2

لعبة الدائرة

ليست المشكلة في أنهم لا يستطيعون رؤية الحل. إنها تكمن في أنهم لا يستطيعون رؤية المسألة.

ـ ج. ك. شسترتون

يمكن، وبلا مبالغة، أن نطلق على تاريخ النظريات الكونية اسم تاريخ الهواجس الجماعية والانفصامات التي يمكن التحكم فيها.

ـ آرثر كوستلر، كتاب The Sleepwalkers

★ ★ ★

إذا خرجْت في إحدى الليالي وولّيت وجهك شطر السماء، فقد تعتقد في البداية أن الفلكيين لم يتجشموا سوى القليل من المشاق للتوصل إلى نموذج دقيق ومترابط منطقياً للحركة الكوكبية. فالكواكب تصدر نوراً متألقاً مستقراً، وما إن يدلّك شخص عليها في السماء، حتى تجد أن من السهل عليك تمييز الكواكب عن النجوم المتلألئة. وبمرور الوقت، يبدو أن الكواكب تجاري الحركة المنتظمة غير المعقدة للنجوم التي ترتفع بثبات نحو الأعلى من الأفق الشرقي، ثم تنحدر في طريقها إلى الأسفل باتجاه الأفق الغربي. إنها دورة بسيطة منتظمة مدتها أربع وعشرون ساعة. بيد أنه بمرور

obeikandl.com

الأيام، والأسابيع، والشهور، يزداد استحسانك لأصل كلمة planet[1]، وهي كلمة يونانية معناها «المتجول». الكواكب تتجول فعلاً. ومع أن حركاتها غير منتظمة على المدى الطويل، فإن هذه الحركات لا يمكن وصفها بالشذوذ عن الحركات المنتظمة بقدر كبير. فهناك قوانين تحكم حركات هذه الأجرام السماوية المتجولة، لكنها قوانين غاية في الإثارة. وفيما يتعلق بقدماء اليونان، لا بد أن يكون بدا لهم أن الخالق كان مصمماً على إرباك محاولاتهم الرامية إلى تفسير الحركة الكوكبية.

الشمس، أيضاً، تتصرف إلى حد ما مثل كوكب متجول، ففي شهر تظهر في برج العذراء، لكننا، بعد بضعة أسابيع، نراها زحفت إلى برج الميزان. (من الواضح أن الأبراج لا تكون مرئية عندما تكون الشمس موجودة فيها ؛ لذا استعمل القدماء موقع القمر بين النجوم لاستنتاج البرج الذي تقع فيه الشمس). إن حركة الشمس عبر الخلفية النجمية تجري تدريجياً ـ فهي تسير درجة واحدة وسطياً في اليوم ـ لكن حركتها تتسارع خلال فصلي الخريف والشتاء، ثم تتباطأ في الربيع والصيف. وتعرّف السنة بأنها الزمن الذي تستغرقه الشمس لإتمام دورة كاملة في السماء. الطريق السنوي للشمس لا يوازي الطريق اليومي للنجوم، لكنه يميل عليه بنحو 23 درجة. وبالطبع، فإن هذه الحركة الشمسية على الستارة الخلفية النجمية وهمية؛ فحركة الأرض في مدارها تجعل الشمس تبدو زاحفةً عبر الأبراج. لكن القدماء، باستثناء أرستارخوس وواحدٍ أو اثنين من أتباعه، لم يصدقوا ذلك.

إن المسارات السماوية للكواكب قريبة عموماً من الطريق الشمسي، لكن حركاتها مختلفة عن حركة الشمس. فعطارد والزهرة لا يبتعدان كثيراً عن الشمس في السماء ؛ وهذان الكوكبان يتذبذبان إلى الأمام وإلى الخلف، فهما يسبقان الشمس أحياناً، ويتخلفان عنها أحياناً أخرى خلال تحركها.

(1) ترجم العرب هذه الكلمة إلى «كوكب»، أو «كوكب سيار». (المعرّب)

كلاهما غير مرئي، لا في وهج النهار ولا في منتصف الليل، لكن كلاً منهما يظهر في الفجر «كنجمة» صبح، أو في الغسق «كنجمةِ» مساء. أما الكواكب الأخرى فتسير بسرعات مختلفة نحو الغرب عبر الأبراج. ومن وقت إلى آخر، يسطع كل منها، ويقوم طوال مدة محدودة بعكس اتجاه حركته، لتصبح حركة تراجعية باتجاه الشرق.

لم يصدق القدماء البتة أن الكواكب كانت تتوقف فعلاً في الفضاء، ثم تتراجع طوال مدة من الزمن. افترضوا أن ثمة آلية تجعل الحركة تبدو وكأن الكواكب تتراجع من نقطة مميزة. لقد آمنوا أيضاً بنظام أرسطوطاليس الذي تتحرك فيه الكواكب بسرعة ثابتة وأفلاك دائرية. وهنا يكمن التحدي الذي يبدو أنْ لا قِبَلَ لمصممي النماذج الفلكية بمواجهته، وهو تفسير الحركات الشاذة المرصودة للكواكب، دون المسّ بمبدأ أرسطوطاليس الذي يتميّز بالحركة الدائرية والسرعة الثابتة. هذا وإن النجاح التقريبي لمصممي النماذج هؤلاء دليل على إبداعهم.

