4

العيون الحولاء والنجوم المرتعشة

السبب في عدم رؤيتنا لمظاهر الأشياء التي تهمنا هو كونها بسيطة ومألوفة لنا. والمرء لا يستطيع ملاحظة شيء ما لأنه موجود دوماً أمام ناظريه.

ـ لودفيك وتكنشتاين

يُرى كثير من الأشياء في أماكن تقع على مسافة ما من مواقعها الحقيقية.

ـ سير توماس براون، في كتابه Christian Morals، 1682

★ ★ ★

P
A
R
A
L
L
A
X

أغمض عينك اليمنى، واجعل إحدى أصابعك في وضع رأسي بعيداً عن أنفك بنحو إنشين، بحيث تبدو هذه الإصبع إلى اليمين قليلاً من كلمة

obeikandl.com

PARALLAX الموجودة في الأعلى. ركز نظرك على هذه الكلمة، لا على إصبعك. أغمض الآن عينك اليسرى وافتح اليمنى. عندئذٍ تبدو إصبعك إلى يسار كلمة PARALLAX. وإذا قمت بإغماض عين وفتح الأخرى بالتناوب، فستبدو إصبعك تقفز من اليمين إلى اليسار، ثم من اليسار إلى اليمين، وهلم جرا. هذه هي الظاهرة التي تسمى اختلاف المنظر parallax، وهي نفس الظاهرة التي تجعلنا نخدع أنفسنا خلال وقوفنا على ميزان الحمام. فبتحريك رأسنا إلى اليمين، يظهر مؤشر الميزان منطبقاً على الأعداد الصغيرة في جانبه الأيسر. ويحدث اختلاف المنظر لأن كل عين ترى العالم مختلفاً قليلاً عما تراه العين الأخرى. تُرى، ما هو السبب في أنه عندما نرى العالم المحيط بنا وعينانا كلتاهما مفتوحتان، فإننا لا نشاهد صورتين مختلفتين لما نرى؟

إن الضوء الداخل إلى بؤبؤ العين يتوجه بواسطة عدسة مرنة إلى مؤخرة العين. وهنا تقع الشبكية، وهي طبقة رقيقة من الخلايا الحساسة للضوء تقوم مقام « شاشة» تسقط عليها صور العالم الخارجي. وتحوّل الشبكية كيميائياً الطاقة الضوئية إلى نبضات كهربائية تسرع متجهة إلى القشرة البصرية للدماغ عن طريق العصب البصري. وإذا أدخلنا في الاعتبار المسافة الفاصلة بين عينينا واختلاف المنظر المرافق الذي تفرضه هذه المسافة على الأشياء المشاهدة، فإن الصورتين الشبكيتين لأي مشهد معطى ستكونان مختلفتين في كلتا العينين. تُرى كيف يتعامل دماغك مع هاتين الصورتين في العالَم الحقيقي؟

ابتداءً من مرحلة الطفولة، تدرّب القشرة البصرية لدماغك نفسها، عن طريق الخبرة الحسية، على دمج الصورة الشبكية الثنائية في «صورة» منسجمة واحدة ثلاثية الأبعاد. من السهل كشف الثنائية لهذه الصورة المدمجة. انظر إلى الصفحة وعيناك مفتوحتان كلتاهما. الآن، اضغط برفق الوجه الخارجي لجفنك بإصبعك. عندئذٍ تتضاعف الكتابة الموجودة على الصفحة، ولا يعرف دماغك كيف يجمع الصورتين الشبكيتين ـ واحدة أفقية، والأخرى مائلة ـ في كلٍّ منسجم. (إذا واصلت الضغط على جفنك، فلا بد أن يتعلم

دماغك أخيراً طريقة مكاملة الصورتين). عندما اكتشفت هذه اللعبة أول مرة في طفولتي، كنت أحار في معرفة أي من هذين العالمين هو «الحقيقي». فإذا اخترتَ الصورة الأفقية على أنها الحقيقية، والصورةَ المائلة على أنها المشوهة، حاول ما يلي: كرر التجربة، لكنْ أغمض عينك التي لم تضغطها؛ عندئذٍ يبدو العالم المائل طبيعياً جداً، أليس كذلك؟

وبدون الدروس المبكرة للمثيرات المترابطة ـ البصرية، واللمسية، والسمعية ـ فإن ما يحيط بنا يبدو لنا مجموعة منبسطة ومختلطة بغير انتظام من الألوان، والأشكال، والحركات، التي ليس لها بعد ثالث. فالطفل الذي يحاول أن يضرب بعنف لعبة متحركة بعيدة عن متناوله معلقة فوق سريره، لم يكن قد اكتسب بعد إدراكاً عميقاً للمسافة. وفي مواقف معينة، يفتقر الكبار إلى القدرة على إدراك المسافة. ويكتب طبيب الأمراض العصبية أوليفر ساكس Oliver Sacks كتابة مؤثرة عن فيرجيل Virgil، الذي عمره خمسون سنة، والذي كان كفيفاً منذ طفولته، ثم عاد إليه بصره بعد أن أجرى جراحة ناجحة له ؛ فيقول:

> أخبرني فيرجيل فيما بعد أنه في أول لحظة بعد العملية، لم يكن لديه فكرة عما كان يراه. كان ثمة ضوء، وكان هناك حركة، وكان يوجد لون، لكن كل ذلك كان مختلطاً بعضه ببعض، وليس له أي معنى؛ كان كل ما يراه ضبابياً. بعد ذلك، انطلق عبر هذا الضباب صوت يقول: «هل كل شيء على ما يرام؟» عند ذلك، وعند ذلك فقط، قال إنه أدرك أخيراً أن هذه الفوضى من الألوان والظلال كان وجهاً، وهو في الحقيقة، وجه جراحه... كان فيرجيل قادراً على الرؤية، لكنه كان غير قادر على فك رموز ما كان يراه.

لم يكن لدى فيرجيل أيضاً إدراك للمسافة. كان يتراجع إلى الوراء من مشهد طائر يطير في السماء، لأنه لم يكن قادراً على تقدير بعده عنه. ومن المعلوم أن سكان غابات المطر، الذين قضوا حياتهم فيها، لا يستطيعون مدّ بصرهم بعيداً جداً ؛ فالأشجار الكثيفة الموجودة في بيئتهم تحدد طول خط بصرهم إلى عدة أقدام. وعندما يواجهون بمشهد مفتوح خالٍ من الحواجز،

فإنهم يمدون أيديهم ويحاولون لمس الجبال في الأفق. ويرى ساكس أننا «لم نُعْطَ العالَم؛ ونحن نصنع عالمنا عن طريق الخبرة والتصنيف، والتذكر، وإعادة الربط، وكل هذه عمليات مستمرة».

وترى كاتبة المقالات آني ديلارد Annie Dillard أنه فيما يتعلق بالأطفال، أو الذين يرون من جديد، «تكون الرؤية إحساساً صرفاً غير مثقل بالمعنى». وهي تتخيل انتقالها إلى الحقيقة الثلاثية البعد كما يلي: «أُخْبِرْتُ أنني وصلت إلى القمر؛ وكثير من الأطفال لا يحصل لهم ذلك. لكن البقع اللونية للطفولة بدأت تنتفخ مع امتلائها بالمعنى؛ ومن ثم انطلق القمر بعيداً عني. إنني أعيش الآن في عالم يولِّد فيه الفضاء نوعاً من الإحساس المزعج».

ويروي فيزيائي القرن التاسع عشر هيرمان فون هلمهولتز Hermann Von Helmholtz في مذكراته تجربة مرّ بها عندما كان في الثانية من عمره. فعندما كان يمشي آنذاك في متنزه مع أمه، رأى ما بدا له لعبة على شكل برج فيه تماثيل صغيرة تبدو للعيان على درابزون في أعلى البرج. عند ذلك طلب من أمه أن تعطيه أحد التماثيل ليمسك به. لكن أمه شرحت له أن البرج ليس لعبة، بل هو برج حقيقي يبعد ميلاً عنه، التماثيل التي يراها هي أناس حقيقيون يقفون في أعلى البرج. ويتذكر هلمهولتز أن البعد الثالث سرعان ما تجلى أمام عينيه، وأن نظرته إلى العالم تغيرت إلى الأبد. لقد تعلم إدراك العمق.

عندما يتعلق الأمر بإدراك المسافة، فمن الممكن أن يخطئ حتى راصد ذو خبرة. حدث هذا معي عندما كنت أقود سيارتي قبل بضع سنوات عبر ولايتي. فقد رأيت ما بدا منطاداً ضخماً مملوءاً بالهواء الساخن بعيداً عني. كان المنطاد بعيداً عني مسافةً لم أتمكن منها تمييز سلة الركاب التي كنت أعتقد أنها تتدلى منه. وقد بدت هذه الكرة الضخمة هادئة، تطفو دون حراك تقريباً في السماء، وتصوّرت أن من الممكن رؤية العالم من على متنها. لكنني عندما اقتربت من المنطاد، وجدت أن شيئاً ما كان خطأً. لم يبد أن

ثمة يداً غير مرئية كانت تدفعه. وسرعان ما ظهر متحركاً بسرعة غير معقولة عبر السماء. تُرى، ما الذي كان يحدث في العالم؟ بعد ذلك، وفي لحظات، تغير إدراكي للمشهد تغيراً مفاجئاً. فما كنت أراه ليس منطاداً ضخماً يحمل بعض المسافرين، بل كان منطاداً إعلانياً بحجم الغرفة. وعندما تجاوزته رأيت الحبل الذي يثبته بالأرض. وهكذا فإن حجم المنطاد، وبعده عني، وحركته التي كنت أتصورها لم تكن سوى وَهْم بصري، وهو خيال كامل اصطنعه دماغي.

D
I
S
T
A
N
C
E

تكشف التجربة التالية سمةً أساسية لظاهرة اختلاف المنظر، وهي سمة تمثل جوهر هذا الكتاب: إنها القدرة على استعمال اختلاف المنظر لقياس المسافة. ارفع إصبعك ثانيةً إلى أنفك، وانظر إلى الكلمة DISTANCE الموجودة في الأعلى. اغمض عيناً وافتح الأخرى، ثم اعكس ذلك، وتابع العملية دورياً كما في السابق، ثم لاحظ الانزياح الظاهري لإصبعك بين اليسار واليمين. لاحظ مقدار الانزياح. الآن، أبعِد إصبعك قليلاً عن وجهك، وأعد إغماض عينيك وفتحهما ثانيةً. وإذا أبعدت إصبعك أكثر، فإنك ترى أن انزياح اختلاف المنظر يصبح أصغر.

