

La Legge di Moore.  
Una linea guida  
attraverso l'Era dell'Informazione

---

Roberto Sartori

*relatore:* prof. Alessandro Paccagnella

Settembre 2010



Università degli Studi di Padova



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

DEI





*alla mia famiglia*



# Indice

<b>1</b>	<b>Una definizione ad ampio spettro</b>	<b>9</b>
1.1	Un'onda travolgente per l'economia mondiale . . . . .	14
<b>2</b>	<b>Storia</b>	<b>17</b>
<b>3</b>	<b>Altre formulazioni e leggi simili</b>	<b>21</b>
	Densità a costo minimo per transistor. . . . .	21
	Costo per transistor. . . . .	21
	Prestazioni computazionali per unità di costo. . . . .	21
	Consumo di potenza. . . . .	22
	Legge di Kryder. . . . .	23
	Capacità delle memorie RAM. . . . .	24
	Legge di Butters. . . . .	24
	Pixels per dollaro. . . . .	25
	The Great Moore's Law Compensator. . . . .	27
<b>4</b>	<b>Una profezia auto-avverante</b>	<b>29</b>
4.1	Relazione con i costi di produzione . . . . .	30
<b>5</b>	<b>Prospettive future</b>	<b>33</b>
	Transistors super-raffreddati. . . . .	34
	Litografia ottica DUV. . . . .	35
	Memristori. . . . .	35
	Transistor senza giunzioni. . . . .	35
5.1	Nuova vita alla Legge di Moore . . . . .	35
5.2	Ai confini della legge . . . . .	38
	Quantum tunnelling. . . . .	39
	Capacità totale di information-processing. . . . .	41
5.3	I futuristi e la singolarità tecnologica . . . . .	41

<b>6</b>	<b>Conseguenze e limiti</b>	<b>43</b>
	Colli di bottiglia. . . . .	43
	Parallelismo. . . . .	43
	Obsolescenza. . . . .	43
<b>7</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>45</b>



# Capitolo 1

## Una definizione ad ampio spettro

La Legge di Moore descrive una tendenza a lungo termine nella storia dell'hardware:

“Il numero di transistor che possono essere inseriti a prezzo di mercato in un circuito integrato raddoppia approssimativamente ogni due anni.”

La tendenza è rimasta tale per più di mezzo secolo e non si prospettano variazioni fino al 2015 e oltre.

Le funzionalità di molti dispositivi elettronici digitali sono fortemente legate alla Legge di Moore: dalla velocità di elaborazione alla capacità di memoria, dai sensori al numero e alla dimensione dei pixels nelle fotocamere digitali. Tutti questi fattori presentano incrementi (circa) esponenziali. Ciò ha di conseguenza aumentato enormemente l'utilità dell'elettronica digitale in quasi tutti i settori dell'economia mondiale.

La Legge di Moore descrive dunque una forza guida dei cambiamenti tecnologici e sociali del ventesimo e inizio ventunesimo secolo.


Il nome della legge fu assegnato dopo che Gordon Earle Moore, co-fondatore e presidente emerito di Intel Corporation, ne descrisse il trend in un suo articolo del 1965. Nel documento si osservava come il numero di componenti nei circuiti integrati fosse raddoppiato ogni anno, dal 1958 - quando fu inventato il circuito integrato - al 1965, e si prospettava che il trend sarebbe rimasto tale *“per almeno dieci anni”*. La previsione si è dimostrata essere indubabilmente accurata, seppure vada sottolineato come in parte ciò dipenda dal fatto che la legge stessa è oggi usata nell'industria dei semiconduttori come guida per la pianificazione a lungo termine e per fissare gli obiettivi di ricerca e sviluppo. Questo fatto andrebbe a sostegno di una visione alternativa della “legge” come “profezia che si auto-avvera”, dove

cioè l'obiettivo fissato dalla previsione stabilisce un andamento che condurrà quasi certamente alla sua realizzazione.


## The Revolution Begins

Invented 60 years ago, the transistor is a key building block of today's digital world. Perhaps the most important invention of the 20th century, transistors are found in many devices and are the building blocks of computer chips. Intel, the largest manufacturer of computer chips, continues to innovate to help PCs and laptops become smaller, faster, sleeker and more energy-efficient. Many new applications and inventions powered by transistors have impacted all of our lives over the past 60 years.


**1947** - When it comes to helping jumpstart innovation and technology, no invention is more important than the transistor, conceived 60 years ago at Bell Labs.




**1953** - The first commercial device to make use of the transistor is put on the market - the Sorenson 1010 hearing aid.




**1954** - The first transistor radio, the Regency TR-1, goes on the market for just \$49.99. The radio contains just four transistors.




**1962** - Moore's Law, which states that the number of transistors on a chip doubles about every two years, is born when Intel's Gordon Moore and Robert Noyce, Intel's first semiconductor business that still holds true today.




**1965** - Moore's Law, which states that the number of transistors on a chip doubles about every two years, is born when Intel's Gordon Moore and Robert Noyce, Intel's first semiconductor business that still holds true today.



**1971** - Intel launches its first microprocessor, the 4004, containing just over 2,300 transistors.



**1971** - Business introduces the first microprocessor, the MOS/TEC "MADY" which uses a MOS/TEC AM6510 integrated circuit.