لم يحرز أرستارخوس نجاحاً ولم يُمْنَ بفشل في ميدان الحركات الكوكبية. فبعد أن رحل أرستارخوس عن الدنيا قرابة سنة 230 قبل الميلاد، دبّ الضعف في فرضيته المتعلقة بالنظام الشمسي المركز. فلم يقم أرستارخوس، أو الذين أتوا بعده مباشرة، بدعم النموذج الشمسي المركز بآليات رياضية ملائمة. ثم إن هذا النموذج لم يحقق الحلم الذهبي لعلم الفلك القديم، ألا وهو التنبؤ الدقيق بمواقع الشمس والقمر والكواكب. ربما كانت فرضية النظام الشمسي المركز مثيرة للاهتمام والفضول، لكنها كانت تفتقر إلى القوة التنبؤية، ولهذا كانت، بكل بساطة، غير عملية.

لقد سلك تاريخ النظام الأرضي المركز مساراً مختلفاً جداً. ففي القرن الثاني قبل الميلاد، أدلى الراصد المشهور هيبارخوس Hipparchus بدلوه في نظرية السماوات الأرضية المركز. هذا و لم يكن يُعرف عن هيبارخوس سوى القليل خارج مجال أرصاده الفلكية. وقد عاش في أوقات مختلفة في شمال تركيا، وفي جزيرة رودس الكائنة في أقصى الشرق لبحر إيجة، وربما

في الإسكندرية. مات بعد سنة 127 قبل الميلاد، وهذه السنة هي تاريخ آخر رصد سجّله. وفيما يتعلق بأرستارخوس، فقد كان يقتني رسالة واحدة فقط من الرسائل الأصلية التي خلفها هيبارخوس، وهي لا تقدم أي معيار لمدى أهميتها في عمله.

كان هيبارخوس أول فلكي وعى الصلة الوثيقة بين النظرية والرصد، ثم إنه بيّن كيف أن كلاً منهما يختبر صحة الآخر. وفي ذلك كشف للعيوب والتناقضات التي توجد في معرفتنا. وخلافاً لأرستارخوس قبل قرن من الزمان، لم يكن هيبارخوس مهتماً كثيراً بالأسلوب من أجل الأسلوب، لكنه كان معنياً بالكيفية التي يفسر بها الأسلوب الظواهر الطبيعية السماوية. وهذا هو السبب في أن هيبارخوس كان راصداً لا يمِلّ ولا يكل من الرصد. كان يعرف أنه دون أن تكون لدينا بيانات رصدية متميزة لدعم النظريات، فهذه النظريات لن تكون اكثر من أحجيات عن الطبيعة، ولن تكون، بحال من الأحوال، متصلة بالواقع اتصالاً وثيقاً. فالنظرية، بلا حقائق تدعمها، تشبه تمثالاً صنع نصفه ؛ قد يكون مبشراً بتمثال رائع، لكنْ يتعين علينا انتظار إتمامه للحكم عليه.

وإضافةً إلى قيام هيبارخوس بقياس مواقع الكواكب بدقة أعلى بكثير من أي شخص آخر قبله، فربما كان هو الذي أعدّ أول كاتالوك (فهرس) موسع عن النجوم. هذا الكاتالوك ـ الذي لا نعرف وجوده إلا عن طريق تقارير الفلكيين الذين أتوا من بعده ـ كان يعتبر هدراً كاملاً للجهد من وجهة نظر بعض معاصريه: فكانت النجوم تشغل مواقع نسبية ثابتة، ولم يكن ضوؤها متغيراً أبداً، ومن ثم، فما هي الفائدة من سرد هذه المعلومات عنها؟ بيد أن ثمة حادثة سماوية مشهورة هي التي ربما أثارت اهتمام هيبارخوس وجعلته يخرج كاتالوكه. ففي سنة 134 قبل الميلاد، تغيرت فجأة الأشكال المألوفة المتألقة للأبراج السماوية؛ ولمع نجم «جديد» في السماء. كان هذا حادثاً لم يسبق له مثيل، وبدا أنه يخالف الإيمان الشائع والراسخ في ذلك الوقت بعدم قابلية السماوات للتغير. ولا نعلم ما إذا كان النجم الجديد مستعراً nova ـ وهو نجم عاتم حارّ ينفجر بين حين وآخر ـ أو كان مذنباً بلا ذنب. ظهر

وسطع مدة من الزمن، ثم خبا نوره. (لو كان هذا الجرم «نجماً»، لكان موجوداً عندما لاحظه هيبارخوس، لكنه كان معتماً جداً إلى درجة يستحيل فيها رؤيته قبلاً؛ إن «الولادة» الحقيقية لنجم ليست عملية تحدث بين ليلة وضحاها، لكنها تدوم على مدى أجيال من البشر). ويقدم المؤرخ بليني Pliny في كتابه بعنوان التاريخ الطبيعي Natural History، الوصف التالي للنجم الجديد:

> اكتشف هيبارخوس نجماً جديداً ظهر في حياته؛ وقادته حركة هذا النجم في خط تألقه إلى التفكير فيما إذا كان هذا مجرد خطأ عابر، أم أن النجوم التي نظن أنها ثابتة، تتحرك أيضاً؛ ومن ثم خطا خطوة جريئة قد يحاسبها عليه حتى الإلّه. فقد تجرأ على وضع جدول نجمي للأجيال القادمة، ثم وجه إساءة إلى الأجرام السماوية بوضع أسماءٍ لها أدرجها في جدول، وابتكر آلية تسمح بتحديد مواقعها المتعددة وسطوعها، وذلك كي يكون بالإمكان، بدءاً من ذلك الوقت فصاعداً، عدم الاقتصار على معرفة ما إذا كانت النجوم تفنى أم تولد فحسب، بل أيضاً معرفة ما إذا كان بعضها في حالة حركة، وتحديد ما إذا كان سطوعها متزايداً أو متناقصاً. وبهذا يكون قد سلّم السماوات ميراثاً إلى الجنس البشري، وافترض أن لكل شخص في هذا العالم حصة في هذا الإرث.

بعد تسعة عشر قرناً، قام الفلكي الإنكليزي إدموند هالي Edmond Halley، الذي سُمِّيَ مذنب هالي الشهير باسمه، بمقارنة المواقع الحالية للنجوم بالمواقع المسجلة في كاتالوك قديم، ربما كان يستند إلى كاتالوك هيبارخوس، وأثبت أن بعض النجوم تقوم فعلاً بحركات خاصة بها عبر السماوات. وعندما كان هيبارخوس يجمع البيانات اللازمة لكاتالوكه النجمي، قام هو، أيضاً، بتحليل عينة من النجوم التي دُرِسَتْ في القرون السالفة. ومن الغريب أن تكون كل تلك النجوم في عيّنته انزاحت عن مواقعها الأصلية في السماء. لم تكن هذه الانزياحات عشوائية، كتلك التي كشفها هالي مؤخراً، لكنها كانت منهجية. وحدثت كما لو أن الكرة السماوية المرصعة بالنجوم مالت قليلاً بالنسبة إلى الأرض، وهذا هو السبب في تغير إحداثيات كل نجم.

يستند نظام الإحداثيات السماوية عند الفلكيين إلى توجيه الأرض بالنسبة إلى النجوم؛ وكل تغير في هذا التوجيه يسبب تغيراً في إحداثيات جميع الأجرام السماوية. ووفق حسابات هيبارخوس، كانت مواقع الأجرام السماوية تنزاح، بمجموعها، قرابة درجة كل قرن. وقد أدرك أن أي إحداثيات سماوية سجلها سابقوه يجب تصحيحها ـ إزاحتها إلى مواقعها التي شغلتها في عصره ـ قبل مقارنتها بالأرصاد التي أجراها بنفسه. بهذه الطريقة حصل هيبارخوس على سجل طوله قرون لحركات الشمس والقمر والكواكب، وكانت هذه الحركات تُعَايَرُ بمقارنتها بمواقع النجوم. وكان لا بد أن ينقضي ثمانية عشر قرناً آخر قبل أن يفسر إسحاق نيوتن Isaac Newton الانحراف الجماعي للإحداثيات السماوية بمرور الزمن. فقد عرف أن محور الأرض يتهادى في المحيط الفضائي كقارب شراعي مدفوع بالريح. وبتأثير الشد التثاقلي للقمر، يقوم اتجاه محور كوكبنا بالتغير ببطء، أي أنه يبادر precess، بالطريقة التي يتحرك بها بلبل (خدروف) الأطفال. إن مبادرة محور الأرض تدريجية، وتستغرق 26،000 سنة لتتم دورة واحدة. وتقوم المبادرة بدفع نظام الإحداثيات السماوية المرتبط بالأرض عبر النجوم، وهذا يجعل مواقع النجوم تتغير بمرور الزمن.

قبل زمن هيبارخوس، كانت القدرة التنبؤية للنموذج الأرضي المركز ما تزال تقريبية إلى حد بعيد، مع أنها كانت أفضل كثيراً من قدرة النموذج الشمسي المركز المنافس. وقد سمح اكتشاف المبادرة الحاسم الذي أنجزه هيبارخوس، للفلكيين، وللمرة الأولى، بربط الأرصاد الحالية بأرصاد الماضي البعيد. وبعد أن تسلح هيبارخوس ببياناته وبيانات أسلافه الكثيرة، التي وحّدها عن طريق تعديلات المبادرة، قام بإجراء مراجعة للأسس الرياضية للنظام الأرضي المركز بغية انسجام أفضل مع الواقع للتنبؤات المتعلقة بالشمس والقمر. لكن القدر لم يمهل هيبارخوس طويلاً كي ينقح النظام الأرضي المركز كله ؛ إذ إنه لم يعالج حركات الكواكب الخمسة الأخرى. لذا تعيّن على شخص آخر إنهاء هذه المهمة. وقد كان المسرح مهيّأً آنذاك لواحد من أعظم الشخصيات المؤثرة في تاريخ العلم، ظلت

كتاباته الفلكية مسيطرة على الفكر الفلكي طوال 1،400 سنة. إنه كلوديوس بطليموس Claudius Ptolemy.