يترتب على نتائج هذه التجربة القاعدة التالية: كلما ازداد بعد جسم صغر اختلاف منظره. وعند تقدير اختلاف منظر جسم، فمن المفيد أن يوجد شيء في الخلفية كي نقيس عليه انزياح اختلاف منظر الجسم. ويحقق هذا الغرض هنا كلمة DISTANCE المكتوبة على الصفحة (مع أن للكلمة نفسها

اختلاف منظر). وفي حال شجرة، قد تكون الخلفية مئذنة جامع، أو برج كنيسة، أو شجرة أبعد بكثير. وفي حال جرم سماوي، كالقمر أو نجم قريب، فإن حقل النجوم البعيدة يمثل خلفية أيضاً.

وعكس هذه القاعدة صحيح أيضاً فكلما صغر اختلاف المنظر، بعد الجسم. وفي هذا يكمن أساس قياس المسافات التي تفصلنا عن الأجسام المحيطة بنا، بدءاً من زهرة لا تبعد عنا سوى بضعة إنشات، إلى نجم في الفضاء الخارجي يبعد عنا تريليونات من الأميال. كلما صغر اختلاف المنظر، بَعُدَ الجسم. ومن الواضح أنه كي ندرك المسافة بطريقة أكثر فعالية، لا بد أن يكون دماغنا قادراً على قياس اختلاف المنظر التي تحسه عيوننا. ترى، ما هو الأساس الفيزيولوجي لهذه العملية؟

ثمة مجموعتان عضليتان تقومان بهذه العملية السحرية. فعضلات الأهداب تتمدد أو تتقلص لتبئير focus عدسة العين بواسطة تغيير شكلها: فتصبح أسمك في حال الأجسام القريبة، وأرقّ في حال الأجسام البعيدة. تسمى هذه الظاهرة مطابقة (أو تكيفاً) accommodation. إن مجموعة العضلات المستقيمة recti والمنحرفة oblique. ـ المسؤولة مباشرة عن الإحساس باختلاف المنظر ـ تقوم بتدوير مقلتي العينين eyeballs، وتسمح لهما بالتركيز على جسم. ويمكنك الإحساس بالعضلات المستقيمة والمنحرفة خلال عملها بأن تضغط برفق على جفني عينيك أثناء تحريكهما باتجاهات مختلفة. والأفضل من ذلك، صور نفسك بجهاز الفيديو حين تشاهد أشياء تقع على مسافات مختلفة منك. وفي حال الأجسام القريبة، لا بد أن يُظهر شريط الفيديو تقارباً واضحاً بين عينيك، أي أنك ستظهر مصاباً بالحول. (لن ينجح النظر في مرآة لأنك لا تستطيع تركيز نظرك على جسم وملاحظة صورتك المنعكسة في المرآة في آن واحد). ولإدراك المسافة إدراكاً فعالاً وتوليد منظرٍ ثلاثي البعد، أو مجسمٍ، للمنظر المحيط بك، فإن دماغك يحس بتقارب مقلتيك، ثم يعالج مجموعة من الأمور، من ضمنها المطابقة، وحركة الجسم، والتظليل والرسم المنظوري، والتفاوت بين

العينين (المظهرين المختلفين للصورتين الشبكيتين)، وكاتالوك الخبرة الذي يملكه الدماغ.

كل مخلوق له عينان متناظرتان في مقدمته، أو عينان في نفس الجانب من رأسه ـ المقدَّمات primates، البوم، السمك المفلطح ـ يمكن أن يكشف اختلاف المنظر. حتى الحيوانات التي تقع أعينها في جانبين متقابلين من الرأس ـ الببغاء الصغير الهزيل parrakeet، بعض الزواحف ـ فإنها قادرة على تدوير رؤوسها لكشف اختلاف المنظر. ويمكن ربط الرؤية المجسمة بوجود وتطور أنواعنا، بدءاً من القدرة على تناول الطعام، إلى صيد الطرائد، إلى تجنب الحيوانات المفترسة. ولو كنتَ من سكان الكهوف، ووجهت سهماً إلى خنزير بري، فقد يساعدك تقدير المسافة التي تفصلك عنه. ويسمى عالم الفيزياء جورج كاموف George Gamow هذا الإحساس «الشعور بالمسافة»، وهو يساعدنا حتى في أيامنا المعاصرة على أمور مثل: إدخال الخيط في ثقب الإبرة؛ وقيادة السيارة؛ وممارسة بعض الألعاب كلعبة كرة المضرب (التنس)، أو البيسبول، أو البادمنتون، أو كرة السلة؛ وحتى مدّ يدك لمصافحة شخص ما. إذا كان ثمة عيب يمكن وجوده في مركبة الشعور باختلاف المنظر التابعة للنظام البصري البشري، فإن هذا العيب يكمن في المدى المحدود التي تكون فيه المركّبة دقيقة، وهذا المدى يمتد بضع عشرات من الأقدام. لكنْ يوجد دوماً طرق لتوسيع هذا المدى، إلى أن يشمل كل المسافة التي تفصلنا عن النجوم.

توسيع الخط القاعدي (I): معينات المدى

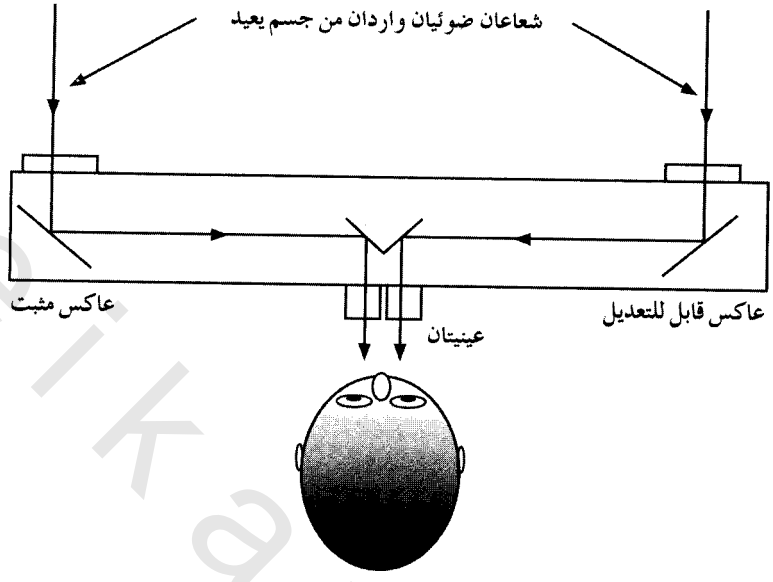
إن عيني الإنسان مفصولتان عادةً، إحداهما عن الأخرى، بإنشين ونصف الإنش. هذا هو خطك القاعديّ baseline الذي يولد معك، والذي يحكم ويحدد إدراكك للمسافة في العالم. وعلى بعدٍ يتجاوز مئة قدم تقريباً، فإن مسافة جسمٍ ما عنك يربك «قدرة» خطك القاعدي. وهذه حقيقة هندسية

بسيطة: فكلما ابتعدت الأشياء، أصبح تقارب عينيك أصغر من أن ينقل إلى الدماغ شعوراً مفيداً باختلاف المنظر. وتكون عيناك متوازيتين عمليّا إذا ركّزت نظرك على جسم يبعد عنك بضع مئات من الأقدام أو ميلاً؛ دماغك مُكْرَهٌ على الاعتماد على منبهات بديلة وعلى خبرتك السابقة في تحديد المسافة إلى الأشياء. من الممكن توسيع مدى آلية الإحساس العيني باختلاف المنظر إذا كان بالإمكان توسيع الخط القياسي بين العين والأخرى. هل هذا مستحيل؟ طبعاً. بيد أنه يتعيّن علينا ألاّ نكون حرْفيين، إذ يمكننا أن نزيد بفعالية المسافة الفاصلة بين عينينا بحيلة طالما استعملها السحرة، ألا وهي المرايا.

كان لدى والدي معيّن مدىً[1] هو منظار ثنائي العينية (بنوكل) binocular من ماركة IDEAL، صنعته شركة في لونك آيلند أغلقت أبوابها قبل مدة طويلة. وكان يستعمله لضبط بؤرة آلة تصويره. (لم تكن آلات التصوير التي تتضمن معيّنا للمدى موجودة في تلك الأيام، في بيتنا على الأقل). كان معيّن المدى صغيراً إلى درجة تسمح بوضعه في جيب قميصي، وأصبح واحداً من لعبي المفضلة عندما كنت طفلاً. وقد تبيّن أن هذا الجهاز يسمح بالإحساس بالمسافة التي تفصله عن أي جسم يوجّه إليه.

أصبح الآن معيّن مدى والدي ملكاً لي. فيه جسم بلاستيكي مستطيل، وهو أسود اللون، وفي نهايتي أحد ضلعيه الطويلين يوجد زوج من الفتحات الصغيرة الدائرية يدخل منهما الضوء. ويوجد على الطرف المقابل ثقب للرؤية وقرص مدرج من 2,5 إلى 100 قدم. وإذا نظرت إلى جسم من خلال معيّن المدى، فإنك ترى خيالين للجسم قريبين أحدهما من الآخر. وإذا

(1) معيّن المدى range finder (البصري) جهاز بصري يقيس عادة المسافة بينه وبين نقطة الهدف، وذلك بقياس الزاوية الموجودة بين شعاعين ضوئيين ينطلقان من الهدف ويدخلان في معيّن المدى من خلال نافذتين متباعدتين. (المعرّب)



مبدأ معيّن المدى الثنائي العينية

أدرت القرص، فإن الخيالين يندمجان معاً تدريجياً؛ وعندما يندمجان يدلّك القرص المدرج على المسافة التي تفصلك عن الجسم.

عندما كنت صبياً صغيراً، كنت أحار في الطريقة التي تسمح لهذا الجهاز الصغير بإنجاز هذا العمل الفذ. وكأي عالم جيد، بدأت بتفكيكه. (كان أبي مهندساً، وكان دائماً يحاول رؤية داخل الأشياء. ومرة، عندما كنت في المرحلة الثانوية، استخرجت المحرّك من المكنسة الكهربائية واستعملته لشفط الهواء من مرطبان كبير للمايونيز. وكان ذلك جزءاً من مشروع علمي لدراسة أثر جو المريخ ذي الضغط المنخفض في نمو النباتات. وقد وجدت أن النباتات لا تعيش في هذا الجو). ويبيّن المخطط السابق كيفية عمل معيّن المدى. ويوجد خلف كل فتحة مرآة مائلة تعكس الضوء نحو مركز معيّن المدى، حيث ينعكس الضوء ثانيةً إلى العين. وهكذا فإن العين ترى خياليين واردين من كلتا الفتحتين في آن واحد. إحدى

المرآتين مثبتة؛ أما الأخرى فمثبتة بشريط معدني مرن ينثني عندما ما ندوّر القرص المدرج، ويغير زاوية المرآة. وتشكل المرآتان معاً نموذجاً ميكانيكياً لزوج من العيون المتقاربة.

