

# سخنرانی فاینمن در ۱۹۵۹

## "آن پایین فضای بسیاری هست"

مترجم: مهدیه فراز کیش  
محقق شرکت پژوهشگران نانوفناوری

این نسخه رونوشتی مطابق بهترین نمونه گفتگویی است که ریچارد فاینمن در ۲۹ دسامبر سال ۱۹۵۹ در نشست سالانه جامعه فیزیکی آمریکا در مکان مؤسسه تکنولوژی کالیفرنیا Caltech ارائه داده است که اولین بار در فوریه ۱۹۶۰ در شماره علوم و مهندسی Caltech، منتشر گردیده است.

من ترجیح می‌دهم زمینه‌ای را شرح دهم که در رابطه با آن کار اندکی انجام شده باشد، ولی عمدتاً کار بیشتری بتوان انجام داد. این زمینه کاملاً همانند زمینه‌های دیگری که چندان ارتباطی با فیزیک بنیادی ندارند، نخواهند بود (درک اینکه: "ذرات غیرمتجانس چه هستند؟") و بیشتر به فیزیک جامدات شبیه است که موارد جالبی درباره خواص گروهی مواد بیان می‌کند. وانگهی، بیشترین اهمیت آن در اینست که کاربردهای تکنیکی بسیاری دارد. آنچه من بیان خواهم کرد در ارتباط با شکل انجام استادانه و کنترل مواردی در مقیاس کوچک است. ابتدایی‌ترین مرحله در مسیری که من قصد دارم روی آن بحث کنم، اینست که در زیر آنچه ما داریم، بی‌تردید جهانی کوچک وجود دارد. در سال ۲۰۰۰، زمانیکه آنان به این سال رجوع کنند، متعجب خواهند بود از اینکه چرا تا سال ۱۹۶۰ کسی به‌طور جدی کار در این مسیر را شروع نکرده است؟

### چرا ۲۹ جلد دایرةالمعارف بریتانیکا (Britannica) را بر سر یک سوزن نمی‌توانیم بنویسیم؟

سر یک سوزن دارای قطر یک‌شانزدهم اینچ است. اگر آن را ۲۵ هزار بار بزرگ کنید، سطح آن برابر با سطح کل صفحات دایرةالمعارف می‌باشد. بنابراین نیاز است که همه نوشته‌های آن را ۲۵ هزار بار کوچک کنیم. آیا این کار امکان‌پذیر است؟ قدرت تشخیص چشم در حدود یک صدویستم اینچ است. اگر دایرةالمعارف را ۶-۱۰ \* ۰/۵ بار کوچک کنیم، ابعاد آن به اندازه قطر یک نقطه کوچک خواهد شد. وقتی شما آن را ۲۵ هزار بار کوچک می‌کنید، هنوز  $80^\circ A$  قطر دارد، یعنی قطر ۳۲ اتم یک فلز معمولی. به عبارت دیگر، یکی از آن نقطه‌ها سطحی برابر با سطح ۱۰۰۰ اتم را دارا می‌باشد. بنابراین هر نقطه بوسیله روش گراورسازی در عکاسی در سایزی که نیاز است، اندازه می‌گردد. اما سؤال اینست که آیا فضای کافی برای نوشتن همه دایرةالمعارف در سر یک سوزن وجود دارد؟ آیا اگر در آن اندازه نوشته شود، خوانده می‌شود؟ تصور کنیم که نوشته‌ها به صورت حروفی از فلز هستند. جایکه در دایرةالمعارف سیاه است، در اینجا حروف فلزی با یک‌بیست و پنج هزارم سائز معمولیشان وجود دارند، چگونه آن را بخوانیم؟

امروزه یکی از روشهای خواندن چنین است. ابتدا فلز را در یک ماده پلاستیکی فشرده می‌کنیم و قالبی از آن می‌سازیم، سپس پلاستیک را با دقت جدا می‌کنیم و در بخار سیلیسی قرار می‌دهیم تا پرده‌ای بسیار نازک بدست آوریم. سپس طرف دیگر پرده سیلیسی را زرانود می‌کنیم تا حروف کوچک به خوبی مشخص گردد، سپس پلاستیک را از پرده سیلیسی جدا نموده و پرده را با میکروسکوپ الکترونی می‌نگریم!

و آنچه مهم است اینکه: چطور ما کوچک بنویسیم؟ اکنون هیچ روش استانداردی برای انجام این کار نداریم. اما به اندازه‌ای که ابتدا به نظر می‌رسد، مشکل نیست. ما می‌توانیم عدسی‌های میکروسکوپ الکترونی را وارونه کنیم تا به

<sup>1</sup> "There is plenty of room at the bottom"

همان خوبی بزرگ کردن اجسام در کوچک کردن آنها کاربرد داشته باشند. دسته ای از یونها که از میان عدسیهای وارونه میکروسکوپ عبور می کنند، می توانند در یک نقطه متمرکز شوند؛ همانگونه که در میدان نوسانی اشعه کاتدی ITV، ابتدا مقدار ماده لازم برای هر خط را به طور اجمالی بررسی می کنیم و آن را در میدان تنظیم می کنیم و سپس از اول تا انتهای سطر را با همان نقطه متمرکز می پیماییم و این چنین می نویسیم.