عاش بطليموس (الذي يجب عدم الخلط بينه وبين بطالسة مصر الملكيين) في الإسكندرية في القرن الثاني بعد الميلاد. وكل معلوماتنا عنه ـ وهي معلومات غير قيّمة كثيراً ـ جُمعت من تعليقات متأخرة عليه، أو ممّا بقي من أعماله. نحن هنا أمام رجل كتب بثقة عالية أنه سمع كلمة الله، وأن هذه الكلمة في هذه الحالة هي المخطط الشامل للعالم المادي. وما يجعل البعض يعتقد بصحة هذه الإشارة الضمنية الدينية، هو أن كتابات بطليموس ظلت تحظى بإيمان الناس بها طوال أربعة عشر قرناً، وكان هذا الإيمان قريباً من الإيمان بعقائدهم الدينية. وفي النهاية، أصبح نموذج بطليموس للكون جزءاً من العقيدة المسيحية. ومن وجهة نظر معظم الناس، كان عالم بطليموس هو العالم الحقيقي.

يجسد بطليموس أوج العلم الهليني القديم. وقد أكمل أهم أعماله، وهو «التصنيف الكبير» Megale Syntaxis، المؤلف من ثلاثة عشر مجلداً، في سنة 150 بعد الميلاد تقريباً. وقد صار هذا العمل يُعْرَفُ عبر العصور باسم «المجسطي» أي «الأعظم»، وهو الاسم الذي أطلقه عليه مترجم عربي في القرن التاسع. هذا المؤَّلف مليء بمجموعة مرهقة للذهن من الجداول العددية، والمخططات التقنية، والبراهين الرياضية، والأمثلة المتدرجة في صعوبتها، والتفصيلات الموسّعة: وهذه بمجموعها تكوّن كتاباً معقداً يبيّن كيفية حساب إحداثيات الشمس، والقمر، والكواكب في أي وقت. أخرج بطليموس كاتالوكاً (فهرساً) نجمياً عصرياً، فيه أكثر من ألف مدخل. ولو كان المجسطي عملاً موسيقياً، لما كان مجرد سيمفونية لبيتهوفن، بل كان يجمع بين دفتيه جميع سيمفونياته، مع تعليمات مفصّلة للأسلوب الذي يجب سلوكه في العزف على كل آلة من آلات الأوركسترا، وللأسلوب الذي يجب أن تتبعه، أنت أيضاً، في كتابة سيمفونية.

من بين جميع الرسائل الرياضية التي بقيت من العصور القديمة، لا

يوجد بينها ما يجاري المجسطي في آفاقه، وتعقيده، وسموه الإبداعي، سوى كتاب الأصول Elements لإقليدس. هذا وإن الشبه بين بنيتي هذين العملين لم يكن مصادفة ؛ فقد اتخذ بطليموس، مثل أرستارخوس قبله، كتاب الأصول قدوة لكتاباته. الأصول و المجسطي طموحان على حد سواء: فأحدهما يدّعي بأنه شمل الهندسة كلها، والآخر يدّعي بأنه شمل علم الفلك كله. وفي هذا الصدد، يكتب الفلكي أوين جنكريتش Owen Gingerich ما يلي: «كانت محاولة بطليموس كتابة مكافئ فلكي لهندسة إقليدس ناجحة جداً: فلم يستطع أحد كتابة أي رسالة منافسة لعمل آخر مشهور مثلما فعل بطليموس».

إن أهم ما يحويه المجسطي هو وصف بطليموس للنموذج الأرضي المركز للسماوات: النموذج «البطلمي» ـ وهو الاسم الذي أصبح هذا النظام يعرف به ـ هو النموذج الأرضي المركز على إستروئيدات[1] steriods، وهو يعج بالتعقيدات الرياضية، ويتميز بقدرة تنبؤية لم يسبق لها مثيل. استعمل بطليموس الأرصاد السابقة ليولّد نماذج هندسية للشمس، والقمر، وكل من الكواكب. بعد ذلك قام بتجميع جداول عددية يمكن لقرائه استعمالها لحساب المسار المستقبلي لكل جرم في السماء. وقد أدى نظامه عمل كمبيوتر (حاسوب) ـ لكن المستخدم، وليس الكمبيوتر، هو الذي أنجز جميع الحسابات الطويلة. وكمعلّم بارز، قدم بطليموس إلى قرائه أمثلة على كيفية القيام بهذه الحسابات. لقد كان من الضروري استعمال المجسطي، وليس مجرد دراسته.

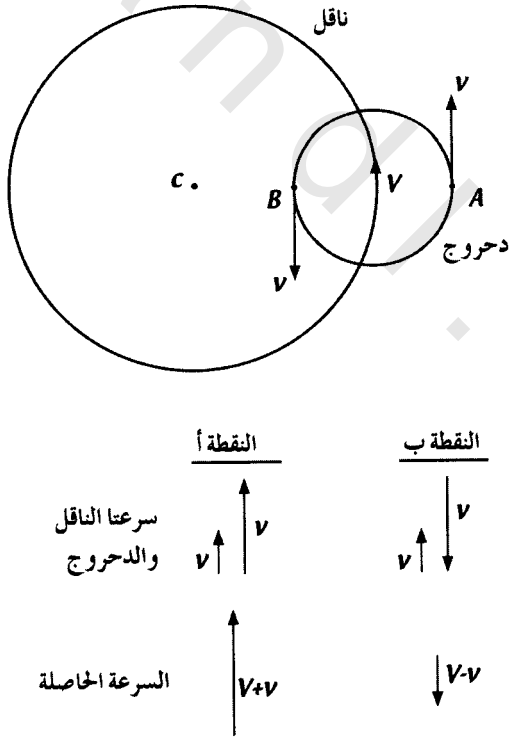
كان ثمة موضوع واحد يتحتم على بطليموس معالجته، هو الحركات الظاهرة غير المنتظمة لبعض الأجرام السماوية. فالشمس، مثلاً، تبدو متحركة عبر السماء بسرعة متغيرة تتوقف على الوقت من السنة. والكواكب، أيضاً، تبدو متسارعة أو متباطئة في حركاتها على مرّ الأشهر. لكنّ الأجرام