بدأ استعمال نموذج مطوّر لمعيّن المدى الذي كان لديّ، في الأغراض العسكرية في أواخر القرن التاسع عشر. قبل ذلك كان المشرفون على سلاح المدفعية يطلقون قذائفهم لتصل قبل الهدف، ثم يقاربون الهدف بعدة جولات من إطلاق القذائف. (كان يُستعمل أيضاً «تعيين المدى الصوتي»، إذْ كان أحد الجنود يحسب زمن التأخر بين رؤيته للوميض أو الدخان الصادر عن مدفع العدو وبين سماعه لصوت المدفع؛ ولما كانت سرعة الضوء أعلى كثيراً من سرعة الصوت، فكلما زاد زمن التأخر كان مدفع العدو أبعد. لكن هذه الطريقة لم تكن ناجحة تماماً؛ فعندما كانت تبدأ المعركة، كان من المستحيل خلال اندلاعها تعيين المدفع الذي صدر منه الصوت. وحالما بدأ استعمال مسحوق البارود الذي لا يخلف دخاناً، توقف استعمال طريقة تعيين المدى الصوتي). ومع تزايد كلٍّ من مدى المدافع وتكلفة القذائف، كان لا بد من استحداث أسلوب أدق لإصابة الهدف. والحل هو: معيّن المدى الثنائي العيّنية binocular range finder، وهو، أساساً، زوج من البريسكوبات[1]، واحد لكل عين، بحيث تكون فتحتاهما منفصلتين إحداهما عن الأخرى بعدة أقدام.

صَنع أول معيّن مدى محمول، بدقة معقولة، شركة Barr and Stround في اسكتلندا، وبدأ استعماله سنة 1888. وخلال عقد واحد، صارت الشركة تنتج أجهزة لها خطوط قاعدية تصل أطوالها إلى 15 قدماً؛ وقد كانت تركَّب على الحصون، واستُعملت أيضاً في بعض التطبيقات البحرية. وهذا كان لمعيّن المدى المحمول M7، الذي استعمله الجيش الأمريكي في الحرب

(1) البريسكوب periscope جهاز بصري يستعمل في توفير خط مرفوع للرؤية حيث تكون الرؤية غير عملية أو غير ممكنة، كما في الخنادق أو الدبابات أو الغواصات. (المعرّب)

العالمية الثانية، خط طوله 39 إنشاً، ونظام بصري قادر على تكبير الأشياء 14 مرة. كان M7 يسمح بقياس مسافة هدف يبعد عنه ثلاثة أميال بخطأ قدره عُشْرُ ميل. في جميع هذه الأجهزة، كانت زاوية المرآة الداخلية تعدَّل بتدوير زرّ مُعَيّرٍ إلى أن يُرى الخيالان المنفصلان في العينية متطابقين؛ وعندئذٍ يشار إلى مدى الجسم على عدّاد آلي.

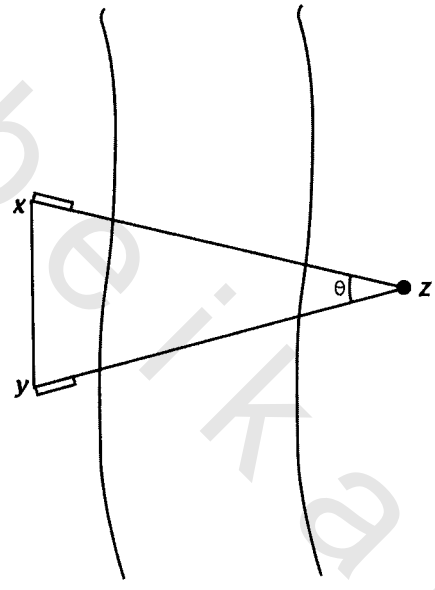
من جهة المبدأ، يمكن جعل معيّن المدى ذي العيّنتين كبيراً جداً؛ لكن هذا ليس بالأمر السهل عملياً. فإذا جعلت المسافة بين الفتحتين اللتين تدخل منهما الأشعة الضوئية عدة أقدام، فقد يصبح النظام البصري بعيداً عن التراصف alignment بسهولة، وخصوصاً عندما يُنْقَلُ هذا الجهاز البشع من مكان إلى آخر. ويكون معيّن المدى محدوداً عادة بتصميمه: فمن الضروري أن تكون الفتحتان، المبتعدتان جداً إحداهما عن الأخرى، مرئيتين في آن واحد. وهذا يقيد بدرجة كبيرة الحدّ الأعلى للطول الفعّال للخط القاعدي للجهاز، ومن ثم الحد الأعلى لمداه. لكن ماذا لو كان بمقدورنا، بطريقة ما، تسجيل موقع جسم بأن نراه من نقطة مميزة، ثم ننتقل ببساطة إلى نقطة مميزة ثانيةً، وننظر إلى الجسم منها ثانيةً؟ هذا هو جوهر عملية المسح surveying.

توسيع الخط القاعدي (II): عملية المسح

كان جورج واشنطن، الذي كان موظف المساحة surveying في مقاطعة كولبيبر Culpeper بولاية فرجينيا، يعرف قطعاً جوهر اختلاف المنظر: فكلما صغر اختلاف المنظر، ابتعد الجسم.

ويستعمل المساحون اختلاف المنظر حين يحاولون تعيين المسافة التي تفصلهم عن جسم بعيد. ويسمون هذه العملية تثليثاً triangulation، لكنها، في جوهرها، تعتمد مبدأ تقارب العينين مراراً على مقياس واسع. وخلافاً للرؤية الاستريوسكوبية (المجسامية) stereoscopic، أو معيّنات المدى ذوات

العيّنيتين، فإن أساليب المسح لا تتطلب أرصاداً آنية (في نفس الوقت) من كلا طرفي خط قاعدي. وبدلاً من ذلك، يُسْتعمَل جهاز يسمى التيودوليت theodolite (الذي ترد صورته في بداية هذا الفصل)، الغرض منه قياس موقع الجسم، كما يرى من أحد طرفي الخط القاعدي أولاً، ثم من الطرف الآخر. وبالاستعانة بمثل هذا الجهاز، يمكن قياس الزوايا بتقريب يصل إلى ثانية قوسية واحدة، أي 1/3,600 من الدرجة، ومن ثم فإن إزاحة جسم عن موقعه بمقدار نصف إنش يمكن أن تكشف من على بعد ميلين.



اختلاف منظر شجرة

سنورد الآن الطريقة التي تسمح لنا بقياس عرض نهر بواسطة النظر إلى شجرة تقع على الضفة المقابلة. نعيّن أولاً خطاً قاعدياً ونقيس طوله؛ وفي الصورة المجاورة يمتد الخط القاعدي بين النقطتين X و Y، وهو موازٍ تقريباً لضفة النهر. إن النقطتين X و Y، والنقطة Z، تشكل مثلثاً. نضع جهاز التيودوليت في النقطة X ونوجهه نحو الشجرة. وباستعمال المقياس المدرج في التيودوليت، نقيس الزاوية YXZ المحصورة بين الخط القاعدي والخط الذاهب من X إلى الشجرة. بعد ذلك ننقل الجهاز إلى النقطة Y ونقيس الزاوية XYZ. (في هذا الشكل، المثلث متساوي الساقين، والزاويتان YXZ و XYZمتساويتان، لكن هذه الحالة لا تحدث دوماً). نحن نعرف الآن طول أحد أضلاع المثلث ـ وهو الخط القاعدي ـ ونعرف أيضاً الزاويتين المحصورتين بينه وبين الضلعين الذاهبين إلى الشجرة. عند هذه النقطة، يمكننا قياس طولي الضلعين

المجهولين، ومن ثم الحصول على تقدير لعرض النهر. أو يمكننا استعمال قواعد علم المثلثات لحساب العرض الدقيق المطلوب.

الزاوية التي رمزنا لها بـ 0 هي الفرق بين الموقعين الظاهرين للشجرة عند رؤيتها من النقطة Y ثم رؤيتها من النقطة X. إنها اختلاف منظر الشجرة كما ترى من طرفي الخط القاعدي. لننقل عيننا إلى الضفة الأخرى من النهر وننظر إلى الخط القاعدي عبر الماء. إن الزاوية XZY، التي نرى ضمنها الخط القاعدي من نقطة موجودة على الشجرة، تساوي زاوية اختلاف المنظر 0. والقاعدة الهندسية الواردة هنا هي: إذا قطع مستقيم زوجاً من المستقيمات المتوازية، فإن الزاويتين الداخليتين المتعاقبتين متساويتان. وبعبارة أخرى، فإن اختلاف المنظر لجسم كما يرى من خط قاعدي يساوي الزاوية التي يُرى ضمنها الخطُّ القاعدي منَ الجسم. ووجهة النظر البديلة هذه ـ أي النظر إلى الخلف من الجسم إلى الخط القاعدي ـ سنستفيد منها في وقت لاحق عند مناقشتنا لاختلاف المنظر النجمي.

بعد انتهاء الحرب العالمية الأولى بوقت قصير، قام الجيش الأمريكي بدمج جهاز معيّن المدى ذي العينيتين وجهاز المسح في نظام واحد، وطبقه في حل مسألة استراتيجية هي: كيف يمكن توجيه المدافع الساحلية لتصيب قذائفها السفن الحربية للعدو؟ وقد استعمل هنا اختلاف منظر السفينة لكشف بعدها. فَوُضِعَ مقراب (تلسكوب) telescope في كل من محطتي رصدٍ أقيمتا على الخط الساحلي، وكانت تفصلهما مسافة تقدر بين ربع وثلث مدى الرمي الأعظمي للمدفع. ومن هاتين المحطتين كان راصدان يراقبان في نفس الوقت موقع السفينة المستهدفة. وكل 30 ثانية (بسبب كون السفينة هدفاً متحركاً)، كانا يرسلان معلوماتهما إلى غرفة تخطيط مركزية، حيث كانت خطوط النظر ترسم على خارطة وتصدر التعليمات. وباستطاعة مدافع من عيار 16 إنشاً منصوبة في تلك المواقع أن تغرق سفينة حربية بعد جولة واحدة فقط إذا كان التصويب جيداً. لكنْ لم تكن توجد ضرورة للرمي، إذ إن الأثر النفسي الرادع للمدافع ونظام تصويبها المبني على اختلاف المنظر

كانا كافيين لإبقاء سفن العدو بعيدة في عرض البحر.

