجزت عن تحديد هذا العمر بدقة لكونها نظرية غير مكتملة، أي لغياب تصور داخلي للمادة فيها. وعلى أي حال، فما كان بالإمكان لنظرية نيوتن أن تقود إلى هذه الفكرة الغريبة بحكم بنيتها الفكرية الأساسية. فالمكان مطلق وثابت في نظرية نيوتن. أما الفكرة التي قادت إليها النسبية العامة فهي أن عمر المكان محدود، بمعنى أن المكان ابتدأ في لحظة معينة (من العدم؟) على صورة نقطة لامتناهية الصغر، ثم تمدد حتى وصل إلى الأبعاد الهائلة التي نشهدها اليوم. فقبل بضعة مليارات من السنين (حوالي ١٣،٧ مليار سنة، وفق أحدث القياسات الفلكية)، كان المكان نقطة لامتناهية الصغر والسخونة والكثافة.

وكان أول من توصل إلى هذه النتيجة المثيرة هو العالم الكاهن الكاثوليكي البلجيكي، ليميتر. ولعله لم يكن من قبيل الصدفة أن هذه النتيجة جاءت على يدي عالم كاهن. ولربما كان للدافع الديني أثره في وصول ليميتر إلى هذه النتيجة. وقد هلل لها واحتفى بها رجال الدين من كل حدب وصوب، ظنا منهم أنها تؤكد قصة خلق العالم الواردة في كتبهم المقدّسة، غير مدركين أن هذه النتيجة المبهمة تنبع من نواقص نظرية النسبية العامة وثغراتها، لا من مكامن قوتها وكمالها، وأنها مؤشر على حدود انطباق النظرية ومحدودية قدرتها على معالجة مسألة نشوء الكون. وهذا هو شأن رجال الدين، أنى كان مذهبهم؛ يتمسكون كالغرقى بما ينثره العلم أمامهم من قش في مسيرته المعرفية المظفرة، لانعدام ثقتهم بنهجهم الأوامري الاستبدادي.

ولنتوقف قليلاً عند هذه الفكرة، فكرة أن المكان، بما يحمله من مادة، انبثق جملة وتفصيلا من نقطة منفردة لانهائية الصغر والسخونة والكثافة. ولندقق في معنى

هذه المقولة.

أولاً، ينبغي الانتباه إلى أن هذه النقطة المنفردة تشكل حدّاً للمكان والزمان. فهي ليست في المكان والزمان. إنها تضم المكان برمته وتشكل نقطة بدء الزمان. وعليه، فإنها خارج المكان والزمان (خارج الزمكان) بصفتها حدّاً للزمكان. ولما كانت معادلات النسبية العامة (أو، ما يسمى معادلات آينشتاين المجالية) تعنى بالزمكان، وتفترض وجوده، وتصف العمليات والتفاعلات المادية ضمن إطاره، فإن النقطة المنفردة تقع خارج إطار النسبية العامة، بمعنى أن قوانين النسبية العامة تنهار ولا تسري عند هذه النقطة. وبالطبع، فإن رجال الدين قد يفهمون من ذلك أن العلم يعجز وينهار عند لحظة خلق العالم. فهم يهللون فرحاً لأي مظهر من مظاهر عجز العلم والإنسان الذي يصنعه، لأنهم أعداء الحرية والعقل. لكنهم لا يدركون أن قصة الخلق التي يروجونها لا تقل سوءاً، من حيث المعقولية والقدرة التفسيرية، عن النقطة المنفردة، إن لم تكن أسوأ بكثير. وعلى أي حال، فإن النقطة المنفردة تشير إلى حدود نظرية النسبية العامة ونقائصها وكونها تفتقر إلى نظرية شاملة في المادة، لا إلى حدود العلم ونقائصه.

ثانيا، فإن مفهوم اللانهاية في هذا المقام (المكان اللامتناهي الصغر، السخونة اللانهائية، لانهائية كثافة المادة) مفهوم مبهم وضبابي، على الأقل فيزيائيا. وبصورة عامة، فإن بروز اللانهاية في نظرية فيزيائية لهو مؤشر على بروز حدّ لانطباق النظرية، أو إلى نقص فيها، أو إلى نقص في الأنموذج المعتمد. لذلك، فقد عدّ جل الفيزيائيين النقطة المنفردة الأصلية للكون نقطة ضعف كبيرة في نظرية النسبية العامة، وسعى بعضهم إلى إيجاد طرق وآليات لتفاديها والالتفاف حولها. وظن بعضهم أنه يمكن تفاديها إذا افترضوا أن توزيع المادة في المكان ليس متجانساً، بمعنى أنهم ظنوا أن النقطة المنفردة الأصلية منبعها افتراض تجانس توزيع المادة في الكون. وظنوا أن إزالة هذا الافتراض سيقودهم إلى حدّ أدنى محدود لحجم المكان. لكن سرعان ما خيب أملهم ذاك الفيزيائيان البريطانيان، روجر بنروز وستيفن هوكنغ، اللذان برهنا رياضيا، وبطريقة محكمة، في نهاية الستينيات من القرن

العشرين، أن نظرية النسبية العامة تقود إلى ضرورة النقطة المنفردة الأصلية حتى لو كان توزيع المادة في المكان غير متجانس. وهذا ما حدا الفيزيائيين، بمن فيهم بنروز وهوكنغ، إلى النظر خارج حدود نظرية النسبية العامة، صوب ما يسمى نظرية المجال الكونتمي، من أجل التغلب على هذه الصعوبة.

وثالثاً، فهناك مشكلة العبور من اللانهائي إلى المحدود، وهي المشكلة التي أرقت بال الفيلسوف الإغريقي (الكنعاني) زينون، وما زالت تؤرق بال الفيزياء الحديثة. فكيف يتسنى للكون أن ينتقل من حجم لانهائي الصغر وسخونة وكثافة لانهائيتي الكبر إلى حجم محدود وسخونة وكثافة محدودتين؟!

وهكذا، فقد شكلت نقطة البداية للكون صعوبة بالغة لنظرية النسبية العامة في معالجتها مشكلة الكون نشوءاً وتكوينا وتطوراً. ومع ذلك، فقد هلل رجال الدين لهذه الصعوبة واعتبروها أساساً علميا لتصوراتهم ما قبل العلمية لنشوء الكون وتطوره. فالملاحظ أنهم يقتاتون على نقائص النظريات العلمية، لا على نقاط قوتها، الأمر الذي يجعلهم يلهثون باستمرار وراء العلم وتطوره المتسارع، عبثا ومن دون جدوى.

وبالإضافة إلى ذلك كله، فإن نظرية النسبية العامة أظهرت قصورها في عجزها عن التنبؤ بتوزيع المادة المرئية (المجرات) والأخرى غير المرئية وتوزيع الضوء وغيره من الأمواج الكهرمغناطيسية في المكان، وفي عجزها عن تحديد هندسة الكون ومصيره. هذا ناهيك بصعوبات منطقية يصعب ذكرها هنا بالنظر إلى طبيعتها الفنية المعقدة والمتخصصة. كل ذلك قاد الفيزيائيين إلى تخطي نظرية النسبية العامة صوب التطورات الهائلة التي كانت تمر فيها ما يسمى نظرية المجال الكونتمي.

والحق أن هذا النقص مكتوب أصلاً في البنية الداخلية لنظرية النسبية العامة، وبخاصة في ما يسمى معادلات آينشتاين المجالية، التي تعبر عن قوانين تفاعل المادة مع الزمكان. فالشق الأيسر من هذه المعادلات يعبر عن بنية الزمكان وطبيعة هندسته ودرجة انحنائه (أي درجة ابتعاده عن هندسة إقليدس المألوفة في حياتنا اليومية). وهو ينبثق جوهريا من قلب نظرية النسبية العامة، التي تعنى أصلاً بالزمكان. أما

الشق الثاني، فيعبر عن المادة والطاقة، ولا ينبع من قلب نظرية النسبية العامة، وإنما يعتمد في مضمونه على النظريات الفيزيائية الأخرى، وإن كان يعتمد في شكله على مبادىء النسبية العامة. ويمكن القول إن هذا الشق هو الجسر الذي يربط النسبية العامة بنظريات المادة. وهو لا ينتمي حقاً إلى النسبية العامة، وإنما إلى النظريات الأخرى. لذلك، فهو يعكس الحالة التي وصلت إليها نظرية المادة. وعليه، فإن معالجة النسبية العامة للكون تتطور بتطوير نظرية المادة، وتأخذ شكلاً جديداً كلما طبقت على طور جديد للمادة.

ففي المراحل الأولى من وضع نظرية المكان المتمدد، اعتمدت نظرية المادة الموروثة من الفيزياء الكلاسيكية (ميكانيك نيوتن ونظرية ماكسويل في الكهرمغناكيسية)، بعد أن أعيد صوغها وفق مبادىء النسبية العامة. وأدت هذه المعالجة إلى التنبؤ بتمدد المكان، ومحدودية عمر الكون، والنقطة المنفردة الأصلية، وعجزت عن التنبؤ بالسمات الأخرى للكون والمتعلقة مباشرة بطبيعة المادة.