(1) الإستروئيد مركّب مؤلف من سلسلة من أربع حلقات يتصل بعضها ببعض لتكوّن وحدة بنيوية. (المعرّب)

السماوية، طبقاً لكتابات أرسطوطاليس، الذي كانت كلمته في تلك الأيام بمنزلة القانون، تتحرك دوماً بسرعة ثابتة وفق أفلاك دائرية. فكيف يمكن لبطليموس جعل الكواكب والشمس المتحركة بانتظام تبدو سائرة بحركة غير منتظمة في السماء؟ لقد قام بإنجاز هذا العمل الفذ بحيلة ابتكرها قبله بثلاثة قرون أبولونيوس من بيركا Apollonius of Perga، وحسّنها فيما بعد هيبارخوس: فقد قام بطليموس بإزاحة فلك الشمس جانباً، بحيث لم تعد الأرض موجودة في مركزه. (بقيت الأرض في مركز الكرة السماوية، لذا بقي الكون أرضي المركز). ونتيجة لذلك، كانت الشمس تقترب من الأرض في بعض الأوقات، وتبتعد عنها في أوقات أخرى. وعندما كانت الشمس أقرب إلى الأرض، كانت تبدو متحركة بسرعة أكبر في السماء، وعندما كانت أبعد عن الأرض، كانت تبدو متحركة بسرعة أبطأ. (إذا استعملنا تشبيهاً أرضياً لإيضاح ذلك، تصور نفسك ـ «الأرض» ـ واقفاً داخل حلبة سباق دائرية قريباً من مركز الحلبة، وليس فيه تماماً. ثمة سيارة سباق ـ «الشمس» ـ تتحرك على طول الخط الدائري للحلبة بسرعة ثابتة. عندئذٍ ترى من موقعك أن السيارة تبدو متحركة حين تدور في المنحنى القريب منك بسرعة أكبر من حركتها وهي تدور في المنحنى الأبعد عنك). قام بطليموس بإزاحة فلك الشمس بالقدر المناسب والاتجاه المناسب للحصول على الحركة المتغيرة للشمس في السماء. وبهذا الإجراء، فإن نموذج بطليموس الجديد لم ينتهك مذهب أرسطوطاليس في الحركة الدائرية المنتظمة.

لكن حركات الأجرام السماوية الجوالة الأخرى كانت أكثر تعقيداً من حركة الشمس، فقد تطلبت هذه الحركات نماذج تنطوي على أكثر من مجرد تعديل في موقع المركز. وعلى سبيل المثال، سنرى كيف قام بطليموس بتوليد عروة تراجعية ضمن مسار كوكب، في الوقت الذي لم يسمح فيه أرسطوطاليس بأي تغيير في سرعة ذلك الكوكب، وهذا إجراء أقل بكثير من عكس كامل لاتجاه حركته. لقد وجد بطليموس حلاً جزئياً في مفهوم الدحاريج epicycles والنواقل (دوائر بطليموس) deferents، وهذا الحل، شأنه شأن المدار المختلف المركز eccentric، كان من بنات أفكار أبولونيوس من بيركا.

افترض بطليموس أن كل كوكب يدور في مدار صغير، وهو الدحروج الذي يسير مركزه على مدار أكبر، هو الناقل، الذي هو نفسه يتمركز في الأرض المثبتة. وهذا التصميم أساس للعبة تسلية شاهدتها تسبب الدوار للمشاركين فيها، يطلق عليها اسم تويزلر Twizzzler. (من المحتمل أن وكالة ناسا NASA استعملت لعبة كهذه لغربلة رواد الفضاء غير الصالحين للقيام بمهماتهم الصعبة). تتكون لعبة تويزلر من أربع أذرع دورانية أفقية تمتد شعاعياً من محور رأسي (شاقولي) مركزي يديره محرك. كل ذراع تحمل في نهايتها أربعة مقاعد مرتبة تناظرياً بحيث تكون موزّعة على دائرة. وعندما تعمل الآلة، تقوم المقاعد بالدوران في مدار دائري ـ الدحروج ـ حول نهاية الذراع، في حين تدور الذراع حول المحور في مدار كبير ـ الناقل. ومع دوران كل مقعد عبر القسم الداخلي من دحروجه، يبدو من الأعلى أنه



لعبة ميكانيكية للتسلية تستند إلى فكرة الدحروج.

يتوقف عن الحركة لحظياً، أو أنه حتى يعكس اتجاه دورانه. وإذا نظرنا من المحور المركزي لتويزلر - وهو شبيه بموقع الأرض في نظام بطليموس - فإن المقعد، أو «كوكب» بطليموس يبدو متحركاً عموماً إلى الأمام، لكنه يقوم بين حين وآخر، بحركة تراجعية.

