الفصل الثالث

تهذيب خرائط هيرودوت

تصور الرحالة الاغريقى هيرودوت أنه يعرف العالم جيداً . ساح حول البحر المتوسط، وسمع كثيرا عن رحلات الفينيقيين داخل أفريقيا . جمع ما عرفه عن معالم الكرة الأرضية ، ليقرر أن طول أوروبا يعادل طول أفريقيا وآسيا مجتمعتين ، أما عرضها فهو ، فى رأيى ، ليس مما يدخل فى مجال المقارنة . وضع هيرودوت العلاقات بين الأشياء فى موضعها الصحيح تقريبا ، لكن المسافات بينها كانت خاطئة لحد كبير .

ظل رسم الخرائط ، لألفى سنه ، يتم بالطرق الاغريقية . كانت الخرائط أشياء نسبية تتم بمحاولة توفيق المعالم سويا دون قياس للمسافات الواقعية . كانت المواقع المألوفة تحتل مكاناً على الخريطة أكبر بكثير مما تستحقه . ولم تكن خرائط العصور الوسطى أفضل كـثيرا . قد ندرك الصورة العامة لأفريقيا ، لكنها صورة مشوهة للغاية. كان ادراك راسمى الخرائط للبعد يحدده الزمن الذى تستغرقه الرحلة بين نقطتين ، لا المسافة الواقعية بينهما .

وعلم الوراثة ، كالجغرافيا ، يدور حول الخرائط – خريطتنا الوراثية . ابتُـكرت الساعات الدقيقة والبوصلة بعد هيرودوت بألفى سنه ، ولم يكن من المستطاع حتى

ذلك الحين أن نقيس المسافات الواقعية على سطح الأرض . وما أن اكتملت صناعة هذه الأدوات حتى بدأت الخرائط الجيدة فى الظهور – لتصبح خرائط هيرودوت مضحكة . يحدث نفس الشيء الآن فى البيولوچيا . فالوراثيون على ما يبدو كانوا حتى عهد قريب يكررون نفس أخطاء قدامى الإغريق .

ومثلما كان الحال فى رسم خريطة العالم ، كان على التقدم فى رسم الخرائط الجينية أن ينتظر التكنولوچيا . أما وقد تحققت الآن هذه التكنولوچيا فقد بدأ شكل الأطلس البيولوچى فى التغير السريع . فما كان يبدو منذ عقدين خريطة بسيطة للطاقم الوراثى يعول عليها (جاءت عن وراثة معالم مثل لون البسلة أو الأمراض الوراثية) قد أصبح الآن يبدو مشوها جدا .

اكتشف مورجان ، بذبابته ، عددا كبيرا من الصفات التى تسلك السلوك المندلى. لم يكن ثمة تلازم بينها عند الانتقال عبر الأجيال . وكان هناك استثناء كبير . ثمة مجاميع معينة من الصفات ـ تلك المرتبطة بالجنس ـ لم تكن تسلك هذا السبيل . وجد مندل أن النسب الموروثة للون البسلة لم تكن تتأثر بما إذا كانت البذرة مستديرة أو مجعدة . واكتشف مورجان أزواجا من الصفات (كلون العين والجنس) كثيرا ما تنتقل سويا خلال الأجيال . وبسرعة اكتشف كثيرا من الصفات المختلفة بذبابة الفاكهـة (كصفات لون العين والجناح المختزل والشعر المنشعب) تشترك مع الجنس ومع كـروموزوم س فى نمط التوريث . كانت ـ فى تحد واضح لقواعد مندل ـ غير مستقلة ، أو كانت ـ إذا استخدمنا مصطلح مورجان ـ مرتبطة .

وفى سنين قليلة ظهرت صفات أخرى تنتقل سويا ، ليست بالضرورة على كروموزوم الجنس . أجريت تجارب تربية مجهدة تضمنت ملايين الذباب ، ليتضح أنه من الممكن ترتيب كل جينات الدروسوفيلا فى مجاميع ، بناء على ما إذا كانت تورث مستقلة (بالأسلوب المندلى) أم لا . البعض من مجاميع الصفات يسلك بالضبط السلوك الذى يتوقعه مندل ، والبعض الأخر تنحو فيه الصفات الآتية من أحد

الأبويين إلى أن تبقى سويا فى النسل وفى الأجيال التالية . كانت الجينات التى تتحكم فى مثل هذه المجاميع الأخيرة جينات من نفس المجموعة الارتباطية – كما أسماها مورجان . ثم اتضح أن عدد المجاميع الارتباطية مساوٍ لعدد الكروموزومات . كان هذا الكشف هو بداية رسم خريطة الارتباط للدروسوفيلا ، وأصبح فيما بعد الرابطة بين المندلية وبين البيولوجيا الجزيئية .

الارتباط هو اتجاه مجاميع الصفات لأن تنتقل سويا عبر الأجيال . وهو ليس شيئا مطلقا . فقد يكون التلازم بين الجينات قويا أثناء انتقالها عبر الأجيال ، وقد لا تفضّل الجينات كثيرا أن تظل بصحبة بعضها بعضا . ولقد فُسر عدم كمال الارتباط ببضع وقائع شاذة تحدث عند تكوين الحيوان المنوى والبويضة . تحمل كل خلية نسختين من كل كروموزوم . ينصّف العدد أثناء انقسام خاص يحدث بخلايا الخصية والمبيض عند تكوين الخلايا الجنسية . فى هذه العملية ترقد الكروموزومات سويا كلٌ مع قرينه ، وتتبادل أجزاءً من بنيتها فى عملية تسمى التأشيب . وعلى هذا فإن الحيوان المنوى أو البويضة ، يحمل توليفات من المادة الكروموزومية تختلف عن تلك الموجودة فى خلايا الأبوين .

اعتقد مورجان أن هذا قد يفسر السبب فى أن هناك داخل المجموعة الارتباطية جينات تورث فى تزامل حميم ، بينما يورث غيرها فى تلازم أقل حميمية . اقترح أن الجينين إذا وقعا على مقربة من بعضهما بعضا على الكروموزوم ، قل احتمال افتراقهما عندما تتبادل الكروموزومات مادتها أثناء تكوين الحيوان المنوى أو البويضة. فإذا ما كانت ثمة مسافة بعيدة بينهما ، زاد احتمال انفصالهما . أما تلك الصفات التى تورث مستقلة فتقع على كروموزومات مختلفة .