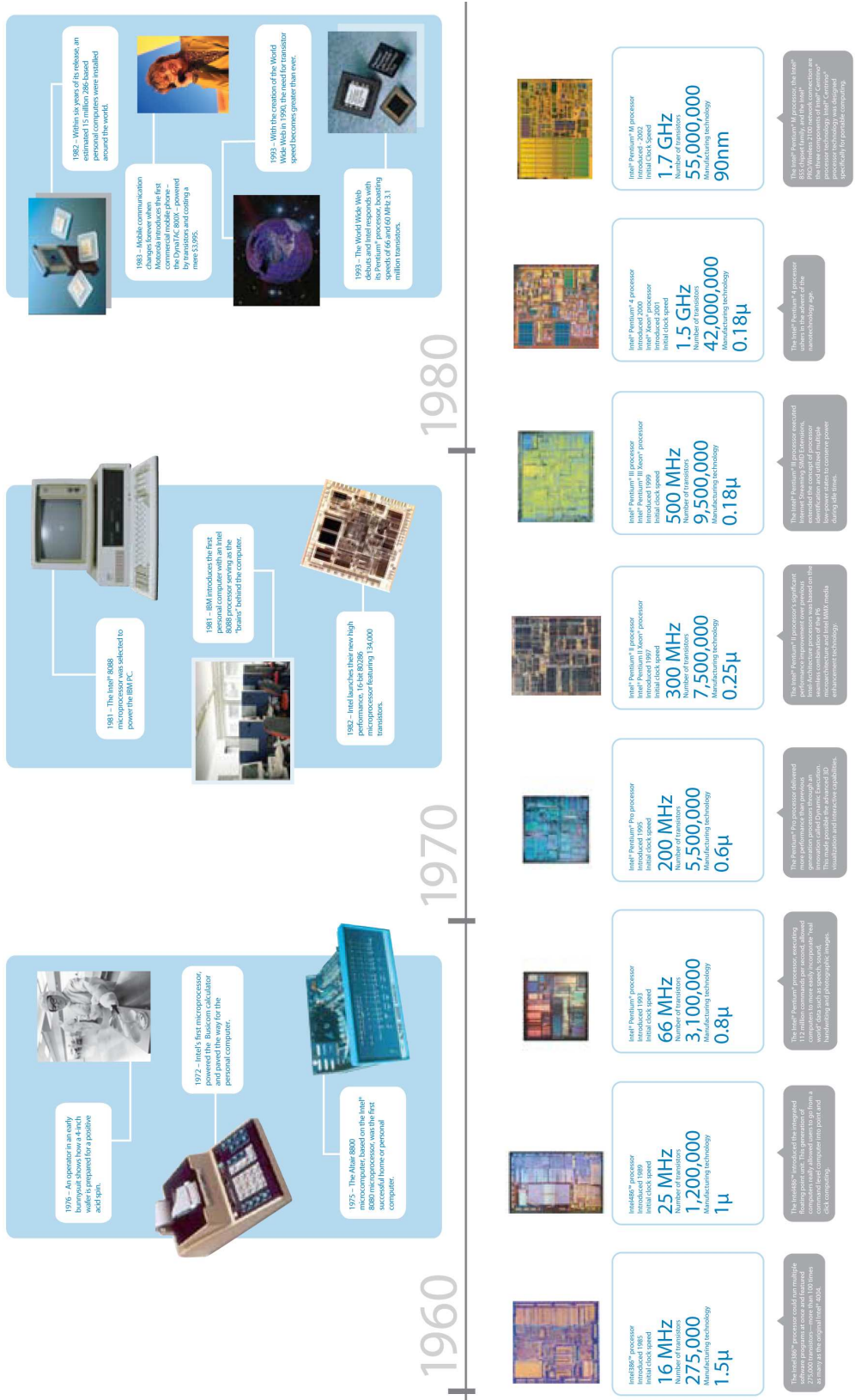
# 1950

## Moore's Law

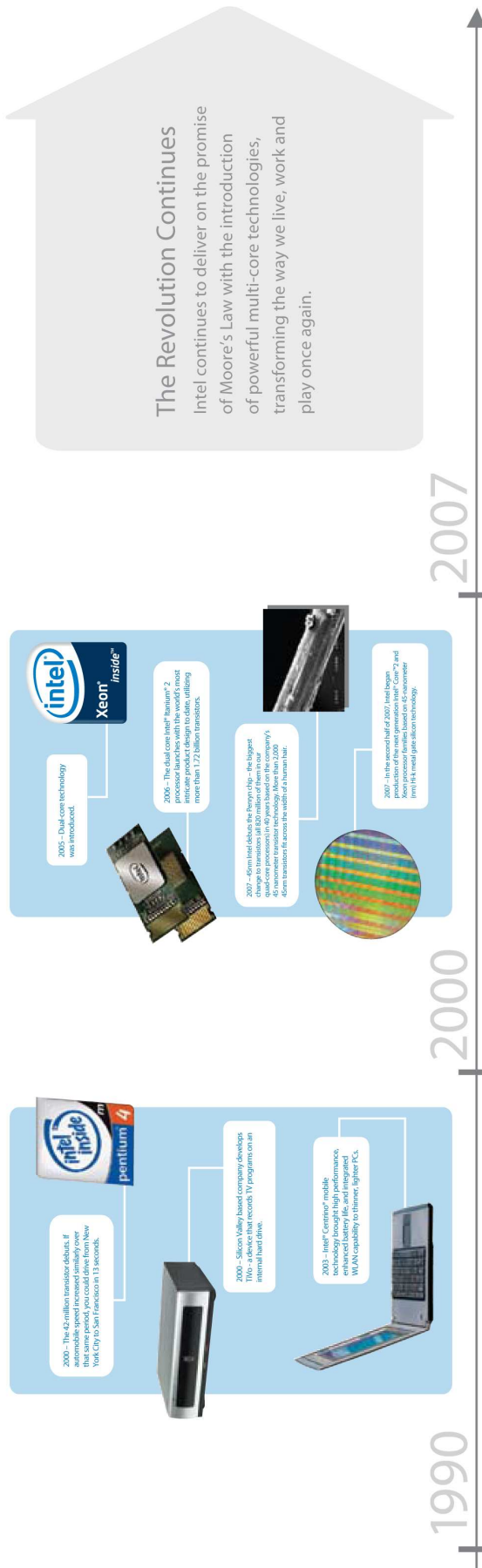
In 1965, Intel Co-founder Gordon Moore predicted that the number of transistors on a chip would double about every two years. Since then, Moore's Law has fueled a technology revolution as Intel has exponentially increased the number of transistors integrated into its processors for greater performance and energy efficiency.



Year	Processor	Initial clock speed	Number of transistors	Manufacturing technology	Key Milestone
1971	Intel 4004	108 KHz	2,300	10µ	The first silicon-based microprocessor was introduced with 2,300 transistors, enabling computing power to take off.
1974	Intel 8008	2 MHz	4,500	6µ	The Intel 8008 processor made video games and home computers possible.
1978	Intel 8086	5 MHz	29,000	3µ	The Intel 8086 processor set the performance bar for microprocessors.
1979	Intel 8088	5 MHz	29,000	3µ	A standard such as IBM's was essential for computer division made the Intel 8088 more popular than IBM's.
1982	Intel 286	6 MHz	134,000	1.5µ	The Intel 286 was the first Intel processor that could be used in a wide range of applications.



60 anni del transistor: 1960-1989



**2000** - The 42-million transistor Athlon® processor that same period, you could drive from New York City to San Francisco in 13 seconds.

**2000** - Silicon Valley based company develops Tivo - a device that records TV programs on an internal hard drive.

**2000** - Intel® Centrino™ mobile technology brought high performance, enhanced battery life, and integrated WLAN capability to thinner, lighter PCL.

**2005** - Dual-core technology was introduced.

**2006** - The dual-core Intel® Pentium® 2 processor launches with the world's most advanced 65nm manufacturing technology - more than 1.2 billion transistors.

**2007** - 45nm Intel debuts the Pentium® processor family with the world's most advanced 45nm transistor technology. More than 2,000 45nm transistors fit across the width of a human hair!

**2007** - In the second half of 2007, Intel began the Xeon processor family based on 45-nanometer Intel Hi-K metal gate silicon technology.

1990

2000

2007

**Intel® Pentium® 2 processor**  
 Introduced 2002  
 Initial clock speed  
**1 GHz**  
 Number of transistors  
**220,000,000**  
 Manufacturing technology  
**0.13µ**

The Intel® Pentium® 2 processor is the successor of the first billion processor - the Intel® Pentium® processor (1992). It is naturally capable of performing roughly eight times more operations per second than the Intel® Pentium® processor. It is also the first processor to use RISC architectures.

**Intel® Pentium® D processor**  
 Introduced 2005  
 Initial clock speed  
**3.2 GHz**  
 Number of transistors  
**291,000,000**  
 Manufacturing technology  
**65nm**

The Intel® Pentium® D processor features the first desktop dual-core design with two cores on a single chip. It is the first processor to use the same speak, to over 100 pin grid array.

**Intel® Core™ 2 Duo processor**  
 Intel® Core™ 2 Extreme processor  
 Dual-Core Intel® Xeon® processor  
 Introduced 2006  
 Initial clock speed  
**2.93 GHz**  
 Number of transistors  
**291,000,000**  
 Manufacturing technology  
**65nm**

Intel® Core™ 2 Duo processor continues to make the most of Moore's Law by doubling the number of transistors in the same area. It is the first processor to use the same speak, to over 100 pin grid array.

**Dual-Core Intel® Pentium® 2 processor**  
 Introduced 2006  
 Initial clock speed  
**1.66 GHz**  
 Number of transistors  
**1,720,000,000**  
 Manufacturing technology  
**90nm**

Dual-Core Intel® Pentium® 2 processor (90nm) confirms the earlier single-core version of the Pentium® processor family. It is the first processor to use the same speak, to over 100 pin grid array.

**Quad-Core Intel® Xeon® processor**  
 Intel® Core™ 2 Extreme processor  
 Intel® Core™ 2 Duo processor  
 Introduced 2007  
 Initial clock speed  
**2.66 GHz**  
 Number of transistors  
**582,000,000**  
 Manufacturing technology  
**65nm**

The unprecedented performance of the Intel® Core™ 2 Duo processor is made possible by each of its four cores. The Intel® Core™ 2 Duo processor is the first processor to use the same speak, to over 100 pin grid array.

**Quad-Core Intel® Xeon® processor (Banyan)**  
 Dual-Core Intel® Xeon® processor (Banyan)  
 Intel® Core™ 2 Extreme processor (Banyan)  
 Introduced 2007  
 Initial clock speed  
**> 3 GHz**  
 Number of transistors  
**820,000,000**  
 Manufacturing technology  
**45nm**

Intel's next generation Xeon® processor family, codenamed "Banyan", contains 820 million transistors. It is the first processor to use the same speak, to over 100 pin grid array.