وفي المرحلة الثانية (الأربعينيات والخمسينيات من القرن العشرين)، التي شكلت العصر الذهبي للفيزياء النووية، أدخلت نظرية الالتحام النووي وبناء العناصر في التصور النسبي العام للكون من خارجه، فكانت النتيجة توسيع دائرة تنبؤات النظرية، تمثل في التنبؤ بنسب العناصر في المادة المرئية في الكون، والتنبؤ بتوزيع الطاقة الكهرمغناطيسية وخصائصها في المكان (ما يسمى إشعاع الخلفية). إذ تنبأت النظرية بأن ثمانين بالمائة من كثافة المادة المرئية هي من الهيدروجين، وحوالي عشرين بالمائة هي من الهيليوم، وأن نسبة باقي العناصر لا تتجاوز الواحد بالمائة. وقد أثبتت القياسات والرصدات الفلكية الدقيقة ودراسة الأطياف الضوئية للنجوم والمجرات معقولية هذا التنبؤ.

أما التنبؤ الآخر للنظرية في شكلها النووي، فهو أن المكان يملؤه بحر من الطاقة الكهرمغناطيسية متدنية درجة الحرارة، وأن توزيعها متجانس تماماً، وأنها مماثلة في طبيعتها لما يسمى إشعاع الجسم الأسود (أي الإشعاع الكهرمغناطيسي المنبعث من التجويفات). وبالفعل، فقد تم الكشف عن هذه الطاقة عام ١٩٦٤، وجاءت

القياسات والرصدات مطابقة للتنبؤ، الأمر الذي دعم النظرية ودحض النظريات الأخرى المنافسة، وفتح عهداً جديداً في دراسة الكون وظاهراته.

ومع ذلك، فإن إدخال الفيزياء النووية في التصور النسبي العام للكون لم يفلح في التغلب على صعوبات هذا التصور وتناقضاته الكثيرة، بما في ذلك مشكلة النقطة المنفردة الأصلية. وبرغم هذه الصعوبات، ازداد العلماء تمسكاً بهذا التصور بفضل إنجازاته الهائلة المذكورة. فكيف لنا أن نتخلى عن أنموذج يبين لنا كيف تبتعد المجرات عن بعضها، وكيف بنيت العناصر في الكون، وبحسب نسبها، ويبين توزيع الطاقة الكهرمغناطيسية مكانياً وموجياً؟! كان لا بدّ إذاً من التشبث بهذا الأنموذج النسبي العام، والبحث في التطورات المستمرة لنظرية المادة عن مخارج وحلول لصعوبات الأنموذج وتناقضاته.

وجاءت الستينيات والسبعينيات من القرن العشرين تحمل معها بشائر أنموذج شبه مكتمل للمادة ومكوناتها، وهو ما أخذ يعرف بالأنموذج المعياري للمادة. ويقسم هذا الأنموذج المكونات الأساسية للمادة والطاقة إلى ثلاث عائلات متمايزة: (١) عائلة الكواركات، التي تتكون منها البروتونات والنيوترونات؛ (٢) عائلة الليبتونات، التي تضم الإلكترونات وغيرها؛ (٣) عائلة البوزونات، التي تضم الجسيمات المسؤولة عن التفاعلات والقوى الأساسية في الكون، كجسيم الفوتون المسؤول عن التفاعل الكهرمغناطيسي، والصمغيات (الغلوونات) المسؤولة عن التفاعلات النووية القوية.

وقد استطاع التصور النسبي العام استيعاب الأنموذج المعياري بيسر، ومكنه ذلك من تحديد حالات الكون، أو حالات مادة الكون، ابتداء من واحد مقسوماً على عشرة للقوة خمس وثلاثين من الثانية من نشوء الكون وحتى اللحظة الراهنة. فبين كيف نشأت عائلات المادة والطاقة المذكورة أعلاه ومتى نشأت، ثم كيف ومتى انفكت عن بعضها واستقرّت. وفسّر أيضا اللاتكافؤ في مادة الكون بين المادة وضدها. فمن المعلوم أن لكل جسيم أولي ضداً معاكساً له في الخصائص. فإذا اصطدم الجسيم بضده، انفجرا وتحولت كتلتاهما إلى طاقة كهرمغناطيسية. والأصل أن تنتج

الجسيمات وأضدادها بالتساوي. لكن الواقع عكس ذلك تماماً. فجل مادة الكون من صنف واحد. أما الضد فتكاد نسبته أن لا تذكر. لكن الأنموذج المعياري استطاع حلّ هذا الإشكال، وجاءت النتيجة منسجمة تماماً مع نسب المادة والطاقة الموجودة في الكون.

وبرغم هذه الانتصارات الكبيرة، فقد ظل التصور النسبي العام (ما يسمى نظرية الانفجار الكبير) يشكو من صعوباته وتناقضاته الكبيرة. لكن تطورات أخرى، أصابت نظرية المادة في السبعينيات والثمانينيات، فتحت آفاق نظرية وتربة نظرية جديدة للتغلب على هذه الصعوبات وحل هذه التناقضات. فلئن عجزت نظرية نيوتن الكلاسيكية عن توفير أرضية لعلم الكون، ولئن أفلحت نظرية آينشتاين في النسبية العامة في توفير مثل هذه الأرضية، لكنها عجزت عن توفير أرضية مناسبة لوضع تصور علمي دقيق ومنسجم لولادة الكون، فإن التطورات المذكورة بدت قادرة على توفير أرضية ملائمة لتفسير ولادة الكون علميا.

وبصورة خاصة، فقد برزت على أساس التطورات المذكورة، ثلاث أفكار غيرت مجرى البحوث الكونية وقلبتها رأساً على عقب إلى غير رجعة، وهي:

١ ـ في ضوء نظريات المجال الموحد، التي اشتد ساعدها في السبعينيات والثمانينيات من القرن الماضي (العشرين)، والتي حاولت توحيد التفاعل الكهرمغناطيسي مع التفاعلين النووي القوي والنووي الضعيف وحققت نجاحاً جزئيا في ذلك، برزت فكرة أن عائلات الأنموذج المعياري ليست نهاية المطاف، وإنما تنبع من حالات للمادة أكثر جذرية وأولية. وبصورة خاصة، برزت أهمية ما يسمى الفراغ الزائف، وهي حالة للمادة شبيهة بالفراغ، لكنها غير مستقرة ومثقلة بالطاقة، أي إنها فراغ مثقل بالطاقة، ومن ثم غير مستقر. وعندما بدأ علماء الكون يدخلون هذا المفهوم في التصور النسبي العام للكون، كانت هناك مفاجأة تنتظرهم. فحتى هذا التطبيق، كان أثر حالات المادة المعروفة على المكان واحداً ويتمثل في إبطاء تمدد المكان على اعتبار أن المادة تؤثر بجاذبية جاذبة على بعضها. لكن علماء الكون فوجئوا بأن الفراغ الزائف يعطي أثراً معاكساً تماماً. إذ إنه يدفع المكان إلى التمدد بصورة انفجارية

هائلة، بحيث ينتفخ المكان من نقطة أصغر من الذرة بمليارات مليارات مليارات المرات إلى كرة بحجم البرتقالة في لمح البصر (في فترة تقع بين واحد مقسوم على عشرة للقوة خمس وثلاثين من الثانية وبين واحد مقسوم على عشرة للقوة اثنتين وثلاثين من الثانية!). بذلك ضرب علماء الكون أكثر من عصفور بحجر واحد. إذ عثروا على مصدر الانفجار الكوني الكبير في هذا الانتفاخ (التضخم، التورم) الصاعق الذي يعانيه المكان في اللحظات الأولى من تولد الكون، بفعل حالة الفراغ الزائف هذه. وعثروا فيه أيضا على مصدر المادة والطاقة في الكون، حيث إن تحلل الفراغ الزائف إلى الفراغ الحقيقي المألوف أدى إلى تولد فيض الجسيمات الذي تتكون منه مادة الكون. أضف إلى ذلك أن نظرية الانتفاخ (التضخم) تلك تخطت كثيراً من الصعوبات والتناقضات المستعصية التي عانى منها التصور النسبي العام للكون، والتي لا مجال لذكرها هنا بالنظر إلى طابعها الفني المعقد. كما إنها وفرت أرضية نظرية مكينة لتفسير درجة التجانس المذهل، التي يبديها الكون على مستوى ما بعد عناقيد المجرات، مقرونة بدرجة اللاتجانس الكبير التي يبديها توزيع مادة المجرات في المكان.

ولكن، وبرغم هذه الانتصارات النظرية الكبيرة، ظلت معضلة النقطة المنفردة الأصلية قائمة. فمن أين جاءت حالة الفراغ الزائف في المقام الأول؟ ومن أين جاءت طاقته والمجالات (ما يسمى المجالات غير المتجهة) التي تحمل هذه الطاقة؟

وقد تطورت نظرية الانتفاخ (التضخم) الكوني هذه صوب تقديم حل لمشكلة النقطة المنفردة الأصلية، وذلك على يدي الفيزيائي الروسي، أندريه ليندا. إذ توصل ليندا إلى ما يسمى الانتفاخ الفوضوي. ومفاد هذه الفكرة أن الانفجار الكوني ليس حدثاً فريداً يحدث مرة واحدة، وإنما هو عملية متواصلة وسلسلة لانهائية من الأحداث، وأن المكان كيان لانهائي تتولد فيه نقاعات كونية تتمدد صوب اللانهاية بصورة متواصلة. فالانفجار الكوني لا يحدث في الآن ذاته في كل بقاع الكون، وإنما يصيب بقعة ويتخلف في بقعة أخرى. من ثم، فإنه ليس هناك بداية ولا نهاية للكون، بمعنى أن الأكوان (الفقاعات الكونية) تتوالد باستمرار عبر عملية الانتفاخ (التضخم)

الكوني، وتخلق كل فقاعة كونية شروط توالد المزيد من الفقاعات الكونية داخلها، وكأن الكون هو شجرة لامتناهية التشعب من الفقاعات الكونية.