وعملية التأشيب هذه هى إعادة ترتيب إرث كل من الوالدين . فإذا ما تمت ، أصبح كل كروموزوم فى الجيل التالى مزيجاً جديدا من المادة الوراثية مؤلفا من قطع أُعيد ترتيبها من زوج الكروموزومات المعنى .

استُخدم التأشيب لرسم أول الخرائط الوراثية . كانت هذه تبين ترتيب الجينات، ولاشيء أكثر ، تقريبا . تنظم الجينات فى تتابع ، ويمكن تحديد مواقعها عن طريق حساب مقدار التغير فى هذا التتابع بسبب التأشيب فى كل جيل . اقترح مورجان أن الجينين اللذين يندر أن يفترقا أثناء التأشيب لابد أن يكونا أقرب إلى بعضهما بعضا ، فإذا كان الجينان ينفصلان كثيرا ، كان موقعاهما متباعدين . تمكن مورجان ، بدراسة الجينات اثنين اثنين أو ثلاثة ثلاثة ، من التوصل إلى ترتيبها على الكروموزومات ، وإلى البعد النسبى بينها . وبتجميع المعلومات عن مجموعات صغيرة من الصفات الوراثية أمكن رسم خريطة ارتباط لجينات الدروسوفيلا .

كان منهجه – خريطة ترتكز على الاستثناءات من المندلية – منهجا فعالاً . استُخدم فى البكتريا والطماطم والفئران وغيرها من الكائنات الحية . رسمت خرائط الآلاف من الجينات بهذه الطريقة . ولقد أمكن فى الدروسوفيلا ترتيب كل الجينات تقريبا على طول الكروموزومات .

ولما كان عمله يتطلب تجارب تربية ، فقد بقيت خريطة الارتباط البشرية بيضاء تقريبا . فعدد الأفراد فى معظم العائلات عادة ما يكون أقل من أن يسمح بالبحث عن الانحرافات من قواعد مندل . ونتيجة لذلك ، بدا أنْ ليس ثمة أمل كبير فى أن نستطيع يوما رسم الخريطة الوراثية للبشر .

أما الاستثناء الوحيد من هذه الأرض المجهولة فقد كان الارتباط بالجنس . فالواضح أنه إذا ما ارتبطت الجينات بكروموزوم س ، فلابد أن تكون مرتبطة ببعضها بعضاً . لم يستغرق الأمر طويلا لرسم خريطة الكثير من الجينات البشرية على الكروموزوم س . ومع ذلك فقد مضى رسم خريطة الارتباط بطيئا لدرجة مزعجة . حدد موقع جين عمى الألوان على الكروموزوم س مبكرا – فى عام ١٩١١ ، لكن لم يُكتشف جين على أى كروموزوم آخر إلاّ عام ١٩٥٥ ، عندما ظهر أن جين مجاميع الدم أ ب o يرتبط بشذوذ فى الهيكل العظمى . ثم حدد العدد الحقيقى

لكروموزومات الانسان فى العالم التالى . وقُرن أول چين غير مرتبط بالجنس بالكروموزوم الذى يحمله فى عام ١٩٦٨ . لقد استغرق تحريك عملية رسم خريطة الارتباط فى الانسان زمنا طويلا ، ولا يزال الطريق أمامه طويلا .

تحول علم الوراثة عن طريق منهج للتفحص أقل براعة وأكثر فعالية ، منهج لا يعتمد على تجارب التربية ، وإنما يتضمن خريطة أكثر تقليدية ، خريطة فيزيقية توضح الترتيب الواقعى لكل القواعد على طول الدنا ، لا خريطة بيولوچية مبنية على أنماط الوراثة . ولقد غيرت الخريطة الجديدة فكرتنا عن ماهية الچينات .

قامت الثورة التقنية فى البيولوچيا الجزيئية ـ وفى زمن قصير حقا ـ بتوضيح ملامح الدنا وطريقة عمله بالتقريب . منذ ثلاثين عاما كان البيولوچيون الجزيئيون وقد ملأتهم الغطرسة . تصوروا أنهم قد حلوا كل مشاكل الوراثة ، ستؤدى المقدرة الجديدة على قراءة الدنا ، على وجه الخصوص ، المهمة التى فشلت دراسات العائلات فى إتمامها . ستعرفهم بمواقع الچينات وترتيبها جميعا . سيكتمل الصرح الذى أرسى مندل قواعده . كان للتفاؤل إذن ما يبرره . وكان من المقبول أن نفترض أن الخريطة الفيزيقية للچينات ستشبه كثيرا الخريطة البيولوچية المرتكزة على أنماط الوراثة ، وقد تحل محلها عندما يحين الوقت . اكتمل كِبَر البيولوچيين الجزيئيين بموهبة حب الدعاية للذات ، الموهبة التى لابد وأن كان سينفر منها مؤسسو علم الوراثة .

فى طفولة علم وراثة الانسان ، منذ عشرين عاما ، كان للبيولوچيين نظرة صبيانية عن حقيقة العالم . كانت خريطة الارتباط ـ كمثل الخريطة الذهنية لطفل فى الحادية عشرة (أو لهيرودوت) ـ لا تحمل سوى عدد قليل من المعالم المألوفة، كلٌ فى الترتيب الصحيح بالنسبة لغيره . ولقد تغير هذا كله بالاستخدام المرهِق ـ إن يكن موضوعيا ـ لمقياسٍ للبعد .

اعتمدت نجاحات المستكشفين الجزيئيين ، كمثل الجغرافيين من قبلهم ـ على أدوات جديدة للمسح جعلت من العالم مكانا أفسح وأكثر تعقيدا . أما الأدوات التى استخدمت فى الجغرافيا الجزيئية فتستحق التنويه .

كانت الأداة الأولى هى التفريد الكهربى ، فصل الجزيئات فى مجال كهربى . فالكثير من المواد البيولوچية ، ومن بينها الدنا ، يحمل شحنة كهربية ، وإذا ما وضعت بين قطبين ، سالب وموجب ، فإنها تتحرك نحو واحد منهما أو الآخر . تستعمل مادة الچيل الغروية (وتعمل كالمنخل) فى تحسين عملية الفصل. كان الچيل يصنع فى أول الأمر من نشا البطاطس ، أما الچيل الحديث فيصنع من بوليمرات كيماوية . ولقد جربت چيل الفراولة ، ووجدته صالحا تماما. يفصل الچيل الجزيئات بناء على حجمهـا وشكلها : فالجزيئات الكبيرة تتحرك بشكل أبطأ أثناء مرورها خلال المنخل . هناك طرق عديدة يمكن بها تحسين العملية كأن يعكس التيار كل بضع ثوان . هذا يعنى أن القـطَع الطويلة من الدنا يمكن أن تفـرد كهربائيا ، إذ تلف وتبسط فى كل مرة يفتح فيها التيار .