## 1.1 Un'onda travolgente per l'economia mondiale

La Legge di Moore è nata come un'osservazione empirica, un'esercizio di interpolazione che ha evidenziato i notevoli progressi e l'accelerazione della tecnologia dei semiconduttori, diventando quasi un *leitmotif* in ogni discussione di tecnologia. Nonostante le variegatae tecniche attraverso cui è stata sostenuta, essa ha guadagnato e mantenuto un indiscusso carattere di legge fisica, fino ad essere profondamente venerata e ritenuta pressoché immutabile da consumatori, tecnici, dirigenti e finanziari di tutto il mondo.

Al di là della sua formulazione peculiare, ciò che Moore ha chiaramente sottolineato nel suo articolo è il ruolo schiacciante di una crescente integrazione nel ridurre i costi per funzione o per operazione. Quarant'anni fa Gordon Moore si rese conto di descrivere un fenomeno economico, piuttosto che tecnologico, con le potenzialità per ristrutturare letteralmente intere industrie, se non intere economie.

David Liddle<sup>1</sup> esprime chiaramente il punto di vista secondo cui, al giorno d'oggi, la Legge di Moore viene letta come *legge economica* [Liddle2006]:

“La Legge di Moore esprime quella percentuale di miglioramento nei processi di produzione dei semiconduttori che trasferisce il massimo profitto *dal* settore dell' IT *all'*industria dei semiconduttori. Essa *non* definisce il massimo miglioramento dei processi - o velocità di riduzione delle dimensioni dei componenti - possibile tecnicamente, e non è limitata dalla spesa di capitale investibile in nuovi strumenti e tecnologie. È il tasso al quale ogni generazione di prodotto dura sufficientemente a lungo da essere (marginalmente) redditizio per i produttori di sistemi, fornendo il lancio di nuovi prodotti ai clienti ad un ritmo tale per cui possano essere presi seriamente in considerazione. Questa influenza economica è diventata il mezzo attraverso il quale la Legge di Moore non solo ha guidato il settore dei semiconduttori, ma ha ristrutturato, emarginato, o fortemente rinvigorito molti altri settori.”

Un enorme impatto della Legge di Moore si è riscontrato nella drastica delimitazione e messa a fuoco dell'industria informatica. Per decenni, prima

---

<sup>1</sup>David Liddle, Ph.D., membro di U.S. Venture Partners, presidente e CEO di Interval Research Co. (Silicon Valley), Consulting professor di Computer Science alla Stanford University, ricercatore, manager e imprenditore in diverse aziende della Silicon Valley

dell'avvento di livelli significativi di integrazione nei semiconduttori, le innovazioni nelle architetture degli elaboratori hanno costituito la base della concorrenza tra fornitori. Queste innovazioni significavano organizzazioni del sistema, sets di istruzioni, tecniche di gestione della memoria o controllers I/O differenti in ogni generazione di prodotto e per ogni produttore. Di conseguenza, nessuna particolare struttura riusciva a diventare sufficientemente diffusa da permettere diminuzioni di costo o l'incrementarsi di industrie del software indipendenti. Ogni piccolo passo per migliorare il rapporto costi/prestazioni era a spese di produttori e consumatori.

La Legge di Moore rese la rapidità dei miglioramenti nel rapporto costo/prestazioni di gran lunga superiore alla velocità di manovra dell'industria informatica, rendendo impraticabile per i produttori di elaboratori operare sostanziali cambiamenti nelle architetture e portando i fornitori di semiconduttori a influenzare fortemente quest'ultime, tramite l'integrazione di sempre più funzioni direttamente sui chips, l'aumento della loro velocità e la costante diminuzione dei costi legati all'elettronica.

Un enorme effetto collaterale della Legge di Moore è stato l'affermazione del settore del software commerciale come una forza significativa nell'economia. Ciò è accaduto in due modi. Prima di tutto, la diminuzione dei costi e l'ampia disponibilità di potenti processori ha ampiamente incrementato il numero di computers in uso, permettendo così la vendita di prodotti software in enormi quantità a prezzi modesti. Inoltre, la fine della proliferazione di variazioni architettoniche ha dimostrato che un prodotto software di successo deve girare su uno o al massimo due tipi diversi di CPU, con la certezza che ciò copra praticamente tutto il mercato di fornitori e clienti e che ci siano costanti miglioramenti in termini di costi/prestazioni che raramente richiedano significativi cambiamenti nei programmi, permettendo sempre più ampi investimenti nella produzione di software sempre più performanti nel tempo, grazie alla Legge di Moore.

Questi tre ampi fenomeni, ossia l'enorme crescita dell'industria dei semiconduttori, la mercificazione del settore informatico e l'emergere di un'enorme industria del software, sono naturalmente interdipendenti ed hanno creato il quadro economico che ha mantenuto valida la Legge di Moore così a lungo.

Volendo rimanere su un piano strettamente tecnico, si può notare come la programmazione fosse considerata negli anni '60 e '70 un'alta forma di *arte tecnologica*: computers costosi, risorse limitate, pochi programmatori, avevano portato allo sviluppo di un'ampia base teorica, all'enfasi di eleganti algoritmi che richiedessero il minor numero di istruzioni o la più piccola quantità di memoria, o entrambi. Questa intera cultura passò nettamente sullo sfondo con l'avvento della Legge di Moore, con i designs eleganti e parsimoniosi dei programmi che diventavano inutili in un'era di CPUs e memorie

sempre più veloci ed economiche.

Lo stesso accadde, sempre dagli anni '70, al calcolo parallelo, quando gli studi e le ricerche furono letteralmente congelati dalle conseguenze della Legge di Moore. In effetti, ogni progettista si chiedeva: “Dovrei veramente costruire una macchina a due processori, con tutte le modifiche software annesse, quando tra 24 mesi posso avere una singola CPU con velocità doppia senza alcuno sforzo?”. Solo oggi, con i margini di crescita della frequenza di clock delle CPUs ridotti al minimo, l'attenzione nei confronti delle architetture multi-processore è tornata a livelli di regime.



# Capitolo 2

## Storia

Il termine “Legge di Moore” è stato coniato intorno al 1970 dal fisico Carver Mead, professore al Caltech<sup>1</sup>, pioniere della VLSI<sup>2</sup> e imprenditore.

Previsioni di simili incrementi nella potenza dei computers esistevano già in precedenza. Alan Turing in un articolo del 1950 aveva previsto che dalla fine del millennio i computers avrebbero avuto un miliardo di parole di memoria.

Moore può aver sentito Douglas Engelbart, un co-inventore dell’odierno mouse per computers, discutere la riduzione prevista delle dimensioni dei circuiti integrati in una conferenza del 1960, in una delle tappe previste da un suo ciclo internazionale di conferenze. Un



*D. Engelbart*

Un articolo del New York Times pubblicato il 18 Aprile 2005 attribuisce a Engelbart la paternità della previsione, fatta nel 1959. [Markoff2005]

Significativamente, i due pionieri rappresentano culture gemelle, sviluppatesi nella Silicon Valley, la cui combinazione ha dato origine alla *digital economy*. “Gordon era il classico ingegnere”, ha detto Craig Barrett, capo esecutivo di Intel che aveva appena iniziato ad insegnare alla Stanford University quando Moore fece la sua famosa previsione. Il grafico che accompagnava il suo articolo era un tracciato di soli cinque punti su sette anni, interpolato fino al 1975, quando un singolo chip sarebbe stato in grado di contenere 65.000 transistors. Quarant’anni dopo, la capacità dei chips di memoria è andata ben oltre il miliardo di componenti. Engelbart invece è stato l’architetto di una visione appassionata secondo cui l’informatica può estendere o “aumentare” le potenzialità della mente umana.

