2

أجهزة الكومبيوتر في المستقبل

بعد أربعين سنة من التفجير النووي في ناغازاكي يُلقي العقل المدبّر لمشروع مانهاتن وهو السيد فينمان خطاباً في اليابان لكن الموضوع كان سلمياً ولا يزال يُشغل أذكى العقول وهو مستقبل جهاز الكومبيوتر ليشمل الموضوع الذي جعل من فينمان نوستراداموس علم الكومبيوتر ـ الحدّ الأدنى النهائي لحجم الكومبيوتر. قد يكون هذا الفصل تحدياً لبعض القرّاء إلا أنه جزء مهم من مساهمة فينمان في العلم، وآمل أن يتوفّر لديهم الوقت لقراءته حتى وإن كان عليهم أن يقفزوا فوق بعض النقاط الفنية. ويختتم بنقاش موجز لإحدى الأفكار المفضّلة لفينمان والتي أطلقت الثورة الحالية في التكنولوجيا الرقمية.

مقدمة

إنها لسعادة غامرة وشرف كبير أن أكون هنا لأتحدث في ذكرى عالم احترمته وأُعجبت به وهو البروفسور نيشينا. أن أحضر إلى اليابان أتحدث عن الكومبيوتر شبيه بإلقاء عظة في بودا، ولكنني أفكر في الكومبيوتر وهذا هو الموضوع الوحيد الذي فكرت فيه عندما دعيت للتكلم.

إن أول شيء أود أن أقوله هو ما لا أريد التكلم عنه. أريد أن أتكلم عن مستقبل الكومبيوتر إلا أن أهم التطورات الممكنة في المستقبل هي الأشياء التي لن أتكلم عنها. فمثلاً هناك حجم كبير من العمل لمحاولة تطوير أجهزة أكثر ذكاء ـ أجهزة ذات علاقة أفضل مع البشر ـ بحيث يُمكن عمل المدخلات والمخرجات بمجهود أقل من البرمجة المعقدة الضرورية في وقتنا الحاضر. وهذا يندرج غالباً تحت اسم الذكاء الصناعي ولكنني لا أحب هذا الاسم فلربما تستطيع الأجهزة غير الذكية أن تعمل أفضل من الأجهزة الذكية.

هناك مشكلة أخرى وهي جعل لغات البرمجة قياسية. فهناك العديد من اللغات هذه الأيام وربما يكون اختيار واحدة منها فكرة جيدة. (إنني أتردد في ذكر هذا في اليابان لان ما سيحصل أنه سيكون هناك لغات قياسية أكثر ـ فأنتم لديكم حتى الآن أربع طرق للكتابة ومحاولة تقييس أي شيء، هنا يبدو أنه

يؤدي إلى مقاييس أكثر وليس أقل!). كما أن هناك مشكلة مستقبلية مثيرة جديرة بالعمل فيها ولكني لن أتكلّم عنها وهي البرامج التلقائية لإزالة الأخطاء. وإزالة الأخطاء تعني معرفة الأخطاء في البرنامج أو في الآلة وإنه لمن الصعب بشكل مذهل أن تزيل الأخطاء من برنامج لأنها تصبح أكثر تعقيداً.

هناك اتجاه آخر من التحسينات هو جعل الأجهزة ثلاثية الأبعاد بدلاً من أن تكون جميعاً على سطح رقاقة. وهذا يُمكن عمله في مراحل بدلاً من كونها جميعاً في مرحلة واحدة ـ يمكن أن يكون لديك عدة طبقات ثم تُضيف عدة طبقات أخرى مع مرور الزمن. كما أن هناك أداة مهمة يمكن أن تكتشف العناصر المعيبة تلقائياً في الرقاقة. بعدئذٍ يمكن للرقاقة أن تعيد لف ذاتها تلقائياً لتلافي العناصر المعيبة. وفي الوقت الحاضر عندما نحاول أن نصنع رقاقات كبيرة هناك غالباً عيوب أو نقاط سيئة في الرقاقات وعندها نلقي بالرقاقة بكاملها فلو أننا صنعناها بحيث يمكن أن نستعمل جزء الرقاقة الجيّد فإن ذلك سيكون أكثر فعالية. إنني أذكر هذه الأشياء لأقول لكم إنني مُدرك للمشكلات الحقيقية في أجهزة المستقبل، إلا أن ما أريد التكلم عنه بسيط جداً، إنها مجرَّد أشياء صغيرة فنية وطبيعية يمكن عملها من حيث المبدأ حسب قوانين الطبيعة، وبمعنى آخر أود أن أُناقش الجهاز وليس طريقة استعمالنا للجهاز.

سأتحدث عن بعض الاحتمالات الفنية لصنع الأجهزة،

وسيكون هناك ثلاثة مواضيع. أحدها هي أجهزة المعالجة الموازية وهو شيء في المستقبل القريب جيداً، ربما في الوقت الحاضر يعملون على تطويره. وثمة أمر آخر في المستقبل هو مسألة استهلاك الأجهزة للطاقة والتي تبدو حالياً أحد القيود ولكنها ليست كذلك في واقع الأمر. وأخيراً سأتكلم عن الحجم، فالأفضل دائماً أن نصنع حجماً أصغر، والسؤال هو مدى صغر الحجم الممكن من حيث المبدأ لجعل الأجهزة وفقاً لقوانين الطبيعة. لن أُناقش أيّ من هذه الأشياء التي ستظهر فعلياً في المستقبل وهذا يعتمد على المشكلات الاقتصادية والاجتماعية ولن أُحاول التخمين فيها.

الكومبيوترات المتوازية

الموضوع الأول يخصّ الكومبيوترات المتوازية، وجميع الكومبيوترات الحالية، الكومبيوترات التقليدية تعمل وفقاً لمخطط أو بنية اخترعها* فون نيومان، تحتوي على ذاكرة واسعة جداً تخزّن جميع المعلومات، وموقع مركزي واحد يقوم بحسابات بسيطة. نأخذ رقماً من هذا المكان في الذاكرة، ورقماً من ذلك المكان في الذاكرة، ونرسل الاثنين إلى الوحدة الرياضية المركزية لتجمعها ثم نرسل الجواب إلى مكان آخر في

* جون فون نيومان (1903 ـ 1957) عالم رياضيات هنغاري ـ أمريكي يعتبر أنه من الآباء في مجال الكومبيوتر.

الذاكرة. لذلك فإن هناك معالج مركزي فعّال يعمل بسرعة قوية جداً ونشاط بارز في حين أن الذاكرة بكاملها تبقى كخزانة أرشفة سريعة للبطاقات التي تُستعمل نادراً. ومن الواضح أنه لو كان هناك معالجات أكثر تعمل في نفس الوقت فإننا يجب أن نكون قادرين على عمل حسابات أسرع. ولكن المشكلة هي أن شخصاً ما قد يستعمل جهاز معالجة ويستعمل بعض المعلومات من الذاكرة التي يحتاجها شخص آخر وهذا أمر مُربك. لهذه الأسباب فقد قيل إنه من الصعب جداً أن نحصل على عدة معالجات تعمل بطريقة متوازية.