يستطيع الكمبيوتر الذى أكتب عليه هذا الكتاب أن يقوم ببضع مهام لا لزوم لها! فمن بين مواهبه مثلا أن فى مقدوره أن يفرز الجمَل حسب طولها . سيصفُ هذه الجملة ، ذات الثمان عشرة كلمة ، مع الجمل زميلاتها من نفس الطول دون ثمة علاقة تربطها سويا . وهذا ما يفعله التفريد الكهربى مع الجزيئات . يمكن أن نقيس طول قطعة الدنا بتحديد المسافة التى تحركتها فى الچيل . ويمكن أن نحدد موقعها بالضوء فوق البنفسجى (الذى يمتصه الدنا) أو بالصبغات الكيماوية أو بواسم مشع. وستصطف كل قطعة مع زميلاتها ممن يحمل نفس العدد من حروف الدنا .

ثمة أداة أخرى لمسح الدنا تستعمل إنزيماتٍ تُستخلص من البكتريا . تهاجم الڤيروسات البكتريا . تولج الڤيروسات نفسها فى دنا البكتريا وتجبرها على صناعة نسخ ڤيروسية جديدة . لكن للبكتريا وسيلتها للدفاع : إنزيمات تمزق الدنا الغريب .

وانزيمات التحديد هذه يمكن أن تُستغل فى تقطيع جينات الانسان إلى شرائح . هناك العشرات من هذه الانزيمات ، كل يقطع مجموعة بذاتها من حروف الدنا . أما طول قطع الدنا الناتجة فيتوقف على تكرر هذه المجموعة . فإذا قطعنا كل جملة فى هذا الكتاب حيثما يظهر حرف إن فسنجد الآلاف من الشظايا الصغيرة ، فإذا كان الانزيم يتعرف على كلمة لكن فسينتج عدد أقل من شظايا أطول . أما إذا كان الانزيم يقطع عند كلمة موز الأقل تكرار (والتى تظهر لا شك بين الفينة والفينة) فلن نحصل إلا على عدد محدود من الشظايا ، كلٌ طوله آلاف الكلمات.

توفر مواضع البتر (كمثل مواضع الكلمات : إن ، لكن ، موز) مجموعة من المعالم على طول الدنا . ومعرفة هذه المواضع هى أول خطوة نحو رسم خريطة فيزيقية للكتاب نفسه ، خطوة تعتمد على ترتيب الحروف والكلمات التى يضمها بين دفتيه . وهذه عملية تشبه تلك التى قام بها الطلبة عندما هاجموا السفارة الأمريكية فى طهران بعد سقوط الشاه . فقد جمعوا سويا بمجهود جبار الوثائق السرية التى كانت قد فُرمت ، و بتوفيق المُزَق مع بعضها بعضا استطاعوا أن يعيدوا تركيب رسالة طويلة معقدة كانت فضيحة !

تقوم البيولوچيا الجزيئية بنفس الشيء . ثمة وسائل مختلفة تسمح بإيلاجِ قطع الدنا المفصولة فى دنا بكتيرة أو خميرة . تغدو هذه القطع عندئذ وقد كُلونت . فكلما انقسمت البكتيرة كاثرت ليس فقط رسالتها الوراثية وإنما أيضا الچين الغريب الذى أولج بها . ونتيجة لذلك يمكن انتاج ملايين النُسخ من قطعة الدنا المولَجة ، لتُدرس إلى التفاصيل الدقيقة المطلوبة للجغرافيا الوراثية .

كانت الكلونة أساسيةً لنخطو الخطوات الأولى نحو الخريطة الفيزيقية . ولقد استُبدلت بها وسيلة أخرى : تفاعل البوليميريز المتسلسل (ت ب م) . وهذا يُستعمل إنزيما يستخدم فى النسخ الطبيعى للدنا بالمعمل ، لصناعة مكررات من

الجزىء . فإذا مضينا فى استخدام التشبيه الأدبى المرهق فإن ت ب م هو آلة بيولوچية لتصوير المستندات يمكنها أن تنتج كل ما نحتاج من صور لأية صفحة من الكتيب الوراثى . يؤخذ إنزيم النسخ من بكتريا تحيا بالينابيع الحارة ، ولا تتأثر بالتالى بدرجات الحرارة العالية . وبتسخين وتبريد مزيج التفاعل وتغذيته بالقواعد الأربع ، يمكن صناعة ملايين النسخ من قطعة الدنا الأصلية .

ثمة طريقة أخرى تخدم راسمى الخرائط ، طريقة تستغل قدرة الدنا على الارتباط بالنسخة المكملة له . تشكل قواعد الدنا اثنين من الأزواج المتكاملة أ مع ث ، ج مع س . لكى نعثر على چين ، يمكننا أن نصنع بالمعمل النسخة المكملة لدناه . فإذا أضيفت هذه النسخة إلى خلية ، قامت بالبحث عن نظيرتها على الكروموزم . وارتبطت بها ، لنعرف موقع الچين على الخريطة . والكمبيوتر الذى أكتب عليه يقوم بنفس الشىء . بأمر بسيط واحد ، نجده ينطلق ليبحث عن أى كلمة أختارها فيبرزها فى لون أرجوانى ساحر ، وتزداد أهميته إذا كان يبحث عن كلمة نادرة (مثل كلمة موز) . فإذا ما وسم مسبر الدنا بصبغة لاصقة ، فمن الممكن أن نكشف الچينات بنفس الشكل . تسمى هذه الطريقة باسم طريقة التهجين اللصقى (للچينات) فى الموقع .

كل هذا قد ثوّر عملية رسم خرائط دنا الانسان . حسنت أولاً من خريطة الارتباط . فى مقدورنا أن نتتبع أنماط وراثة تتابعات قصيرة من الدنا خلال الأجيال، تماما مثلما نتتبع عمى الألوان أو قصر الاصابع . وبين الأفراد ملايين المواقع التى تختلف من شخص إلى آخر ، ومن الممكن استغلالها فى دراسة الأسلاف . ولما كانت معظم العائلات اليوم قليلة العدد ، فثمة تعاون يجرى مع المورمون بالولايات المتحدة ومع البنجلاديشيين ببريطانيا ، فلدى هؤلاء من الأبناء ما يكفى لرسم شجرة النسب . وهناك مشروع رائع يستخدم فيه تفاعل البوليميريز المتسلسل فى اكثار نسخ الدنا من حيوان منوى واحد : ترسم خريطة الارتباط بمقارنة الكروموزومات المؤشبة

للحيوان المنوى بكروموزومات الرجل الذى أنتجه ، لنجتاز بذلك عقبة حجم العائلة كلية .