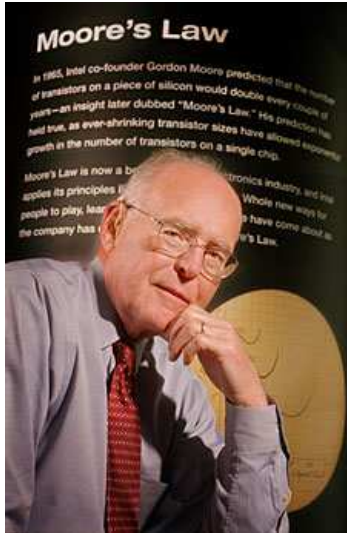
---

<sup>1</sup>California Institute of Technology

<sup>2</sup>very-large-scale integration

Egli aveva avuto un'intuizione nel 1950 nella quale aveva immaginato quello che decenni più tardi sarebbe diventato l'odierno PC connesso ad Internet, e si mise a costruirlo. A quel tempo non sapeva ancora come avrebbe fatto, ma presto si rese conto che la tecnologia necessaria ancora non esisteva. Pensando all'idea della miniaturizzazione dei circuiti, Engelbart

capì che il punto nevralgico della questione stava nel concetto di *scaling* tecnologico e una persona a cui rimase ben impressa la sua idea fu proprio Moore.



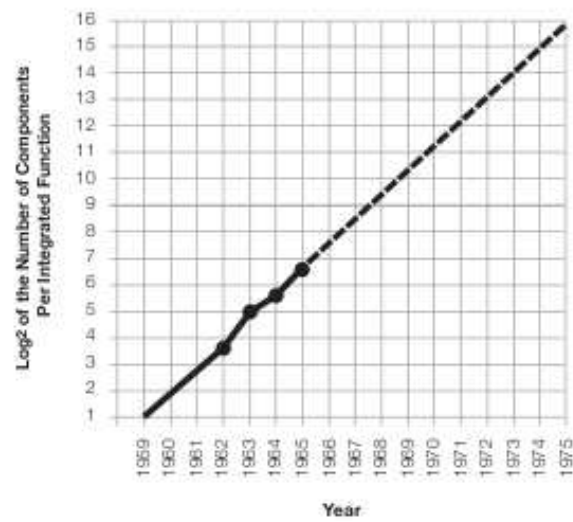
G.E. Moore

Molti storici hanno sottolineato come la precedente osservazione di Engelbart non sminuisca per nulla il significato del trend delineato con precisione da Moore: “Dovrebbe essere comunque chiamata *Legge di Moore*, piuttosto che *Legge di Engelbart*”, ha detto Michael Riordan, uno storico della fisica alla UC Santa Cruz. “La Scienza è ancora basata su teoria ed esperimento”.

La dichiarazione originale di Moore secondo cui il numero di transistor è raddoppiato ogni anno si può trovare nella sua pubblicazione *Cramming more components onto integrated circuits*, apparsa su *Electronics* il 19 Aprile 1965[Moore1965]:

La complessità per minimo costo del componente è aumentata ad un ritmo di circa un fattore 2 per anno [...]. Certamente sul breve periodo ci si può aspettare che tale velocità si mantenga, se non che aumenti. Sul lungo periodo, la velocità di incremento è un po' più incerta, sebbene non ci sia motivo di credere che non rimarrà costante per almeno 10 anni. Ciò significa che nel 1975 il numero di componenti per circuito integrato a costo minimo sarà 65.000. Io credo che un circuito di tali grandi dimensioni potrà essere costruito su di un singolo wafer.

Moore modificò leggermente la formulazione della legge nel tempo, rafforzandone a posteriori la correttezza percepita. In particolare, nel 1975, Moore modificò la sua previsione in un raddoppio ogni *due* anni. Malgrado il fraintendimento popolare, egli è fermamente convinto di non aver mai parlato di un raddoppio “ogni 18 mesi”. Fu piuttosto David House, un collega Intel, a calcolare nell'incremento delle prestazioni dei transistor un tale tempo di raddoppio di densità.



*Grafico originale apparso su  
Electronics Apr1965*

Nell'Aprile 2005 Intel offrì \$10.000 per l'acquisto di una copia originale dell'*Electronics Magazine* contenente l'articolo di Moore. David Clark, un ingegnere che viveva nel Regno Unito, fu il primo a trovarne una e la offrì a Intel.



## Capitolo 3

### Altre formulazioni e leggi simili

Molte grandezze, nell'ambito delle tecnologie digitali, stanno crescendo - in accordo con la Legge di Moore - a velocità esponenziali, compresi dimensione, costo, densità e velocità dei componenti, sebbene Moore abbia parlato solo di densità dei transistor a costo minimo, per circuito integrato.

**Densità a costo minimo per transistor.** Si tratta della formulazione originaria data da Moore nel suo articolo. Essa non riguarda solamente la densità di transistor raggiungibile, ma tiene conto anche del costo minimo di mercato degli stessi.

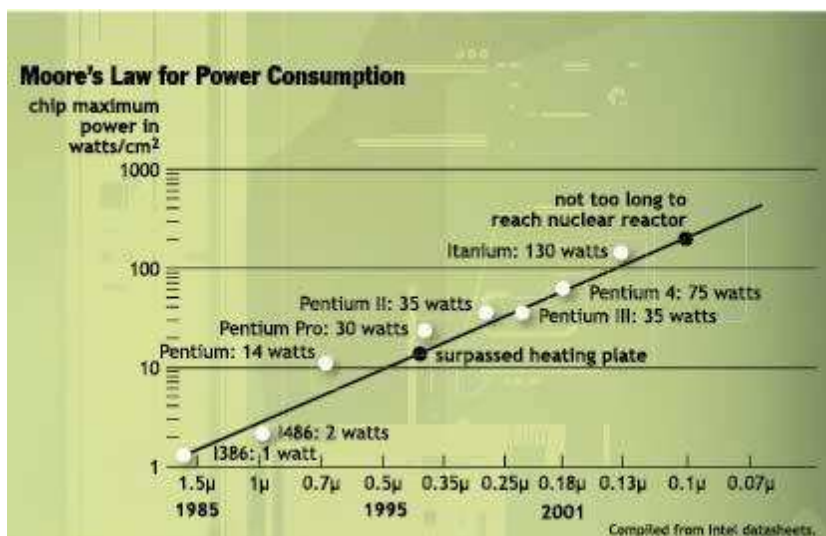
Mettendo più transistor su un singolo chip, il costo del singolo transistor diminuisce, ma la probabilità che il chip non funzioni per dei difetti aumenta. Nel 1965 Moore valutò la densità di transistor tale per cui il costo è minimizzato e osservò che, rendendo i transistor più piccoli grazie agli sviluppi delle tecniche fotolitografiche, il loro numero aumentava “ad una velocità di circa un fattore 2 per anno”.

**Costo per transistor.** Al diminuire della dimensione dei transistor, anche il *costo per transistor* è diminuito. D'altra parte, il *costo di produzione per unità di area* è sempre aumentato. Questo perché le spese di materiali ed energia per unità di area sono parimenti aumentate ad ogni successivo passo tecnologico.

**Prestazioni computazionali per unità di costo.** La velocità alla quale i transistor operano è aumentata con il diminuire delle loro dimensioni. Per questo motivo, si è soliti citare la Legge di Moore anche in riferimento ai continui e rapidi sviluppi in termini di performances computazionali per unità di costo, essendo i due incrementi strettamente legati. Su questa

base, le prestazioni computazionali per unità di costo - dette *bang per buck* - raddoppiano ogni 24 mesi circa.

**Consumo di potenza.** Nel 1991 il Cray C90, uno dei primi cosiddetti *supercomputers*, occupava  $55 m^2$  e consumava  $500 kW$ . Ai giorni nostri, il supercomputer ASCI Q al Los Alamos National Laboratory occupa  $2000 m^2$  e consuma  $3000 kW$ . Sebbene le prestazioni tra questi due sistemi siano



aumentate di quasi un fattore 2000, le prestazioni per watt sono aumentate solo 300 volte e quelle per metro quadro di un irrisorio fattore 65. Questo significa che vengono costruiti supercomputers sempre meno efficienti dal punto di vista dello spazio occupato. Il motivo principale è l'aumento esponenziale della potenza richiesta dai *compute nodes*, un fenomeno che Wu-chun Feng chiama "Legge di Moore per il consumo di potenza" [Feng2003]:

*Il consumo di potenza dei compute nodes raddoppia ogni 24 mesi.*

Quando i nodi del sistema consumano e dissipano più energia, devono essere spazati maggiormente e fortemente raffreddati. Senza esotiche strutture dove posizionarli adeguatamente, i tradizionali supercomputers avrebbero un tale livello di inaffidabilità (a causa del surriscaldamento) da non essere mai disponibili per l'uso da parte di applicazioni scientifiche. Dati empirici (mai pubblicati) di due industrie leader del settore dimostrano che il tasso di errore di un compute node raddoppia ogni  $10^\circ C$  di aumento della temperatura, come del resto si ottiene dall'Equazione di Arrhenius applicata alla microelettronica, e la temperatura è proporzionale al consumo di potenza.