البته روشهای سریعتری نیز وجود دارد. اول می توانیم پرده ای با سوراخهایی در فرم حروف بسازیم و آن را نورپردازی کنیم. جرقه ای در پشت سوراخها ایجاد می کنیم که در امتداد آن یونهای فلزی کشیده می شوند. آنگاه دوباره می توانیم از سیستم عدسیهایمان استفاده کنیم و یک تصویر کوچک یونی را بسازیم که فلز را روی سوزن قرار دهد. یک روش ساده تر که مطمئن نیستیم کار کند، اینست که ما نور را کنترل می کنیم و از یک میکروسکوپ نوری وارونه عبور می دهیم و آن را روی یک صفحه بسیار کوچک فتوالکترونیک متمرکز می کنیم. الکترونهای روی پرده به جایی که نور می درخشد، حرکت می کنند. این الکترونها در مقیاس پایین به وسیله عدسیهای میکروسکوپ الکترونی متمرکز شده اند تا مستقیماً بر سطح فلز حمله کنند. آیا چنین پرتویی اگر به اندازه کافی قوی باشد، فلز را قلم زنی می کند؟ من نمی دانم. اگر بر سطوح فلزی عمل نکند، ممکن است سطوحی بیابیم که سوزن اصلی را پوشش دهد تا تغییرات ناشی از بمباران الکترونی را بتوانیم تشخیص دهیم.

در این دستگاه مسأله حادی وجود ندارد. آنچه شما برای بزرگ نمایی استفاده می کنید، اینست که تعداد کمی الکترون را در یک پرده، بیشتر و بیشتر پخش می کنید و در اینجا قضیه برعکس است. نوری که از صفحه بدست می آوریم، روی یک سطح بسیار کوچک متمرکز شده است. بنابراین بسیار قوی است. الکترونهایی که از پرده فتوالکترونیک آمده اند، بر یک سطح بسیار کوچک جمع شده اند و بسیار قوی هستند. من نمی دانم چرا هنوز این کار صورت نگرفته است!

این یک دایره المعارف بریتانیکایی بر سر یک سوزن است. اما اگر تمام کتابهای جهان را در نظر بگیریم، چه می شود؟ انجمن کتابخانه ها تقریباً ۹ میلیون جلد کتاب دارد. کتابخانه موسیقی انگلیس ۵ میلیون جلد کتاب دارد. ۵ میلیون جلد کتاب هم در کتابخانه ملی فرانسه وجود دارد. بنابراین می توانیم بگوییم سراسر ۲۴ میلیون جلد کتاب وجود دارد.

چه اتفاقی می افتد اگر همه آنها را در مقیاسی که بحث کردیم، چاپ کنیم؟ چقدر فضا اشغال می کند؟ البته مساحتی در حدود یک میلیون برابر سر یک سوزن اشغال می کند، زیرا بجای اینکه فقط ۲۴ جلد دایره المعارف وجود داشته باشد، ۲۴ میلیون جلد کتاب وجود دارد. میلیونها سر سوزن می تواند در مربعی متشکل از هزاران سوزن قرار گرفته در یک پهلو، وجود داشته باشد، یا مساحتی در حدود ۳ یارد مربع اشغال کند. در واقع رونوشت سیلیسی با روکش پلاستیکی و کپی های آن، تقریباً روی سطحی با اندازه ۳۵ صفحه دایره المعارف قرار می گیرد، که حدود نصف تعداد صفحات یک مجله است. به این ترتیب همه اطلاعاتی که انسانها در کتابها ثبت کرده اند، به صورت یک تک جزوه در دسترس شما قرار می گیرد... و نه به صورت نوشته ای رمزی؛ بلکه یک راه تکثیر ساده تصاویر اصلی، حکاکی ها و هر چیز دیگری در مقیاس کوچک که نتیجه ای مطلوب در بر دارد.

### اطلاعاتی درباره مقیاس کوچک :

فرض کنید بجای چاپ مستقیم تصاویر و اطلاعات، حروف را بصورت کدی از نقطه ها و خطوط "-" یا چیزی همانند آن نمایش دهیم. هر حرف ۶ یا ۷ قسمت را شامل می گردد. یعنی شما ۶ یا ۷ نقطه یا خط برای بیان هر حرف نیاز دارید. حال بجای آنکه همانند قبل هر چیزی را بنویسیم، قصد داریم از مواد درونی خود سوزن استفاده کنیم.