نورد فيما يلي وصفاً لكيفية حدوث ذلك. إن الشكل المرافق يورد شرحاً موجزاً للعبة تويزلر. المقعد يتحرك في دحروجه بسرعة ثابتة، يشار إليها بالسهم الذي يوجد الحرف v في نهايته. وفي نفس الوقت، يدور الدحروج كله في الناقل بسرعة ثابتة V. وفي أي لحظة معطاة، تكون السرعة الحاصلة للمقعد تركيباً لسرعتيه في الدحروج والناقل. تُرى، كيف نركّب سرعتي الدحروج والناقل للتوصل إلى السرعة الفعلية للمقعد؟ إن السرعة V في الناقل هي دوماً متجهة «إلى الأمام» (في الشكل، تتجه بعكس اتجاه دوران عقارب الساعة). لكن سرعة الدحروج v تغير اتجاهها طوال الوقت: فأحياناً تتجه إلى الأمام، كما هي الحال في النقطة A، وأحياناً إلى الخلف، كما في النقطة B.

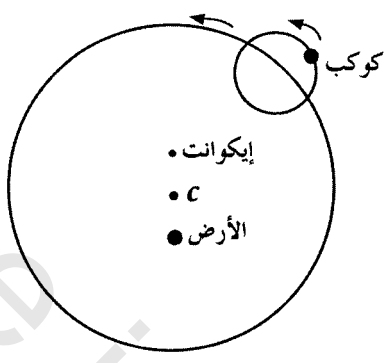
ونحصل على السرعة الحاصلة للمقعد في أي لحظة معطاة بتركيب سرعتي الناقل والدحروج. وهكذا فإن السرعة الحاصلة للمقعد في النقطة A هي v + V، لأن سرعتي كل من الناقل والدحروج تتجهان في تلك اللحظة إلى الأمام. أما في النقطة B، فمحصلة سرعة المقعد هي الفرق V-v لأن لسرعتي الدحروج والناقل هنا اتجاهين متعاكسين. فخلال محاولة حركة الناقل دفع المقعد إلى الأمام، تحاول حركة الدحروج دفعه إلى الخلف.

تُرى كيف تبدو حركة المقعد عند النظر إليه من النقطة المميزة، وهي محور تويزلر الذي يقابل موقع الأرض في النظام البطلمي؟ وعلى وجه الخصوص، كيف تبدو حركة المقعد حين يكون دائراً في القسم الداخلي من دحروجه قرب النقطة B؟ إذ كانت سرعتا الدحروج والناقل متساويتين، فإن كلا منهما تلغي الأخرى، وعندئذٍ يبدو المقعد غير متحرك في تلك اللحظة. أما إذا كانت سرعة الدحروج أكبر من سرعة الناقل، فسيبدو المقعد متراجعاً نحو الخلف. إنها الحركة التراجعية retrograde.

نظام بطليموس هو نموذج رياضي للعبة تويزلر التي تحاكي حركات الكواكب. وبتعديل بيانات الدخل input data ـ الحجوم النسبية للدحاريج والنواقل، والسرعات النسبية للدحاريج والنواقل، وميول الدحاريج والنواقل في الفضاء ـ استطاع بطليموس توليد حركة قريبة جداً من الحركات المرصودة للكواكب في السماوات، وتمكن من الحصول على حركات تراجعية لها. قدم المجسطي، بتفصيل رائع، حركة القمر وكل من الكواكب الخمسة المعروفة. لقد كان هذا نصراً مؤزّراً لعلم الفلك الرياضي، لكن هذا لم يكن مرضياً تماماً لبطليموس.

وحتى بعد إجراء تعديلات واسعة على الدحاريج والنواقل، بقيت بعض الاختلافات موجودةً بين المواقع المحسوبة والمواقع المرصودة للكواكب. ولا بد أن تكون هذه الاختلافات أقضّت مضجع بطليموس وأثارت حساسياته، لأنه لُوحِظَ أنه اتخذ في المجسطي خطوة مفاجئة لم يسبق أن فعلها قبلاً، وهي قيامه بمحو هذه الاختلافات. وللتكيف مع نظامه، قام بطليموس بإبعاد كل ناقل بحيث لا يكون مركزه منطبقاً على الأرض، بل على بقعة خالية بعيدة عن الأرض، نرمز إليها بالحرف C في الشكل المرافق. لذا صار بعد الدحروج عن الأرض يتغير خلال حركته على طول الناقل. حتى الآن، لا يوجد ثمة مشكلة مثيرة للجدل. بعد ذلك، استحضر نقطة أخرى في الفضاء تبعد عن المركز C مثلما يبعد عنها كوكبنا، لكنها متقابلة قطرياً مع الأرض بالنسبة إلى C. أطلق بطليموس على هذه النقطة اسم إيكوانت equant. إن بعد الدحروج عن الإيكوانت يتغير أيضاً، مثلما كان يتغير سابقاً بعده عن الأرض، لكن بالاتجاه المقابل: فحين يكون الدحروج قريباً من الإيكوانت، يكون بعيداً عن الأرض، وبالعكس.