وقد اتُخذت بعض الخطوات في ذلك الاتجاه في الأجهزة التقليدية الكبيرة تسمى «المعالجات الموجهة». فعندما تريد أحياناً أن تفعل تماماً الخطوة ذاتها لعدة بنود مختلفة يمكنك أن تفعلها في نفس الوقت. ونأمل أن يكون من الممكن كتابة برامج نظامية بالطريقة الاعتيادية ومن ثم نكتشف برنامج تفسيري تلقائياً. متى يكون من المفيد استعمال هذه الإمكانية الموجهة. وتلك الفكرة مستعملة في كمبيوترات «كري» و«الكومبيوترات الضخمة» في اليابان. ثمة خطة أخرى هي أن نأخذ عدداً كبيراً من الكومبيوترات البسيطة (ليست البسيطة جداً) ونوصلها ببعضها ضمن نمط معيَّن وبعدئذٍ يمكن كلها أن تعمل في جزء من المشكلة. وكل جهاز كمبيوتر فعلي مستقل وستنقل المعلومات

لبعضها الآخر حسب حاجتهم لها. وقد تحقّق هذا النوع من النظام في كالتيك كوزميك كيوب وهذا يمثل فقط واحدة من إمكانيات عديدة. وكثير من الناس الآن يصنعون مثل هذه الأجهزة. وهناك خطة أخرى تتمثّل في توزيع عدد كبير جداً من المعالجات المركزية البسيطة جدا على نطاق الذاكرة بكاملها، وكل واحد منها يعالج فقط جزءاً بسيطاً من الذاكرة وهناك نظام موسع للتوصيل فيما بينها. ومثال ذلك جهاز الوصل المصنوع في إم. آي. تي. إذ يوجد فيه 64000 معالج ونظام مسارات يمكن فيه لكل 16 أن يتحدث لأي 16 آخرين وهكذا يتوفر لدينا 4000 احتمال توصيل مسار.

يبدو أن المشكلات العلمية مثل توليد الأمواج في بعض المواد قد تعالج بسهولة بالمعالجة المتوازية وهذا يعود إلى أن ما يحدث في أي جزء من الفراغ في أي لحظة يمكن حله محلياً وما يلزم معرفته فقط هو الضغط والتحميل من الأحجام المجاورة. وهذه يمكن حلّها في الوقت ذاته لكل حجم ويتم توصيل الحالات الحدودية عبر الأحجام المختلفة. وهذا هو السبب الذي يجعل هذا النوع من التصميم عملياً لمثل هذه المشكلات. وقد تبيّن أن عدداً كبيراً من المشكلات بجميع أنواعها يمكن معالجتها على التوازي. وطالما أن المشكلة كبيرة لدرجة أن كمية كبيرة من الحسابات لا بد وأن تتم فإن نتيجة

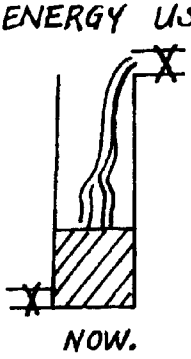
المعالجة المتوازية يمكن أن تُسرع في الوقت للحصول على الحلول بشكل هائل، وهذا المبدأ لا ينطبق فقط على المشكلات العلمية.

ما الذي حدث للتحيُّز منذ عامين سابقين بإدعاء أن البرمجة المتوازية صعبة؟ لقد تبيّن أن ما كان صعباً وربما مستحيلاً هو أن نأخذ برنامجاً عادياً وأن نتصور تلقائياً كيفية استعمال المعالجة المتوازية بطريقة فعّالة في ذلك البرنامج. وبدلاً من ذلك يجب على الشخص أن يبدأ مرة ثانية في المشكلة مقدِّراً أن لدينا إمكانية الحساب المتوازي ويُعيد كتابة البرنامج بالكامل بفهم جديد لما هو بداخل الجهاز. ومن غير الممكن أن نستعمل البرامج القديمة بطريقة فعّالة إذ لا بد من إعادة كتابتها. وهذه إحدى المساوئ الكبيرة في معظم التطبيقات الصناعية التي قوبلت بمقاومة كبيرة. لكن البرامج الكبيرة تخص علماء أو مبرمجين أذكياء آخرين غير رسميين يحبون علم الكومبيوتر ويرغبون في البدء من جديد ويُعيدون كتابة البرنامج إن كان بمقدورهم أن يجعلوه فعالاً أكثر، لذلك فإن ما سيحصل هو أن البرامج الصعبة والبرامج الضخمة الكبيرة ستكون هي أول ما يُعاد برمجته من قِبل الخبراء بالطريقة الجديدة، وتدريجياً سيطبِّق كل واحد ذلك، وستتم برمجة المزيد من البرامج بهذه الطريقة وسيكون على المبرمجين تعلُّم فقط كيفية عمل ذلك»

تقليل فقدان الطاقة

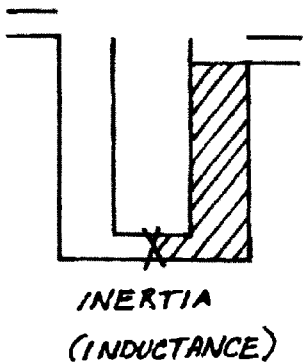
الموضوع الثاني الذي أود أن أتكلم عنه هو فقدان الطاقة في الكومبيوترات. وحقيقة أنها يجب أن تبرد هو عيب واضح لأكبر الكومبيوترات ـ يُبذل جهد لا يُستهان به في تبريد الجهاز. أود أن أوضّح أن هذا ببساطة ناتج عن هندسة سيئة جداً وليس شيئاً جوهرياً أبداً. ففي داخل الكومبيوتر هناك جزء من المعلومات يضبطها سلك ذو تيار بقيمة معينة أو أخرى وتُسمى «قطعة واحدة» ونريد أن نغيِّر التيار من قيمة إلى أُخرى ونشحن بالتيار أو نفرغ التيار. وسأعمل قياساً نظرياً بالماء. نريد أن نملأ وعاء بالماء للحصول على مستوى معين أو تفريغه لنصل إلى المستوى الآخر. هذا مجرَّد قياس، فإن كنت تريد الكهرباء أفضل، فإنك تستطيع أن تفكِّر بدقة أكثر من ناحية كهربائية. وما نفعله الآن قياساً في حالة الماء في تعبئة الوعاء بصب الماء من الأعلى «الشكل 1» ونخفِّض المستوى بفتح الصمام في الأسفل وترك الماء يجري بالكامل. في كلا الحالتين هناك فقدان للطاقة بسبب الانخفاض المفاجئ في مستوى الماء من مكان مرتفع ومن المستوى الأعلى الذي يأتي منه إلى المستوى الأسفل المتدني، وكذلك عندما تبدأ بصب الماء لملئه مرة ثانية، في حالة التيار والشحن فإن الشيء ذاته يحصل.

إن الأمر شبيه، كما أوضح مستر بينيت، بتشغيل سيارة يجب أن نبدأ بتشغيل المحرِّك وإيقافها بالدوس على الكوابح.