ما هر نقطه را با ذره کوچکی از ماده نمایش می‌دهیم و هر خط را با ذره مجاور دیگر ماده و به همین ترتیب ادامه می‌دهیم. پیروی یک سنت قدیمی، هر قسمت از اطلاعات به یک مکعب کوچک  $5 \times 5 \times 5$  یا  $125$  اتمی احتیاج دارد. شاید ما به صد و چند اتم منفرد احتیاج داریم تا در مرحله انتشار یا مرحله دیگر، مطمئن گردیم که اطلاعاتی از بین نرفته‌است.

من تعداد حروف موجود در دایره‌المعارف را تخمین زده‌ام و فرض کرده‌ام که هر  $24$  میلیون کتاب من، معادل با یک جلد دایره‌المعارف است و خانه‌های اطلاعاتی موجود  $10$  به توان  $15$  است. در هر قسمت  $100$  اتم مجاز است، و به این نتیجه می‌رسیم که همه اطلاعاتی که انسان در تمام کتابهای جهان گردآوری کرده‌است، با این فرم به صورت مکعبی ساخته شده از ماده‌ای با عرض دوهزارم اینچ قرار می‌گیرد که همان آشکارترین گردوخاکی است که آن را می‌توان با چشم دید. پس فضای بسیاری در سطوح زیرین وجود دارد.

زیست‌شناسان این حقیقت را که اطلاعات زیادی را می‌توان در فضای کمی گردآوری کرد، می‌دانند و این مشکلات پیش آمده قبلی را برطرف می‌سازد. چطور در کوچکترین سلولها همه اطلاعات برای بافت یک مخلوق پیچیده همانند خودمان ذخیره می‌شود؟ اطلاعاتی همانند اینکه: آیا چشمانی قهوه‌ای داریم؟ آیا صفت متفکر بودن را داریم؟ یا اینکه ابتدا باید استخوان فک جنین با یک سوراخ کوچک در کنارش رشد کند تا بعدها یک رشته عصبی از میان آن رشد نماید؟ همه این اطلاعات در بخش کوچکی از سلول که به صورت رشته‌های دراز مولکولی DNA است، وجود دارد و برای هر خانه اطلاعاتی سلول،  $50$  اتم استفاده شده‌است.

### میکروسکوپهای الکترونی پیشرفته‌تر:

چگونه امروزه کدی با  $125$  اتم در هر قسمت را می‌توانیم بخوانیم؟ میکروسکوپهای الکترونی به اندازه کافی خوب نیست. بیشترین دقت آنها در حدود  $10^{\circ} \text{A}$  است. زمانیکه بر روی موارد مقیاس کوچک صحبت می‌کنیم، بهبود دقت میکروسکوپها تا  $100$  مرتبه نیاز است. طول موج الکترون در چنین میکروسکوپی یک بیستم  $^{\circ} \text{A}$  است. پس با قوانین پراش الکترونی تناقضی ندارد و می‌توان با آنها اتمهای منفرد را دید.

ما دوستانی در زمینه‌های دیگر همانند زیست‌شناسی داریم، فیزیکدانان اغلب به آنها می‌گویند: "آیا شما دلیل اینکه تلاش‌هایتان پیشرفت کمی در بردارد را می‌دانید؟" شما باید همانند ما از ریاضیات بیشتر استفاده کنید. "و پاسخ آنها چنین است: "شما فیزیکدانان باید میکروسکوپهای الکترونیکی با دقت  $100$  مرتبه بهتر بسازید تا پیشرفتهای ما افزایش یابد."

مرکزی‌ترین و اساسی‌ترین مسائل زیست‌شناسی امروزه چه هستند؟ سؤالاتی همانند اینکه: رشته اصلی DNA چیست؟ در زمان یک تغییر ناگهانی، در بدن شما چه اتفاقی می‌افتد؟ ارتباط آرایش ساختار DNA با آرایش آمینواسیدها در پروتئین چیست؟ ساختار RNA چیست؟ یک رشته‌ای است یا دو رشته‌ای؟ چطور در آرایش ساختاری اصلی اش به DNA مرتبط شده‌است؟ ساختار چیزهای کوچک و ریز چگونه است؟ ترکیب پروتئین‌ها چیست؟ RNA به کجا مرتبط می‌گردد؟ در چه وضعیتی قرار می‌گیرد؟ پروتئین‌ها در کجا قرار می‌گیرند؟ آمینواسیدها به کجا داخل می‌شوند؟ در پدیده فتوسنتز کلروفرم کجاست؟ ترتیب ساختاری آن چگونه است؟ در کدام مرحله این پدیده، رنگدانه‌ها استفاده می‌گردند؟ چه سیستمی در تبدیل نور به انرژی شیمیایی دخیل است؟

پاسخ بسیاری از این مسائل زیست‌شناسی آسان است. فقط به آنها نگاه کنید! شما ساختاری از ذرات ریز خواهید دید. با میکروسکوپهای کنونی فقط ذرات ساده‌ای را می‌بینید. ساختن میکروسکوپهایی با دقت  $100$  مرتبه بیشتر، مشکلات زیست‌شناسی را تا حد زیادی حل می‌نماید. امروزه نظریه فرآیندهای شیمیایی بر مبنای فیزیک تئوری است،