بعد ذلك يخطو بطليموس الخطوة الحاسمة المشؤومة، التي أثارت اعتراضات شديدة عليه طوال قرون قادمة. ففي كتابه التاسع من موسوعة المجسطي، يفترض بطليموس أن المعدل الذي يسير فيه كل دحروج كوكب على طول ناقله محكومٌ رياضياً بموقع الإيكوانت. وكأن هناك ذراعاً غير



مرئية تمتد عبر الفضاء من الإيكوانت لتحرك الدحروج بسرعة متغيرة: فيكون أسرع عندما يكون الدحروج بعيداً عن الإيكوانت، وأبطأ عندما يكون قريباً منه. وتغير السرعة يجري بحيث يبدو الدحروج متحركاً بانتظام بالنسبة إلى راصد افتراضي موجود في الإيكوانت. بيد أنه بالنسبة إلى راصد على الأرض، فإن تغير السرعة يكون واضحاً خلال تسارع أو تباطؤ الكوكب على طول مداره في السماء الليلية. وباقتراح بطليموس لنموذج الإيكوانت، يكون وجه تحدياً شديداً إلى جوهر عقيدة أرسطوطاليس، التي تؤكد أن الحركات السماوية هي حركات منتظمة ودائرية. هذا وإن معرفة السبب الجوهري الذي أدى إلى جعل النماذج الكوكبية أكثر دقة باستعمال الإيكوانت، لم تتضح إلاّ في القرن السابع عشر، عندما توصل يوهان كبلر Johannes Kepler إلى أن الكواكب تتحرك في مدارات إهليليجية (ناقصية)، وليس في دوائر. وفي أيام بطليموس، لم يتوصل بطليموس إلى أن نماذجه للنظام الكوني كانت أفضل، إلاّ عندما نحّى جانباً تقييدات أرسطوطاليس التي تصر على السرعات المنتظمة. وفيما يتعلق ببطليموس، فقد كان يعتبر أن دقة تنبؤاته بمواقع الكواكب أقوى من كل الاعتبارات الأخرى.

كان المجسطي مرجعاً لتحديد الحركة الكوكبية. وقد عالج كل كوكب على حدة مستقلاً عن الكواكب الأخرى. وفي رسالة متأخرة تسمى الفرضيات الكوكبية Planetary Hepotheses، دمج بطليموس جميع الكواكب في كلٍّ منسجم. لم تعد بنات أفكاره مجرد بناء رياضي للتنبؤ بمواقع للكواكب، إذ غدت عالماً فيزيائياً كاملاً فيه أجرام حقيقية تسبح في أفلاك حقيقية، وهذا هو نظام بطليموس. صفّ بطليموس الأجرام السماوية حول

الأرض بترتيب منطقي وفق سرعة حركاتها في السماء: القمر، عطارد، الزهرة، الشمس، المريخ، المشتري، زحل. افترض أن كل دحروج وناقل كوكبٍ كانا يدوران داخل تجويف الكرة البلورية الشفافة السميكة الخاصة بذلك الكوكب، وأن هذه الكرات الكوكبية كانت تدور إحداها حول الأخرى دون أن تفصلها فجوات. وكانت تغلف هذا الترتيب الكلي كرة النجوم الثابتة. وقد حدّد بطليموس حتى أبعاد كل كرة كوكبية وأبعاد الفضاء ككل: فبدءاً من المركز، كان بالإمكان، كما يقول بطليموس، وضع قرابة 10،000 أرض مثل أرضنا، جنباً إلى جنب، قبل الوصول إلى الكرة السماوية.

وبرغم تشكيك الفلكيين في إصرار بطليموس على الحركة غير المنتظمة، فقد كانوا واثقين بأن قصة الكون أصبحت الآن مروّية من حيث الجوهر. وبمعنى من المعاني، كان بطليموس في أيامه بمنزلة بيل غيتس[1] Bill Gates في أيامنا. «فنظامه العملي» البطلمي، برغم عيوبه المعروفة، انتشر ليهيمن على بل، في الحقيقة، ليحتكر السوق الفلكية. وقد أصبح النموذج الوحيد الذي كان يُنظر إلى الكون من خلاله. وبإبقاء الأرض عديمة الحركة وراسخة الموقع وفق قناعات بطليموس، أصبح اختلاف المنظر النجمي غائباً عن المناقشات الفلكية ما دام النظام البطلمي معتمداً.

حدث بعد بطليموس انحدار مطرد في جودة النشاط العلمي الغربي. فقد حلّت قرون من الهيمنة الرومانية أعقبها رفض مسيحي «للعلم الوثني»، نَجَمَ عنه هبوط في المكانة الفكرية للإسكندرية، التي أصبحت مجرد ظل لِمَا كانت عليه في الماضي. وقد أحرقت المكتبة الكبيرة خلال الفتوحات الإسلامية في القرن السابع، ودمر معها قدر كبير من ثمار الفلسفة الهلينية. وغدت أوروبا في حالة ركود فكري، بعد أن فقدت عملياً جميع الوثائق الثمينة التي خلّفها القدماء. كان ثمة نفر قليل من

---

(1) هو صاحب شركة مايكروسوفت Microsoft، ويعد من أغنى الشخصيات وأشهرها في أيامنا هذه. (المعرّب)

الأوروبيين يعرفون اليونانية، وقد عثر، هنا وهناك، على أجزاء من النصوص القديمة، ترجم معظمها ترجمة سيئة إلى اللاتينية. لم تتوفر آنذاك سوى أجزاء قليلة جداً من كتابات إقليدس وأرسطوطاليس. هذا وإن بطليموس، ونظامه المشهور للسماوات، دخلا عملياً في غياهب النسيان. وكانت النتيجة أن تبخّرت تقاليد المعرفة الهلينية من وعي الناس، الذين كانوا يكافحون للخلاص من الصعوبات الاقتصادية والسياسية التي يعانونها في حياتهم. وبدءاً من تفكك الإمبراطورية الرومانية في القرن الخامس بعد الميلاد الذي استغرق القسم الأكبر من الألف الأول للميلاد، ظلت أوروبا غارقة في عصور الظلام.