وقد استعملت أيضاً تقنيات مسح تقليدية، وعلى نطاق واسع، في رسم خريطة الكرة الأرضية. حتى التثليث استعمل فوق سطح الأرض لتحديد مسار النيازك في الجو. ويجري تصوير النيزك المتوهج من محطتين تبعد إحداهما عن الأخرى عدة أميال؛ وبسبب اختلاف المنظر، تُظهر كلُّ صورةٍ النيزك في موقع مختلف بين النجوم. واستناداً إلى مقدار انزياح اختلاف المنظر، فإننا نستطيع استنتاج ارتفاع النيزك فوق الأرض.

ولا يتطلب الانتقال من الجو إلى الفضاء الخارجي إلا قفزة صغيرة في الميدان الأساسي للدراسات المتعلقة باختلاف المنظر. لذا سنزيد من طول خطنا القاعدي ثانيةً، وننطلق بعيداً عن الأرض.

توسيع الخط القاعدي (III): اختلافات منظر النظام الشمسي

هل سبق لك أن تطلعت عبر نافذة سيارتك خلال قيادتك لها، لتتحقق أن القمر يواصل سيره معك؟ كيف يمكن أن يحدث ذلك؟ إن أعمدة المصابيح الكهربائية، والبيوت، والأشجار، تبدو كلها ثم تختفي خلال قيادتنا للسيارة. ولكن القمر لا يفعل ذلك. وحتى لو بلغت سرعتك ستين ميلاً في الساعة ـ وعندئذٍ ينزاح موقع عينيك ميلاً كل دقيقة ـ فإنك لا ترى تغيراً في المسافة التي تفصلك عن القمر، بل ترى أنه يقبع في نفس الموقع.

لهذا السلوك الغريب للقمر علاقة باختلاف المنظر أو بوجه أدق، بغياب اختلاف المنظر. القمر بعيد جداً، ومن ثم لا يمكن للعين المجردة أن تكشف انزياحاً نتيجة اختلاف المنظر على خط قاعدي طوله لا يتجاوز بضعة أميال. (في الواقع، يتحرك القمر عبر السماء مع دوران الأرض، ولكن لا علاقة لهذا الأمر باختلاف المنظر). لقد أجري أول قياس ناجح لاختلاف منظر القمر في القرن الثاني قبل الميلاد بواسطة الراصد الفلكي العظيم هيبارخوس، الذي ذكرناه في وقت سابق. نفذ هيبارخوس هذا العمل الفذ

بطريقة ذكية جداً. فقد كان الكسوف الشمسي، الذي حدث في 14 مارس/ آذار سنة 189 قبل الميلاد، مرئياً على رقعة واسعة من منطقة البحر الأبيض المتوسط. ذكر الذين شاهدوه من ساكني المنطقة القريبة من هيليسبنت Hellespont، وهو مضيق صغير في شمال غرب تركيا، أن الكسوف كان كلياً؛ أي أن القمر غطى كلياً وجه الشمس. ومع ذلك، لم يشاهد الراصدون في الإسكندرية إلا أربعة أخماس الشمس محجوبةً بقرص القمر. اغتنم هيبارخوس هذه الفرصة لتعيين اختلاف منظر ـ ومن ثم بُعد ـ القمر. وقد افترض أن الشمس بعيدة جداً إلى درجة لا تسمح باختلاف منظر قابل للقياس لمشاهدي الكسوف. وبكلمات أخرى، فخلال الدقائق التي حدث فيها الكسوف الأعظم، كانت الشمس تقوم في الواقع مقام معلم ثابت يسمح بقياس اختلاف منظر القمر؛ وإن أي اختلاف في مظهر الكسوف من النقطتين الأرضيتين المختلفتين لا بد أن يكون نشأ عن اختلاف منظر القمر وحده. وما حصل هو أن الإسكندرانيين رأوا القمر في وضع مختلف عن الوضع الذي رآه فيه نظراؤهم على شواطئ مضيق هيليسبنت.

بقي خمس الشمس مرئياً في الإسكندرية؛ وهكذا فإن موقع القمر، كما كان يرى من هناك، انزاح بقدر خمس قرص الشمس، أي نحو عشر درجة. لذا فإن عشر درجة هو اختلاف منظر القمر على خط قاعدي ممتد بين هيليسبنت والإسكندرية. وبدمج اختلاف المنظر بخطي عرض هيليسبنت والإسكندرية، وأيضاً بخط عرض القمر في كل موقع، استنتج هيبارخوس بعدنا عن القمر، ووجد أنه يقع بين 35 و 41 مثلاً من قطر الأرض. والقيمة الحقيقية تساوي تقريباً 30 مثلاً من قطر الأرض. الفرق ليس كبيراً، إذا أدخلنا في اعتبارنا أن هذا القياس نُفِّذَ قبل أكثر من 2،000 سنة.

من الممكن أيضاً قياس اختلاف منظر القمر بواسطة التثليث التقليدي، حيث يقوم راصدان بالنظر إلى القمر في نفس الوقت من موقعين على الأرض تفصلهما مسافة كبيرة. وقد أُجري أول تحديد حقيقي لاختلاف المنظر القمري بخط قاعدي طويل سنة 1751 من قبل الفلكي الفرنسي نيقولا

لوي دو لاسيل Nicolas Louis de Lacille في رأس الرجاء الصالح، بالتعاون مع فلكيين في أوروبا. وجد لاسيل أن القمر يبدي اختلاف منظر بدرجتين تقريباً للراصدين الموجودين في جانبين متقابلين من الأرض، أي على خط قاعدي طوله 8،000 ميل. وهاتان الدرجتان تعادلان انزياحاً جانبياً في طول الذراع قدره إنش تقريباً، وهذا يمكن كشفه بسهولة.

وخلال إلقاء الفلكيين نظرات أعمق في الفضاء، كانوا يبذلون مساع حثيثة لكشف اختلافات منظر الكواكب. وقد خَدَعَ الراصدون أنفسهم زمناً طويلاً عندما اعتقدوا أنهم اكتشفوها. والحقيقة أن اختلافات المنظر حتى لأقرب الكواكب ـ عطارد، الزهرة، المريخ ـ لا يمثل سوى جزء من اختلاف منظر القمر، لأن هذه الكواكب أبعد كثيراً منه. وعلى سبيل المثال، فإن الزهرة، التي هي أقرب الكواكب إلى الأرض، تبعد عن الأرض مسافة لا تقل عن 100 مرة تقريباً من بعد القمر عن الأرض؛ ومن ثم فإن اختلاف منظرها سيكون، على الأغلب، جزءاً من مئة من اختلاف منظر القمر. ومع ذلك، فإن الدافع لقياس اختلاف منظر كوكب قوي جداً. ففي نظام كوبرنيك الشمسي، تعيّن الحجوم النسبية لجميع الأفلاك الكوكبية تعيينا دقيقاً. فمثلاً، قطر فلك الزهرة يعادل تقريباً ثلاثة أرباع قطر فلك الأرض، وقطر فلك المريخ يعادل زهاء مرة ونصف المرة من قطر فلك الأرض، وقطر فلك المشتري أكبر بنحو خمس مرات من قطر فلك الأرض. ولو عُيّن الحجم الحقيقي لواحد فقط من أفلاك الكواكب، لغدا بالإمكان تعيين الحجوم الحقيقية لجميع أفلاك الكواكب الأخرى. وكنتيجة لذلك، تصبح الأبعاد الحقيقية للنظام الكوكبي الكوبرنيكي معروفةً، كما يصبح معروفاً أهم قياس في النظام الشمسي، وهو بعد الأرض عن الشمس الذي يسمى الوحدة الفلكية astronomical unit. وكل ما يتطلبه هذا هو قياس موثوق لاختلاف منظر كوكب واحد فقط، وهذا الكوكب يمكن أن يكون أي كوكب.

كان المريخ أبكر هدف للبحوث الرصينة الرامية إلى تعيين اختلاف المنظر الكوكبي. وأفضل وقت لقياس اختلاف منظر المريخ هو خلال التوزع

الكوكبي الذي يسمى تقابلاً opposition، وذلك عندما تمر الأرض مباشرة بين المريخ والشمس. في التقابل يصبح المريخ أقرب ما يمكن من الأرض، ويزداد اختلاف منظره ليبلغ قيمته العظمى. وتجدر الإشارة إلى أن الراصد الدانمركي العظيم تيخو براهي، الذي سيلمع اسمه في قصة اختلاف المنظر النجمي، حاول تعيين اختلاف منظر المريخ خلال التقابل الذي تنبأ به، والذي حدث سنة 1582. كان تيخو يرصد موقع المريخ بين النجوم مرتين يومياً: مرة قبل الفجر، وأخرى بعد الغروب، وفي المدة الفاصلة بينهما، كان دوران الأرض يدفعه على طول خط قاعدي طوله يعادل قطر كوكبنا. ومع أنه أعلن أنه أحرز نجاحاً في عمله، إلا أن تيخو كان، بلا انقطاع، يغير سنوياً قيم اختلاف المنظر الذي حصل عليه. ونحن ندرك في هذه الأيام أن القياس الذي أعلنه تيخو كان غير صحيح. فاختلاف المنظر الحقيقي للمريخ ـ وهو انزياح ظاهري بنحو 0,012 درجة فقط حين رؤيته من خط قاعدي طوله يعادل قطر الأرض ـ أصغر من أن يتمكن تيخو من كشفه.

بعد قرابة قرن، وتحديداً سنة 1672، بدأ جيوفاني دومينيكو كاسيني Giovanni Domenico Cassini، مدير المرصد الملكي بباريس، مشروعاً لقياس اختلاف منظر المريخ خلال التقابل الذي حدث ذلك العام. وعندما كان كاسيني يسجل موقع المريخ من باريس، كان مساعده جان ريشيه Jean Richer يفعل الشيء ذاته من جزيرة كايان الموجودة على ساحل أمريكا الجنوبية، والتي تسمى الآن غيانا الفرنسية. وقد استنتج هذان الفلكيان أن المريخ يبعد عنا خلال التقابل مسافة 4،000 قطر أرضي، وأن بعد الشمس عنا ـ الوحدة الفلكية ـ تساوي زهاء 87 مليون ميل، وهذا قريب من القيمة المعتمدة في هذه الأيام، وهي 93 مليون ميل. ومع ذلك فهذا التقارب في القيمتين حدث مصادفة، ذلك أن الارتيابات في قياسات موقعي كاسيني وريشيه كانت أكبر من أن تقدم نتائج سليمة. وفي البحث العلمي، لا يكفي الحصول على الجواب الصحيح، إذ يتعين على الباحث إقناع زملائه، النزّاعين عموماً إلى الشك، بأن الجواب هو نتيجة تطبيق منهج سليم. وحتى إذا تحقق ذلك، فقد تكمن مصادر مجهولة للخطأ في الأرصاد، وهي أخطاء تظل غير ظاهرة

أحياناً عدة أجيال. وبوجه خاص، ففي الماضي، عندما كان المنهج العلمي ما زال في مراحله المبكرة، كانت شهرةُ العالِم تضفي وزناً على نتائجه التجريبية. وفي أواخر القرن السابع عشر، كان كاسيني مصنفاً بحق في زمرة أكثر الفلكيين الجديرين بالاحترام في عصره. وظلت وحدته الفلكية ـ 87 مليون ميل ـ مقبولة عموماً حتى في القرن الثامن عشر، مع أن هذا العدد كان، كما قال المؤرخ ألبرت فان هلدن Albert Van Helden لا يعدو كونه «تقديراً ملائماً ملفوفاً بعباءة الشهرة».