بدین معنی که فیزیک، اساس شیمی را مهیا می‌سازد؛ اما در شیمی تجزیه و تحلیل نیز وجود دارد. اگر شما یک ماده ناشناس دارید و می‌خواهید ماهیت آن را تشخیص دهید، باید از مراحل پیچیده و طولانی تجزیه شیمیایی استفاده کنید. اگر فیزیکدانها بخواهند، می‌توانند زیر نظر شیمیدانها در موارد تجزیه شیمیایی کاوش نمایند. تجزیه مواد شیمیایی بسیار آسان می‌باشد، فقط باید ببینید که اتمها در کجا قرار می‌گیرند. تنها مشکل اینست که میکروسکوپهای الکترونی ۱۰۰ مرتبه ضعیف‌ترند. (سؤال بعدی من اینست که آیا فیزیکدانها می‌توانند کاری درباره موضوع سوم علم شیمی، یعنی ترکیب، انجام دهند؟ آیا راهی فیزیکی برای ترکیب مواد شیمیایی وجود دارد؟)

دلیل اینکه میکروسکوپهای الکترونی ضعیف عمل می‌کنند، اینست که فاصله کانونی عدسیهای آنها فقط یک صدم است، گشادگی دهانه عدسی به اندازه کافی نیست و برهانهایی وجود دارد که اثبات می‌کند بهبودی اوضاع، فعلاً غیرممکن است. آیا راهی وجود ندارد که میکروسکوپ الکترونی با قدرت بیشتر بسازیم؟

### سیستم های حیاتی حیرت آور :

نمونه زیست‌شناسی اطلاعات در مقیاس کوچک، به من درباره چیزهای دیگری الهام بخشیده است. یک سیستم زیست‌شناسی تا حد زیادی می‌تواند کوچک باشد. سلولها بسیار ریز هستند، اما بسیار فعالند. آنها ذرات مختلفی تولید می‌کنند، می‌چرخند، تکان می‌خورند و انواع کارهای حیرت‌آور را انجام می‌دهند و همه اینها در مقیاس کوچک است، همچنین اطلاعات ذخیره می‌کنند. یک سؤال قابل توجه مطرح است: "آیا چیز بسیار کوچکی می‌توانیم بسازیم که آنچه ما می‌خواهیم را انجام دهد؟ آیا می‌توانیم شی ای که در آن سطح نمود داشته باشد داشته باشد، تولید کنیم؟"

اشتغال به ساخت چیزهای بسیار کوچک، فواید اقتصادی نیز به همراه دارد. مثلاً در کامپیوترها اطلاعات زیادی باید ذخیره کنیم، نوشتن بر روی فلز که قبلاً به آن اشاره کرده‌ام، موردی دائمی است. روش کامپیوتر چنین است که برای هر بار نوشتن، مطالب قبلی را پاک می‌کند (زیرا ما نمی‌خواهیم مواد را فقط برای نوشتن تلف کنیم. زمانیکه در فضای کوچک می‌نویسیم، تفاوت زیادی وجود ندارد؛ فقط بعد از خواندن دور انداخته می‌شود و ماده زیادی مصرف نمی‌کند).

### کامپیوتر مینیاتوری :

من نمی‌دانم چگونه این را عملی سازم، اما می‌دانم که ماشینهای محاسبه گر، بسیار بزرگ هستند و فضای زیادی را اشغال می‌کنند. چرا ما نمی‌توانیم آنها را بسیار کوچک بسازیم؟ سیمهای کوچک، مواد کم و وسایل کوچک، برای مثال سیمها دارای قطری برابر با ۱۰ یا ۱۰۰ اتم و مدارها چند هزار آنگستروم خواهند شد. هر فردی که تئوری منطقی کامپیوترها را تجزیه و تحلیل کرده است، امکانات کامپیوترها را بسیار عالی می‌داند. اگر آنها از مواد زیادی و بطور پیچیده‌تری با روشهای مختلف ساخته می‌شدند، می‌توانستند هوشمند باشند. آنها می‌توانستند بهترین روش محاسبه را بکار گیرند. آنها روشی تحلیلی را انتخاب می‌کردند که از آنچه به آنها داده شده است، بهتر باشد و در زمینه‌های دیگر هم قابلیت‌های جدیدی می‌یافتند.