والسؤال هو: إلى أي مدى تحل هذه الفكرة مشكلة النقطة المنفردة الأصلية؟ وإلى أي مدى تحمل مضامين مفاهيمية واضحة ومنسجمة مع ذاتها؟ وبصورة خاصة، إلى أي مدى تحدد مفهوم الزمان بصورة منطقية منسجمة مع ذاتها؟

ولعله من السابق لأوانه البت في هذه الأسئلة.

٢ـ بدأت في مطلع السبعينيات من القرن العشرين تتردد فكرة غريبة مفادها أن قوانين الفيزياء تجيز نشوء الكون من العدم. لكن هذه الفكرة لم تبرز على أساس نظرية النسبية العامة، وإنما ضمن إطار نظرية الكونتم، التي أطلق شرارتها الأولى الفيزيائي الألماني، ماكس بلانك، في مطلع القرن العشرين. والحال أن فيزياء القرن العشرين تنازعتها نظريتان أساسيتان: نظرية النسبية العامة، التي وجدت حقلها الطبيعي في الكون بوصفه نظاما شاملاً، ونظرية الكونتم، التي وجدت حقلها الطبيعي في الذرة ونواتها والجسيمات دون النووية. وانطلقت كل من النظريتين في حقلها الطبيعي بممزل تقريبا عن النظرية الأخرى. ومع تطورهما الطبيعي، برز حجم الاختلاف، لا بل التناقض، بينهما. ولم يقلق ذلك الفيزيائيين كثيراً ما ظل حقلا النظريتين بمنأى عن بعضهما. لكن تطور علم الكون، واعتماده المتنامي على تطور نظرية المادة، وتمكنه من معالجة حالات الكون في اللحظات الأولى بعد ولادته، كل ذلك أدى إلى تداخل الحقلين الكوني ودون النووي تداخلا عضويا لا انفكاك فيه ولا مفرّ منه، الأمر الذي دفع خيرة العقول النظرية صوب توحيد النظريتين المتناقضتين: النسبية العامة ونظرية الكونتم. وبرغم التطورات المهمة التي حدثت على هذا الصعيد في ربع القرن الأخير، إلا أن التوحيد المرجو لم يتحقق حتى الآن. ويسود المحاولات التي تمت حتى الآن جو كثيف من الغموض والضبابية.

وعلى أي حال، فقد قادت نظرية الكونتم إلى تصور جديد للفراغ (الخلاء) مفاده أن الفراغ يمج، بالضرورة وبحكم طبيعته، بفيض من الجسيمات (فوتونات، إلكترونات، كواركات، الخ...) قصيرة العمر. فلا مانع لنشوء الجسيمات دون

النووية من قلب الفراغ، شريطة ألا يتخطى بقاؤها فترات خاطفة تتناسب وطاقتها. ومن ذلك نبع السؤال الكوني الآتي: لئن أباحت قوانين نظرية الكونتم نشوء الجسيمات دون النووية من الفراغ لفترات خاطفة، فهل من الممكن أن تبيح نشوء بذور مكانية كونية من العدم؟

وبرزت صعوبتان أساسيتان في الرد على هذا السؤال. وتكمن الصعوبة الأولى في عمر الكون الطويل. فالجسيمات المتولدة من الفراغ لا تبقى إلا للحظات خاطفة. ما الذي يبقي الكون لمليارات السنين، إذاً؟ وكان الجواب أن الكتلة (أو، الطاقة) الكلية للكون تساوي صفراً، بمعنى أن الطاقة الموجبة المتمثلة في كتلة الجسيمات تكافىء تماماً الطاقة السالبة المتمثلة في المجال الجاذبي للكون. من ثم، فإنه يمكن للكون أن يبقى لفترات طويلة جداً وفق قوانين الكونتم، التي تنص على أن هناك علاقة عكسية بين زمن البقاء وبين طاقة النظام المادي.

أما الصعوبة الثانية، فتكمن في الحجم الهائل للكون اليوم. إن البذرة الكونية تنشأ صغيرة جداً، بل تكون أصغر من البروتون بمليار مليار مرة. والسؤال هو: لماذا لا تنهار هذه البذرة تحت تأثير الجاذبية لتعود إلى العدم الذي انبثقت منه؟

والجواب، الذي يتبادر إلى الذهن هنا، هو أن كثيراً من هذه البذور الكونية تنهار بالفعل قبل أن يتاح لها المجال للتحول إلى أكوان، لكن بعضها تتضمن حالات مادية تدفعها إلى الانتفاخ والتضخم الهائلين اللذين يحولانها إلى أكوان ضخمة على غرار كوننا.

لكن هاتين الإجابتين لا تفيان تماماً بالغرض، حيث إنهما تكتفيان ببيان الإمكانات ولا تحددان الاحتمالات، ولا الآليات المفصلة لنشوء البذور الكونية وتحولها إلى أكوان ضخمة. كما إن مفهوم العدم الذي تنطويان عليه مفهوم ضبابي مبهم يعوزه التحديد الدقيق. فهل هو المكان الفارغ من المادة والطاقة، أم إنه المكان الذي تكون فيه طاقة المجالات الأولية للمادة عند حدها الأدنى، أم إنه حالة انعدام المكان والزمان والمادة والطاقة؟ وما معنى ذلك كله وما إمكانيته؟

وقد نشأ علم الكون الكونتمي محاولة للإجابة عن هذه الأسئلة ولبيان الاحتمالات

والآليات المفصلة لنشوء الكون من العدم. والفكرة الأساسية هنا هي أن هناك محيطاً من البذور الكونية الممكنة الحدوث والمتنوعة المضمون، أي من حيث طبيعة هندستها وحالة المادة. لكن احتمالات حدوثها، أي انبثاقها من العدم، ليست متساوية. فبعضها مهمل الاحتمال، وبعضها الآخر عظيم الاحتمال. ولكن كيف نحدد هذه الاحتمالات؟ إننا نحددها تماماً كما نحدد احتمالات الإلكترون أو الفوتون، أي بمبادىء الميكانيكا الكونتمية ومعادلاتها، بعد توسيعها وتعميمها بالطبع. وقد جرى توسيع هذه المبادىء وتعميمها كونيا بطريقتين: طريقة هوكنغ وهارتل من جهة وطريقة فايلنكن ولندا من جهة أخرى. وبرغم بعض النجاحات التفسيرية التي حققها علم الكون الكونتمي ممثلا بهاتين الطريقتين، إلا أنه ما زال في بداية الطريق، وأمامه الكثير من التحديات والتوضيحات، كما إن جل مفهوماته ما زالت مبهمة وضبابية.

وفي بادىء الأمر، فهم بالعدم المكان الفارغ من المادة والطاقة، وانصبت الجهود على اشتقاق وجود المادة بتنوعها من المكان الفارغ، سواء أكان منحنيا أم غير منحن، ارتكازاً إلى فكرة أن المكان الفارغ غير مستقر بفعل الذبذبات الكونتمية، الأمر الذي يدفعه إلى «الانهيار» إلى كون يعج بالمادة. لكن علم الكون الكونتمي سرعان ما تخطى ذلك إلى اعتبار العدم ليس فقط حالة انعدام المادة بتنوعاتها الزاخرة، وإنما أيضا حالة انعدام المكان والزمان، فكان عليه وضع تصور لانبثاق المكان والزمان والمادة من قلب العدم بهذا المعنى تحديداً. ووجد ضالته في طرائق ميكانيك الكونتم بعد تعميمها إلى أقصى حد. ووضع نصب عينيه: (١) اشتقاق وجود البذرة المكانية وآليات نشوئها؛ (٢) اشتقاق شروط انتفاخ المكان بسرعة خيالية تفوق سرعة الضوء بمرات عديدة؛ (٣) اشتقاق قوانين المادة وقوانين الزمكان من طرائق ميكانيك الكونتم المعممة؛ (٤) اشتقاق توزيع المادة في المكان، وبخاصة توزيع المجرات؛ (٥) اشتقاق اتجاه الزمن وكونه يسير في الاتجاه ذاته في كل نقطة مكانية. وهي مهمات كبيرة تحتاج إلى جهود نظرية جبارة وإلى حسابات تستلزم أعتى الحواسيب الممكنة.