شكل (1)

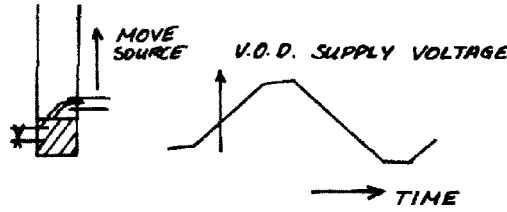
بتشغيل المحرّك ثم الضغط على الكوابح فإنك تفقد قوة في كل مرة. ثمة طريقة أخرى لترتيب الأمور بالنسبة للسيارة هي أن تربط العجلات بدواليب موازنة. الآن عندما تقف السيارة فإن دواليب الموازنة تُسرع وبالتالي توفّر الطاقة ومن ثم يمكن إعادة وصلها لتشغيل السيارة مرة ثانية. وعملية القياس بالماء تكون بوجود أنبوب على شكل u مع وجود صمام في الوسط في أسفله يصل بين ذراعي الأنبوب u (الشكل 2). نبدأ به مملوءاً من اليمين ولكن فارغاً من اليسار مع إبقاء الصمام مغلقاً. إذا فتحنا الصمام فإن الماء سينصب في الجانب الآخر ثم نغلق الصمام مرة ثانية تماماً في الوقت المناسب للإبقاء على الماء في الذراع الأيسر للأنبوب. والآن نريد أن نجرّب الطريقة الأخرى. نفتح الصمّام مرة أخرى ويعود الماء إلى الرجوع إلى الجزء



شكل (2)

الآخر ثم نحبسه مرة ثانية. هناك نوع من الخسارة والماء لا يرتفع إلى نفس المستوى الذي وصل إليه من قبل، فقدان طاقة أقل من طريقة التعبئة المباشرة. هذه الحيلة تستعمل عطالة الماء والقياس بالكهرباء هو المحاثة إلا أنه من الصعب جداً أن نقوم بواسطة ترانستور السيليكون الذي نستعمله حالياً بالمحاثة على الرقائق. لذلك فإن هذه الوسيلة ليست عملية خاصة بالنسبة للتقنية الحديثة.

هناك طريقة أخرى وهي أن نملأ الخزّان بمورد يبقى فقط فوق مستوى الماء بقليل لرفع مستوى الماء في الوقت الذي نملأ فيه الخزان (الشكل 3) بحيث يكون قطر الماء صغيراً دائماً خلال العملية بكاملها. وبنفس الطريقة يمكن أن نستعمل منفذاً لخفض مستوى الماء في الخزّان ولكن يجب أن نوقف الماء



شكل (3)

عند الأعلى ثم نخفِّض الأنبوب بحيث لا يظهر فقدان الحرارة في مكان الترانسستور أو يكون قليلاً. والكمية الفعلية للخسارة تعتمد على مدى ارتفاع المسافة بين مصدر التوريد والسطح عندما نملأه. هذه الطريقة تتصل بتغيير مصدر التيار مع مرور الزمن. لذلك إذا استطعنا أن نستعمل مصدر تيار متغيِّر مع الزمن، فإنه يمكننا أن نستعمل هذه الطريقة. بطبيعة الحال هناك فقدان طاقة في مصدر التيار ولكن هذا كله موجود في مكان واحد وهناك يسهل عمل محاثة كبيرة. هذا الأسلوب يسمى «القياس الحار» لأن مصدر توريد التيار يعمل في نفس الوقت كالساعة التي تقيس كل شيء، إضافةً لذلك فإننا لا نحتاج إلى إشارات توقيت إضافية لقياس الدارات كما هو الحال في التصاميم التقليدية.

وكلا الأدائين الأخيرين يستعملان طاقة أقل إذا مشينا بطريقة أكثر بطئاً. فإذا حاولنا تحريك مستوى مصدر الماء بسرعة فإن الماء في الأنبوب لا يبقى على نفس المستوى وينتهي بوجود هبوط كبير في مستوى الماء. لذلك لجعل الأداة تعمل لا بد أن أكون بطيئاً. وبالمثل فإن نظام أنبوب u لن يعمل إلا إذا فُتح الصمام المركزي وأُغلق بدرجة أسرع من الوقت الذي يستغرقه مرور الماء في الأنبوب u جيئةً وذهاباً. لذلك يجب أن تكون أدواتي أكثر بطئاً ـ لقد وفَّرت خسارة طاقة ولكني جعلت الأدوات أبطأ. وفي الحقيقة فإن فقدان الطاقة مضروباً بعدد المرات الذي تستغرقه لتشغيل الدارات ثابت. ولكن مع ذلك فإن هذا يبدو عملياً جداً لأن زمن الساعة عادةً أكبر من زمن الدارة في الترانسستورات ويمكننا أن نستعملها لتقليل الطاقة. كذلك، إذا سرنا مثلاً أبطأ بثلاث مرات في حساباتنا فإننا يُمكن أن نستعمل ثلث الطاقة على ثلاث مرات وهي تسع مرات أقل طاقة يجب أن تتشتت. وربما بإعادة التصميم يجب استعمال كومبيوترات موازية أو أدوات أخرى فإننا نستغرق وقتاً أطول مما نستطيع أن نفعله بأقصى سرعة للدارة من أجل أن نصنع آلة أكبر تكون عملية ونستطيع بها أيضاً تقليل فقدان الطاقة.

بالنسبة للترانسستور فإن فقدان الطاقة مضروباً بالزمن الذي تستغرقه للعمل ناتج عن عدة عوامل (الشكل 4).

$$\text{ENERGY} \cdot \text{TIME FOR TRANSISTOR} = kT \cdot \frac{\text{LENGTH}}{\text{THERMAL VELOCITY}} \cdot \frac{\text{LENGTH}}{\text{MEAN FREE PATH}} \cdot \text{NUMBER OF ELECTRONS}$$

$$\text{ENERGY} \sim 10^{9-13}\ kT$$

$$\therefore \text{DECREASE SIZE} : \text{FASTER, LESS ENERGY}$$

شكل (4)

1 ـ الطاقة الحرارية بالتناسب مع الحرارة: كي. تي.

2 ـ طول الترانزستور بين المصدر والنزح مقوماً على سرعة الإلكترونات بالداخل (السرعة الحرارية 3 كي. تي./ م.).

3 ـ طول الترانزستور بالوحدات للممر الحر المتوسط للاصطدام بالإلكترونات في الترانزستور.

4 ـ إجمالي عدد الإلكترونات التي هي بداخل الترانزستور عند عمله.

إن وضع قيم مناسبة لكل هذه الأرقام يدلنا على أن الطاقة المستعملة في الترانزستورات هذه الأيام تتراوح ما بين مليار إلى عشر مليارات أضعاف الطاقة الحرارية كي. تي. وعندما

نفتح الترانزستور فإننا نستعمل هذا المقدار من الطاقة وهي كمية هائلة.

ومن الواضح إن فكرة تقليل حجم الترانزستور فكرة جيدة. فتقلل الطول بين المصدر والنزح ونستطيع أن نقلّل عدد الإلكترونات، وبالتالي نستعمل طاقة أقل بكثير. كذلك فإن الترانزستور الأصغر أسرع بكثير لأن الإلكترونات يمكن أن تقطع المسافة أسرع وتفتح أسرع. وأيا كان السبب فإنَّ جعل الترانزستور أصغر فكرة جيدة إذ أن الكل يحاول أن يفعل ذلك.