ومهمة رسم خرائط الارتباط للانسان لا تزال مهمة شاقة . لقد طالما رغب البيولوچيون فى أن يرسموا نوعاً جديداً من الخرائط ، نوعا كذلك الذى يستخدمه الجغرافيون ، لا يرتكز على التأشيب وإنما على وصف فيزيقى مستقيم للمادة الوراثية . والخريطة المرجـوة تبين ترتيب كل من الثلاثة آلاف مليون من حروف الدنا. المهمة هائلة : أن نهاجم الطاقم الوراثى بكل ما نملك من مال ووقت وجهد إلى أن نقرأه كله من أوله إلى آخره . ولقد أُحرز بالفعل تقدم كبير . وربما كان لحربنا الخاطفة أن تنتهى بنهاية هذا القرن .

أما الخطوة الأولى فى ربط خريطة الارتباط بأخرى تعتمد على البيولوچيا الجزيئية فقد جاءت بمحض صدفة حسنة . لاحظ مورجان أن چينا معينا يرتبط عادة بالجنس قد فعل شيئا غريبا فى إحدى الذبابات : لقد بدأ يسلك كما لو كان على كروموزوم آخر غير س . وبالفحص الميكروسكوبى أمكن معرفة ما حدث . لقد التصق كروموزوم س بكروموزوم آخر ليورَّث معه . وكان التغير فى تلازمات ارتباط الچين يرجع إلى تغير موقعه الفيزيقى .

استغلت مثل هذه المصادفات الكروموزومية كخطوة أولى نحو رسم خريطة البشر الفيزيقية ، إذ يحدث ما بين الحين والآخر خطأ أثناء تكوين الحيوان المنوى أو البويضة، فينتقل جزءٍ من أحد الكروموزومات إلى مقر جديد . يصطحب ذلك تغير فى نمط وراثة چين يستخدم كمفتاح إلى مكان وجوده .

تغيب أحيانا قطعة بالغة الصغر من أحد الكروموزومات . وكل مَنْ يحمل مثل هذا الكروموزوم المُقتضب قد يعانى من بضعة أمراض وراثية فى نفس الوقت . ثمة

صبى أمريكى تعيس أصيب بنقص فى الجهاز المناعى وعمى وراثى وحثل عضلى . واتضح أن كروموزوم س فيه تنقصه قطعة غاية فى الصغر ، لابد أن كانت تحمل الدنا الخاص بجينات هذه الصفات . قدم هذا الصبى الأمريكى أول الاشارات الهامة عن موقع جين الحثل العضلى – وهذا واحد من أكثر الأمراض الوراثية انتشارا وخطرا . كانت القطعة الناقصة معلما يمكن أن ترتكز عليه خريطة فيزيقية للمنطقة المحيطة بهذا الجين .

عند رسم خرائط الجينات بتفحص التغيرات الكروموزومية ، لا يلزم أن ننتظر وقوع مثل هذه الحوادث البيولوجية الطبيعية . من الممكن أن تزرع الخلايا البشرية فى المعمل . ويمكن أيضا أن نزرع خلايا الفأر وخلايا الهامستر . فإذا نمينا خلايا إنسان مع خلايا فأر ، فقد تندمج الخلايا لتعطى هجنا تحمل كروموزومات النوعين سويا . وعندما تنقسم هذه الخلايا الهجينة ، فإنها تفقد كروموزومات (وما تحمله من جينات) من هذا النوع أو ذاك . وفى كل مرة يختفى فيها كروموزوم بشرى تختفى أيضا جينات بشرية – لابد أن تكون مواقعها على هذه الكروموزومات . ولقد أمكن فى بعض الحالات أن تربط جينات باستخدام الشظايا الكروموزومية القصيرة التى تحملها .

ولقد حُدِّد الموقع التقريبى على الكروموزومات للغالبية العظمى من الأمراض الوراثية الشائعة . أما تحديد الموقع المضبوط لكل منها فيحتاج إلى زمر جديدة من نظم رسم الخرائط الدقيقة . وتقنيات تحديد التتابع البايدة ـ كما تسمى ـ تقنيات بسيطة. إحداها تعتمد على قدرة الدنا على نسخ نفسه إذا وفرنا إنزيما معينا وزودنا المزيج بالقواعد الأربع : أ ، ج ، س ، ث . يتضمن التفاعل نمو نسخ من قطع جديلة دنا تزداد طولا من طرف إلى الآخر . يبدأ العمل بأربع تجارب منفصلة (كلٌ يستخدم قاعدة مختلفة من القواعد الأربع) فى نفس الوقت، وكلها تنطلق من نفس المكان بالدنا . ببعض الحيل الكيماوية توقف بعض الجدائل كل مرة تضاف

فيها قاعدة . هذا ينتج قطعا من الدنا ذات أطوال مختلفة، كل منها توقّف عند قاعدة: أ ، أو ج ، أو س ، أو ث . فإذا أجرينا التفريد الكهربى على نفس الجيل لكل مزيج لدينا فستظهر أربعة خطوط متوازية من شظايا الدنا مرتبة فى أطوال متزايدة . وإذا ما قرأنا عبر الجيل وإلى أسفل توصلنا إلى ترتيب القواعد .

هذا عمل مجهد للغاية ، ولن يطمع المعمل الواحد فى انجاز أكثر من جزء ضئيل غاية فى الضآلة من المهمة كلها ، رسم مقطـــع صغير حول الچين الذى نبحث عنه . وهذه الخرائط الاقليمية – خرائط المدن – لابد أن تجمع سويا فى ترتيبها المضبوط قبل أن نركّب منها خرائط أكبر للدنا . ثمة طريقة نصنع فيها سلسلة من التتابعات المتراكبة لقطع صغيرة من الدنا . وهذا قد يشبه تجميع صفحات ممزقة لدليل شوارع مدينة عن طريق النظر إلى التراكبات عند حواف الصفحات لمحاولة العثور على الشوارع التى تجرى عبرها .