وهنا يبرز السؤال الفلسفي الآتي: هل إن العدم (اللامادة واللامكان واللازمان)،

الذي يتكلم عنه علم الكون الكونتمي، هو اللاشيء أو اللاوجود فعلاً؟ هل إن علم الكون الكونتمي يناقض، بطرحه ذاك، المبدأ الأساس للعقلانية والقائل بأن لا شيء ينبع من العدم؟

هناك ميل واضح لدى بعض الفيزيائيين صوب صدم قرائهم وإثارة دهشتهم وتحدي مخيالهم ومسلماتهم بتكرار مقولة أن الكون نبع من العدم المطلق بالضرورة – ضرورة مبادىء ميكانيك الكونتم المعمم. ولربما كان هذا الميل يعبر عن نزعة تسلطية لدى أولئك الفيزيائيين ورغبة مهنية في إخضاع غير المتخصصين لسحر رؤيتهم، وفي ممارسة استعلائهم المعرفي، وبث الرهبة والخضوع في نفوس الآخرين، وجعلهم يشكون في كل مسلماتهم ومقومات تفكيرهم. إنه أقرب إلى الآيديولوجيا منه إلى العلم بمعناه النقدي الصارم. فهم يغفلون أولا أن هناك غموضاً وإبهاماً مفاهيميا لا يجوز إنكاره في علم الكون الكونتمي. فلئن كان الغموض المفاهيمي ملازماً لمكانيك الكونتم العادي والمألوف، فما بالك بعلم الكون الكونتمي، الذي يتضاعف منسوب غموضه! ومن جهة أخرى، فإن كون العدم ينصاع إلى مبادىء ميكانيك الكونتم المعمم يشير إلى أنه ليس عدماً مطلقاً، وإنما هو نوع من الوجود بالقوة. إنه نوع من العودة إلى أرسطو. بل إن علماء الكون الكونتمي يتحدثون عن السويرمكان، الذي يتكون من جميع الاحتمالات المكانية والمادية. ألا يشكل هذا السويرمكان الوجود بالقوة الذي يتحول إلى وجود بالفعل بفضل مبادىء الكونتم المعممة؟

يبدو لي أن هناك تأويلين عقلانيين ممكنين للعدم في علم الكون الكونتمي: فإما أن يكون العدم حالة كمون أي وجوداً بالقوة لجميع الاحتمالات والممكنات، كما أسلفنا، وإما أن يكون حالة سابقة (منطقيا) على المكان والزمان والمادة، بحيث تتركب الأخيرة وتنبثق من قلب هذه الحالة الأولية. وما زلنا بالطبع في البدايات الأولى للتنظير لهذين التأويلين.

٣ـ لقد دلت التطبيقات الأولى لمكانيك الكونتم على أن هناك طولاً أدنى وفترة زمنية دنيا لا يمكن تخطيهما إلى ما دونهما. وعليه، فإن النقطة الأصلية المنفردة

إن هي إلا وهم كلاسيكي، حيث إن القوانين الكونتمية تحظرها وتحظر الوصول إليها. فهناك حجم أدنى للمكان، أصغر بتريليونات تريليونات المرات من حجم الذرة، لكنه محدود وأعلى من الصفر. وقد ولدت هذه التطبيقات الأولى الأمل في أن تتمكن ميكانيك الكونتم من حل مشكلة النقطة الأصلية المنفردة، الأمر الذي حدا الفيزيائيين النظريين إلى تكثيف جهودهم لتوحيد ميكانيك الكونتم مع نظرية النسبية العامة في نظرية شاملة واحدة، أي لبناء نظرية كونتمية في الجاذبية. وهناك حاليا عدد من المحالولات لتحقيق ذلك، وفي مقدمتها علم الكون الكونتمي، السابق ذكره، ونظريات الخيوط الفائقة. وفي حال نظريات الخيوط الفائقة، فإنها ليست مجرد نظريات في المادة تضاف إلى نظرية النسبية العامة من خارجها، كما كان عليه الحال في التطبيقات الكونية السابقة، وإنما هي نظريات شاملة في الوجود المادي تنبع منها نظرية المادة ونظرية الزمكان (النسبية العامة) بصورة طبيعية. ومن هذه الزاوية، فهي تعد تحقيقا لحلم آينشتاين في بناء نظرية مجال موحد شاملة للمادة والمكان والزمان. لكن هذه النظريات ما زالت مبهمة المعنى الفيزيائي، كما إن تطبيقاتها الكونية ما زالت في بداياتها. وهناك أمل في أن تتمكن هذه النظريات من تجاوز مشكلة اللانهايات، التي أثخنت جسد نظرية المادة والجاذبية حتى الآن، بما في ذلك مشكلة النقطة الكونية الأصلية المنفردة.

ومن الأفكار المثيرة، بصدد حل مشكلة النقطة الكونية المنفردة، ما طرحه ستيفن هوكنغ بصدد الزمان في نظريته في علم الكون الكونتمي. إذ رأى هوكنغ أن الزمن يبدأ يتحول إلى نوع من البعد المكاني قبل أن يصل إلى نقطة الصفر (نقطة البداية). ويتم هذا التحول بصورة تدريجية. بذلك، وبرغم محدودية عمر الكون، فإنه ليست هناك نقطة بداية زمنية محددة للكون، ومن ثم ليست هناك نقطة كونية أصلية منفردة. كل ما في الأمر أن الزمان والمكان الثلاثي المألوف ينبثقان بفعل قوانين الكونتم من فضاء رباعي أولي سابق منطقيا على الزمان. فإذا عدنا بالزمان إلى الوراء، فإنه يتحول إلى بعد مكاني قبل الوصول بنا إلى النقطة المنفردة. وهو مخرج مرضٍ منطقيا لمشكلة النقطة المنفردة، وإن كان شديد الإبهام والتجريد وليس

هناك ما يدعمه رصديا بصورة مباشرة. لكنها فكرة جريئة على أي حال، وتحمل في باطنها أمل بناء إطار نظري جديد قادر على استيعاب ظاهرة الخلق والنشوء الكوني استيعابا علميا عقلانيا.

وختاماً، فإنه ينبغي القول إن علم الكون دخل منذ مطلع تسعينيات القرن العشرين مرحلة جديدة في تاريخه تمثلت في تطوير أدوات كشف وتلسكوبات فضائية وأساليب في الرصد والحساب جديدة تتميز بدقتها المذهلة، التي تجعل من الممكن قياس الكميات الكونية بدقة قياسية، ومن ثم حسم كثير من المقولات الكونية، التي ظلت معلقة ردحاً طويلاً من الزمن. وبهذه التطورات المتسارعة صار بالإمكان الحسم بين النظريات الكونية، حتى تلك التي تتناول عملية الخلق والنشوء. لذلك، فإننا لا نبالغ إن قلنا إن علم الكون وصل درجة النضج العلمي، وأنه لا ضير البتة في اعتباره علماً دقيقاً ناضجاً شأنه في ذلك شأن فروع الفيزياء الراسخة، كالفيزياء النووية وفيزياء الحالة الصلبة والفيزياء الفلكية. ولا شك أن العقد القادم سيكون عقد علم الكون، حيث من المتوقع أن يشهد ازدهاراً لا مثيل له في السابق، ويتجاوز بدرجات ما حققه هذا العلم من تطورات وقفزات طوال القرن العشرين الفائت.

المراجع

إذا أراد القارىء الكريم أن يتوسع في علم الكون من دون الدخول في التفصيلات الفنية والرياضية، فيمكنه الرجوع إلى الكتب والمقالات الآتية (الموجودة في مكتبتي الخاصة):

١) هشام غصيب، سيرورة التوحيد في فيزياء المجال: الطريق إلى النسبية (من كوبرنيكوس إلى آينشتاين)، الجمعية العلمية الملكية والمنظمة الإسلامية للتربية والعلوم والثقافة، عمان، الأردن (١٩٨٨).

٢) هشام غصيب، دراسات في تاريخية العلم، دار التنوير العلمي والمؤسسة العربية للدراسات والنشر، عمان، الأردن (١٩٩٣).

٣) هشام غصيب، هل نشأ الكون من العدم؟ المضمون الفكري لنظرية النسبية العامة لآينشتاين، الأسس والمبادىء والاختبارات الأولى، المؤسسة العربية للدراسات والنشر، عمان وبيروت (١٩٩٩).

٤) Davies, P., God and the New Physics, Dent, London (1984).

٥) Davies, P., Superforce: The Search for a Grand Unified Theory of Nature, Heinemann, London (1984).

٦) Davies, P., The Mind of God, Simon and Schuster, London (1992).

٧) Eddington, A., The Expanding Universe, Cambridge Univ. Press (1952).

٨) Hawking, S., A Brief History of Time, Bantam, London (1988).

٩) Hawking, S., and Israel, W., 300 Years of Gravitation, Cambridge Univ. Press (1987).

١٠) Kaku, M., Hyperspace, Doubleday, London. (1994).

١١) Layzer, D., Constructing the Universe, Scientific American Library, New York (1984).

(١٢ Narlikar, J. V., The Lighter Side of Gravity, Freeman, New York (1982).

(١٣ Pagels, H., Perfect Symmetry, Bantam, New York (1986).

(١٤ Pagels, H., The Cosmic Code, Bantam, New York (1983).

(١٥ Parker, B., Eintein's Dream, Plenum, London (1988).

(١٦ Singh, J., Modern Cosmology, Pelican, Penguin (1970).

(١٧ Wald, R., Space Time and Gravity, Chicago (1977).

(١٨ Wheeler, J., A Journey into Gravity and Spacetime, Scientific American Library (1990).

(١٩ Davies, P., About Time: Einstein's Unfinished Revolution, Simon and Schuster, New York (1996).

(٢٠ Davies, P., and Gribben, J., The Matter Myth, Simon and Schuster, New York (1992).

(٢١ Chown, M., Afterglow of Creation: From the Fireball to the Discovery of Cosmic Ripples, Arrow, London (1993).