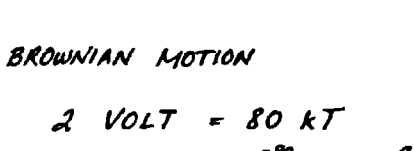
لكن لنفترض أننا صادفنا حالة يكون فيها الممر الحر المتوسط أطول من حجم الترانزستور، عندئذٍ فإننا نكتشف أن الترانزستور لا يعمل بشكل سليم أبداً. إنه لا يعمل بالطريقة التي توقعناها. وهذا يذكّرني أنه كان هناك منذ عدة سنوات شيء يسمَّى حاجز الصوت. وكانت الطائرات لا يُفترض فيها أن تكون أسرع من سرعة الصوت لأنك لو صمَّمتها بصورة عادية ثم جرَّبت أن تضع سرعة الصوت في معادلات فإن المروحة لن تعمل والأجنحة لا تُرفع ولا شيء يعمل بشكل صحيح. ومع ذلك فإن الطائرات يمكن أن تسير أسرع من الصوت. ما عليك إلا أن تعرف القوانين الصحيحة في ظل الظروف الصحيحة وتصمِّم الأداة بقوانين صحيحة. أنت لا تستطيع أن تتوقع أن تعمل التصاميم القديمة في ظروف جديدة، ولكن التصاميم «الجديدة» يمكن أن تعمل في ظروف «جديدة» وأنا أؤكد أنه من

الممكن تماماً عمل أنظمة ترانزستور أو بمعنى أصح، أنظمة فتح وأدوات حساب تكون فيها الأبعاد أقل من متوسط الممر الحر. إنني أتكلم طبعاً «من حيث المبدأ» ولا أتكلم عن الجهة المصنِّعة لمثل هذه الآلات. كذلك دعنا نناقش ما الذي يحدث لو حاولنا أن نجعل الآلات أصغر ما يمكن.

تقليل الحجم

لذلك فإن موضوعي الثالث هو حجم عناصر الحسابات وأتحدث الآن نظرياً بالكامل. إن أول شيء يهمّك عندما تصغر الأشياء هي حركة براون* - كل شيء متحرّك ولا شيء يبقى في مكانه. فكيف يمكنك أن تتحكّم بالدارات بعدئذٍ؟ وعلاوة على ذلك، فإن كانت الدارة لا تعمل ألا يوجد لها فرصة الآن في الرجوع فجأة؟ إذا استعملنا فولطين من الطاقة لهذا النظام الكهربائي وهو الذي نستعمله عادةً (الشكل 5) أي ثمانين ضعفاً من الطاقة الحرارية بدرجة حرارة غرفة ما (كي. تي. =40/ 1) وأن فرصة الرجوع إلى الخلف مقابل 80 مرة طاقة حرارية هو e أساس اللوغاريتمية الطبيعية، للطاقة ناقص ثمانين أو 10 أس - 43 فماذا يعني هذا؟ إذا كان لدينا مليار ترانزستور في الكمبيوتر

* الحركة المتغيرة للذرات الناتجة عن تصادم دائم عشوائي للجزئيات والتي أول من لاحظها عام 1928 روبرت براون وفسرها البرت آينشتاين في عام 1905 في دراسته أنالين ديرفيزيك.



شكل (5)

(وهو أمر غير متوفر حتى الآن) وكلها تفتح 10أس 10 مرة في الثانية (مرة الفتح عُشر نانو ثانية) وتفتح باستمرار وتعمل لمدة 10 أس 9 ثوان وهذا يعني 30 سنة فإن العدد الإجمالي لعمليات الفتح في تلك الآلة هو 10 أس 28.

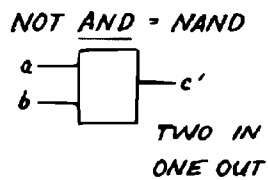
وفرصة عودة ترانزستور واحد إلى الخلف هي 10 أس - 43 فإنه لن يكون هناك خطأ ناتج عن الذبذبة الحرارية أبداً على مدى 30 سنة. إن لم يعجبك ذلك استعمل 2.5 فولط وعندئذٍ فإن الاحتمال يقلْ» وقبل ذلك بكثير فإن الفشل الحقيقي يأتي عندما تمر الأشعة الكونية من خلال الترانزستور وهو أمر لا يمكن أن نجيده أكثر من ذلك.

ومع ذلك فإن أكثر من هذا بكثير ممكن وأود أن أرجعكم

إلى مقالة في مجلة «سيانتفيك أمريكان» كتبها سي. إتش. بينيت وآر لاندوير «القيود الفيزيائية الأساسية للحساب». إنه من الممكن صناعة كومبيوتر يكون فيه كل عنصر وكل ترانزستور يسير إلى الأمام ويرتد فجأةً ومع ذلك يكون الكومبيوتر في حالة تشغيل. إن جميع العمليات في الكومبيوتر يُمكن أن تسير إلى الأمام أو الخلف والحساب يسير لفترة باتجاه واحد ثم يحل نفسه «لا يُحسب» ثم يمضي للأمام وهكذا. ولو مددناه للأمام قليلاً فإننا نستطيع أن نجعل هذا الكومبيوتر يمضي للنهاية وينهي الحساب بجعله أكثر احتمالاً لأن يسير إلى الأمام بدلاً من الخلف.

من المعروف أن جميع الحسابات المُمكنة يمكن أن تتم بالجمع بين بعض العناصر البسيطة مثل الترانزستورات. أو إذا أردنا أن نكون معنويين بطريقة منطقية أكثر شيء يسمى بوابة NAND مثلاً: NAND تعني AND-NOT (وبوابة ناند يوجد لها «سلكين» داخل وخارج (الشكل 6) ولننسى NOT حالياً. فما هي بوابة AND؟ إن بوابة أند هي أداة يكون المخرج منها 1 فقط إن كانت مدخلات السلكين 1 وإلا فإن مخرجاتها صفر.

NOT - AND تعني العكس وهكذا فإن قراءة السلك الخارج تكون 1 (أي أن لها مستوى فولطية يتعلق بـ 1) ما لم تكن قراءة مدخلات السلكين 1. وإن كانت قراءة مدخلات السلكين 1 فإن سلك المخرجات تكون قراءته صفر (له مستوى فولطية يتعلق



A	B	C'
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

NOT REVERSIBLE

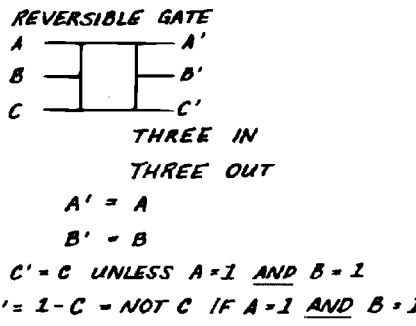
INFORMATION LOST

شكل (6)