في الوقت نفسه، ازدهر العلم الإسلامي. فقد ورث العلماء في العالم الإسلامي، الذي امتد بحلول القرن السابع الميلادي عبر منطقة البحر الأبيض المتوسط، المخطوطات القديمة التي فقدها الغرب المسيحي. وقد تُرجمت جميع المخطوطات الهلينية الرئيسية إلى العربية، وقام العلماء المسلمون بإجراء إضافاتهم وأفكارهم إليها. وهذه الأعمال، هي التي حفظت عمل بطليموس للأجيال القادمة.

في القرن العاشر، بدأت أوروبا بالخروج التدريجي من عصور الظلام. وفي ظل استقرار سياسي متزايد، وتحسنٍ للظروف الاقتصادية، وعودةٍ للتجارة إلى الانتعاش، حدث اهتمام متجدد بالتعلم. وقد وفرت التجارة اتصالات متزايدة بالعالم الإسلامي، وهذا أدى إلى إعادة اكتشاف أعمال القدماء. وقد نُقِلَت الترجمات العربية للنصوص القديمة إلى اللاتينية، وانتشرت في أرجاء القارة الأوروبية. وفي القرنين الثاني عشر والثالث عشر، أُسِّست الجامعات التي كان من مهماتها الأولى دراسة النصوص القديمة، ثم تحولت إلى إجراء البحوث الأصيلة والأعمال الإبداعية. وقد أصبحت نسخ موسوعة المجسطي التي ألفها بطليموس، والتي نقلت إلى اللاتينية، جزءاً من المناهج الدراسية الجامعية.

يكتب المؤرخ مايكل هوسكن Michael Hoskin أنه «حين وضع مدرس في كلية للآداب أو الفنون يديه على المجسطي لأول مرة، فلا بد أن تكون هذه الموسوعة مثلث له مستوى من البراعة التقنية الفائقة تتجاوز في قيمتها، بعدة درجات، قيمة أي كتابات فلكية سبق له الاطلاع عليها». تصوّر أن مدرس العصور الوسطى هذا نفسه يقوم بتصفح الجداول الرياضية للمجسطي، ويحملق في مخططات الدحاريج الغامضة التي وضعها بطليموس، ويفكر في نتائجها. فهل يصدِّق أن مثل هذا العمل الاستثنائي أبدعه عقل بشري منذ زمن بعيد؟ هل كان من الممكن أن يُسْتَوعَبَ ذلك الميكانيك الذي اقتُرح للكون قبل ذلك بألف سنة؟ لا بد أن يكون المجسطي مصدر وحي علماء القرون الوسطى مثلما كان أحد كتب آينشتاين مصدر إلهام للعالم بن فرانكلين Ben Franklin. ونتيجة للعمل الذي قام به الراهب الدومينيكاني الإيطالي توما الأكويني Thomas Aquinas في القرن الثالث عشر، بدأ كون بطليموس يحظى ببعد مقدس، ودخل في النهاية في صلب العقيدة المسيحية بعد أن أجريت عليه تعديلات «ملائمة» لاهوتيًا.

في القرن الخامس عشر، أدت الاكتشافات البحرية وما رافقها من نشاط تجاري إلى إعادة بعث الاهتمام بعلم الفلك. وقد أقام البرتغالي هنري الملاح Henry the Navigator مرصداً سنة 1420 على لسانٍ من الأرض في ساكرس sagres في أقصى جنوب غرب أوروبة. وطوال الأربعين سنة التالية، أشرف على إدارة معهد خصصه لعلم الفلك، والفنون الملاحية، والاستكشاف البحري.

كان علم الفلك في القرن الخامس عشر يعني علم الفلك البطلمي: أي العالَم الأرضي المركز. ومع أن المواقع الكوكبية التي كان يتنبأ بها بعيدة عدة درجات عن الحقيقة، إلاّ أنه في ظل الفنون الرصدية المتواضعة، كانت حتى تلك الأخطاء غير الطفيفة، مقبولة في ذلك الوقت. لكن سيطرة بطليموس على الكون لا يعقل أن يستمر إلى الأبد. فلا بد أن تتحرر الأرض في نهاية

المطاف من موقعها المركزي الذي كان في أذهان الناس، ذلك أن بذرة اضمحلال النظام البطلمي كانت مغروسة في بنيته ذاتها. وفعلاً فقد بدأت هذه البذرة تخرج شطأها في القرن السادس عشر، على يدي فلكي بولوني فذ.

obeikandl.com

نموذج ريتنهاوس الكوكبي.

المصدر: قسم علوم الفيزياء الفلكية، جامعة برنستون.