(٢٢ Callan, C., et. al., Cosmology and Newtonian Mechanics, American Journal of Physics, (1964).

(٢٣ Hawking, S., and Penrose, R., The Nature of Space and Time, Scientific American, (1997).

رواية الاتصال لكارل سيغان

(نشرت عام ٢٠٠١)

تعنى هذه المداخلة برواية «الاتصال» Contact للفلكي والكاتب الأميركي الألمعي، كارل سيغان. وقد نشرت هذه الرواية الممتعة للمرة الأولى عام ١٩٨٥، في خضم المناظرة الحامية الوطيس التي كانت تدور رحاها في الولايات المتحدة آنذاك بصدد إمكانية وجود حياة عاقلة خارج الأرض؛ تلك المناظرة التي كان لكارل سيغان الفضل الرئيسي في إثارتها. ويبدو أن سيغان وجد أن الوسيلة المثلى للتعبير عن الجانب الإنساني الاجتماعي لموضوع هذه المناظرة وعن طبيعة المجتمع المشغوف بهذا الموضوع هي الرواية، الشكل الأدبي الأكثر حداثة والأكثر تعبيراً عن روح الحقبة الرأسمالية من تاريخ البشرية.

ونبدأ تحليلنا لهذه الرواية المذهلة بطرح السؤال: كيف نصنف رواية غير تقليدية كهذه الرواية؟ هل ندرجها ضمن لون الخيال العلمي؟ فهي بالفعل تبدو كذلك على السطح. بل ولا شك أنها تتضمن عنصراً مهما من الخيال العلمي. لكن، هل إن هذا العنصر هو العنصر الجوهري في الرواية؟ إن الذي يشعل فتيل الرواية هو بالفعل حدث من عالم الخيال العلمي، أعني حدث استقبال رسالة راديوية عاقلة من الفضاء الخارجي، وبالتحديد من النجم الأزرق، «النسر الواقع» أو فيغا Vega، الذي يبعد عن الأرض حوالي ٢٦ سنة ضوئية. بيد أن جوهر الرواية لا يكمن في هذا الحدث. فالحدث مجرد الشعلة أو الفتيل. أما الانفجار الناجم عن ذلك، والذي

يشكل محور الرواية وموضوعها الرئيسي، فهو الوقع اللاهوتي الاجتماعي لهذا الحدث والنتائج اللاهوتية الاجتماعية لما أخذ يعرف بالرسالة، الرسالة العاقلة الأولى من الفضاء الخارجي. من ثم فإنه من الأدق تصنيف هذه الرواية على أنها رواية لاهوتية اجتماعية تعنى بالعلائق المتشعبة بين العلم والدين والسياسة في إطار يتشابك فيه الحب والمعرفة والتصوف العقلاني. أما الرسالة، فهي مجرد مناسبة للتعليق على المجتمع العالمي المعاصر، وتناقضاته، وجنونه، ولاعقلانياته، وتحيزاته المتنوعة، وإجرائيته ضيقة الأفق. إن كارل سيغان يريد أن ينبهنا إلى المأزق الخانق الذي يعانيه المجتمع العالمي الراهن. وهو يرى أن أزمة عالمنا المعاصر هي أزمة موقف خاطىء من الإنسان والطبيعة تترتب عليه أفعال جنونية. ومع ذلك، فهو يمنحنا «الأمل». إن رواية «الاتصال» مفعمة بالأمل والعاطفة الإنسانية الخافقة. فسيغان مدرك تماماً لعنت البشرية ونزوعاتها الجنونية، لكنه مدرك أيضا للجانب السامي النبيل في الإنسان، ذلك الجانب الذي يمكن الإنسان من الشعور الدافق بالحب ومن إبداع موسيقى كموسيقى بيتهوفن. إن سيغان يريد أن يبلغنا أن عالم الإنسان المعاصر يغوص بالفعل في مستنقع آسن من التدمير الذاتي، لكنه ليس حالة ميئوساً منها، وأن الإنسانية تستحق أن تنقذ، مع أن ذلك بالطبع يتطلب كفاحاً مضنيا من قبل النخبة الملتزمة، العلمية منها واللاهوتية أو الدينية. نعم، ليس فقط العلمية، وإنما أيضا اللاهوتية والدينية. لكن سيغان يميز بين نمطين رئيسيين من رجال الدين واللاهوت في الوسط الديني الأميركي: النمط المغلق النصي المتعصب والمتحجر ممثلا بشخصية رانكين، والنمط العقلاني الوجودي الذي يقبل العلم بعقله والدين بقلبه وينبع شعوره الديني من تجربة صوفية مباشرة وعميقة، ممثلا بشخصية جوس، الذي يجسد ما يمكن وسمه بالتصوف العقلاني. وبالطبع، فإن سيغان ينحاز إلى النمط الثاني ويكسبه وظيفة رئيسية في بنائه الروائي، بل وينهي روايته بإسباغ مشروعية عقلية أصيلة على مجمل رؤيته ورسالته. وتكمن المفارقة في أن بطلة الرواية، الفلكية الأميركية إليانور أروي (إلي)، التجسيد الأكبر في الرواية

للعقلانية المادية العلمية المدججة بمنهج الشك والريبة، تقودها تجربتها المريرة في التعامل مع الرسالة القادمة من فيغا إلى فقدان الثقة بزملائها ورفاقها من العلماء والعلميين، وإلى وضع ثقتها كاملة في رجل الدين واللاهوت المستنير، جوس. ولا يعني ذلك مطلقاً تخلي سيغان عن العقلانية العلمية. كل ما في الأمر أن سيغان يرفض أن يبسط الأمور. فهو يدرك جيداً مدى تشابك الحياة وتعقدها ومقاومتها للاختزال والحشر في قوالب منطقية ضيقة. كذلك، يدرك سيغان ببصيرته النفاذة الحاجة إلى تحالفات اجتماعية وفكرية وسياسية في المجتمع الأميركي تتخطى الشكل الآيديولوجي من أجل بناء قوة شعبية تتصدى لجنون الرأسمالية الأميركية.

إن رواية «الاتصال» إذاً هي رواية أقرب إلى الرواية اللاهوتية الاجتماعية منها إلى رواية الخيال العلمي. ومن جهة أخرى، فإنها تنتمي إلى صنف الروايات الفلسفية الفكرية، بمعنى أن أبطالها الحقيقيين هم الأفكار التي تدور حولها الرواية. لكنها مع ذلك تختلف عن الروايات الفلسفية الفكرية الكلاسيكية، مثل روايات دستويفسكي وملفيل وكافكا. فلدى العالم العقلاني، كارل سيغان، لا تتجسد الأفكار لحماً ودماً، كما في دستويفسكي. كما إنها لا تؤسطر (من أسطورة) ولا تتجسد دراميا، كما في ملفيل ودستويفسكي وكافكا. لكنها تعرض وتحلل بأقصى دقة ممكنة في رواية، وبالعلاقة مع الأحداث الاجتماعية والعلمية، على غرار ما يفعله مبسطو العلم في العادة. وينزع ذلك إلى جعل شخوص سيغان تجريدية بعض الشيء وخالية من ذلك التوتر الدرامي الحي الذي تتسم به الروايات الفلسفية الفكرية الكلاسيكية، مثل «الجريمة والعقاب» و الأبله» و « الشياطين» و «الأخوة كرامازوف» لدستويفسكي و «موبي ديك» لملفيل و «القلعة» و «المحاكمة» لكافكا. لكن ذلك لا يقلل من أهمية هذه الرواية الفريدة من نوعها حقا. فمن الواضح أن هدف سيغان من كتابة روايته هذه لم يكن خلق عمل فني أو أنموذج للإبداع الجمالي بقدر ما كان التعبير عن هم كوني اجتماعي بدقة كافية، وتوجيه رسالة ملحة إلى البشرية المعاصرة. وهو يذكرنا في سعيه ذلك بالفيلسوف الفرنسي جان بول سارتر، الذي سعى أيضا إلى تعميم أفكاره الفلسفية

وتوضيحها واختبارها وإشاعتها عبر وسيلة الأدب، وبخاصة الرواية والمسرح.

وينبغي الإشارة هنا إلى أنه، برغم صعوبة بعض فصول الرواية لغويا وعلميا وتشابك الأحداث وتعقد النقاشات والحوارات فيها، إلا أن الرواية تعد مثالاً للرواية المشوقة المثيرة. فهي تزخر بالمفاجآت والإثارة والأفكار والملاحظات الأصيلة الذكية، بحيث يصعب على المرء ترك الكتاب بعد أن يتخطى الفصل الأول. ذلك أن سيغان لا يتوانى لحظة واحدة عن إدهاش القارىء، وإنما يبقيه في حالة ترقب وانتظار حتى آخر فقرة من الرواية، حين تكتشف بطلة الرواية، إلي، أن والدها الحقيقي هو من كانت تظنه زوج أمها الفظ، وأن في قلب الوجود المادي يربض عقل إلهي، أو خالق عاقل، أو صانع عاقل خارق القدرة للأكوان المادية، كما تجلى في تحليل الرقم باي. إن سيغان ينهي روايته بفكرة صاعقة بحق: أن العدد اللانهائي من المنازل العشرية التي تشكل الرقم باي تتضمن رسائل أو آيات إلهية بصدد الكون وطبيعته. فكرة مذهلة بحق تترك القارىء بعد أن يفرغ من قراءة الرواية في حالة نشوة بروعة الوجود وتميزه.