بالصفر). ويبين الشكل 6 جدولاً بسيطاً لمدخلات ومخرجات بوابة NAND A وB هي مدخلات و C هي المخرجات. فإن كانت A وB كلاهما 1 فإن المخرجات هي صفر وإلا 1. لكن مثل هذه الأداة غير قابلة للارتداد وتصنيع المعلومات. ولو أنني أعرف المخرجات فقط فإنني لا أستطيع أن استرد المدخلات فالآلة لا يمكن أن تقفز للأمام وتعود إلى الوراء ثم تُحسب بشكل صحيح. مثلاً إذا عرفنا أن المخرجات الآن 1 فإننا لا نعرف فيما إذا جاءت من A = 0، B = 1 أو A = 1 ، B = 0 أو A = 0 أو B = 0 ولا تستطيع أن تعود للوراء. مثل هذه الأداة بوابة غير مرتدة. إن الاكتشاف الكبير لبنيت وفريدكين

بصفة مستقلة هو أنه من الممكن عمل حسابات بنوع مختلف من وحدة بوابة أسس خصوصاً وحدة بوابة مرتدة. ولقد شرحت فكرتها ـ بوحدة يمكن أن أسميها بوابة NAND مرتدة ولديها ثلاث مدخلات وثلاث مخرجات (الشكل 7). من المخرجات هناك اثنتان A ، B مشابهتان للمدخلات A ، B ولكن المدخل الثالث يعمل بهذه الطريقة C . هي مشابهة لـ C ما لم تكن A و B كلاهما أو في هذه الحالة تتغير حسب C . مثلاً إذا كانت C 1 فإنها تتغير إلى صفر، إذا كانت C صفر فإنها تتغير إلى 1، لكن هذه التغيرات تحصل فقط إن كانت A و B 1 ولو أنك وضعت بوابتين من هذه البوابات على التوالي فإنك سترى أن A وB ستمر وإذا لم تتغير C في كليهما. فإنها تبقى كما هي. وإذا تغيرت C فإنها تتغير مرتين كي تبقى كما هي. لذلك فإن هذه البوابة يمكن أن تعكس نفسها بدون فقدان معلومات ومن الممكن اكتشاف ما دخل إذا عرفت ما خرج.

إن أداة مصنوعة بالكامل بمثل هذه البوابات ستجري الحسابات إذا تحرك كل شيء للأمام ولكن إذا سارت الأمور ذهاباً وإياباً لفترة ثم تعود في النهاية إلى الأمام فإنها لا تزال تعمل بشكل صحيح. لكن إذا قفزت الأمور للوراء ثم ارتدت إلى الأمام فإنها لا تزال أيضاً صحيحة. وهو أمر مشابه لذرَّة في الغاز تقذف بالذرَّات التي حولها. مثل هذه الذرَّة عادةً لا تذهب إلى أي مكان ولكن بجذب بسيط، وانحراف بسيط يجعل فرصة



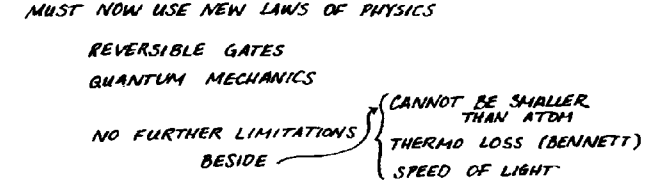
شكل (7)

للحركة باتجاه معيَّن أعلى بقليل من الطريقة الأخرى فإن الشيء سينحرف قليلاً للأمام ويسير معه طرف آخر على الرغم من حركة براون التي عملها. لذلك فإن الكومبيوتر سيقوم بعملية الحساب شريطة أن نضيف قوة طاردة لجذب الشيء عبر الحساب. وعلى الرغم من أنه لا يقوم بالحساب بعملية سلسة إلا أن الحساب هكذا إلى الأمام والوراء سيُنهي المهمة، وكما هو الحال بالنسبة لذرَّة الغاز، لو أننا جذبناها قليلاً فإننا نفقد قدراً ضئيلاً من الطاقة ولكنها تستغرق وقتاً طويلاً لتصل إلى طرف واحد من الطرف الآخر. ولو أننا في عجلة من أمرنا وجذبنا بقوَّة فإننا نفقد قدراً كبيراً من الطاقة. والوضع ذاته

بالنسبة لهذا الكومبيوتر، فإن كنا صبورين ومضينا ببطء فإنه يمكننا أن نجعل الكومبيوتر يعمل دون فقدان عملي للطاقة حتى أقل من KT لكل خطوة أي مقدار ضئيل ممكن أن يوفِّر لديك الوقت. ولكن إن كنت في عجلة من الأمر فإن عليك أن تشتِّت الطاقة مرة ثانية، صحيح أن الطاقة المفقودة لجذب الحساب إلى الأمام لإنجازه مضروباً بالزمن المتاح لك لعمل الحساب ثابت.

مع الإبقاء على هذه الإمكانيات في ذاكرتنا، دعنا نرى كم هو صغر حجم الكومبيوتر الذي يُمكن أن نصنعه؟ كم هو حجم الرقم الذي سيكون؟ نحن نعلم جميعاً أننا نستطيع أن نكتب أرقاماً في القاعدة 2 «كضربات» كل منها إما أن يكون واحداً أو صفراً. والذرَّة الثانية يمكن أن تكون واحداً أو صفراً لذلك فإن خيطاً صغيراً من الذرَّات كافٍ لحمل رقم ذرَّة واحدة لكل ضربة (فعلياً حيث أن الذرَّة يمكن أن يكون لها أكثر من حالتين فيمكننا أن نستعمل ذرَّات أقل ولكن واحداً لكل ضربة صغيرة بدرجة كافية) لذلك ومن أجل المتعة الفكرية فإننا ننظر إذا كان بإمكاننا أن نصنع كومبيوتراً يكون فيه كتابة الضربات بحجم الذرَّات وتكون فيه الضربة مثلاً إما لفة الذرَّة إلى أعلى للرقم 1 أو أسفل للرقم صفر. بعدئذٍ فإن «الترانزستور» الذي لدينا والذي يغيِّر الضربات في أماكن مختلفة يتعلَّق بنوع من التفاعل بين الذرَّات التي تغير حالاتها. وأبسط[1] لأمثلة سيكون فيما لو حصل نوع من التفاعل من 3 ذرات باعتباره العنصر الأساسي أو البوابة

في مثل هذا الكومبيوتر. ولكن مرة أخرى فإن الأداة لن تعمل بالشكل الصحيح لو أننا صمَّمناها بقوانين مناسبة للأجسام الكبيرة. يجب علينا الآن أن نستعمل قوانين فيزيائية جديدة، قوانين الكمية الميكانيكية، القوانين المناسبة للحركة الذرية (الشكل 8).