اگر من در صورت شما نگاه کنم، فوراً متوجه می‌شوم که آن را قبلاً دیده‌ام. (به عقیده دوستان، بدترین مثال را انتخاب کرده‌ام. زیرا در انتها تشخیص می‌دهم که صورت شما مربوط به انسان است یا به یک سیب). هنوز ماشینی وجود ندارد که با این سرعت تصویری از صورت بگیرد و حتی بگوید که انسان است و یا همانی است که قبلاً دیده‌است. مگر اینکه دقیقاً یک تصویر باشد. اگر صورت تغییر کرده است، اگر من نزدیکتر یا دورتر هستم، به هر جهت آن را تشخیص می‌دهم. کامپیوتر کوچک داخل سرمان به سادگی قادر به انجام آن می‌باشد؛ اما کامپیوتر ساخت بشر، چنین توانایی را ندارد. عناصر موجود در جعبه استخوانی سر من بسیار بیشتر از عناصر عجیب کامپیوتر هستند. عناصر این

جعبه میکروسکوپی هستند، من چیزی کوچکتر از مقیاس میکروسکوپی می‌خواهم. کامپیوتری با چنین توانایی‌های فوق‌العاده باید اندازه‌ارزش آمریکا باشد. از مضرات آن نیاز به مواد زیادی باشد. ممکن است ژرمانیوم کافی برای ترانزیستورها در جهان وجود نداشته باشد، تأمین نیروی گرمایی مصرفی، TVA به اجرای کامپیوتر نیاز داشته باشد و اینکه کامپیوتر محدود به سرعت معینی باشد. به دلیل سایز بزرگ آن، زمان برای فرستادن اطلاعات از یک مکان به مکانی دیگر نیاز است و فرستادن اطلاعات بدون جزئیات است؛ پس کوچک‌سازی آن الزامیست.

فضای زیادی برای نوع کوچک آن وجود دارد و هیچ قانون نقض‌کننده فیزیکی در رابطه با ساخت کوچکتر کامپیوترها وجود ندارد.

### استفاده از تبخیر در جهت کوچک‌سازی مواد:

چگونه ما می‌توانیم چنین وسیله‌ای بسازیم؟ چه مراحل تولیدی را استفاده می‌کنیم؟ نکته قابل توجه، اینست که از زمانیکه ما درباره قرار گرفتن اتمها در یک موقعیت منظم و معین تحقیق نمودیم، مسأله تبخیر مواد قابل تأمل شده است. بدین صورت که ابتدا خشک کردن ماده، سپس قرار گرفتن ماده نارسانا روی آن و برای لایه بعدی نیز خشک کردن ماده و سپس قرار گرفتن ماده نارسانا بر روی قسمت دیگر آن سیم؛ و این مراحل همچنان ادامه می‌یابد تا زمانیکه یک واحد از ماده در اختیار شما قرار می‌گیرد. برای نمونه می‌توان به ماریپچها، ترانزیستورها و متراکم‌کننده‌ها و مانند آنها اشاره نمود که تا حد زیادی ابعاد آن را کوچک می‌سازند.

چرا ما نمی‌توانیم این کامپیوترهای کوچک را شبیه به کامپیوترهای بزرگ تولید نماییم؟ چرا ما نمی‌توانیم سوراخها را ایجاد کرده و اشیاء را ببریم و آنها را لحیم کنیم؟ یا اشیاء را از خارج منگنه نماییم و حالت‌های مختلف آنها را در سطوح بسیار کوچک قالب بزنیم؟ چه محدودیتهایی برای کوچک بودن یک شیء باید وجود داشته باشد، قبل از آنکه ساخت قالب بزرگ آن صورت پذیرد؟ چند بار پیش آمده که شما روی یک شیء کوچک مانند ساعت مچی همسرتان کار می‌کرده‌اید و با خود گفته‌اید: "کاش من می‌توانستم فقط یک مورچه برای این کار تربیت کنم." آنچه من تمایل دارم پیشنهاد کنم، امکان تربیت یک مورچه یا یک کرم ریز برای انجام آن کار است، و سالی که کوچک می‌باشند در حالیکه متحرکند و می‌توانند مفید یا غیرمفید باشند. در حالیکه من فکر می‌کنم مطمئناً ساختار جالبی دارند. به همه ماشینها توجه کنید، برای مثال یک اتومبیل، و درباره ساخت یک مدل کوچک از روی آن فکر کنید. در طرح یک اتومبیل، ما به ظرافت قطعات و دقت کافی نیاز داریم. مثلاً "در حدود چهارهزارم اینچ. اگر در اکثر موارد در ساخت سیلندر و مانند آن دقیق عمل نکنیم، آن وسیله خوب کار نخواهد کرد. اگر شیء کوچکی بسازیم، باید در مورد اندازه اتمها نگران باشیم. نمی‌توانیم یک دایره از گویهایی که صحبت شد بسازیم، زیرا بسیار کوچک است. بنابراین اگر آن را با خطایی برابر چهارهزارم اینچ در حدود یک خطای ۱۰ اتمی بسازیم، این مسأله سبب می‌شود که بتوانیم ابعاد یک اتومبیل را ۴۰۰۰ مرتبه کاهش دهیم، بطوریکه در حدود ۱ mm عرض داشته باشد. واضح است اگر شما یک ماشین را به منظور بهره‌برداری از قدرت بیشتر طراحی کنید که به هیچ وجه غیرممکن نمی‌باشد، شما می‌توانید یک دستگاه بسیار کوچک بسازید.