بيد أن سيغان لا يكتفي بمفاجأة القارىء في نهاية روايته، وإنما يفاجىء قارئه عند كل منعطف في روايته. ويصل عنصر المفاجأة لديه أوجه في مضمون الرسالة الفضائية القادمة من جيرة النجم فيغا. إذ يتبين للجماعة العلمية العالمية، وعلى رأسها بطلة الرواية إليانور أروي، أن الرسالة الفضائية القادمة من جيرة النجم الأزرق تتكون من ثلاث شرائح أو طبقات. أما الطبقة الأولى فهي تتضمن مجموعة من الأرقام الأولية التي تعلن عن الطابع العاقل للإشارة الراديوية، أي عن كونها رسالة من كائنات عاقلة. وأما الطبقة الثانية، فهي عبارة عن تعبير رمزي عن أول بث تلفزيوني تم على سطح الأرض، وهو بث افتتاح أدولف هتلر لدورة الألعاب الأولمبية التي أقيمت في ألمانيا النازية عام ١٩٣٦. ويمكنكم أن تتصورا الصدمة التي أصيب بها كبار السياسيين والعلماء الذين تحلقوا حول شاشة السينما لرؤية نتيجة فك رموز الرسالة الفضائية التي طال انتظارها. لقد كانت هذه الفكرة غير

المتوقعة ضربة معلم من هذا الساحر الساخر الذكي، كارل سيغان. على أن المفاجأة الكبرى في الرسالة الفضائية كانت وجود طبقة ثالثة فيها تتضمن مجلداً كاملاً من النصوص، وبالتحديد من التعليمات المفصلة لبناء آلة معقدة، من دون تحديد غاية بنائها. وقد ثارت عاصفة من التكهنات حول دوافع الكائنات الفضائية ومراميها من ذلك. وذهب بعض الناس إلى الاعتقاد بأن هذه الآلة إن هي إلا قنبلة فائقة القدرة التدميرية ستدمر الكرة الأرضية بمجرد تشغيلها. وبرغم هذه المخاوف، قررت حكومات العالم المغامرة في تخصيص ترليونات الدولارات لبناء الآلة وبناء ما يلزم ذلك من صناعات جديدة. وقد تبين لاحقاً أن غاية هذه الآلة كانت فتح نفق أو معبر في الزمكان Wormhole يتم عبره الانتقال من مكان إلى آخر في المجرة في لمحة بصر، الأمر الذي مكن «إلي» وزملاءها من العلماء من القيام بجولة سياحية في المجرة في غضون يوم واحد لا أكثر.

ومن النقاط الفائقة الأهمية التي يثيرها سيغان في رواية «الاتصال» الأثر السببي (العلي) الهائل للمعرفة والمعلومات الموضوعية على المجتمع البشري. فإنه من المذهل حقا أن تحدث موجة تكاد لا تدرك من الإشعاع الكهرمغناطيسي مثل هذا الزلزال في المجتمع البشري، حين تكون مثقلة بالمعنى. ذلك أن مجرد فكرة وجود حياة عاقلة في الكون خارج الأرض قاد إلى ثورة في العلاقات الدولية صوب تخفيف حدة التوتر وتعزيز التعاون بين أمم الأرض. بل إن الأجواء الثقافية العالمية برمتها أصابها التحول العميق. وإني لأجد هذه العلاقة السببية بين المعرفة والبناء الاجتماعي، والتي يوضحها سيغان في روايته، في غاية الأهمية والخصوبة لعلم الاجتماع بعامة، والمادية التاريخية بخاصة. وأرى أنها تضيء جوانب مستترة وغير مدركة تماماً من طبيعة المجتمع البشري.

وينبغي الإشارة هنا إلى أن سيغان، العالم الموضوعي الجدلي، لا يرحم أحداً في عالم اليوم ولا يتحيز لأحد. فهو يوجه نقداً لاذعاً للجماعة العلمية العالمية التي ينتمي مهنيا إليها لا يقل عن نقده للحكومات، وخصوصا للإدارة الأميركية ورموزها،

وللأوساط اللاهوتية والدينية في الولايات المتحدة الأميركية. بل إنه لا يرحم بطلة الرواية نفسها، إلي أروي، التي تدرك في النهاية كم من أحكامها ومعتقداتها بصدد الناس وأفراد عائلتها وزملائها ومعارفها كانت خاطئة وسطحية وأحادية الجانب.

وينبغي الإشارة أيضاً إلى أن مخيال كارل سيغان لا يجمح قط في الرواية خارج حدود العلم السائد، وبخاصة حدود ما تسمح به نظرية النسبية العامة. وعلى سبيل المثال، فإنه حين استعمل فكرة المعابر الزمكانية Wormholes المستقرة والتي تسمح بالعبور فيها بحيث يتمكن المرء من الوصول إلى مناطق بعيدة في المجرة في لمح البصر، فقد استشار في إمكانية ذلك كيب ثورن، أحد كبار الخبراء في فيزياء الثقوب السوداء والمعابر الزمكانية. وقد استجاب ثورن لهذا التحدي، إذ دفعته هذه الاستشارة إلى نشر بحث متخصص عام ١٩٨٧ في الدورية الأميركية للفيزياء Americal Journal of Physics عالج فيه إمكانية وجود معابر زمكانية مستقرة وشروط استقرارها. وتوصل إلى نتيجة مهمة مفادها أن هذه المعابر ممكنة فعلا إذا توافر نوع غريب من المادة Exotic Matter تناقض خصائصه أغلب خصائص الأشكال المألوفة للمادة. وتكهن ثورن بأن هذه المادة الغريبة ممكنة الوجود وفق بعض نظريات المجال الموحد الكونتمية. فهذا البحث المذهل، الذي قيض لأفكاره أن تزدهر في التسمينيات، أساسه رواية سيغان «الاتصال». والشيء نفسه يقال بصدد الأفكار العلمية الأخرى التي تتضمنها الرواية، مثل فكرة وجود ثقبين أسودين عملاقين في مركز مجرتنا، وفكرة إمكانية وجود حضارات مجرية ينوف عمرها على ٥٠٠ مليون عام ووصلت حداً من التقدم مكنها من تصنيع مجرات جديدة بكاملها من أجل التعويض عن المادة التي يخسرها الكون بفعل تمدده. كل هذه الأفكار تجد مكانها الطبيعي في العلم السائد راهنا، والذي ساهم سيغان مساهمة فعالة في بنائه.

إن هناك الكثير الذي يمكن قوله بصدد هذه الرواية المتميزة، لكن الوقت المتاح لهذه المداخلة لا يسمح بذكرها والتعليق عليها. وما على المستمع إلا أن يحاول اقتناء الرواية وقراءتها والغوص في تفاصيلها المثيرة.

وأختتم مداخلتي بالقول إن رواية «الاتصال» لكارل سيغان هي رواية فكرية مؤثرة فعلاً. وهي منجم حقيقي من الأفكار والتبصرات الطازجة المثيرة بصدد مصير الإنسان وبنية الكون، والتي لا يجوز للبشرية المعاصرة أن تهملها، لأنها تمس بقاءها ومعنى وجودها. وشكراً.

لغز الثابت الكوني

(نشر عام ٢٠٠٣)

فرضية الثابت الكوني

بدأ علم الكون بوصفه علماً حين طبق آينشتاين نظريته في النسبية العامة على الكون بوصفه كلاً. وكان ذلك عام ١٩١٧، أي بعد عامين من نشره ورقته المشهورة في النسبية العامة. وكان طموح آينشتاين أن يضع أنموذجاً للكون يجسد مجموعة من المبادئ، التي اعتبرها آينشتاين شبه مسلمات ومقولات أساسية. ومن ضمن هذه المبادئ:

(١) الارتباط العضوي بين الزمكان والمادة، بحيث تنبع خصائص الواحد من الآخر. إذ ارتأى آينشتاين أن خصائص المكان تحديداً ينبغي أن تنبع من توزيع المادة فيه، وذلك تأكيداً لما يسمى مبدأ ماخ، وهو المبدأ الذي سبق أن وضعه الفيلسوف والفيزيائي النمساوي، إرنست ماخ، في سياق نقد نظرية نيوتن. وعلى هذا الأساس، فقد اعتبر آينشتاين المكان محدوداً من حيث الحجم من دون أن يكون له نهايات وحواف، على غرار سطح الكرة في بعدين. لذلك أسمى آينشتاين هندسة الكون كرية أو كروية، ورأى في ذلك مخرجاً منطقياً مرضياً من مآزق الكون النيوتني اللانهائي. فكتلة كون آينشتاين وحجمه وكثافته كلها محدودة من دون أن يقضي ذلك بوجود نهايات أو حواف للمكان.

(٢) اعتمد آينشتاين ما يسمى مبدأ كوبرنيكوس في نظرته إلى توزيع المادة. وينص هذا المبدأ على أنه ليس هناك ما يميز أي نقطة مكانية عن أي نقطة أخرى، الأمر الذي قاد آينشتاين إلى فكرة تجانس مادة الكون موضعاً واتجاهاً. وهذا يعني

أن كثافة المادة الكونية لا تتغير من نقطة إلى أخرى ولا من اتجاه إلى آخر. وسنناقش هذه الفكرة لاحقاً بالتفصيل، بالنظر إلى أهميتها الفائقة.