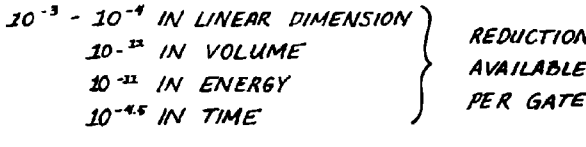


شكل (8)

لذلك يجب أن نتساءل فيما إذا كانت قوانين الميكانيكا الكمية تسمح بترتيب ذرَّات صغيرة في العدد بعدد البوابات في كمبيوتر يمكن أن يعمل ككمبيوتر. لقد تمَّت دراسة ذلك من حيث المبدأ وقد وُجد مثل هذا الترتيب، وحيث أن قوانين الميكانيكا الكمية قابلة للارتداد فإننا يجب أن نستعمل اختراع بينيت وغريدكين ذي البوابات المرتدة المنطقية. عند دراسة هذه الحالة الكمية الميكانيكية فإننا نجد أن الميكانيكا الكمية لا تضيف قيوداً إضافية لأي شيء قاله السيد بينيت من حيث

الاعتبارات الخاصة بالحركة الحرارية. بطبيعة الحال هناك قيود، القيود العملية، وهي أن الضربات يجب أن تكون بحجم الذرة وأن الترانزستور يجب أن يكون 3 أو 4 ذرات. وبوّابة الميكانيكا الكمية التي استعملتها ذات 3 ذرّات (لن أحاول أن أُجرّب أن أكتب ضرباتي على ذرات وسأنتظر إلى أن يصل التطور التكنولوجي للذرّات قبل أن أحتاج إلى المضي لأبعد من ذلك). وهذا يتركنا مع (أ) قيود من حيث الحجم بحجم الذرّة. (ب) متطلبات الطاقة بناء على الوقت حسبما فعل بينيت. (جـ) الخاصيَّة التي لم أذكرها بشأن سرعة الضوء. هذه هي القيود الفيزيائية الطبيعية للكومبيوتر التي أعلم بها.

ولو أننا نجحنا في صنع كومبيوتر بحجم الذرّة فإن ذلك يعني (الشكل 9) أن البُعد الخطي أصغر بألف إلى عشرة آلاف مرة من تلك الرقائق الصغيرة جداً المتوفرة لدينا الآن. وهذا



شكل (9)

يعني أن حجم الكومبيوتر يساوي 100 على مليار أو 10 أس - 11 من الحجم الحالي لأن حجم الترانزستور أصغر بمعامل 10 أس - 11 من الترانزستورات التي نصنعها هذه الأيام. ومتطلّبات الطاقة لفتحة واحدة تتراوح أيضاً من حيث الشدة أحد عشر درجة أقل من الطاقة المطلوبة لفتح الترانزستور هذه الأيام والوقت اللازم لعمل التحويل سيكون على الأقل عشرة آلاف مرة أسرع لكل خطوة حسابية. لذلك هناك مجال كبير للتحسين في الكومبيوتر، وأترك هذا لكم أنتم الناس العمليين الذين يعملون بالكومبيوتر كهدف يقبلون عليه. لقد قلّلت من المدة الزمنية التي سيستغرقها مستر إيزاوا لترجمة ما قلت وليس لدي ما أقوله مما أعددته لهذا اليوم. أشكركم وسأجيب على الأسئلة لو رغبتم في ذلك.

أسئلة وإجابات

سؤال: لقد ذكرت أن جزءاً من المعلومات يمكن أن تخزَّن في ذرَّة واحدة وأتساءل إن كان بإمكانك أن تخزِّن نفس الكمية من المعلومات في كوارك واحد (كلمة مخترعة من الفيزيائي موري جيل مان وهو فيزيائي أمريكي ولد عام 1892م).

جواب: نعم ولكن ليس لدينا تحكُّم بالكوارك وهذا يصبح فعلاً طريقة غير عملية للتعامل بالأمور. ربما تفكر أن ما أتحدث

عنه غير عملي ولكني لا أعتقد ذلك. عندما أتكلم عن الذرّات فإني أعتقد أنه يوماً ما سيكون من الممكن معالجتها وضبطها بصورة فردية. وسيكون هناك الكثير من الطاقة مشمولاً في تفاعل الكوارك لدرجة إنه من الخطر التعامل معها بسبب النشاط الإشعاعي وهكذا. لكن الطاقة الذرية التي أتحدث عنها شيء مألوف لدينا في الطاقة الكيماوية والطاقة الكهربائية وتلك أرقام ضمن نطاق الحقيقة مهما كانت تبدو شاذة في الوقت الحاضر.

سؤال: لقد قلت أن عنصر الحساب الأصغر أفضل ولكني أعتقد إن الجهاز يجب أن يكون أكبر لأن. . .

جواب: تعني إن إصبعك كبير جداً إذا ما ضَغَطَ على الأزرار؟ فهل هذا ما تعنيه؟

سؤال: نعم تماماً.

جواب: طبعاً أنت على حق. أنا أتكلم عن الكومبيوترات الداخلية ربما للرجل الآلي أو أدوات أخرى. فالمدخلات والمخرجات شيء لم أُناقشه سواء أكانت المدخلات من النظر إلى الصور أو سماع الأصوات أو ضغط الأزرار. أنا أناقش الكيفية التي يتم بها الحساب وليس الشكل الذي ينبغي أن يكون عليه المخرجات. إنه صحيح بالتأكيد إنه لا يمكن خفض المدخلات والمخرجات في معظم الحالات بطريقة فعّالة لما بعد الأبعاد البشرية. إنه من الصعب أن تضغط على الأزرار

لبعض الكومبيوترات بأصابعنا الكبيرة. ولكن في مشكلات الحسابات الكبيرة التي تستغرق ساعات وساعات، فإنه يمكن عملها بسرعة على الجهاز الصغير جداً باستهلاك ضئيل للطاقة. هذا هو النوع من الأجهزة الذي كنت أفكّر فيه وليس التطبيقات البسيطة لإضافة رقمين لحسابات مستفيضة.

سؤال: أود أن أعرف طريقتك في تحويل المعلومات من عنصر نطاق ذري لعنصر نطاق ذري آخر.

إذا استعملت الميكانيكا الكمية أو التفاعل الطبيعي بين عنصرين فإن مثل هذه الأداة ستصبح قريبة جداً من الطبيعة نفسها. مثلاً إذا عملنا محاكاة بالكومبيوتر، محاكاة مونت كارلو لمغناطيس دراسة الظواهر الحيوية فإن كمبيوتر الميزان الذرّي سيكون قريباً من المغناطيس نفسه. فما هي أفكارك حول ذلك؟

جواب: نعم.. جميع الأشياء التي نصنعها هي الطبيعة. ونحن نرتبها بطريقة لتتناسب غرضنا، لإجراء حساب لغرض. في المغناطيس هناك نوع من العلاقة، إن أردت هناك أنواع من الحسابات جارية مثلما هناك في النظام الشمسي بطريقة التفكير.

ولكن ربما لن يكون الحساب الذي نريد أن نعمله في الوقت الراهن. إن ما نحتاج أن نصنعه هو أداة نغيِّر البرامج بها ونتركها تحسب المشكلة التي نريد أن نحلها وليس مجرد مشكلة مغناطيسها التي تريد أن تحلها لنفسها أنا لا أستطيع أن استعمل

النظام الشمسي للكومبيوتر إلى أن تتم المشكلة التي قدَّمها لي شخص ما لإيجاد حركة النجوم وفي مثل هذه الحالة فإن كل ما يجب أن أفعله هو أن أراقب. لقد كان هناك مقالة مسلية مكتوبة على هيئة نكتة. وفي المستقبل البعيد تظهر «المقالة»، تناقش طريقة جديدة لعمل حسابات حركة هوائية. وبدلاً من استعمال كومبيوترات العصر، يخترع الكاتب أداة بسيطة لنفخ الهواء من الجناح (إنه يعيد اختراع نفق الهواء).