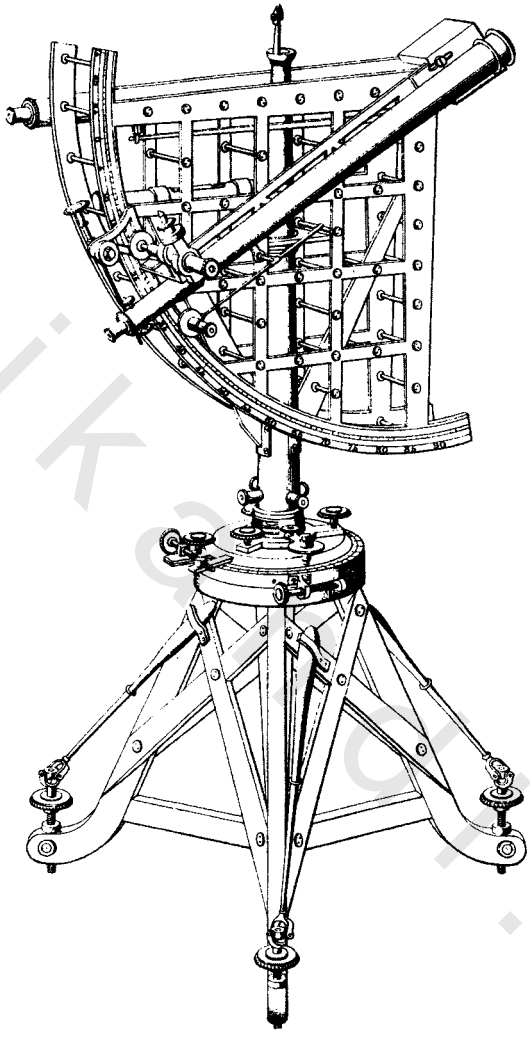
كان أحد الفلكيين، الذي رفض تقرير اختلاف منظر المريخ الذي قدمه كاسيني ـ ومن ثم رفض المسافة التي تفصلنا عن الشمس، التي استنتجها كاسيني من هذا التقرير ـ هو الفلكي البريطاني المشهور إدموند هالي Edmond Halley. اقترح هالي طريقة أخرى لقياس الوحدة الفلكية، هي قياس اختلاف منظر الزهرة. فالزهرة تقترب من الأرض أكثر من اقتراب المريخ منها، لكن تقدير اختلاف منظرها مسألة أصعب بسبب قربها من الشمس. وخلال التقابل، يكون المريخ موجوداً دوماً في السماء الليلية، لأنه تعريفاً، متقابل قطرياً مع الشمس بالنسبة إلى الأرض في هذه التشكيلة؛ لذا فإن النجوم توفر الشبكة الثابتة التي يمكن أن يقاس عليها موقع المريخ. وبالمقابل، فعندما يكون كوكب داخلي كالزهرة موجوداً على أقرب مسافة منا، فإنه يقع دوماً مباشرة بين الشمس والأرض؛ لذا فإن الزهرة ستظهر خلال ضوء النهار. فكيف يمكن عندئذٍ قياس اختلاف منظرها حين لا توجد شبكة نجمية يمكننا تعيين موقعها عليها؟

من الغريب أن حل هذه المعضلة جاء عن طريق شاب مفعم بالحيوية والحماسة هو إدموند هالي. ففي شهر نوفمبر/تشرين الثاني سنة 1676، حين كان طالباً في جامعة أكسفورد، وسنّه لم تتجاوز آنذاك التاسعة عشرة، سافر هالي إلى جزيرة القديسة هيلانه St. Helena، وهي جزيرة في أقاصي جنوب المحيط الأطلسي، وذلك لمشاهدة أجزاء من السماء لا يمكن رؤيتها من إنكلترا. كانت هذه الجزيرة البركانية الصغيرة، الواقعة على بعد 1،200 ميل غرب أنغولا، محطة للقوارب التابعة لشركة الهند الشرقية، ثم أصبحت من

سنة 1816 إلى سنة 1821، المنفى الأخير لنابليون. وقد كتب الفلكي ديفيد س. إيفانز David S. Evans يقول: «يمكن للمرء أن يتحدث ببساطة عن السفر إلى جزيرة القديسة هيلانة. لكن حديثه سيكون مختلفاً عندما يتطرق إلى المهارة أو الحظّ اللذين يجب أن يتوفرا للبحارة كي يتمكنا من الوصول إلى هذه الجزيرة بالاستعانة بتقنيات ملاحية متخلفة جداً».

أقام هالي تجهيزاته على منحدرات قمة الجزيرة، المسماة Diana's Peak التي ترتفع ذروتها عن سطح البحر 2،700 قدم. ومن بين الأرصاد الكثيرة، التي أجراها خلال إقامته في جزيرة القديسة هيلانة مدة 18 شهراً، رصد العبور transit الذي سبق التنبؤ به لكوكب عطارد أمام قرص الشمس في 7 نوفمبر/تشرين الثاني سنة 1677. ولدى مرور قرص عطارد الصغير مباشرة بين الأرض والشمس، أمكن رصده بسهولة عن طريق مقراب (تلسكوب) موجه إلى سطح الشمس المتوهج. (عندما ينظر الفلكيون إلى الشمس بواسطة مقراب، فإنهم إما أن يسقطوا الصورة غير الواضحة على شاشة بيضاء، وإما أن يزودوا المقراب بمرشح قاتم اللون). وقد اقترح الفلكي جيمس كريكوري James Gregory، للمرة الأولى سنة 1663، أن خط الكفاف الدائري للشمس قد يوفر علامة مرجعية تمكّن من قياس اختلاف منظر عطارد. ولدى مشاهدة هالي لحادثة العبور من جزيرة القديسة هيلانه، تصوّر شبكة من الفلكيين يرصدون هذا العبور، في آن واحد، من بقاع بعيدة بعضها عن بعض على سطح الأرض. ويقوم كل من هؤلاء الفلكيين بتسجيل الزمن الدقيق لمرور عطارد عبر خط الكفاف الشمسي، وهذا الزمن يختلف من راصد إلى آخر، بسبب وجودهم في مواقع رصد مختلفة. وستكرر العملية حين يغادر عطارد القرص الشمسي. وعند تجميع الفلكيين لقياساتهم، يمكنهم أن يستنتجوا بدقة اختلاف منظر عطارد. وعندما عاد هالي إلى إنكلترا سنة 1678، وجد أن الحاجة إلى جهود منسقة واضحة جداً، وعلم أن فلكياً واحداً فقط في أوروبا كلها رصد العبور، إضافة إليه.

كان من الممكن لخطة الرصد التعاونية، التي اقترحها هالي، أن تعطي



ربعية محمولة يعود تاريخها إلى مطلع القرن التاسع عشر. من بيرسون (1824).
المصدر: مكتبة وولباخ، جامعة هارڤرد.

نتائج أفضل إذا كان الكوكب هو الزهرة. وقد ذكر هالي أنه بسبب قرب الزهرة من الأرض، سيظهر قرصها أكبر كثيراً من قرص عطارد. كذلك، فإن وقت دخولها أو خروجها المرصود عبر خط الكفاف الشمسي يجب أن يتغيّر من راصد إلى آخر مدة تصل إلى خمس دقائق؛ لذا فإن أخطاء التوقيت التي

تعادل عدة ثوانٍ يمكن تحملها. كانت التجهيزات اللازمة قليلة جداً وهي: ساعة دقيقة، ومقراب محمول لقياس الموقع يسمى رُبعيّة quadrant. وقد تنبأ هالي بأن يكون الخطأ في تحديد اختلاف المنظر الحاصل للزهرة لا يتجاوز 1 في المئة، وبأن اختلاف المنظر هذا سيعطي حجم النظام الشمسي بيقين لا تستطيع بلوغه أرصاد كاسيني للمريخ.

في سنة 1716، نشر هالي بحثاً فصل فيه طريقته في العبور، ودعا فيه إلى إقامة مشروع دولي لتعيين اختلاف منظر الزهرة. وكان من الضروري إجراء تخطيط سلفاً لتحديد مواقع الراصدين وتقاسمهم البيانات التي يحصلون عليها بعد ذلك. كان من الضروري أيضاً وضع الخلافات الشخصية والسياسية جانباً. ومن الواضح أنه لن ينجح هذا المشروع العلمي إلاّ عن طريق التعاون. ومن المعلوم أن حوادث عبور الزهرة نادرة، مرتين كل قرن تقريباً. (مدار الزهرة مائل على مدار أرضنا، لذا فإن العبور لا يحدث إلا في تلك الحالات التي تقع فيها الزهرة مباشرة بين الأرض والشمس).

تنبأ هالي بأن عبور الزهرة القادم للشمس سيكون في 6 يونيو/حزيران سنة 1761، وفي 3 يونيو / حزيران سنة 1769، وبأن كل عبور يستمر عدة ساعات. وقد حذر من أنه لو ضيّع الفلكيون هاتين الفرصتين، لوجب عليهم انتظار الفرصتين التاليتين في 9 ديسمبر / كانون الأول سنة 1874، و 6 ديسمبر/كانون الأول سنة 1882، وفي بحثه الذي نشره سنة 1716، كان هالي يخاطب جيل المستقبل من الفلكيين، لأنه كان يعرف أنه، لا هو ولا الكثير من زملائه، سيعيشون ليشهدوا مرور الزهرة عبر وجه الشمس سنة 1761. بل إنه لن يعيش إلى أمسية عيد الميلاد السنة 1758 ليشهد عودة المذنب، الذي يسمى الآن مذنب هالي تخليداً لذكراه، والذي كان هالي أول من رآه سنة 1682. وقد قام هالي بإجراء حسابات رياضية بينت أن هذا المذنب سيعود إلى الاقتراب من الأرض سنة 1705. كان إدموند هالي رجلاً يتمتع بتفكير مستقبلي حقاً.