(٣) افترض آينشتاين أن المكان ساكن على الصعيد الكوني، بمعنى أنه لا يتقلص ولا يتمدد بوصفه كلاً كونياً واحداً. إذ اعتبر آينشتاين هذه الفكرة الموروثة بديهية.

وكم كانت صدمة آينشتاين كبيرة حيث تبين له استحالة هذا الأنموذج وفق معادلاته المجالية، بمعنى انعدام الانسجام المنطقي بين المبادئ التي قام عليها أنموذجه وبين معادلاته المجالية. كان على آينشتاين إما أن يضحي ببعض مبادئ أنموذجه وإما أن يعدل معادلاته المجالية، فاختار الإجراء الثاني. لقد عز عليه التضحية بأي من هذه المبادئ، التي اعتبرها أكثر يقينية من معادلاته المجالية التي كان قد اكتشفها للتو. فبرغم إيمانه القوي بأفكاره الجديدة، وبرغم ثوريته الطافحة، إلا أنه لم يستطع هذه المرة الصمود في وجه الموروث وتحيزاته الراسخة. وكم تندم آينشتاين لاحقاً على اتخاذه الخيار الثاني. إذ اعتبره أكبر غلطة ارتكبها في حياته. لكن، هل كان بالفعل كذلك ؟ وكيف عدل آينشتاين معادلاته المجالية حتى تنسجم ومبادئ أنموذجه؟ أقنع آينشتاين نفسه بأن أنموذجه يصبح ممكناً إذا أضاف إلى معادلاته المجالية حداً يقيس أثره ثابت أسماه آينشتاين الثابت الكوني. ومغزاه الفيزيائي هو الآتي: فلئن كان أثر المادة الكتلية العادية هو الجذب، ومن ثم التقلص المكاني، فإن أثر الثابت الكوني هو التنافر، أي التمدد المكاني، وكأنه يمثل قوة جاذبية نافرة. وتكون محصلة الأثرين حالة السكون والاستقرار والثبات التي سعى إليها آينشتاين. هذا هو الدافع الذي حدا آينشتاين أصلاً إلى افتراض مفهوم الثابت الكوني. وسرعان ما انتفى الدافع، لكن المفهوم أبى أن ينتفي أو ينحسر. ولنر كيف تم ذلك.

عام ١٩٢٢، وضع الروسي، ألكساندر فريدمان، أنموذجاً كونياً حلاً لمعادلات آينشاتين المجالية الأصلية الخالية من الثابت الكوني، أبقى فيه على افتراض تجانس المادة الكونية، لكنه أسقط افتراض سكونية الكون، الأمر الذي مكنه من إيجاد حل منطقي لمعادلات آينشتاين من دون الحاجة إلى الثابت الكوني. وكون فريدمان هو كون متمدد أو متقلص. وفي عام ١٩٢٧، تمكن الفيزيائي البلجيكي، ليميتر، من وضع

أنموذج كوني متمدد ارتكازاً إلى معادلات آينشتاين المعدلة، التي تتضمن الثابت الكوني، مؤيداً بذلك نتائج فريدمان ومبيناً أن الثابت الكوني لا يقود بالضرورة إلى كون ساكن. ثم جاءت اكتشافات الأمريكي إدوين هابل التجريبية والرصدية تدعم أنموذجي فريدمان وليميتر، وتشير بقوة إلى أن الكون آخذ في التمدد، الأمر الذي يتبدى في التباعد المطرد للمجرات عن بعضها. وقد أقر آينشتاين ببطلان الدافع الذي ألجأه إلى افتراض الثابت الكوني، لكنه استنتج من ذلك بطلان الافتراض ذاته، بل واعتبره أكبر خطأ وقع فيه في حياته. ولم يكن يدري أن اكتشافه الثابت الكوني يعد أخطر اكتشافاته على الإطلاق وأساساً لفيزياء المستقبل، فيزياء القرن الحادي والعشرين.

عام ١٩٣٠، اكتشف الفلكي الإنجليزي، السير آرثر إدنغتون، أن إدخال الثابت الكوني في معادلات آينشتاين المجالية لا يحل إشكال آينشتاين لأنه لا يضمن سكونية المكان. إذ بين أن حلول المعادلات المعدلة هي أيضاً من صنف حلول فريدمان، وأنها تقضي بتمدد الكون أو تقلصه، وأن الكون الساكن، الذي تصوره آينشتاين، غير مستقر، بمعنى أنه ينهار أو يبدأ بالتمدد لأي هزة أو ذبذبة داخلية على الصعيد الكوني. وقد عزز هذا الاكتشاف شعور آينشتاين بالخطأ الفادح الذي ظن أنه ارتكبه، لكنه، من جهة أخرى، دعم مشروعية الثابت الكوني، حيث بين أنه ينسجم وحقيقة أن الكون يتمدد. كذلك تبين أن معادلات آينشتاين المجالية المعدلة، التي تضمنت الثابت الكوني، هي الترجمة الأكثر عمومية لمبادئ النسبية العامة، بمعنى أن المعادلات الأصلية غير المعدلة هي حالة خاصة من المعادلات المعدلة. من ثم، فإن الثابت الكوني ليس مجرد حد مصطنع أدخله آينشتاين عنوة في معادلاته لإنقاذ تحيز تقليدي، وإنما هو عنصر أساسي في هذه المعادلات يعبر عن المبادئ الجوهرية في النسبية العامة. بذلك، تحولت المشكلة من تبرير إدخال هذا الثابت في معادلات آينشتاين إلى تبرير غيابه في أنموذج فريدمان، بمعنى أن افتراض غيابه لم يعد شيئاً طبيعياً، وأن تحديده أضحى مسألة أساسية في علم الكون على الصعيدين النظري والعملي.

لكن أمر الثابت الكوني لم يقف عند هذا الحد. فمع تنامي ميكانيك الكونتم ونظرية المجال الكونتمي بدأت تبرز مشكلة الخلاء وخصائصه الفيزيائية. إذ تبين أولاً أن الخلاء يتضمن مجالات غير مألوفة تسمى المجالات غير المتجهة، وهي تختلف في خصائصها الجاذبية كلياً عن المجالات المادية المألوفة. إذ تبين أنها تؤثر بضغوط سالبة، بعكس المادة المألوفة التي تؤثر بضغوط موجبة، الأمر الذي يجعل جاذبيتها تنافرية، تماماً كما هو الحال مع الثابت الكوني. بل إنها تظهر في معادلات آينشتاين المجالية على صورة ثابت كوني. ومن جهة أخرى، فقد تبين أن مبادئ ميكانيك الكونتم تحظر أن يكون الحد الأدنى لطاقة الخلاء صفرا، فالخلاء يمج بالطاقة حتى بعد إزالة كل أشكال المادة منه. وهذه الطاقة أيضاً تؤثر بضغوط سالبة، الأمر الذي يجعلها تؤثر بجاذبية نافرة وتظهر في معادلات آينشتاين على صورة ثابت كوني. بذلك، فهناك ثلاثة مصادر للثابت الكوني: طبيعة المكان، المجالات غير المتجهة، وطاقة الخلاء. لكن هذه الاكتشافات النظرية أدخلت الفيزياء برمتها في نوع من المأزق يعتبره كثير من الفيزيائيين اليوم المأزق الأكبر الذي تمر فيه فيزياء اليوم. وأساس هذا المأزق هو التناقض الصارخ بين فيزياء الجسيمات والرصدات الفلكية. إذ تدل الأخيرة على أن مقدار الثابت الكوني لا يتجاوز حداً معيناً، وأن هذا الحد لا يتجاوز واحداً مقسوماً على عشرة للقوة مائة وعشرين من المقدار الذي اشتق من فيزياء الجسيمات (أو ما يسمى نظرية المجال الكونتمي). وبتعبير آخر، فإن نظرية المادة الحديثة، التي ترتكز على حشد كبير من التجارب والتحليلات والبيانات، تقود إلى مقدار للثابت الكوني يفوق المقدار الفعلي، الذي تشير إليه الرصدات الفلكية، بعشرة للقوة مائة وعشرين مرة. إنه لأمر مربك حقاً، حيث إن الفرق صارخ. إنه بالفعل يشكل أكبر تحد اليوم لنظرية المادة. هناك تكهنات بصدد أسباب هذا الفرق المذهل، لكنها ليست أكثر من ذلك. ومن جهة أخرى، فإنه من الضروري حسم مسألة ما إذا كان الثابت الكوني صفراً أم لا. إننا نعلم أن مقداره قريب من الصفر مقارنة بتوقعات نظرية المادة، ولكن هل هو صفر حقاً؟ لقد دلت الرصدات الأخيرة إلى أن الكون يتسارع في تمدده. وهذا يشير إلى أن الثابت الكوني

ليس صفراً. وهذا يعقد أمر تفسير الثابت الكوني كثيراً. إذ علينا أن نفسر كيف تلغي الإسهامات المتنوعة للثابت الكوني بعضها بعضاً، من دون أن تفعل ذلك كلياً، بحيث تبقى مخلفات تسرع الكون. هذا هو التحدي الذي يجابه فيزياء اليوم: كيف نفسر صغر مقدار الثابت الكوني مقروناً بكونه ليس صفراً ؟

لغز الطاقة الكونية الداكنة

كما أسلفنا، فقد كان أول أنموذج واقعي للكون هو الأنموذج الذي وضعه الرياضي الروسي، ألكساندر فريدمان، عام ١٩٢٢، على أساس المعادلات الأصلية غير المعدلة لآينشتاين في نظرية النسبية العامة. ويمكن القول إن هذا الأنموذج ما زال هو الأنموذج المعياري المتبع حتى يومنا هذا. ويفترض هذا الأنموذج أن مادة الكون متجانسة في توزيعها. وتعطي معادلات آينشتاين المجالية نتيجة مفادها أن الكون إما أن يكون مغلقاً، بحيث يتمدد من حالة النقطة المنفردة، حتى يصل حدا يتوقف عنده التمدد، ويبدأ الكون بعده بالانكماش، وإما أن يستمر في التمدد إلى ما لا نهاية. ويعتمد ذلك على كثافة مادة الكون. فإذا كانت دون حد معين، يسمى الكثافة الحرجة، ظل الكون يتمدد إلى ما لا نهاية. أما إذا فاقت هذا الحد، توقف التمدد عند حد وبدأ الكون بعده بالانكماش.