Chiaramente, il tempo di inattività dovrebbe essere un componente essenziale nel TCO<sup>1</sup> di un sistema informatico, che sia il web-server di un'azienda o un supercomputer.

Sebbene questo corollario della Legge di Moore sia stato valido fino a pochi anni fa, la sua traiettoria prevedeva che si raggiungessero temperature operative di  $1\text{kW}/\text{cm}^2$  entro il 2010, più potenza per  $\text{cm}^2$  della superficie del Sole! Da un punto di vista socioeconomico la *Legge di Moore per il consumo di potenza* va quindi evitata e la valutazione dei sistemi mainframe va redirezionata verso parametri diversi da quello prezzo/prestazioni, guardando piuttosto al TCO, al rapporto prestazioni/spazio, prestazioni/potenza, affidabilità, tempo di (in)attività.

**Legge di Kryder.** Il *costo di archiviazione su disco per unità di informazione* è una legge, enunciata da Mark Kryder<sup>2</sup>, che ha un andamento simile a quello della Legge di Moore.[Walter2005]

Fin dall'introduzione del disco rigido nel 1956, la densità di informazione che può essere memorizzata è passata dai 2000 bits al gigabit per pollice quadrato, con un incremento di 50 milioni di volte. Senza sminuire la Legge di Moore, Kryder sottolinea come i sistemi di archiviazione e i processori necessitino l'uno dell'altro e debbano quindi evolvere insieme:

“Senza continuare a comprimere bits in dischi rigidi sempre più compatti, il mondo dell'informazione subirà un sostanziale arresto. Oggi la densità di informazione che possiamo ottenere su un disco rigido è molto più utile allo sviluppo di nuove applicazioni, rispetto agli avanzamenti nei semiconduttori. Senza di essa, lettori audio digitali, sistemi GPS, HDTV e sistemi digitali via cavo sarebbero impensabili.”

Ma per Kryder questi servizi sono solo l'inizio. Piccoli ma capienti hard-disks stanno sostituendo le memorie flash a bassa capacità (che sfruttano transistori caricati elettricamente al posto di componenti mobili per immagazzinare informazioni) in telefoni, PDAs, automobili e molte altre applicazioni. Questi sviluppi stanno spingendo i produttori ad essere molto più flessibili, in base alla crescita dei mercati.

---

<sup>1</sup> *Total Cost of Ownership*, in inglese *costo totale di proprietà*, è un approccio sviluppato da Gartner nel 1987, utilizzato per calcolare tutti i costi del ciclo di vita di un'apparecchiatura informatica IT, per l'acquisto, l'installazione, la gestione, la manutenzione e il suo smantellamento. [\*]

<sup>2</sup>Mark Kryder, fondatore e direttore del Carnegie Mellon University's Data Storage Systems Center e ora capo del reparto tecnologico presso l'industria di hard-disks Seagate Technology.

Nel 1998, quando Kryder si unì a Seagate per formare il suo avanzato centro di ricerca, la DSSC<sup>3</sup> aveva fissato come obiettivo 100 gigabits per pollice quadrato entro l'inizio del ventunesimo secolo. Nel 2005, solo 7 anni dopo, Seagate iniziò a commercializzare drives da 110 gigabits. Nell'arco di dieci anni gli hard-disks avevano aumentato la loro capacità di mille volte.

Ma le tecnologie inerenti agli hard-drives stanno andando oltre. Gli hard-disks tipicamente memorizzano i bits di informazione sfruttando una sottile testina che spazza l'intera superficie del disco e magnetizza miliardi di aree discrete (in direzione orizzontale), che vanno a rappresentare 0 o 1 a seconda del senso (orario o antiorario) in cui sono rivolte. Le aree magnetizzate stanno diventando così piccole da rendere estremamente difficoltoso garantirne la stabilità. Per risolvere il problema, Kryder e il suo team stanno studiando un metodo chiamato *registrazione perpendicolare*, in cui le cariche magnetiche vengono convertite da positive a negative, permettendo l'uso di campi magnetici più forti in grado di memorizzare bits che occupano così una minor superficie.

Un altro progetto affronta un nuovo metodo chiamato HAMR<sup>4</sup>, che sfrutta una raffica di calore in modo da permettere alla testina del drive di magnetizzare superfici ancora più piccole. Quando il disco poi si raffredda, il campo magnetico si stabilizza.

Il team di Kryder non lavora invece sulla *memorizzazione olografica*, considerata da molti come la tecnologia del futuro per il settore. L'olografia usa tutte e tre le dimensioni per memorizzare i dati, ma secondo Kryder sul lungo termine essa risulterà meno competitiva economicamente.

**Capacità delle memorie RAM.** Una legge simile a quella precedente stabilisce che la capacità di memorizzazione della RAM aumenta con la stessa velocità della potenza dei processori.

**Legge di Butters.** Secondo Gerry Butters, capo del Lucent's Optical Networking Group ai Bell Labs, esiste una formulazione molto simile alla Legge di Moore per quanto riguarda la capacità di rete, detta *Legge di Butters per la Fotonica*, secondo cui

*la quantità di dati trasmessi da una fibra ottica raddoppia ogni nove mesi.*

Di conseguenza, il costo di trasmissione per bit su di una rete ottica si dimezza ogni nove mesi.

---

<sup>3</sup>Data Storage Systems Center

<sup>4</sup>heat-assisted magnetic recording



Ad aumentare la capacità per singola fibra ottica di un fattore 100 hanno fortemente contribuito il WDM<sup>5</sup> e il DWDM<sup>6</sup>.

Alla fine del 1999 la Lucent Technologies (di cui fanno parte i Bell Labs) fu in grado di annunciare lo scioglimento dell'*impasse* riguardante l'ingorgo della rete (che si basava su tecnologie puramente elettroniche) grazie al primo all-optical router ad alta capacità, basato su tecnologia MEMS [Robinson2000]. Il *LambdaRouter* usa microscopici specchi che inviano segnali ottici da fibra a fibra all'interno della rete, istantaneamente. La sua matrice di 256 specchi - ciascuno delle dimensioni di una capocchia di spillo - è predisposta in modo tale che ciascuno possa essere inclinato per dirigere i segnali luminosi da una fibra ottica all'altra.

L'evidente vantaggio progettuale: nessuna conversione elettronica. "Avevamo raggiunto un *electronic bottleneck* nei sistemi a guide ottiche" ha detto Bishop<sup>7</sup>, "e ciò è evidenziato dai diversi intervalli temporali citati rispettivamente nella Legge di Moore e nella Legge di Butters".

Il modo tradizionale per ritrasmettere i segnali uscenti da una fibra ottica prevedeva la loro conversione in segnali digitali, l'uso di circuiti integrati e poi la riconversione in fotoni. "Il problema sta nel fatto che la quantità di dati uscente da una fibra ottica è enormemente maggiore della capacità di gestione di qualsiasi circuito elettronico. Chiaramente a fare da collo di bottiglia per il traffico di rete è proprio la parte elettronica della stessa." Da qui l'idea di Bishop e del suo team di un all-optical switch basato su tecnologia MEMS. Il risultato è stato uno switch data-rate-independent in grado di gestire un petabit<sup>8</sup>, senza altri componenti aggiuntivi, rendendo le possibilità di espansione della rete globale ancora più notevoli e ad una velocità sempre maggiore.