سؤال: قرأت مؤخراً في مقالة صحفية أن عمليات النظام العصبي في الدماغ أكثر بطئاً من حواسيب أيامنا هذه وأن الوحدة في النظام العصبي أصغر بكثير.

فهل تعتقد أن الكومبيوترات التي تكلَّمت عنها اليوم تشترك في شيء ما مع النظام العصبي في الدماغ؟

جواب: هناك تشابه بين الدماغ والكومبيوتر حيث أن هناك عناصر يمكن أن تفتح تحت سيطرة عناصر أخرى. فنبض الأعصاب يُضبط أو يُثير أعصاب أخرى بطريقة تعتمد غالباً فيما إذا كان هناك أكثر من نبضة قادمة شيء شبيه بـAND أو عملومياتها. فما هي كمية الطاقة المستعملة في خلية الدماغ لواحدة من هذه التحولات؟ أنا لا أعرف الرقم. فالزمن المستغرَق للفتح في الدماغ أطول بكثير مما هو عليه في كمبيوتراتنا حتى هذه الأيام، بصرف النظر عن الخيال في بعض

الكومبيوترات الذرية المستقبلية. إلا أن نظام توصيلات الدماغ موسَّع أكثر. فكل عصب مرتبط بآلاف الأعصاب الأخرى.

في حين أننا نوصل الترانزستورات باثنين أو ثلاثة ترانستورات فقط. ينظر بعض الناس إلى نشاط الدماغ أثناء عمله ويرون أنه في العديد من الجوانب يتفوّق على كومبيوتر هذه الأيام وفي جوانب أخرى عديدة يتفوّق الكومبيوتر على دماغنا. وهذا يُلهم الناس كي يُصمِّموا آلات تستطيع أن تعمل أكثر. والذي يحصل غالباً هو أن للمهندس فكرة عن كيفية عمل الدماغ (برأيه) ثم يُصمِّم آلة تسلك ذلك السلوك. وهذه الآلة الجديدة قد تعمل بشكل جيد. ولكن يجب أن أُحذِّرك أن هذا لا يُخبرنا أي شيء حول كيفية عمل الدماغ فعلاً وليس من الضروري أن نعرف ذلك أبداً من أجل أن نصنع كومبيوتر ذي قدرة عالية. ليس من الضروري أن نفهم طريقة رفرفة الطيور لأجنحتها وكيفية تصميم الريش من أجل عمل آلة الطيران. ليس من الضروري أن نفهم نظام الكبد في أرجل شيتا ـ قرد يركض سريعاً ـ لذلك ليس من الضروري تقليد سلوك الطبيعة بالتفصيل من أجل هندسة أداة يمكن أن تتفوّق على قدرات الطبيعة من عدة أوجه وهذا موضوع شيِّق وأحب أن أتحدث عنه.

إن دماغك ضعيف جداً مقارنة بالكومبيوتر. سأعطيك سلسلة من الأرقام واحد، ثلاثة، سبعة، الآن أريد أن تُعيدها لي مرة ثانية. والكومبيوتر يمكن أن يأخذ عشرات الآلاف من

الأرقام ويرجعها لي بالعكس أو يلخصها لي أو يعمل الكثير من الأشياء التي لا نستطيع أن نفعلها. من ناحية أخرى إذا نظرت إلى وجه مجرَّد لمحة أستطيع أن أقول لك من هو إن كنت أعرف ذلك الشخص أو أني لا أعرف ذلك الشخص، ونحن حتى الآن لا نعرف كيف يعمل نظام الكومبيوتر بحيث أننا إذا أعطيناه تشكيلة وجه يمكن أن يقدم لنا مثل هذه المعلومات حتى وإن رأى وجوهاً عديدة وحاولت أن تعلِّمه.

مثال شيِّق آخر هو أدوات لعب الشطرنج: إنه لمن المدهش أننا قادرون على صنع آلات تستطيع لعب الشطرنج أفضل من أي شخص في الحجرة. إلا أنها تفعل ذلك بتجربة الكثير من الاحتمالات. فإذا تحرَّك هنا فإنني أستطيع أن أُحرِّك هناك ويستطيع هو أن ينتقل هناك وهكذا. إنها تبحث في كل بديل وتختار الأفضل. والكومبيوترات تنظر في ملايين البدائل ولكن متقنةً للعب الشطرنج، الإنسان، يعمل ذلك بطريقة مختلفة. إنه يميِّز الأشكال وهو ينظر فقط إلى ثلاثين أو أربعين وضعاً قبل تقرير الحركة التي يقوم بها. لذلك على الرغم من أن القواعد أبسط في «الذهاب» فإن الأجهزة التي تلعب «الذهاب» ليست جيدة لأن هناك احتمالات كثيرة في كل وضع للحركة وهناك أشياء كثيرة للمراجعة، والآلات لا تستطيع أن تنظر بعمق. لذلك فإن مشكلة تمييز الأشكال وما الذي يجب عمله في ظل هذه الظروف هو الشيء الذي لا يزال مهندسو

الكومبيوتر (يحبون أن يسموا أنفسهم علماء الكومبيوتر) يجدونه صعباً جداً. وهو بالتأكيد من الأشياء المهمة لكومبيوترات المستقبل ربما أهم من الأشياء التي تحدثت عنها صنع آلة للعب «كش» بفعالية!

سؤال: إنني أعتقد أن أي طريقة للكومبيوتر لن تكون مُثمرة ما لم تقدم نوعاً ما من الأحكام حول كيفية إنشاء مثل تلك الأدوات أو البرامج. لقد اعتقدت أن ورقة فريدكين حول المنطق المحافظ مثيرة جداً. ولكن عندما بدأت أفكر في عمل برنامج بسيط باستعمال مثل هذه الآلات توقفت لأن التفكير في مثل هذا البرنامج أعقد بكثير من البرنامج نفسه. وأعتقد أننا يمكن بسهولة أن ندخل في تراجع لا محدود لأن عملية صناعة برنامج معيَّن ستكون أكثر تعقيداً من البرنامج نفسه وبمحاولة مكننة العملية فإن برنامج المكننة الآلية سيكون أكثر تعقيداً. وهكذا خصوصاً في هذه الحالة عندما يكون البرنامج موصلاً بالجهاز بدلاً من كونه مفصولاً كبرنامج جاهز. أعتقد أنه من الحيوي أن نفكر بطرق الإنشاء.