ولكن، كيف نقيس كثافة مادة الكون؟

ابتداء كانت هناك طريقتان: تقدير عدد المجرات في الكون ومتوسط كتلها، أو قياس معدل تباطؤ تمدد الكون عبر مقارنة سرع المجرات البعيدة بسرع المجرات القريبة. فالأولى تعبر عن سرعة تمدد الكون قبل مليارات السنين، في حين أن الثانية تعبر تقريباً عن الوضع الحالي. لكن حركة المجرات وعناقيدها سرعان ما بينت أن الكون يعج بالمادة غير المرئية، وأن المادة المرئية أو المشعة لا تشكل سوى نسبة صغيرة من مجمل مادة الكون.

من ثم، برزت مشكلة تحديد كتلة المادة غير المرئية وطبيعتها. وتبين، من دراسة نسبة الهيدروجين الثقيل في الكون، أن جل هذه المادة من نوع مجهول يختلف نوعياً

عن المادة المألوفة، التي تتكون منها المجرات. ومن جهة أخرى، فقد ظلت عملية قياس بعد المجرات البعيدة جدا عنا تشكل معضلة كبرى طوال القرن العشرين. لذلك، ساد الاعتقاد بأن مسألة حسم مآل التمدد الكوني مسألة جد معقدة وصعبة، وقد تكون أقرب إلى المستحيل. لكن تطورات هائلة على الصعيدين النظري والتجريبي حدثت في نهاية القرن العشرين قلبت هذا الوضع رأسا على عقب.

لقد اتضح نظريا أن ما يسمى إشعاع الخلفية الذي يملأ الكون بصورة متجانسة يحمل في طياته معلومات كونية حول هندسة الكون وتوزيع المادة فيه وحالته الحركية. لكن استخراج هذه المعرفة يستلزم دقة متناهية في القياس، الأمر الذي جعل الكثيرين في فترة من الفترات يعتقدون بأن ذلك مجرد أضغاث أحلام نظرية. لكن العالم فوجئ، مع مطلع الألفية الثالثة، بابتكار أساليب جديدة للقياس مكنت العلماء من استخراج المعلومات الكونية اللازمة، وفي مقدمتها أن المكان غير منحن، أي مستو، بمعنى أنه يطيع هندسة أقليدس المستوية، وكأنه سطح مستو في ثلاثة أبعاد. وهذه النتيجة تدعم نظرية الانتفاخ الكوني. فهي تؤكد أن كثافة مادة الكون تساوي الكثافة الحرجة تماما، بالضبط كما تتنبأ النظرية المذكورة. لكن القياسات ذاتها تشير إلى أن المادة الكتلية ، سواء كانت مرئية أو غير مرئية، لاتتجاوز نسبتها ستة وعشرين بالمائة من الكثافة الحرجة.

ما طبيعة الأربعة والسبعين بالمائة المتبقية؟

ومن جهة أخرى، بدأت تطبق، في نهاية الألفية الثانية، طرائق قياس في غاية الدقة على المجرات البعيدة. وكم كانت المفاجأة كبيرة حين تبين أن التمدد الكوني آخذ في التسارع، وذلك بعكس التوقعات جميعا. إذ كان هناك إجماع على تباطؤ التمدد الكوني، وانصب الاختلاف على مدى هذا التباطؤ. لكن النتائج جاءت مغايرة لكل التوقعات. والسؤال هو: ما الذي يدفع التمدد الكوني إلى التسارع، وكيف يرتبط ذلك بكون المكان غير منحن؟!

إن تسارع تمدد الكون يدفعنا لا محالة إلى فكرة أن الكون لا يحوي المادة الكتلية

الجاذبة شبه المألوفة فقط، وإنما يحوي أيضا مادة غريبة نافرة، إن جاز التعبير، بمعنى أنها تؤثر بمجال جاذبي تنافري يدفع المكان إلى التسارع في تمدده بدلا من التباطؤ. وقد أسميت هذه المادة الغريبة حقا الطاقة الداكنة. وفي ضوء التحليل أعلاه، فإن الأربعة والسبعين بالمائة المتبقية من مادة الكون المشار إليها أعلاه هي طاقة داكنة تدفع تمدد الكون إلى التسارع. من ثم، فإن المادة المرئية لا تشكل سوى أربعة بالمائة من مادة الكون، في حين تشكل المادة غير المرئية الجاذبة حوالي اثنين وعشرين بالمائة. أما حصة الأسد فتذهب إلى الطاقة الداكنة المسرعة للتمدد.

ولكن، ماهي بالضبط هذه الطاقة الداكنة؟

هناك العديد من الأفكار النظرية في هذا الصدد. فهناك من يقول إنها طاقة الخلاء، التي تتمظهر على صورة ثابت كوني في معادلات آينشتاين المجالية. وهذا الثابت هو المسؤول عن التسارع المشار إليه.

وهناك من يقول إنها مادة من نوع جديد. وقد أطلقوا عليها اسم الخلاصة أو الزبدة. ولاندري بالضبط ماهي. فالدراسات في هذا المضمار مازالت في بداياتها وتعد بمفاجآت مذهلة لن يطول أمد تحققها.

هشام غصيب

الأعمال الفكرية

2

تشكّل الأعمال الفكرية (١٩٧٦ـ ٢٠٠٦) للمفكر الأردني العربي هشام غصيب، حصيلة نضال فكري دؤوب من أجل بناء الأعمدة الفلسفية للثقافة التقدمية في الأردن والعالم العربي.

وفي مواجهة خياريّ "استيراد" الأفكار الجاهزة والردة السلفية، ، أطلق د.غصيب، جديده، المتمثل في مشروع الاستغراب، ومضمونه الأساسي التملك النقدي للفكر الغربي، تاريخاً واتجاهات وصراعاً، من موقع التجاوز.

استغراب د.غصيب هو «سيرورة استملاك حركة التحرر العربية، تجربةَ الثورة الثقافية العلمية الكبرى التي صاحبت نشوء الحضارة الرأسمالية وتطورها، من موقع النقيض في النظام الرأسمالي العالمي، أيّ من موقع الثورة العالمية والتحرر القومي».

وهذا الضرب من "الاستغراب" ليس جديداً تماماً، إذ شكّل، بالفعل، مضمون جوانب من مساهمات ماركسيين عرب كبار من أمثال سمير أمين وصادق جلال العظم ومهدي عامل وغالب هلسا ـ السلف الأردني الكبير لهشام غصيب ـ، لكن ميزة الأخير هي، بالإضافة إلى اشتغاله المثابر على هذا المحور، هي ضخامة المشروع الذي انجزه على مدار ثلاثين عاماً من الكدح الفكري ـ المتواصل.وقارىء اعمال د.غصيب، يفاجأ بطابعها الموسوعي الذي لم يترك فكرة أو مفكراً في تاريخ الفلسفة الغربية، من دون معالجة عارفة ناضجة نقدية.

إلاّ أن غصيب، لم يكن، خلال هذه السنوات الثلاثين، منفصلاً عن الصراعات السياسية والفكرية الحية، لائذا في مكتبه لانجاز عمل موسوعي، بل كان دائماً في قلب تلك الصراعات. وقد أنجز موسوعته في "الاستغراب" في خضم المعارك الفكرية والسياسية التي شهدها الأردن والعالم العربي، خلال الفترة، وتلظى بنارها.

ناهض حتر

يشتمل هذا الجزء على الأعمال التالية:

دراسات في تاريخية العلم: ١٩٩٢، هل نشأ الكون من العدم؟ المضمون الفكري لنظرية النسبية العامة لآينشتاين (الأسس والمبادئ والاختبارات الاولى)، ١٩٩٩، هل يمكن أن ينشأ الكون من العدم؟ (علم الكون: آليات تطوره)، ٢٠٠١، رواية الاتصال لكارل سيغان، ٢٠٠١، لغز الثابت الكوني، ٢٠٠٣.

دار وردة الأردنية للنشر والتوزيع
P.O. Box 927651 Amman 11190 Jordan
Tel. +962 6 5606 263 - Fax + 962 6 5606 362
E-mail : wardbooksjo@yahoo.com