سنة 1761، بعد وفاة هالي بتسع عشرة سنة، ثم في سنة 1769، بعد

ذلك بثماني سنوات، انطلق الفلكيون إلى مواقع متباعدة من الكرة الأرضية لينفذوا وصية هالي المتعلقة بعبور كوكب الزهرة. وقد تمركز راصدون ينتمون إلى ثماني دول في مواقع تمتد من إنكلترا إلى باجا في كاليفورنيا؛ ومن النرويج إلى البيرو؛ ومن خليج هدسون إلى رأس الرجاء الصالح؛ ومن سيبيريا إلى جزر الهند الشرقية. وفي سنة 1769 توجه الفلكي نفيل ماسكيلين Nevil Maskelyne إلى جزيرة القديسة هيلانة، التي كانت الموقع الذي شهد كثيراً من إلهامات هالي. ثم إن تشارلز ميسون Charles Mason وجيرميا ديكسون Germiah Dixon، اللذين مسحا بين العبورين خطّهما الشهير عبر ريف بنسلفانيا، سافرا إلى جنوب إفريقية. أما القبطان جيمس كوك James Cook فأبحر بقاربه Endeavor عبر المحيط الهادي ليُودِعَ الفلكي تشارلز كرين Charles Green بين أشجار النخيل في تاهيتي. ولم يحالف الحظ الفلكي الفرنسي كيوم لو جانتيل Guillaume Le Gentil الذي لم يشهد عبور سنة 1761 لأن موقعه الرصدي، وهو مستوطنة بونديشيري Pondicherry، سقطت بيد البريطانيين. وقد فضل لو جانتيل البقاء في الهند خوفاً من أن يفوته مشاهدة عبور سنة 1769. ويمكننا تصور الحزن الذي أصابه عندما انتشرت ستارة من الغيوم في ذلك اليوم الموعود. بعد ذلك عاد لو جانتيل إلى موطنه فرنسا ليكتشف أنه قد أعلن عن وفاته، وأن أملاكه وزعت على أقربائه، وأن وظيفته شُغلت من قبل شخص آخر.

وقد سجلت جميع الأرصاد، وعددها 150، والتي أجريت لحوادث عبور الزهرة، في جميع أنحاء العالم. وخلافاً لآمال هالي، لم تكن النتائج مفيدة جداً. فالزهرة محاطة بجو كثيف، جعل من الصعب على الراصدين تعيين اللحظة الدقيقة التي مس فيها الكوكب القرص الشمسي. ومع ذلك فقد توصلوا، عن طريق اختلاف المنظر غير الدقيق للزهرة، إلى أن الشمس تبعد نحو 91 مليون ميل عن الأرض، وهذه النتيجة تنسجم جيداً مع تقدير كاسيني السابق ومع القيمة المقبولة حالياً للوحدة الفلكية.

عُيّن تاريخ حادثة العبور القادمة في 8 يونيو / حزيران سنة 2004،

وعُيّن أفضل مكانين يمكن أن يرى منهما هذا الحادث، وهما أوروبا الشرقية، وغرب آسيا. بعد العبور الذي حدث سنة 1882، يتطلع وليام هاركنس William Harkness، من مرصد البحرية الأمريكية، قدماً إلى حادثة العبور التي تنتظرنا. وقد كتب هاركنس يقول: «لن يكون هناك عبور آخر للزهرة، إلاّ بعد بزوغ القرن الحادي والعشرين، وذلك عندما تتفتح الزهور في سنة 2004. وعندما حدث العبور الأخير، كان عالم المفكرين يستيقظ من سبات طال أمده عصوراً، وكان النشاط العلمي المدهش الذي أدى إلى معارفنا المتقدمة الحالية مازال في بداياته. تُرى، ما هو حال العلم عندما نبلغ موسم العبور التالي؟ هذا أمر لا يعرفه إلا الله». إن حوادث عبور الزهرة هي دقات الساعة السماوية التي تدق ثوانٍ طول كل منها قرن في حياة حضارتنا.

إن الأجرام السماوية الوحيدة الأخرى التي تضلّ طريقها إلى داخل مجال تثليث الأرض هي بضع كويكبات asteroids، أشهرها إيروس Eros الذي سمي باسم إلّه الحب في الأساطير اليونانية. إيروس كويكب غير مألوف قطره قرابة 21 ميلاً، وهو كتلة صخرية يحملها مدارها حول الشمس، من وقت إلى آخر، لتصبح قريبة من كوكبنا زهاء 14 مليون ميل فقط. هذه المسافة تعادل قرابة 60 مثلاً من بعد القمر عن الأرض، ومع ذلك، فهذه المسافة تجعل الكويكب قريباً قرباً كافياً من الأرض ليبدي اختلاف منظر قابل للقياس من قبل راصدين في مواقع متباعدة على سطح الأرض. وكما هو الحال في الكواكب، فإن تعيين اختلاف منظر كويكب يسمح بحساب الوحدة الفلكية.

ونورد فيما يلي جوهر هذا الإجراء. إن السمات الرئيسية المدارية لكل من الأرض وإيروس معروفة جيداً، وهي: حجم المدارين، وشكلهما، وتوجيههما في الفضاء، ودورهما period (الوقت الذي يستغرقه كل منهما للقيام بدورة كاملة حول الشمس). ويبعد إيروس عن الشمس نحو 1,5 مرة وسطياً من بعد الأرض عن الشمس، مع أن مداره يجعل بعده عن الشمس

أحياناً أقل من أصغر مسافة تفصل الأرض عن الشمس خلال دورانها حولها. الدور المداري لإيروس هو 642 يوماً، في حين أنه في حالة الأرض 365 يوماً. ويعرف الفلكيون تماماً أين يقع كلٌّ من الأرض وإيروس في مداريهما في كل الأوقات. وبوجه خاص، إذا استعمل الفلكيون الدساتير الرياضية للحركة الكوكبية، فإنهم يتمكنون من التنبؤ بالمسافات الفاصلة بينهما ـ بالوحدات الفلكية ـ في أي لحظة. لذا فإن القياس الآني لعدد الأميال التي تفصل إيروس عن الأرض، سيُظْهِرُ طول الوحدة الفلكية مقدراً بالأميال. في سنة 1931 قام فريق دولي من الفلكيين لتنفيذ هذه المهمة. فخلال تلك السنة، الذي اقترب فيه إيروس اقتراباً شديداً من الأرض، كان راصدون ينتمون إلى 15 بلداً يعملون بانسجام، بعضهم مع بعض، لقياس اختلاف منظر إيروس. وقد أخذت نحو 3،000 صورة للكويكب المتحرك خلال زحفه على الخلفية النجمية، واستغرق تحليل الصور عشر سنوات أخرى. وكانت النتيجة هي التالية: عندما حدث أكبر اقتراب لإيروس من الأرض، كان البعد بينهما زهاء 16 مليون ميل. واستناداً إلى هذه النتيجة، حُسِبَتْ الوحدةُ الفلكيةُ التي تَبَيَّنَ أن طولها كان قرابة 93 مليون ميل. لنفترض أن الشمس كانت ممثلة ببالون للتنبؤ بالطقس قطره 11 قدماً؛ عندئذٍ تكون أرضنا بحجم كرة الطاولة تدور حول البالون على مسافة ربع ميل عنه. وبهذا المقياس نفسه، سيكون إيروس واقعاً على مسافة من كرة الطاولة طولها ثلاثة أرباع طول ملعبٍ لكرة القدم، وسيكون من الصعب رؤيته بواسطة العين المجردة.

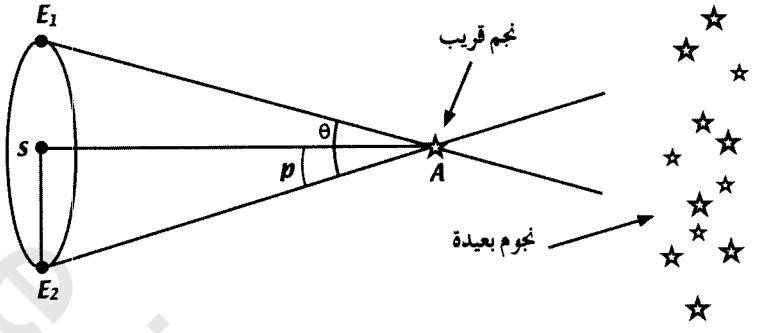
نجحت وكالة ناسا NASA منذ وقت قريب ـ وتحديداً في عيد القديس فالنتاين Valentine سنة 2000 ـ في إطلاق سفينتها الفضائية المسماة Near Earth Asteroid Rendezvous في مدار حول إيروس. وقد ظل المشرفون على البعثة يتعقبون الموقع المداري للسفينة الفضائية، مستعملين الطريقة التي أصبحت من طراز عتيق، وهي التثليث على السمات السطحية لإيروس. وقبل يوم عيد القديس فالنتاين مباشرة سنة 2001، هبطت السفينة برفقٍ على سطح الكويكب الذي تكسوه الصخور الضخمة.

إن أوسع طول لخط قاعدي يمكن تحقيقه على الأرض هو 8،000 ميل ـ أي طول قطر الأرض ـ ومن المؤكد أن القدماء كانوا يتمنون أن يكون بالإمكان توسيع هذا الخط القاعدي، لكننا في النموذج الأرضي المركز للكون، هذا هو الحد الأعلى للخط القاعدي لاستكشاف اختلاف المنظر. أما إذا كان الترتيب الشمسي المركز للكون صحيحاً، فإن الأرض تطوف حول الشمس في فلك ضخم. وعندئذٍ تحملنا حركتها إلى نقاط في الفضاء لا يمكن لسكان العالم الثابت ـ في النظام الأرضي المركز ـ الوصول إليها. وبسبب حركة الأرض حول الشمس، يمكننا أن نكبّر الخط القاعدي الذي طوله 8،000 ميل أكثر من عشرين ألف مرة، وأن نسقط قوى استكشافنا لاختلاف المنظر على عالم النجوم.