تتطلب هذه الطريقة قدراً من أعمال الكمبيوتر السحرية . لكن هناك بعض الطرق المختصرة . من بينها أن نقفز بضع صفحات فى دليل شوارع المدينة على أمل أن نتجنب بعض المناطق المزعجة فى الجوار . الموضوع كله تكرارى للغاية ، حتى لقد اقترح بعضهم ـ ليس تماما على سبيل الدعابة ـ أن يُحْكَم على من تثبت إدانته بتزوير النتائج ، بعقوبة تحديد تتابع ألف قاعدة دنا ، أو عشرة آلاف ، أو مائة ألف !

ربما كان أفضل تشبيه لطريقة الهجوم على الخريطة الجزيئية هو مسح أراضى دولة باستخدام مسطرة قصيرة ، بدءا من طرف ، ثم المضى فى عناد حتى الحدود المقابلة . يلزم أن تتزايد السرعة إذا كان للمهمة أن تتم . وتبقى الحقيقة الموجعة : إن الجزء الأكبر من الثلاثة آلاف مليون قاعدة لا يزال ينتظر التحديد على الخريطة. لكن التكنولوچيا قد بدأت تسعفنا . عندما بدأت المهمة منذ خمسة عشر عاما ، كانت حصيلة عمل الفرد فى العام هى خمسة آلاف قاعدة دنا . أما الآن فقد غدا أمراً روتينيا أن ينجز الفرد عشرين ضعف هذا العدد . لقد رسمت بالفعل زمرة من

خطط ضخمة متراكبة لاثنين من أصغر كروموزومات الانسان وذلك بإيلاج مقاطع منهما فى خلايا الخميرة (وهذه تقنية يمكن أن تعالج مقاطع طويلة من الدنا) . غطى حتى الآن أكثر من تسعة أعشار الطاقم الوراثى كله فى خريطة ارتباط حدد فيها الترتيب والموضع النسبى لمقطع قصير متكرر من الدنا . ولقد تظهر طرق جديدة تسرع من العملية . ولقد يصبح من الممكن قريبا ترتيب القواعد بميكروسكوب إليكترونى عالى القوة يتفحص الكروموزوم ، بطريقة بريل جزيئية .

أما رسم خريطة الطاقم الوراثى كله فتستغرق زمنا طويلا – بل ويرى البعض أن الأمر لا يستحق هذا العناء . فالمستكشف على أية حال إذا ما غزا أرضاً جديدة لا يبدأ برسم خريطة لأول قرية يدخلها ثم يوسعها فى تفاصيل مفرطة إلى أن يكشف القطر كله ، وإنما هو يختار المعالم الرئيسية ويترك الخريطة المفصلة إلى وقت لاحق عندما يعرف المناطق الأخطر شأنا . وقد يكون من الأفضل أن نركز على المقاطع الأكثر أهمية : الجينات التى تنتج البروتين بالفعل .

وهناك من أنواع البروتينات ما قد يصل إلى ٥٠ ـ ١٠٠ ألف نوع . يعطّل انتاج هذه البروتينات فى معظم الخلايا ، لكن هناك فى خلايا المخ ثلاثين ألفا منها تعمل فى أى وقت . وهذا عدد يفوق بكثير ما يوجد بأى من الأنسجة الأخرى ، وهو قد يفسر السبب فى أن ما يزيد على ربع الأمراض الوراثية جميعا يؤدى إلى مرض عقلى. عندما يقوم الجين بصناعة شىء ، فإنه يولد رنا مرسالا (وهذا جزىء مكمل ينقل المعلومات الوراثية من الدنا إلى الجزء الأساسى من الخلية) . فإذا لم يكن يعمل فإنه لا ينتج أى رنا . وعلى هذا فإن استخلاص الرنا المرسال يعتبر وسيلة ممتازة للبحث عن الجينات العاملة . تمضى الآن هذه المهمة بنجاح ، وبها أمكن العثور على ثلاثة آلاف جين جديد بالمخ . أما وظيفة أى منها فلا يزال أمرا مجهولا .

ربما رسمنا الخريطة الكاملة فى نهاية الأمر ، فهذا على أية حال أمر يستحق ، لأننا ببساطة لا نعرف ما قد تكشف عنه . وإتمامها يتضمن إعادة تأكيد حقيقة من

أهم الحقائق التى يساء فهمها فى العلم : وهى أنه من الممكن عادة حل المشكلة إذا أغدقنا عليها المال .

أصبح واضحا بالفعل أن الخريطة الفيزيقية لا تشبه كثيرا خرائط الارتباط التى ظهرت عن دراسات العائلات . تكمن الصعوبة الرئيسية فى مشكلة المقياس . هناك ما قد يصل إلى مائة ألف جين عامل فى الأنسان ، لكن هناك ثلاثة آلاف مليون حرف . ولما كانت الغالبية العظمى من الجينات تستخدم فى انتاج بروتيناتها معلومات مشفرة فى بضعة آلاف قاعدة فقط ، فإن هناك على ما يبدو قدرا من الدنا أكثر من المطلوب . يبين رسم الخرائط الفيزيقية أن الجزء من الدنا العامل بالجينات يبلغ نحو ٥ ٪ من مجموع القواعد . للطاقم الوراثى البشرى بنية غير عادية ، تقصر خرائط الارتباط عن بلوغ خصائصها العجيبة .

يمكننا أن نصل إلى فكرة عن الخريطة الفيزيقية بإجراء مقارنة بخريطة جغرافية. تخيل أن الرحلة على طول دناك كله تعادل رحلة من لاندز إند إلى جون أوجروتس عبر لندن . هذه مسافة يبلغ طولها ألف ميل (أى أنها تعادل بالتقريب المسافة من نيويورك إلى شيكاغو) . ولكى نوفق كل حروف الدنا فى خريطة لطريق بهذا الطول، علينا أن نضع بكل بوصة من الطريق خمسين قاعدة دنا ، أى ثلاثة ملايين قاعدة بكل ميل . تمر الرحلة عبر ٢٣ مقاطعة مختلفة الأحجام . وهذه التقسيمات الإدارية تعادل ، بالصدفة الحسنة ، عدد الكروموزومات التى يعبأ بها الدنا البشرى . يبلغ قدر الدنا الذى تم تحديد تتابعاته حتى الآن طول المسافة من لاندز إند إلى بينزانس ، على مبعدة بضعة أميال – أى، فى الخريطة الأمريكية ، طول جزيرة مانهاتن . ما زال الطريق أمامنا طويلا .