نکات قابل توجه بسیاری در مورد این ماشینهای کوچک وجود دارد. نخست اینکه با فشار قسمتهای هم‌درجه، نیرو به سطحی که شما در حال کاهش آن هستید، وارد می‌گردد. بطور نسبی قدرت مواد، بسیار بیشتر است. بطور مثال در اثر نیروی گریز از مرکز و انقباض و انبساط چرخ پره‌ها، به همان نسبت که ما سایز را کاهش می‌دهیم، سرعتی ایجاد می‌گردد که مدام در حال افزایش است. همچنین فلزاتی که ما استفاده می‌کنیم، ساختار ذره‌ای دارند و در مقیاس کم

سبب اختلال می گردند؛ زیرا مواد همگن نیستند. پلاستیکها و چیزهایی از این قبیل، بطور طبیعی بی نظم هستند. بنابراین ما باید ماشینهایمان را خارج از حیطه این قبیل مواد بسازیم.

پیوسته مسائلی در ارتباط با قسمتهای الکتریکی سیستم، سیمهای مسی و قسمتهای آهنربایی وجود دارد. متعلقات و خواص آهنربایی در مقیاس کوچک با سایز بزرگ آن بسیار متفاوت می باشد. در رابطه با حوزه میدان، مسائلی وجود دارد. یک آهنربای بزرگ از میلیونها میدان ساخته شده است، در صورتیکه در مقیاس کوچک فقط یک میدان وجود دارد. تجهیزات الکتریکی به سادگی کوچک نخواهند شد و آنها باید دوباره طراحی شوند.

### مشکلات روغن کاری سیستم :

روغن کاری با نکاتی جالب سروکار دارد. چسبناکی مؤثر مواد روغنی، همانطور که از سطح به عمق پیش می رویم، به نسبت بالا و بالاتر می رود ( اگر تا اندازه ای که می توانیم سرعت را افزایش دهیم). اگر سرعت را به میزان کافی افزایش ندهیم، و از روغن به نفت سفید یا سیالاتی دیگر متمایل گردیم، مسأله آنقدرها هم بد نیست. اما امکان روغن کاری وجود ندارد! زیرا نیروهای فوق العاده زیادی وارد می شود و اگر اطراف بلبرینگ را خشک نگه داریم، گرما را پخش نمی کنند زیرا حرارت به دلیل سرعت و کوچکی وسیله خارج می گردد.

این سرعت در از دست دادن گرما، از انفجار گاز جلوگیری می کند. بنابراین امکان ایجاد موتور احتراق داخلی غیرممکن است. بنابراین از واکنش شیمیایی دیگری چون آزاد کردن انرژی در سرما، می توان استفاده نمود. احتمالاً "منبع خارجی قدرت الکتریکی برای چنین ماشین کوچکی قابل استفاده است .

فایده چنین ماشینی چه می باشد؟ چه کسی می داند؟ البته یک اتومبیل کوچک فقط برای کرمهای ریز مفید می باشد که با آن رانندگی کنند. البته امکان تولید وسایل کوچکی برای کامپیوترها شامل تراشه ها و ... در سطحی بسیار کوچک در کارخانه های کاملاً "اتوماتیک وجود دارد. تراشه های کوچک نباید دقیقاً "مانند نوع بزرگ آن باشند.

دوست من، آلبرت هیبس، امکان بسیار جالب ولی در ظاهر دیوانه کننده ای را پیش بینی می کند. مثلاً "اگر برای جراحی، جراح را ببلعید. شما جراح مکانیکی را داخل رگ خونی قرار می دهید و آن به طرف قلب می رود و آن حوالی را بررسی می کند (البته با بیرون تبادل اطلاعاتی برقرار می کند). میزان نقص را تعیین می کند و با چاقو قسمتهای اضافی را درمی آورد. ماشینهای کوچک دیگری ممکن است دائماً "داخل بدن بگردند تا به بخشهایی که به خوبی کار نمی کنند، کمک کنند.

حال سؤال جالبی مطرح می شود: چطور ما چنین مکانیزم کوچکی بسازیم؟ اجازه دهید امکان خارق العاده ای را توصیف کنم. در کارخانه های انرژی اتمی نمی توانند مستقیماً "با مواد و ماشینها سروکار داشته باشند، زیرا رادیواکتیو هستند. برای باز کردن پیچها و درآوردن آنها از مهره ها و ... آنها دستگاهی مشکل از دستهای کاردان و ماهر دارند که بوسیله اهرمی آنها را کنترل می کنند و همه چیز را نسبتاً "در دسترس خود قرار می دهند.

در چنین دستگاههایی یک کابل ضخیم وجود دارد که مانند نخ عروسک خیمه شب بازی از مرکز کنترل به دستها متصل است. البته موتورهای خودتنظیم هم ساخته شده اند که ارتباط قسمت الکتریکی و مکانیکی را برقرار می سازند. زمانیکه شما اهرمها را حرکت می دهید، آنها موتور خودتنظیم را می چرخانند و سبب تغییر جریان الکتریکی در سیمها می شوند که دستها را حرکت می دهند.