توسيع الخط القاعدي (IV):
اختلاف المنظر النجمي

لنفترض أن أرستارخوس كان مصيباً، أي أن الأرض تدور حول الشمس. عندئذٍ يكون قطر مدار الأرض ضعف نصف قطر المدار الذي يساوي 93 مليون ميل، أي 186 مليون ميل. وحيثما وجدت الأرض حالياً في مدارها، فبعد نصف سنة من الآن ستكون في الموقع المقابل قطرياً لموقعها الحالي، أي أن الأرض ستبتعد بمقدار 186 مليون ميل عن موقعها السابق. وهذا يعني أنه خلال ستة أشهر من طواف الأرض، فإن راصداً على الأرض يمكنه بلوغ مواقع في الفضاء تبعد عن موقعه السابق مسافةً تصل إلى 186 مليون ميل. وهنا يكمن الدافع للكفاح الملحمي لعلم الفلك الرامي إلى رصد اختلاف منظر نجم. فإذا كان بمقدور مساح تثليث شجرة على خط قاعدي طوله مئة قدم، فإنه قادر، بلا ريب، على تثليث نجم على خط قاعدي طوله 186 مليون ميل.

نرى في الشكل السابق تمثيلاً للأرض في فلكها حول الشمس التي



اختلاف منظر نجم

رمزنا لها بالحرف S. (يُرى فلك الأرض في يسار الشكل). وفي وقت معطى، تكون الأرض موجودة في الموقع E1؛ وبعد ستة أشهر، تكون بلغت الطرف المقابل E2 من مدارها. المسافة SE1 أو SE2 بين الأرض والشمس هي وحدة فلكية واحدة، أي 93 مليون ميل. ويقع في أغوار الفضاء نجم، رمزنا له بالحرف A. عندما تكون الأرض في E1، نوجه منظارنا باتجاه النجم، ونعيّن مكان ظهوره بالنسبة إلى النجوم الأخرى التي يفترض أن تكون خلفه. ننتظر بعد ذلك مدة ستة أشهر، ونعيد رصد النجم A من موقعنا الجديد E2. فإذا كان النجم قريباً بقدر كافٍ، فسيكون موقعه انزاح بالنسبة إلى الخلفية النجمية، (إذا كانت نجوم الخلفية هذه بعيدة جداً، فإن تغير مواقعها لا يمكن تبيّنه. تذكر أنه كلما ابتعد الجسم، صغر اختلاف منظره).

إن المقراب (التلسكوب) الذي وُجه إلى النجم A من الموقع E1 سيتغير توجيهه لدى توجيهه إلى A من E2. ويبدو موقع النجم قد تغير عند الانتقال من النقطة E1 إلى النقطة E2. والاختلاف في الموقع هو اختلاف منظر النجم، الذي نشير إليه هنا بالزاوية 0. لكن الفلكيين اتفقوا على تعريف اختلاف منظر نجم بنصف الزاوية 0، أي بنصف الانزياح الكلي المرصود للنجم في السماء. سنرمز إلى زاوية اختلاف المنظر الفلكي هذا بالحرف P.

يمكن معرفة السبب في تعريف اختلاف المنظر النجمي بأنه نصف

الانزياح الكلي للنجم إذا فكرنا في المنظر من النجم A. فإذا نظرنا من هناك إلى النظام الشمسي، فإننا نرى الشمس والأرض دائرة حولها. إن الزاوية التي نرى بها الوحدة الفلكية من النجم، تساوي زاوية اختلاف منظر النجم P. وفي الواقع فإن تعريف الفلكيين لاختلاف المنظر يتضمن خطأً قاعدياً طوله يساوي طول نصف قطر فلك الأرض، أي وحدة فلكية واحدة. وثمة قاعدة رياضية بسيطة تعطي بُعْدَ نجمٍ، مقدّراً بالوحدات الفلكية، بدلالة اختلاف المنظر p لذلك النجم، وهي:

$$d = 206{,}265 / p$$

لا تصح هذه القاعدة إلاّ إذا عبرنا عن زاوية اختلاف المنظر p بوحدات الثواني القوسية. وتساوي الزاوية القوسية 1/3,600 من الدرجة، وقد تبيّن أن هذه الوحدة ملائمة جداً للتعبير عن اختلافات المنظر النجمية الصغيرة. وثمة وحدة أكبر إلى حد ما، وهي الدقيقة القوسية، التي تساوي 1/60 من الدرجة، وهي أكبر من الثانية القوسية بستين مرة. (تسمى هاتان الوحدتان في علم الهندسة ثوانٍ ودقائق؛ وقد اعتمد الفلكيون كلمة قوس arc لتفادي الخلط مع وحدات الزمن). وعلى سبيل المثال، فإن نجماً قياس اختلاف منظره ثانية قوسية واحدة، يقع على مسافة 206،265 وحدة فلكية من الأرض. تُرى، ما هو عدد النجوم خارج النظام الشمسي التي بعدها عن الأرض يساوي هذه المسافة بالضبط؟ الجواب هو أنْ لا وجود البتة لنجوم تبعد بهذا القدر تماماً. ويقول جون أبدايك John updike بحق في كتابه The Poorhouse Fair ما يلي: «إنني أرى أن السمة الرئيسية للكون هي الفراغ. ثمة لا نهاية من حوادث اللاوجود مقارنة بالعدد الضئيل لحوادث الوجود في الكون».

نظرنا حتى الآن في سلوك نجم في تلك الحالة فقط التي رأيناه فيها من نقطتين متقابلتين قطرياً على مدار الأرض حول الشمس. والأمر يبدو كما لو أننا أخذنا لقطة فوتوغرافية لنجم في لحظة، ثم أخذناها ثانية بعد ستة أشهر، ثم استنتجنا أن النجم يقفز من بقعة سماوية إلى أخرى. لكن ما الذي يحدث

للنجم بين هاتين اللقطتين؟ ما هو المكان الذي سيشغله هذا النجم في السماء، بعد ثلاثة أشهر، مثلاً، من رصده أول مرة؟ تُرى، لو أننا واصلنا مراقبة موقع النجم باستمرار خلال السنة كلها، فما هو الشكل الهندسي الذي يمكن لهذا النجم رسمه في السماء؟

ظل العاملون في تعيين اختلافات المنظر يطرحون هذا السؤال على أنفسهم طوال قرون؛ ما من فلكي يعمل في اختلاف المنظر النجمي يرصد نجماً، ثم يتوقف عن عمله ستة أشهر منتظراً الرصد الثاني لهذا النجم. وبالعكس، فإن الفلكيين يسجلون أكبر قدر يمكنهم إنجازه من الأرصاد للنجم المستهدف. وهم لا يدخرون أي جهد في محاولاتهم الحصول على أي إشارة إلى اختلاف منظر، لأن الانزياح الزاوي صغير جداً، وسرعان ما يضيع في خضم الأشعة الضوئية المضطربة الصادرة عن النجم عبر المقراب.

وكما هو الحال عند العلماء، فإن الفلكيين يسيطر عليهم الشك نتيجة عملهم الطويل في الأرصاد، وطبيعتِهم الخاصة. وما يحدث في حال اختلاف المنظر النجمي، هو أنه إذا كان رصدان يزعمان أنهما يبيّنان نجماً في موقع أول، ثم في موقع آخر، فسيصرف النظر عنهما فوراً. فهناك الكثير من التفسيرات البديلة لسلوك النجم في «القفز» من منطقة إلى أخرى، معظمها يتعلق بعدم أهلية الراصد أو قلة خبرته. وبغية الاقتناع بصحة ظاهرة دقيقة، مثل اختلاف المنظر النجمي، يطلب الفلكيون رؤية سلسلة من الأرصاد الجيدة التوقيت والمنفّذة جيداً. إنهم يريدون رؤية بيانات data جرى تصحيحها بعد أن أدخل في الاعتبار التقلبات في جو الأرض، الذي يرشح الضوء النجمي كله، وبعض العيوب الخاصة بمقراب الراصد. إنهم يريدون ملامح في البيانات تنسجم مع ما هو مقبول نظرياً. والخلاصة، إنهم يريدون الاقتناع بأن اختلاف المنظر وحده دون غيره، يمكن أن يفسر مجموعة الشواهد الموجودة أمامهم.

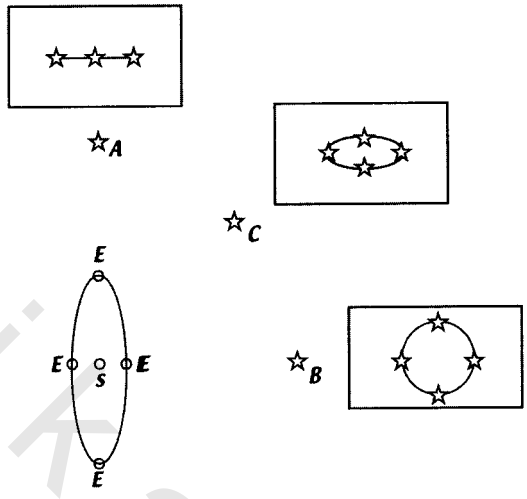
وعلى وجه التحديد، ما الذي يتوقع فلكي، منهمك في تقدير اختلاف المنظر، أن يراه عندما يقوم بدراسة متواصلة لنجم على المدى الطويل؟

يتوقف الجواب على موقع النجم بالنسبة إلى مستوى فلك الأرض، كما هو مبيّن في الأشكال الواردة في الصفحات التالية. لنأخذ النجوم الثلاثة التالية: النجم A يقع في نفس مستوى الفلك الأرضي، والنجم B يقع في مستوى عمودي على مستوى فلك الأرض، والنجم C موجود في موقع متوسط بين A و B.

مع دوران الأرض حول الشمس، يبدو النجم A متهادياً من جانب إلى آخر على طول خط مستقيم؛ وأياً كانت الطريقة التي تتحرك بها الأرض في فلكها، فإن النجم يبدو متحركاً بطريقة معاكسة لاتجاه حركة كوكبنا. ولإقناع نفسك بأن هذا هو الحال تماماً، ارفع إصبعك بوضع رأسي ثانيةً أمام وجهك، وأغمض ثم افتح بالتناوب كلاً من عينيك. فعندما تفتح عينك اليسرى فقط، تبدو إصبعك انتقلت إلى اليمين. ويظل هذا الأثر صحيحاً في النجم لأننا نراه من الأرض المتحركة حول الشمس. بيد أنه خلافاً للقفزات المتقطعة لإصبعك، فإن اهتزازات النجم من جانب إلى آخر في السماء تحدث بطريقة مستمرة.