والمشهد على طول الرحلة معظمها ممل للغاية ، يبدو ـ كمثل بريطانيا المعاصرة ـ قاحلا تماما . تغطى نحو ثلث المسافة مكررات من نفس الرسالة. ثمة نحو خمسين ميلا تمتلىء بكلمات من خمسة أو ستة أحرف ، أو أكثر ، تتكرر

متلاصقة بلا نهاية . والكثير منها كلمات تقرأ طردا وعكسا (مثل البيت : مودّته تدوم لكل هوّل .·. وهل كلُّ مودته تدوم ، الذى يقرأ من بدايته إلى نهايته مثلما يقرأ من النهاية إلى البداية) . والبعض من هذه المكررات المترادفة مبعثر فى مجاميع على طول الطاقم الوراثى . يختلف موقع وطول كل مجموعة من شخص إلى آخر . والبصمات الوراثية الشهيرة (التوقيع الموروث المتفرد الذى يستخدم فى ساحات القضاء) تعتمد على عدد و مواقع هذه المكررات المترادفة . ولتحديد البصمة الوراثية يستخدم إنزيم يبتر مقطعا مكررا معينا . وهذا يشرّح الدنا إلى العشرات من الشظايا . وهناك تتابعات مكررة لا تحمل إلا حرفين فقط – س ، أ – مضاعفة آلاف المرات . لكن الكثير من الطاقم الوراثى مكرس لرسائل عَرَضية طويلة تبدو وكأنها لا تقول شيئا .

خطير حقا أن نهمل كل هذا الدنا ونعتبره عبثا ، لا لسبب إلا أننا لا نفهم ما يقوله . للمصطلح الصينى شى ثلاثة وسبعون معنى مختلفا – حسب طريقة نطقه. من الممكن أن نصوغ جملة مثل السيد مغـــرم بلعق لعاب الأســـد بأن نكرر كلمة شى وحدها مرة بعد مرة ، وقد يبدو هذا تكرارا لا معنى له لدى معظمنا ممن لا يفهمون الصينية .

تمتلىء مساحة كبيرة من المنظر الطبيعى الوراثى بجثث چينات مهجورة ، وقد تتكرر نفس الجثة مرات ومرات . وتتابعات دنا هذه الچينات الكاذبة تشبه تتابعات أقاربها العاملة ، سوى أنها قد فسدت ولم تعد تنتج شيئا . لقد دُمر جزء حيوى من آليتها فى وقت ما من تاريخها . ومن ذلك التاريخ أخذ الوهن يزحف عليها فى هدوء. أما المدهش حقا فهو أننا قد نعثر على نفس الچينات الكاذبة فى مواقع عديدة على طول الرحلة .

بعد أميال طويلة من أدغال مقفرة من الدنا المتكرر ، سنصل إلى مناطق خصبة مثمرة . تلك هى الچينات العاملة . ثمة مفاجأت فى بنيتها تنتظرنا . يمكن التعرف

على الچين العامل من ترتيب الحروف فى أبجدية دناه ، التى تقرأ فى كلمات من أحرف ثلاثة مكتوبة فى الشفرة الوراثية تدل على أن فى مقدوره أن ينتج بروتينا ما. والعادة ألا نجد إلا القليل مما يدلنا عما يفعله البروتين حقا ، بالرغم من إمكان استنتاج تركيبه (وتخمين صورته) عن طريق ترتيب حروف الدنا التى تكونه .

ينظّم الكثير من الچينات فى مجاميع تصنع منتجات ذات قرابة . وهناك بالطاقم الوراثى ما يقرب من ألف من عائلات الچينات هذه . ونحن نعرف عن عائلة معينة تختص بصناعة صبغة الدم الحمراء أكثر مما نعرف عن غيرها . فى خلايا النخاع ، التى تنتج كرات الدم الحمراء ، يعمل كل الدنا تقريبا . لكنا نعرف أكثر عن مجموعة صغيرة من الچينات محمومة النشاط . يرتكز الكثير من بيولوچيا الانسان الجزيئية على هذا المركز الوراثى الصناعى بالذات : چينات البيتا – جلوبين.

وهى تقع فى نحو منتصف الطول الكلى للدنا ، فى منتصف المسافة إلى چون أوجروتس – فى ليدز تقريبا . هى تصنع بعض البروتينات الخاصة بنقل الاكسچين. تحتوى مدينة الجلوبين الصناعية على نحو ستة مقاطع دنا تنتج منتجات ذات صلة . فأما الجزء المختص بصناعة صبغة الدم الحمراء فهو صغير جدا : طوله نحو ثلاثة أقدام بمقياس رسم الخريطة . وعلى بعد بضعة أقدام هناك جزء آخر يصنع جلوبيناً لا يوجد إلا بالجنين . وعلى مقربة من هذا الأخير سنجد الهياكل الصدئة لمعدات توقفت عن العمل منذ سنين . يغطى مصنع الجلوبين كله نحو مائة قدم ، معظمها مسافات شاغرة بين الچينات العاملة ، وهو يتعاون مع مصنع أخـــر له نفس الحجـم يقـع بعيدا (قرب لندن على الخريطة الخيالية) ينتج بروتينا ذا قرابة . والمنتجان سويا يصنعان صبغة الدم الحمراء . تنظّم معظم الچينات العاملة فى عائلات، قريبة من بعضها أو مبعثرة عبر الطاقم الوراثى بأكمله .

هناك سمة أخرى تثير الدهشة فى خريطتنا ، هى أن أطوال الچينات تتباين كثيرا: من نحو خمسمائة قاعدة إلى أكثر من مليونين . تتخلل كل المقاطع العاملة– كلها

تقريبا – أطوال من دنا غير مشفّر ، وسنجد أن الغالبية العظمى من الچينات الكبيرة (كذلك الچين المعطوب الذى يسبب الحثل العضلى) لا تشفر شيئا. يشترك الدنا غير المشفّر فى المرحلة الأولى من عملية الانتاج ، لكن هذا المقطع من الرسالة الوراثية يقتضب من الرنا المرسال قبل تجميع البروتين . قد يبدو هذا طريقة شاذة لقضاء الأمور ، لكنه الطريقة التى انتهى إليها التطور .

لاشك أن هناك الكثير من المفاجآت فى انتظارنا مع تقدم المسّاحين بطيئا فى طريقهم نحو چون أوجروتس . ولقد يتضح أنْ ستتغير صورة العلاقة بين خريطة الارتباط والخريطة الفيزيقية . أحرز جغرافيو الچينات بعض النجاحات ، ربما كان أهم ما فيها يتعلق بالمفاهيم . فلما كنا نعرف شفرة الحروف الثلاثة لكل حمض أمينى ، فمن الممكن أن نستنبط ترتيب الأحماض الأمينية التى ستنتجها أى قطعة عاملة من الدنا عن طريق النظر إلى تتابع القواعد بها . أما ما يصنعه بالفعل أى چين نكتشفه فمن الممكن تخمينه بمقارنة هذا التتابع بمعلومات عن تتابعات نعرف وظيفتها مخزنة بالكمبيوتر . وهذه العملية تشبة إلى حد ما قراءة لغة أجنبية باللجوء إلى قاموس يعرفنا بمعناها .