اکنون من می خواهم همان دستگاه را بسازم، اما می خواهم سازندگان ماشینهای مقیاس بزرگ، دستهایی با یک چهارم سایز مورد بحث قبلی مان بوجود آورند که با دقت کار می کنند. پس ما با مقیاس ربعی سروکار داریم، موتورهای خودتنظیم کوچک که با دستهای کوچک کار می کنند و پیچ و مهره های کوچکی دارند. آنها سوراخهای

کوچکی ایجاد می کنند، که چهار مرتبه کوچکترند. بنابراین من تراشه‌هایی با یک چهارم سایز تولید می کنم و من دوباره مقیاس را یک چهارم می نمایم، تا دستهایی با یک شانزدهم سایز اولیه‌شان داشته باشم و بعد، از میان ترانسفورماتورها، سیستم اصلی بزرگ را توسط سیم کشی به موتورهای خودتنظیم یک شانزدهم متصل می کنم. بنابراین دستهای کارداران یک شانزدهم سایز داریم.

ما می توانیم با مالش سطوح ناصاف، سطوحی صاف ایجاد کنیم و ... ، پس غیرممکن نیست که بتوانیم دقت دستگاهها در مقیاس کوچک را با عملیات درست بهبود بخشیم. بنابراین ضروریست که در هر مرحله با کار روی تجهیزات، دقت را بالا ببریم. مثلاً "با ساخت دقیق پیچها، موتورهای خودتنظیم و غیره در سطوح بالاتر. در هر سطح باید توقف کنیم و تمام مواد مورد نیاز مرحله بعد را تهیه کرده و به همین ترتیب به سطوح مقیاس کوچک پیشروی نماییم. بعد از این همه، فقط تراشه‌ای چهارهزار بار کوچکتر از معمول ساخته‌ایم. اما ما در فکر ساخت کامپیوتر بزرگی بوده‌ایم که تراشه‌های کوچک آن دارای سوراخهایی هستند و بعنوان سازنده و اشهرای کوچک، این کامپیوترها استفاده می شوند. چند واشر با یک تراشه تولید می گردد؟

### **یکصد دست کوچک :**

زمانیکه دستهای کارداران یک چهارم مقیاسی را بسازم، قصد دارم تعداد ده تای آن را فراهم سازم و همه آنها را به اهرم اصلی سیم کشی کنم. بنابراین در یک زمان همه یک کار یکسان را انجام می دهند. بعد از این، وقتی در حال ساخت دستگاههای جدید یک شانزدهم مقیاسی هستم، دوباره اجازه می دهم که هر یک ۱۰ کپی تولید کنند. بنابراین یکصد دست کوچک یک شانزدهم سایز اولیه خواهیم داشت.

کجا قصد دارم میلیونها تراشه کوچک را قرار دهم؟ حجم آنقدر کم است که حتی به اندازه یک ماشین برش بزرگ هم نمی شود. برای مثال اگر یک بلیون تراشه کوچک بسازیم، هر کدام یک چهارهزارم مقیاس تراشه معمولی است، پس ماده و فضای کافی در دسترس می باشد، زیرا بلیونها نوع کوچک، کمتر از ۲٪ یک تراشه بزرگ حجم اشغال می کند.

همانطور که مقیاس را کاهش می دهیم، مسائل جالب توجهی ایجاد می گردد. مسأله چسبندگی مواد به هم توسط جذب مولکولی (نیروی واندروالس) وجود دارد. برای مثال: پس از ساخت یک قسمت، با اینکه مهره را دور پیچ نمی پیچانید، پایین نمی افتد؛ زیرا جاذبه زمین محبوس نیست. حتی به سختی می توانید پیچ را در آورید. شبیه به حرکات آشنای آدمی با دستهای پر از شهد که برای خلاصی از آن، به شیشه‌ای آب نیاز دارد. پس باید برای ارائه طرحی در جهت رفع آن بکوشیم.

### **بازسازی ترتیبات اتمی :**

چه اتفاقی می افتد اگر بتوانیم اتمها را به صورتی که می خواهیم یکی بعد از دیگری مرتب سازیم؟ (البته شما نمی توانید اینگونه عمل کنید، زیرا برای مثال آنها بطور شیمیایی ناستوار هستند).

ما با حفر زمین، مواد معدنی را می یابیم و آنها را گرم می کنیم، و کارهایی در مقیاس معمولی انجام می دهیم تا شاید از مقداری ماده ناخالص به ماده‌ای خالص برسیم. اما با استفاده از یک "تخته کنترل" ترتیب دقیق اتمهای ناخالص به هم می ریزد و  $10^{10}$  A<sup>o</sup> از یکدیگر جدا می شوند و در الگوهای ویژه‌ای قرار می گیرند. در صورتیکه اگر انتظار ترتیب اتمی خاصی در طبیعت داشته باشیم، هیچ بدست نیاورده‌ایم.