**Pixels per dollaro.** Barry Handy, della Kodac Australia, ha graficato una grandezza utilizzabile per valutare le fotocamere digitali, i *pixels per dollaro* in funzione del tempo, dimostrando una (storica) linearità - su scala logaritmica - di questo mercato, con la conseguente opportunità di prevedere l'andamento futuro del prezzo delle fotocamere, degli schermi LCD e LED e della risoluzione grafica in generale. Infatti, pensare che ad esempio la rivoluzione nel mondo della fotografia finirà nel momento in cui ognuno possiederà una fotocamera digitale è assolutamente privo di fondamento. L'aumento del numero di transistor per unità di area implica continui nuovi sviluppi in

---

<sup>5</sup>wavelength-division multiplexing

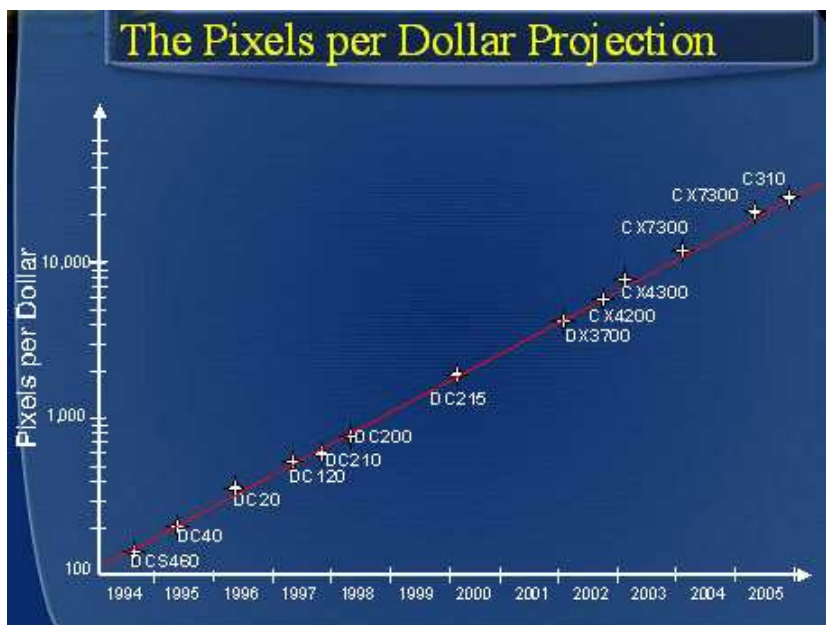
<sup>6</sup>dense wavelength-division multiplexing

<sup>7</sup>David Bishop, direttore del Micro Mechanics Research Department presso i Bell Labs della Lucent Technologies.

<sup>8</sup>1000 terabits

tutte le tecnologie, compresi sensori con più megapixels e memory cards più capienti.

Finora il principale obiettivo nell'ambito della fotografia digitale, come scrive Myhrvold<sup>9</sup>, è stato la produzione di immagini di qualità cinematografica. Dato che, da alcune stime, la risoluzione effettiva dell'occhio umano



Pixels per dollaro. *Basato sui prezzi delle fotocamere digitali Kodak in Australia*

risulta essere pari a più di 500 megapixels, è certamente possibile andare oltre.

Esistono però altri elementi che limitano le fotocamere digitali, come la qualità delle loro lenti. Ma da un punto di vista matematico, una lente opera un "calcolo" su una scena, che può quindi essere integrato con algoritmi di elaborazione del segnale. Altro fattore chiave è il rapporto di luminosità dal nero al bianco. Per l'occhio umano il range è di 10.000:1, mentre le attuali fotocamere non vanno oltre 64:1. Questo può essere risolto con ranges dinamici più ampi e con una maggiore sensibilità luminosa (ISO), riducendo al contempo il rumore che si presenta per alti valori di ISO.

Questi ed altri elementi che si pongono oggi come limiti strutturali nell'evoluzione della fotografia (e del video) digitale, trovano nell'andamento della Legge di Moore le nuove risorse necessarie alla loro evoluzione. [Myhrvold2006]

<sup>9</sup>Nathan Myhrvold, ex-capo del settore tecnologico di Microsoft e co-fondatore di Intellectual Ventures

**The Great Moore's Law Compensator.** Il TGMLC, generalmente indicato come *bloat* o *bloatware*, “software gonfiato”, è il principio secondo cui le successive generazioni di software richiedono di volta in volta prestazioni tali da compensare l'incremento delle stesse raggiunto seguendo la Legge di Moore.

In un articolo pubblicato su InfoWorld, Randall C. Kennedy<sup>10</sup> introduce questo termine per riassumere l'andamento evidenziato dai tests effettuati sul pacchetto Office<sup>®</sup> con sistema operativo Windows<sup>®</sup>. [Kennedy2008]

Iniziando dal test sull'utilizzo di memoria, Office 2007 ha impegnato 109MB, contro gli appena 9MB di Office 2000, con un incremento di ben 12 volte. Parte del risultato è dovuto al fatto che, mentre nella versione precedente i programmi rilasciavano la maggior parte della memoria non critica una volta ridotti a icona, questa caratteristica è stata eliminata a partire da Office 2007. Ad ogni modo, pur considerando questo fattore, il consumo di memoria del nuovo pacchetto Office combinato con un sistema operativo Windows Vista versione base ne rende impossibile l'utilizzo su configurazioni hardware con meno di 1GB di RAM. Inoltre, nulla spiega i requisiti in termini di CPU richiesti da Office 2007, quasi doppi rispetto ad Office 2003. Chiaramente, l'ultima generazione dei pacchetti firmati Microsoft<sup>®</sup> è stata progettata pensando a configurazioni hardware altrettanto recenti e, in linea con le previsioni del TGMLC, processori Dual Cores con 4MB o più di memoria cache L2 e 2GB di memoria RAM suppliscono al compito. In questo modo però, diventa quasi uno *status quo* per la comunità IT vedere l'hardware diventare sempre più veloce e performante, il software più pesante e l'esperienza dell'utente finale, in termini di velocità di risposta delle applicazioni e di efficienza complessiva di esecuzione, rimanere pressochè intatta.

---

<sup>10</sup>Randall C. Kennedy, ex-dipendente di Intel, ora redattore del TestCenter di InfoWorld.



## Capitolo 4

### Una profezia auto-avverante

La previsione di Moore si è realizzata in maniera così perfetta che ai giorni nostri si parla di “Legge di Moore”, come se fosse una legge di Natura. La validità di questa legge non può essere derivata dalle procedure tecniche attraverso cui i chips vengono prodotti. Il fatto che essa risulti valida è piuttosto un effetto del modo in cui i vari attori (nell’industria, nelle scienze e nei governi) giudicano i propri e i reciproci risultati, confrontandoli con ciò che la Legge di Moore prevede. Essi concentrano i loro sforzi al fine di ottenere quanto previsto: i laboratori valutano e pianificano i loro sforzi in base alla Legge di Moore; se si presenta il rischio di mancare gli obiettivi al momento previsto, vengono fatti ulteriori investimenti in quel determinato progetto. Le imprese usano la legge per prendere decisioni sugli investimenti in specifiche tecnologie, ad esempio se sviluppare oppure no prodotti che richiedono chips di una determinata potenza. I governi sono disposti a fornire sussidi per aiutare le imprese che percepiscono il rischio di non raggiungere l’obiettivo predetto. Tutti gli attori si sforzano di essere all’altezza della competizione secondo la previsione e di rimanere in gara. La Legge di Moore è il termine di confronto per il comportamento di produttori di chips e governi in Giappone, Stati Uniti ed Europa, e modella le loro mutue dipendenze nella partita strategica che giocano uno contro l’altro.

Si può parlare di una *profezia auto-avverante*, ma il fatto che si auto-avveri non accade perchè essa è realmente una profezia, ma piuttosto perchè gli attori del settore l’hanno presa in considerazione ed agiscono di conseguenza. Ciò è stato poi d’esempio per altri attori e così via. La promessa è così diventata parte di un *dilemma del prigioniero*: imprese e governi in Europa, Giappone (e ora anche altri Paesi come il Sud-Est dell’Asia), Stati Uniti, rimangono in gioco per costruire chips sempre più potenti, anche se ciò richiede enormi investimenti, il tutto per non correre il rischio di arrivare dopo altri nella competizione. E sebbene la certezza non sia assolutamente tale, ognuno

sospetta fortemente che gli altri continuino a seguire il trend, semplicemente perchè i chips sono una tecnologia promettente.