هناك تشابهات مفزعة بين المعاجم الوراثية لكائنات جد متباينة . فالانسان يحمل چينات تكاد تكون مطابقة للچينات التى تتحكم فى تنامى ذبابة الفاكهة ، الأمر الذى قد يشير إلى أننا نشترك معها فى نفس العمليات الأساسية . والچينات التى تصنع مخ ذبابة الفاكهة قريبة بشكل يخجلنا من تلك التى تصنع مخاخنا . ثمة مقارنات أخرى قد تثيرنا بنفس القدر . فبعض الچينات التى تسبب عند فسادها مرض السرطان تشبه كثيرا تلك التى تشفر للهرمونات . بل إن واحدا من چيناتنا ـ يا للعجب ـ يكاد يكون مطابقا لآخر لا نعرف من وظائفه إلا أنه يحور من نمط العروق فى جناح الحشرة . إن عملية ترجمة لغة بيولوچية إلى أخرى عن طريق مراجعة الكلمات بالكمبيوتر ، قد مضت إلى مدى بعيد ، حتى لنجد لدينا احتمالاً

يبلغ ٥٠ ٪ فى أن ينتسب أى تتابع دنا جديد نكتشفه إلى شيء آخر : إما چين آدمى آخر ، أو چين من أحد الكائنات البعيدة جدا عنا فى عالم الأحياء .

ولقد حوّل هذا علم وراثة الانسان . فبدلاً من أن نبدأ من تغير وراثى (مرض وراثى مثلا) لنكدّ نبحث عن موقعه ، فإنا نستخدم الاستراتيچية المضادة : تحديد موقع الچين ، ثم تحديد وظيفته – إذا حالفنا الحظ – وذلك من قراءة تتابعه الدناوى. علم الوراثة هو أول علم يتقدم بالسير فى الطريق المضاد . وسنكشف معظم الچينات البشرية باستخدام منطق هو بالضبط عكس منطق مندل : من الجسيم الوراثى إلى الوظيفة ، لا من الوظيفة إلى الجسيم .

كان أول اختراق لهذا المنهج الجديد – وربما الأهم – هو اكتشاف چين التليف الكيسى عام ١٩٩٠ . تكلفت المهمة ١٥٠ مليون دولار ، لكن ما أُحرز من تقدم فى التكنولوچيا يعنى أن تكاليف اكتشاف غيره من الچينات ستكون أقل . التليف الكيسى هو أكثر الأمراض الوراثية انتشارا بين البيض من البشر ، فهو يصيب فى أوروبا طفلا من بين كل ٢٥٠٠ . وأعراضه تبدو للوهلة الأولى وكأن لا علاقة بينها ، لكنها جميعا تنجم عن عجز الجسم عن ضخ الملح عبر الأغشية التى تغلف الخلايا. كان حاملو المرض من الأطفال ، وحتى عهد قريب ، يموتون فى سن مبكرة . تمتلىء الرئة بالمادة المخاطية ، وتصيبهم الأمراض البكتيرية ، فتغذيتهم دائما ما تكون فقيرة لأنهم لا يفرزون ما يكفى من إنزيمات الهضم . ولقد حسّن الطب من حياة مرضى التليف الكيسى ، لكن من النادر أن يعيش أى منهم إلى سن تزيد على ٣٥ عاما .

بينت دراسات العائلات من زمان طويل أن المرض يرجع إلى چين متنح لا يقع على كروموزوم الجنس . فى عام ١٩٨٥ أوضح تحليل الأسلاف أنه مرتبط بتتابع دناوى آخر يتحكم فى إنزيم كبدى ، وإن لم يعرف عندئذ موقعه . وفى خلال عام أو نحوه بينت إحدى العائلات أن هذا الزوج من الچينات يرتبط بطفرة دناوية كان موقعها قد حدد على الكروموزوم السابع . أولجت قطعة الكروموزوم التى تحمل چين

التليف الكيسى ـ مع جينات أخرى كثيرة غيره ـ فى خط خلايا فأر . بُترت إلى قطع صغيرة وبدأت المهمة العسيرة لتحديد التتابعات . وبحلول عام ١٩٨٨ كانت المنطقة الحرجة وقد حددت فى مقطع من الدنا طوله مليون ونصف مليون قاعدة . اختبرت الشظايا لمعرفة ما إذا كانت تحمل تتابعات شائعة مع دنا كائنات أخرى ، كالفئران . فإذا كانت تحمل مثل هذه التتابعات فسيفترض أن ترتيب الحروف قد استبقى عبر التطور لأنه ينتج شيئا مفيدا . عثر على مقاطع عديدة مشتركة . كان لأحدها حروف دنا مماثلة لحروف بروتينات أخرى تختص بالنقل عبر الأغشية . وكانت هذه القطعة من الطاقم الوراثى تتبع بالضبط نفس نمط وراثة التليف الكيسى. لقد عثرنا على الجين !

ومثلما هو الحال فى رسم خريطة العالم ، فإن العثور على الجين كان هو الخطوة الأولى فى تفهم ما يجرى فى الجوار . مكّننا ترتيب حروف الدنا من تخمين شكل البروتين المعيب . صحيح أن طول الجين نفسه يبلغ ربع مليون قاعدة دنا ، إلا أن الناتج عنه لا يحمل إلا ١٥٠٠ حمض أمينى . بينت نماذج الكمبيوتر عن صورته أنه يمتد فوق غشاء الخلية بضع مرات ، وأنه قد يعمل كمضخة .

بالكثير من العائلات المصابة بالتليف الكيسى تغير واحد فى البروتين ، لا أكثر: ثمة حمض أمينى واحد ناقص ، فى ثلث الطريق على طول الدنا ، وهذا يوفر اختبارا مباشرا لما إذا كان الاشخاص الطبيعيون يحملون نسخة واحدة من الجين دون أن يعرفوا ، أو – وهو الأهم – ما إذا كان الجنين يحمل نسختين . لكن الخريطة الجزيئية قد بينت للأسف أن التليف الكيسى ، الذى بدا يوما وكأنه مرض بسيط ، قد ينشأ عن أكثر من مائتى تغير فى الدنا . وعلى ذلك فإن استخدام الخريطة الوراثية لمعرفة المهدّدين بخطر المرض لن تكون مهمة سهلة كما كنا نأمل .