اگر می توانستیم واقعا "اتمها را مرتب سازیم، مواد چه خواصی بدست می آوردند؟ تحقیق تئوری آن بسیار جالب است. دقیقاً نمی توانم آن را پیش بینی کنم، ولی تصور می کنم که با کنترل ترتیب اتمی در مقیاس کوچک، خواص

مواد بطور منظم تری ایجاد می گردد.

## اتمها در جهانی کوچک :

زمانیکه به جهانی بسیار کوچک می رسیم، آن را دور هفت اتمی می نامیم. مسائل جدیدی اتفاق می افتد که کاملاً فرصتهای جدید طراحی را ایجاد می کند. اتمها در مقیاس کوچک مانند هیچ موردی در مقیاس بزرگ رفتار نمی کنند، چرا که از قوانین مکانیک کوانتومی پیروی می کنند. ما نه تنها می توانیم از سیم پیچها استفاده کنیم، بلکه تعدادی سطوح در گیر انرژی جدا شده با اسپینهای عمل درونی را مورد بهره برداری قرار می دهیم.

مسئله دیگری که باید توجه کنیم، اینست که اگر به اندازه کافی پایین برویم، وسایلی که بطور جمعی تولید می شود، بطور کامل مشابه دیگران هستند. در صورتیکه ما نمی توانیم دو ماشین بزرگ را دقیقاً مانند هم بسازیم. اما اگر ماشین شما فقط دارای ۱۰۰ اتم باشد، باید ۵۰٪ آن را دقیقاً همانند ماشین دیگر بسازیم!

مطالب اساسی فیزیکی در مورد امکان نمایش موارد اتمی توسط اتمها صحبت نمی کند. برای نقض هیچ قانونی، اصراری نیست. چیزی که بطور عمده مطرح است، امکان انجام آن است، در صورتیکه تمرین عملی آن صورت نگرفته است، چرا که ما بسیار بزرگیم.

و سرانجام ما می توانیم ترکیب شیمیایی انجام دهیم. شیمیدان به ما می گوید: "نگاه کنید! من می خواهم مولکولی با اتمهای مرتب شده بسازم." او زمانیکه مولکولی را می سازد، عمل سری را انجام می دهد. او مواد مختلفی را مخلوط می کند و در انتهای این فرآیند مشکل، معمولاً موفق است و ترکیب آنچه را که می خواهد بدست می آورد. تا زمانیکه من وسایل کار را بدست آورم، تا آن را با فیزیک بتوانیم انجام دهیم، او کشف خواهد کرد چطور کاملاً هر چیزی را ترکیب کند، به صورتیکه واقعاً مفید باشد.

اما جالب است که امکان ترکیب هر ماده شیمیایی که شیمیدان ذکر می کند، برای فیزیکدان وجود دارد. دستورات را بدهید و آن را فیزیکدان انجام می دهد. چطور؟ اتمها را کنار هم در جاییکه شیمیدان می خواهد، بگذارید و بنابراین ماده مرکب را ساخته اید. مسائل وافری می تواند از شیمی و زیست مورد بهره برداری قرار گیرد، اگر ما قادر به دیدن آنچه در حال انجام آن در سطح اتمی هستیم، باشیم. چنین پیشرفتی اجتناب ناپذیر است.

حال ممکن است شما بگویید که: "چه کسی این را باید انجام دهد و چرا؟" خوب، من تعداد کمی از کاربردهای تخصصی آن را یافته ام، ولی می دانم که دلیل اینکه شما آن را انجام می دهید، فقط برای تفریح است. اما مقدار کمی تفریح در بر دارد! بیایید رقابتی بین آزمایشگاهها داشته باشیم، به صورتیکه یک آزمایشگاه موتور کوچک را بفرستد و آزمایشگاه دیگر آن را با چیزی داخل استوانه اش برگرداند.

## رقابت دبیرستانی :

فقط در جهت جنبه تفریحی آن به منظور علاقه مندسازی بچه ها تصمیم گرفتم که رقابتهایی در سطح دبیرستانی برقرار کنم. دبیرستان "لس آنجلس" توانست سنجاقی برای دبیرستان "ونس" بفرستد که می گوید: "هوا چطور است؟" آنها سنجاق را برمی گردانند و در نقطه "I" آن می نویسند: "بد نیست."

قصد دارم که یک جایزه ۱۰۰۰ دلاری برای اولین شخصی که بتواند اطلاعات را از روی صفحه کتاب بردارد و روی یک بیست و پنج هزارم مساحت کوچکتر در مقیاس خطی قرار دهد، بطوریکه توسط میکروسکوپ الکترونی خوانده شود، در نظر بگیریم؛ و جایزه دیگری در حدود ۱۰۰۰ دلار به اولین کسی که موتور الکتریکی عملی را بسازد. موتور الکتریکی چرخشی که از خارج کنترل شود و دارای تعداد دور زیادی باشد، در حالیکه فقط یک شصت و چهارم اینچ مربع حجم دارد.

و البته قصد ندارم که چنین جوایزی زیاد مطالبه کنندگان را در انتظار نگه دارد.