Le situazioni descrivibili secondo il modello del dilemma del prigioniero (e fenomeni simili analizzati nella teoria dei giochi) sono diffusi e spiegano perchè gli attori rimangano in gioco. Il modello non spiega però la natura delle decisioni e la mutua coordinazione tra i diversi aspetti tecnologici. L'antagonistica coordinazione nella *sfida dei chips* è resa possibile dalla "lettura" delle possibilità e dei requisiti richiesti dalla successiva generazione di chips. È solo grazie a questo agente riflessivo che la divisione del lavoro e le strategie permettono di parlare di "strategia auto-avverante". [Disco,Meulen1998]

## 4.1 Relazione con i costi di produzione

Parallelamente al diminuire del costo dei computers per i consumatori, i costi per i produttori che inseguono la Legge di Moore hanno un andamento opposto: R&D, produzione e tests hanno costi costantemente crescenti ad ogni nuova generazione di chips.

L'aumento dei costi di produzione sono un'importante considerazione per quanto riguarda la sostenibilità della Legge di Moore. Ciò ha condotto alla formulazione della *Seconda Legge di Moore*:

Il costo capitale di una fabbrica di semiconduttori cresce esponenzialmente nel tempo.

I materiali richiesti per l'avanzamento della tecnologia (fotoresists, altri polimeri e prodotti chimici industriali) derivano da risorse naturali (come il petrolio) e sono quindi soggetti al costo e alla disponibilità delle risorse stesse. Basti pensare che il costo di tape-out<sup>1</sup> di un chip a 90 nm è di almeno US\$1.000.000, mentre supera i US\$3.000.000 un chip a 65 nm.

I guadagni economici oggi ottenuti dall'incremento delle prestazioni secondo la Legge di Moore non sono più significativi quanto in precedenza, e ciò è in linea con quanto affermato dalla Legge sui rendimenti marginali decrescenti, secondo la quale il rendimento marginale su una singola unità di un fattore produttivo diminuisce all'aumentare del numero di unità. Il problema della diminuzione dei rendimenti si unisce così all'aumento dei costi (considerati solitamente costanti dalla Legge sui rendimenti decrescenti), dato che gli sviluppi della tecnologia e il know-how necessario alla produzione richiedono investimenti sempre maggiori.

---

<sup>1</sup>il *tape-out* è l'insieme dei processi che vanno dalla progettazione dei circuiti integrati alla produzione del chip su silicio.

“La Legge di Moore è interessante ma non rilevante al fine dei problemi che dobbiamo affrontare”, ha detto Bernie Meyerson, capo del gruppo Sistemi e Tecnologie all’IBM.

Uno dei principali ostacoli è la *scalabilità*, dove le nozioni classiche si sono dimostrate inutili una volta raggiunti i 130 nm. Ad un livello di integrazione più spinto infatti risulta impossibile ridurre ulteriormente alcune parti del transistor, così che il consumo di potenza e il problema della dissipazione del calore diventano preponderanti. [Lemon,Krazit2005]

Mano a mano che i progettisti di ICs creano sempre più complesse geometrie (puntando a dimensioni sempre minori), i prezzi delle fotomaschere continuano a crescere, con uno scaling crescente dei costi da una generazione alla successiva. Recenti rapporti e articoli del settore evidenziano come questo trend preoccupi analisti e costruttori di chips, che definiscono i costi come sempre meno concepibili. “Al momento sembra che la stima più accurata circa i costi delle maschere sia di un aumento del 40 - 60% per generazione” afferma Scott Hector, manager del Programma Mask Strategy all’International Sematech di Austin, Texas. Costi medi per set di maschere sono di quest’ordine di grandezza:

- 130 nm: tra \$400.000 e \$800.000, con produzione di massa;
- 90 nm: tra \$1 milione e \$1.5 milioni, per la produzione di ASICs<sup>2</sup>
- 65 nm: tra \$3 milioni e \$4 milioni.

Ad aggravare il problema, si aggiungono recenti stime secondo cui circa la metà delle maschere attualmente utilizzate rappresenta solo un decimo dei wafers effettivamente prodotti. [Mallozzi2004]

---

<sup>2</sup>Application Specific Integrated Circuits

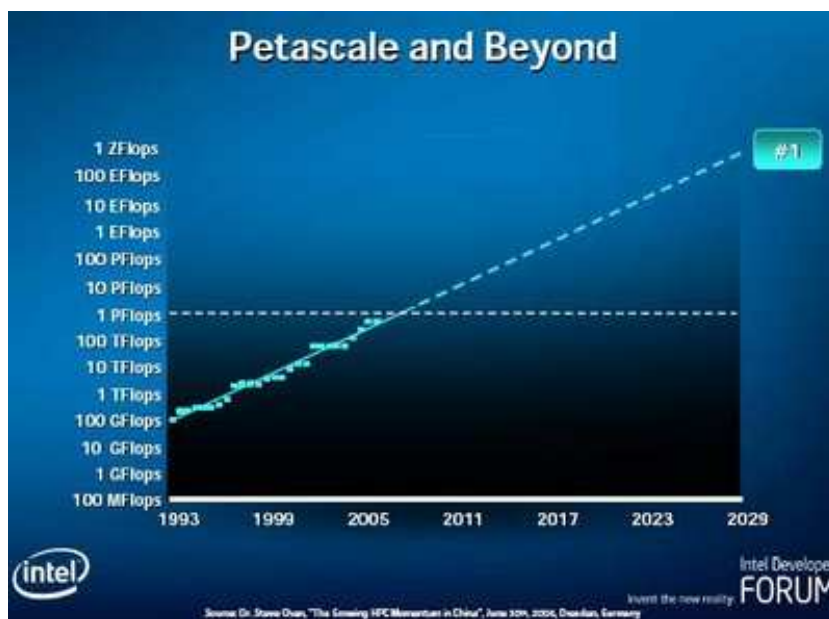




## Capitolo 5

# Prospettive future

Le pianificazioni nel settore tecnologico dell'industria informatica prevedono che la Legge di Moore rimarrà valida per molte altre generazioni di chips. In base al tempo di raddoppio considerato nei calcoli (circa 3 anni per i microprocessori), si parla di un aumento del numero di transistor di circa dieci volte entro la prossima decade.



Pat Gelsinger, Senior Vice Presidente e Manager Generale dell'Intel Enterprise Group, ritiene che la Legge di Moore continuerà a valere almeno fino al 2029 e, parlando all'Intel Developers Forum, nel corso della presentazione

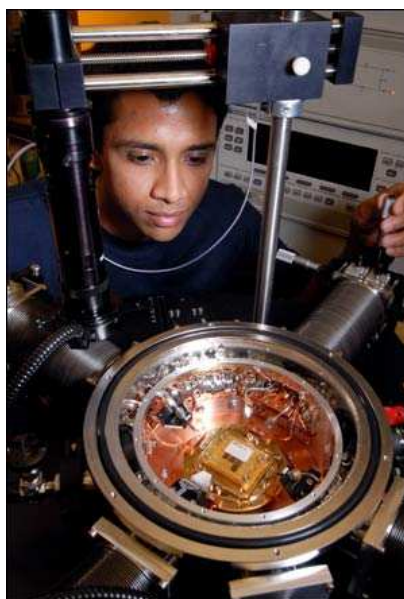
“Dai petaflops<sup>1</sup> ai milliwatt”, Gelsinger ha persino accennato ad aspettative di Intel circa la possibilità di arrivare ai zettaflops<sup>2</sup> supercomputers. [Geelan2008]

Prima di essere CTO<sup>3</sup> di Intel, Gelsinger era Capo del Settore Tecnologico di Intel Architecture Group, dove gestiva l’organizzazione che ricerca, sviluppa e progetta hardware di prossima generazione e tecnologie software per tutte le piattaforme con architettura Intel. “La Legge di Moore è come una strada nella nebbia,” ha detto Gelsinger, “non sai mai quanto lontano puoi arrivare. Pensavamo che ci fossero dei limiti fisici e ora parliamo con *nonchalance* di arrivare ai 10 nm. Noi abbiamo lavorato su diverse strutture a transistor. Il silicio funge oramai da ponteggio per il resto della tavola periodica e i nostri studi sono orientati verso soluzioni per inserire queste nuove strutture nei materiali. Di certo, per ora non vediamo la fine.”