جواب: لدينا بعض التجارب المختلفة. لا يوجد هناك تراجع لامحدود. إنه يتوقَّف عند مستوى معيَّن من التعقيد. إن الآلة التي يتحدث عنها فريدكين في النهاية والتي كنت أتحدث عنها في حالة الميكانيكا الكمية كلاهما كومبيوترات عالمية بمعنى أنها يمكن أن تبرمج لعمل وظائف متعددة. وهذا البرنامج

ليس موصول آلياً. وهي ليست موصولة آلياً أكثر من كومبيوتر عادي يمكنك أن تُدخل المعلومات فيه ـ البرنامج جزء من المدخلات ـ والآلة تحل المشكلة المحددة لها أن تعملها. إنه موصول آلياً ولكنه عالمي مثل الكومبيوتر العادي. هذه الأشياء غير أكيدة أبداً ولكني وجدت لوغاريتمية. فإن كان لديك برنامج مكتوب لآلة غير قابلة للارتداد، البرنامج العادي، وبعدئذ يمكن أن أحوّله إلى برنامج آلة قابلة للارتداد بواسطة نظام ترجمة مباشر وهو غير فعال أبداً ويتعمل خطوات أخرى كثيرة. بعدئذ، في المواقف الحقيقية فإن عدد الخطوات يمكن أن يكون أقل بكثير. ولكن على الأقل أنا أعلم أنني أستطيع أخذ برنامج بخطوات 2 Nحيث لا يمكن ترجيعه وأحوّله إلى خطوات 2 N لآلة قابلة للترجيع. وهذا يعني خطوات أكثر. لقد عملته بطريقة غير فعّالة طالما أنني لا أحاول أن أجد الحد الأدنى ـ مجرّد إحدى الطرق لعمل ذلك. إني لا أعتقد أننا سنجد هذا التراجع الذي تتحدث عنه ولكن ربما تكون على حق. . . . أنا غير متأكّد.

سؤال: ألن نكون نضحّي بالعديد من المزايا التي كنا نتوقعها من مثل هذه الأدوات لأن هذه الآلات تعمل ببطء كبير؟ أنا متشائم جداً حول هذه النقطة.

جواب: إنها تسير أبطأ ولكنها أصغر بكثير. أنا لا أعمله قابلاً للرجوع إلا إذا احتجت ذلك. ليس هناك مبرر في عمل آلة

مرتدة إلا إذا كنتَ تحاول جاهداً في تخفيض الطاقة بشكل هائل لأنه فقط بثمانين KT 80 فإن الآلة غير المرتدة تعمل بصورة جيِّدة. وهذه الـ 80 هي أقل بكثير من 10 أس 9 أو 10 أسKT10 الحالية. لذلك ندي على الأقل 10 أس 7 تحسينات في الطاقة ولا أزال أستطيع عمل ذلك بآلات غير مرتدة! هذا صحيح هذه هي الطريقة الصحيحة للعمل في الوقت الحاضر. إنني أُسلِّي نفسي فكرياً للمتعة لأسأل إلى أي مدى يمكن أن نمضي من حيث المبدأ، ليس من حيث الممارسة، ثم اكتشفت إننا يمكن أن نمضي من أجل كسر من KT من الطاقة وأجعل الآلة ميكروسكوبية ذرياً. ولكن من أجل أن أعمل ذلك يجب أن استعمل القوانين المرتدة فيزيائياً. واللاارتدادية تأتي لأن الحرارة تنتشر على عدد كبير من الذرَّات ولا يمكن جمعها مرة ثانية. وعندما أصنع آلة صغيرة جداً فإني ما لم أسمح بعنصر تبريد كميات كبيرة من الذرَّات، فإن علي أن أعمل بطريقة عكسية. عملياً ربما لن يأتي يوم نكون فيه غير راغبين في ربط كومبيوتر صغير بقطعة كبيرة من الرصاص تحتوي على ذرات 10 أس 10 (وهو صغير جداً) ليجعلها غير مرتدة بطريقة فعالة. لذلك إني أوافق معك من ناحية عملية ولوقت طويل وربما للأبد، إننا سنستعمل بوَّابات غير مرتدة. من ناحية أخرى، إنه جزء من المغامرة العلمية أن نحاول أن نجد قيداً في جميع الاتجاهات وأن نمد الخيال البشري إلى أبعد ما يمكن في كل مكان. على

الرغم من أنه يبدو في كل مرحلة أن مثل هذا النشاط سخيف وبلا فائدة إلا أنه غالباً ما تبيَّن أنه لم يكن بلا فائدة.

سؤال: هل هناك أي قيود من مبدأ الشك؟ هل هناك أي قيود حيوية على الطاقة وتوقيت الساعة في نظامك للآلة المرتدة؟

جواب: كانت هذه نقطتي بالضبط. ليس هناك أي قيود أخرى بسبب الميكانيكا الكمية. وعلى الإنسان أن يميِّز بحذر بين الطاقة المفقودة أو المستهلكة بلا رجوع. الحرارة الصادرة في تشغيل الآلة ومضمون الطاقة في الأجزاء المتحركة والتي يُمكن استخلاصها مرة ثانية. هناك علاقة بين الوقت والطاقة التي يمكن استخلاصها مرة ثانية. لكن الطاقة التي يمكن استخلاصها مرة ثانية ليست ذات أهمية أو علاقة، وستكون شبيهة بالاستفسار فيما إذا كان ينبغي أن نضيف Mc^2، باقي الطاقة لكل الذرَّات في الآلة. أنا أتحدث فقط عن الطاقة المفقودة مضروبة في الوقت وبعدئذٍ لا يوجد قيود. ومع ذلك فإنه من الصحيح إذا أردت أن تجري حساباً بسرعة عالية جداً فإن عليك أن تزوِّد أجزاء الآلة التي تتحرك بسرعة وبها طاقة ولكن تلك الطاقة ليست مفقودة بالضرورة في كل خطوة من خطوات الحساب، إنها تكمن خلال العطالة.

جواب (بدون سؤال): أود أن أقول فيما يخص مسألة الأفكار غير المفيدة، أود أن أُضيف شيئاً آخر، لقد انتظرت

لعلكم تسألوني ولكن هذا لم يحصل ولذلك سأُجيب على كل حال كيف يمكن أن نصنع آلة بمثل هذه المقاييس الصغيرة بدرجة أننا يجب أن نضع الذرّات في أماكن خاصة؟ فنحن هذه الأيام لا يوجد لدينا آلات بأجزاء متحركة تكون مقاساتها صغيرة للغاية، على مستوى ذرّات أو مئات الذرّات. ولكن ليس هناك قيوداً فيزيائية في ذلك الاتجاه أيضاً. ليس هناك سبباً أيضاً، عندما نضيف السيلكون حتى هذه الأيام، يمنع من جعل القطع جزءاً صغيرة بحيث تكون متحركة. كذلك يمكن أن نركب أنابيباً بحيث يكون تدفُّق السوائل المختلفة في أماكن محددة. يمكننا أن نصنع آلات صغيرة للغاية وسيكون من السهل التحكُّم بها بنفس النوع من دارات الكومبيوتر التي نصنعها. وأخيراً ومن أجل المتعة والسعادة الفكرية يمكن أن تتخيل آلات صغيرة مثل عدة مايكرونات مع دواليب وكوابل كلها متصلة بأسلاك وتوصيلات سيلكون بحيث أن الجسم ككل، أداة كبيرة جداً، يتحرك ليس مثل الحركات الغريبة لآلاتنا الصلبة الحالية ولكن بطريقة سلسة كرقبة البطة والتي هي في النهاية عدد كبير من الآلات الصغيرة والخلايا كلها متصلة ومضبوطة بطريقة سلسة فلماذا لا نصنع ذلك بأنفسنا؟