ولقد أمكن تعقب عدد من الأمراض الوراثية ، ولا يزال البعض الآخـر مستعصيا . يؤدى مرض هنتنجتون إلى انحلال الجهاز العصبى والموت فى بداية الكهولة . وقد كان يسمى مرض رَقَص هنتنجتون بسبب الحركات اللاإرادية المترنحة التى يقوم بها

المصابون . ثم إنه مرض مزعج أيضا لأن من هم فى خطر أن يرثوا الچين يظلون لسنين طويلة – بسبب تأخر ظهور الأعراض – فى شك فيما قد يكون المصير . فى عام ١٩٨٣ حدث اختراق ساعد فى تسهيل مهمة راسمى الخرائط – كانت ضربة حظ رائعة . فبعد بداية البحث بوقت قصير حقا أمكن معرفة الموقع التقريبى لچين هنتنجتون عن طريق تعقب علاقته بطفرة فى الدنا مرتبطة به تقع على نفس الكروموزوم . لكن الحظ تخلى عنهم بعد ذلك ، وبعد عشر سنين أمكن تحديد الموقع : يكاد يكون من المؤكد أنه يقع بطرف الكروموزوم الرابع . فإذا ما رسمنا خريطة الچين وتم تحديد تتابعاته فقد يمكننا أن نعرف أين يقع الخطأ فى الخلايا العصبية . إن هذا لا يزال لغزا .

لقد غدا رسم الخريطة الفيزيقية الآن قضية عَرَق يُبْذَل لا قضية إلهام ووحى . يتقدم المنهج الصناعى الآن بخطى سريعة . ثمة من يدعى هنرى فورد – من بين البيولوچيين الجزيئيين – يقدر أن الأتمتة ستضاعف سرعة رسم الخرائط مائة مرة ، وتقلل التكاليف بنفس النسبة . ولقد اتخذ الفرنسيون فى مشروعهم (الچينثون) منهجا عقلانيا جدا : مصنعا لعلم وراثة الانسان تعاونه نداءات تلفزيونية . وكل هذا يعنى أنه من المحتمل أن تكتمل الخريطة الفيزيقية على نهاية هذا القرن – موعد مناسب !

ثمة مشروع لوضع الموضوع تحت اشراف تنظيم مركزى – مشروع الطاقم الوراثى البشرى . يرى المتحمسون للمشروع أنه تنفيـــذ لوصية الانجيل : اعرف نفسك . هم يبحثون دائما عن صورة مكررة مبتذلة ، عندما يجدون فى تحديد التتابعات الكأس المقدسة التى شرب منها المسيح والتى لا يزال المسيحيون يجدُّون فى البحث عنها . وكانت أهم النتائج حتى الآن تسلية بريئة سعد بها النظارة . لا يزال الصراع الوحشى قائما بين من يصر على أن يجعل دافعى الضرائب الأمريكيين (والبريطانيين لحد ضئيل) يلعبون دور فرديناند و إيزابيلا المعارض لطموحات راسمى الخرائط الأمريكيين ، وبين من لديهم نفس الحماس لإيقافهم .

يتهم المعارضون هذا المشروع بأنه خدعة دعائية تقوم بها مجموعة حولت الاعتماد المالى لصالحها بعيدا عن آخرين يقومون بأعمال أكثر ابداعا . فالواقع أن ميزانية البحوث الأساسية للمعاهد القومية للصحة بأمريكا قد انخفضت ، فى الوقت الذى ضوعفت فيه ميزانية خريطة الچينات البشرية خمس مرات . بدأت بيولوچيا المحسوبية فى الظهور ، إذ يتنافس السيناتورات لتوجيه العمل نحو ولايتهم. هناك ستالينية جديدة فى السياسة العلمية ! لقد تمكن من يمتلكون أُذن السياسى وغرور العالم من تحويل ميزانية متضائلة إلى برامج ومعاهد ومراكز ، ليضخوا الحياة فيما هو مأمول على حساب ما هو فجائى غير متوقع . أما المعارضون فقد أُبعدوا ، إن لم يكن إلى منفى حقيقى ، فإلى منفى عقلى على الأقل . لقد هجرت السوق الحرة للعلم لصالح الاقتصاد الموجه – وهذا شيء غريب ، لأن من يتولون أمر المال هم من أنصار السوق الحرة فى كل مجال أخر .

دافع راسمو الخرائط بأن أبرزوا ما سنجنيه من فوائد . إن الربح الاقتصادى واضح بالفعل فى ذلك السباق المحموم نحو تسجيل منتجات الچينات حال اكتشافها. ستجلب البراءات الثروة لمن يعثر على علاجات الأمراض الوراثية ، أو حتى اختبارات لها . ثمة أموال كثيرة يجرى الآن تبادلها . بيعت حقوق تفاعل البوليميريز المتسلسل بمبلغ ٣٠٠ مليون دولار . هناك واحد من مناصرى مشروع الطاقم الوراثى البشرى، كان صريحا جدا . قال إنه بالرغم من موافقته على أن الأجدى هو مسح دنا الفئران لا الرجال ، إلا أن الطاقم البشرى متفرد ، فهو ينتمى إلى الجنس الوحيد المستعد لدفع الفاتورة ! إن تكاليف المشروع أقل من تكاليف السباق للهبوط على القمر ، الذى كانت تركته بعد خمسة وعشرين عاما هى فى الواقع : ثم ماذا ؟ ! . وعلى عكس رحلة القمر ، فإن انجاز أى جزء من الطريق على طول الدنا يعتبر فى حد ذاته شيئا عظيما .

إذا نظرت إلى خريطة قديمة ـ حتى لو كان بها من الأخطاء مثل ما بخريطة هيرودوت ـ فستدرك أن الخرائط تحمل بداخلها قدرا كبيرا من حياة راسمها . هى تبين حجم ومواقع المدن ، مسالك هجرة البشر ، وسجلا عن شعوب اختفت من

زمان طويل مضى . وليست الخريطة الوراثية البشرية استثناء ، ولقد تحوى بين طياتها سر الكثير من الأمراض التى تصيبنا . وعندما يتخرج طالب الطب الذى يسجل اليوم فى كليته ، ثم يبدأ فى ممارسة مهنته ـ وهى مهنة يلعب علم الوراثة فيها دورا حاسماً ـ فلابد أن تكون من بين يديه نسخة من الخريطة الكاملة .