يقع النجم B على خط مستقيم عمودي على مستوى فلك الأرض. وخلال حركة الأرض، يبدو النجم متحركاً على دائرة صغيرة في السماء، وهذه الحركة تبدو لنا أيضاً باتجاه معاكس لاتجاه حركة كوكبنا في مداره. وحيثما وجدت الأرض في مدارها، فسيبدو النجم متقابلاً قطرياً في دورة اختلاف منظره الدقيقة في السماء. ولمعرفة السبب في حدوث ذلك، تصور قلماً طويلاً جداً، طرفه الذي تقع فيه الممحاة مثبت بالأرض، والقسم الباقي منه مثبت بالنجم. لمّا كانت الأرض التي تدور تحمل قاعدة القلم، فإن رأسه يرسم دائرة عكسية في السماء. وقطر دائرة اختلاف منظر النجم يتوقف على بعد النجم عن الأرض: فكلما زاد بعده هذا، صغرت الدائرة. وإذا كان النجم بعيداً جداً، فإن الدائرة تكون أصغر من أن تسمح باكتشافها.

يقع النجم C بين النجمين A و B. وشكل اختلاف منظره وسطٌ بين الخط المستقيم للنجم A وبين دائرة النجم B. وفي الحقيقة، فإن هذا الشكل



حركة اختلافات المنظر السنوية في مواقع مختلفة من مدار الأرض.

دائرة مفلطحة، أي قطع ناقص. وكلما اقترب موقع النجم من مستوى فلك الأرض، ازداد تفلطح القطع الناقص. ومن الممكن اعتبار الاهتزاز المستقيم للنجم A، والحركة الدائرية للنجم B، حالتين جديتين متطرفتين للشكل الناقصي عموماً.

اختلاف المنظر النجمي هو نتيجة ثانوية لحركة الأرض في فلكها حول الشمس. ولن يرى راصد تخيلي على الشمس اختلاف منظرٍ للنجوم، لأن الشمس ثابتة في النظام الشمسي. وبالمثل، فإن راصداً موجوداً على كوكب بعيد جداً، مثل بلوتو، سيرى اختلافات منظر نجمية أكبر مما نراه نحن من الأرض. فبلوتو يبعد عن الشمس مسافة أكبر بأربعين مرة من مسافة الأرض عنها، لذا فإن جميع اختلافات المنظر ستبدو أكبر بأربعين مرة. وهذا خبر جيد. أما الخبر السيئ، فهو أنه لا يوجد على بلوتو أكسجين عملياً، ثم إن درجة حرارة سطحه 220 درجة مئوية تحت الصفر. هذان أمران يجب أخذهما في الاعتبار قبل التفكير بإقامة مرصد على بلوتو.

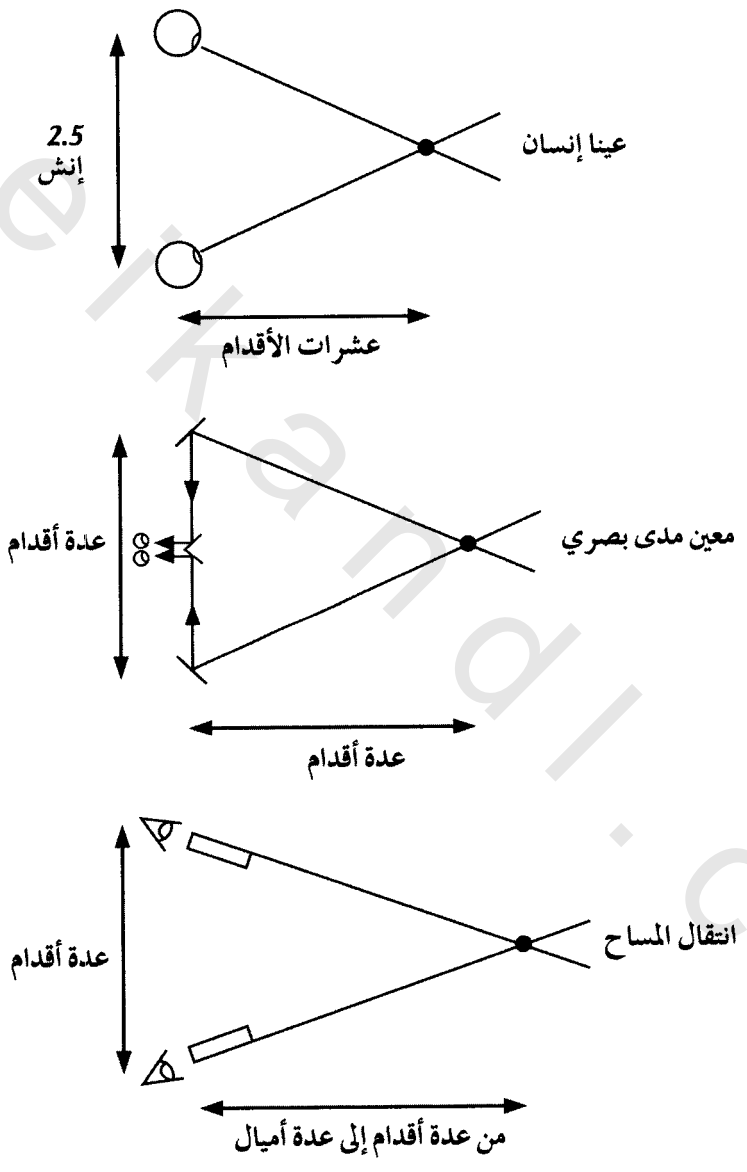
ثمة عامل آخر يجب إدخاله في الحسبان لدى التنبؤ بما يمكن لراصدٍ

اختلافِ المنظر أن يتوقع مشاهدته عند تعقب نجم مدة طويلة. فحتى الآن، افترضنا أن النجوم تبقى ثابتةً في الفضاء خلال دوران الأرض دورتها السنوية حول الشمس. إلا أن هذه النجوم «الثابتة»، كما سنعرف في وقت لاحق، تتحرك في الفضاء. ونتيجة لذلك، فخلال قيام نجم معين بشق طريقه على منحنى اختلاف منظره الناقصي، فإنه ينطلق بسرعة فائقة عبر الخلاء. والمسار الحاصل الذي يراه راصد أرضي هو إذن محصلة حركة النجم المستقيمة في الفضاء وحركته على منحنى اختلاف منظره الناقصي.

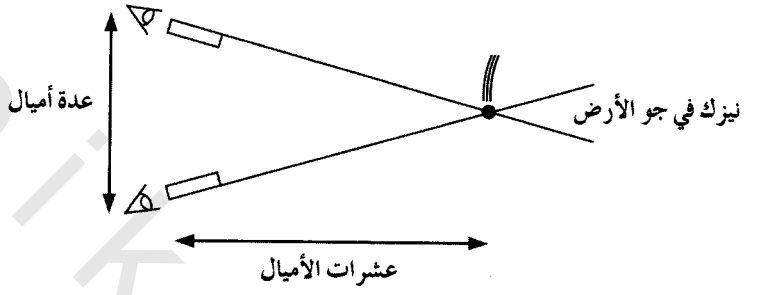
ولتصور الشكل الذي يمكن أن يتخذه هذا المسار الهجين، لننضم إلى أطفال جيراننا في اللعبة التي يمارسونها ليلاً، والتي يحمل كل منهم فيها مصباحاً كهربائياً. الهدف هنا هو اللحاق بأعضاء الفريق المنافس وتجميد حركتهم إذا سَلّطْتَ عليهم ضوء مصباحك. ويجب على اللاعبين «المجمّدين» أن يقفوا دون حراك إلى أن «يتحرروا» بتسليط ضوء مصباح آخر عليهم. لنفترض أن لاعباً مجمداً يحرك ضوء مصباحه ببطء وفق قطع ناقص خلال مراوحته في مكانه. فإذا نظرت إليه من مسافة ما، فإنك سترى شعاع المصباح الضوئي يرسم عروة محكمة في الظلام. لنفترض أيضاً أن اللاعب تحرر وبدأ بالعدْو، مع استمراره في تحريك مصباحه في القطع الناقص الصغير. عندئذٍ يكون المسار الظاهري للشعاع حصيلة حركة ذراع اللاعب البطيئة وحركة ركضه المستقيمة. والنتيجة النهائية هي: بقعة وامضة تتذبذب إلى الأعلى والأسفل خلال تقدمها إلى الأمام.

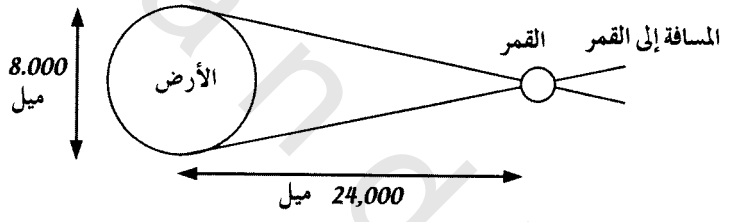
هذا هو بالضبط المسار الذي يفتش عنه صياد اختلاف المنظر بواسطة مشاهدة نجم متحرك قريب. والصبر هنا مطلوب، إذ إن الأرصاد المتأنية لكشف إشارة واضحة لا شك فيها تستغرق سنة على الأقل، وهذه الإشارة هي خط مستقيم فيه اهتزاز دقيق إلى حد بعيد. إنها بقعة من الضوء تتهادى عبر السماوات، تبتعد قليلاً عن مسارها العام باتجاه، ثم باتجاه آخر.

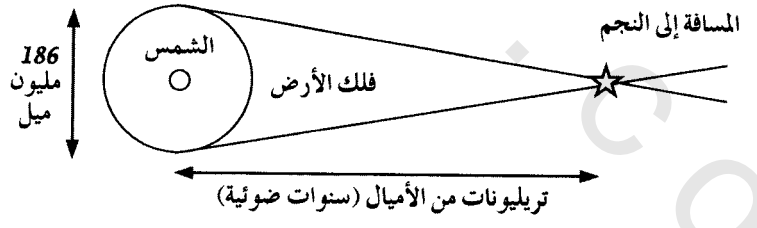
تصور تطريزاً على قماش الكنفا يعج بالخيوط السميكة المحبوكة التي تدخل في القماش وتخرج منه. تصور الآن خيوط تطريز على قماش الكنفا



توسيع الخط القاعدي: قياس الخط القاعدي من مكانين قريبين ثم من مكانين بعيدين







obeikandl.com

وهي تبدأ بالتلاشي إلى أن تغدو غير مرئية، باستثناء خيط واحد، يبدأ بالتموج، وكأن قوى خفية تحبكه. ثم تصور نجماً ينزلق على طول هذا الخيط كخرزة تنزلق على طول طوق، وتسير على القوس اللطيف للخيط الذي يتعرج من طرف إلى آخر. إن الفلكي يشاهد النجم بواسطة مقراب، وربما يراه وهو يهتز. ومن الصعب الجزم بذلك، إذ إن طريق النجم يذكر بنسيج خيط التطريز على قماش الكنفا، لكنه نسيج ذو دقة عالية.

obeikandl.com