Esistono diverse linee di ricerca verso le quali ci si sta orientando per permettere alla Legge di Moore di rimanere valida.

**Transistors super-raffreddati.** I ricercatori della IBM e del Georgia Tech hanno raggiunto un nuovo record di velocità facendo lavorare un transistor di silicio/germanio super-raffreddato in elio liquido a 500 GHz. Il transistor riusciva ad operare oltre tale frequenza se portato a 4,5 K e le simulazioni hanno mostrato come possa potenzialmente lavorare a 1 THz.

Per applicazioni che richiedono enormi quantità di calcoli al secondo, i transistors creati combinando il silicio con altri materiali non si sono rivelati in grado di fornire tutta la potenza necessaria. Si sono usate allora combinazioni come l’arseniuro di gallio, funzionali ma costose e difficili da produrre. Le industrie preferirebbero ovviamente continuare a lavorare con il silicio, duttile ed economico; ecco allora il perchè di questi e-



<sup>1</sup>in informatica, *flops* è un’abbreviazione di *Floating Point Operations Per Second* e indica il numero di operazioni in virgola mobile eseguite in un secondo dalla CPU. I moderni processori includono una floating point unit (FPU), componente specializzata nel calcolo delle operazioni in virgola mobile. Quindi il FLOPS è un’unità di misura delle prestazioni della FPU. In particolare, 1 petaflop =  $10^{15}$ flops [\*\*]

<sup>2</sup>1 zettaflop =  $10^{21}$ flops

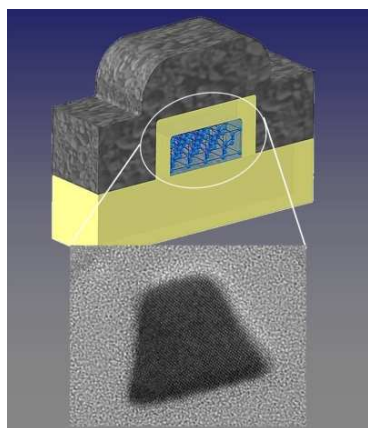
<sup>3</sup>Chief Technology Officer

sperimenti. “Noi osserviamo gli effetti in questi dispositivi a temperature criogeniche, in grado di renderli più veloci di quanto la teoria classica suggerirebbe.” ha detto il prof. John Cressler del Georgia Institute of Technology. “Capire la fisica di questi transistors avanzati ci fornisce quella conoscenza che potrebbe dare origine alla prossima generazione di circuiti integrati in silicio.” [BBCnews2006]

**Litografia ottica DUV.** All’inizio del 2006, i ricercatori della IBM hanno annunciato lo sviluppo di una tecnica per stampare circuiti a 29,9 nm usando la litografia ottica all’ultravioletto (*DUV optical lithography*), che dicono essere una tecnologia utilizzabile dai produttori di chips per almeno sette anni, in attesa di nuovi metodi sicuramente molto più costosi.

**Memristori.** Nell’Aprile del 2008 i ricercatori degli HP Labs hanno annunciato la creazione del *memristore*: un quarto elemento circuitale di base passivo, la cui esistenza era stata in precedenza solo teorizzata ma che, a dimensioni nanometriche, diventa fisicamente realizzabile. Le proprietà uniche del memristore consentono la creazione di apparati elettronici più piccoli e più performanti. [Strukov,Snider2008]

**Transistor senza giunzioni.** Nel Febbraio del 2010 i ricercatori presso il Tyndall National Institute a Cork, Irlanda, hanno annunciato una svolta nei transistors grazie alla progettazione e alla fabbricazione del primo *transistor senza giunzioni* al mondo, che per le sue caratteristiche si dice possa essere prodotto con dimensioni di 10 nm utilizzando gli odierni sistemi di produzione.



La ricerca, condotta dal prof. Jean-Pierre Colinge è stata pubblicata su Nature Nanotechnology e descrive un gate di controllo disposto attorno ad un nanotubo di silicio in modo tale da potersi stringere fino a impedire del tutto il passaggio di elettroni, senza l’uso di giunzioni. [Johnson2010]

## 5.1 Nuova vita alla Legge di Moore

Stephen Chou, professore della Princeton University, ritiene di aver messo a punto un modo per mantenere a regime l’attività dell’industria dei

semiconduttori. [Kanellos2005]

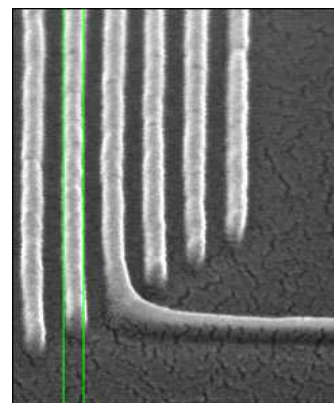
Fondatore della Nanonex, il professor Chou è uno dei primi sostenitori dell'*imprint lithography*, un processo che prevede l'impressione di una maschera su un substrato liquefatto per creare lo stampato di un circuito, similmente a come funziona un anello con sigillo. Nelle sperimentazioni è riuscito a creare elementi con dimensioni di 6 nm, un quindicesimo delle dimensioni degli attuali chips. "Dieci anni fa le persone dicevano: 'Questa è follia. Non riuscirai mai a sfruttare una tecnologia tale da realizzare cose così piccole' " ha detto Chou.

L'imprint lithography - insieme ai nanotubi in silicio, alla memoria a cambiamento di fase, alla spintronica, all'optoelettronica, ai chips 3D e ad altre tecnologie inizialmente considerate come pure curiosità scientifiche - è tra le molte tecnologie emergenti che potrebbero prolungare la vita della Legge di Moore.

Decenni di raddoppi del numero di transistori hanno portato a chips con molti milioni di transistori e fabbriche da svariati miliardi di dollari per produrli. Riducendo le dimensioni dei transistori e dei fili di rame che li collegano, sono sorti problemi come le perdite elettriche e il consumo di energia. D'altra parte, il margine di riduzione oggi rimasto non è molto.

I transistori sono costituiti da quattro parti fondamentali: *source* (dove si immagazzinano gli elettroni), *drain* (dove si ha il livello "alto" di tensione), *gate* e *ossido di gate* (che controlla il flusso da source a drain). Allo stato attuale, l'ossido di gate ha, in alcuni casi, lo spessore di soli 10 atomi. Ciò implica inevitabilmente la fine delle riduzioni dimensionali o un'ardua ristrutturazione a livello chimico della materia. Intorno al 2023, source e drain saranno così vicini che gli elettroni viaggeranno liberamente tra i due, a meno di sostanziali cambiamenti nelle tecniche di produzione dei chips. Da alcune ricerche si suppone che i *circuiti auto-assemblanti*, un potenziale risultato della nanotecnologia, potrebbero mantenere l'industria del settore produttiva per altri cinquant'anni. Sfortunatamente, qualsiasi risposta a questi problemi è tuttora vaga: "Tra non meno di 20 idee (da fonti attendibili) per rimpiazzare i chips di memoria al silicio, è molto difficile riuscire ad immaginare un vincitore sul lungo periodo.

Non c'è nulla che possa essere considerato un ovvio sostituto del transistor al silicio."

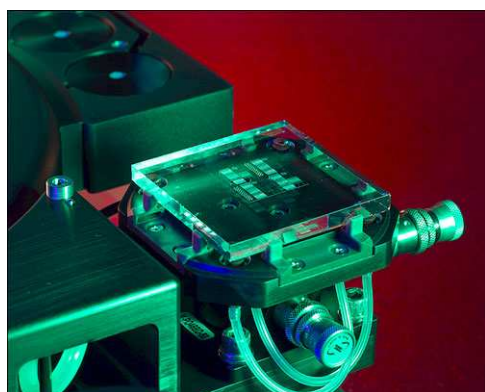


linee ad L da 30nm create con l'imprint lithography

Intel crede che la Legge di Moore, con sostanziali sviluppi tecnologici, possa rimanere valida per almeno un altro decennio. Tra il 2015 e il 2020 ci sarà un passaggio graduale dal silicio ad altri materiali o, secondo altre ipotesi, ad una loro combinazione, come sostiene Paolo Gargini, direttore del settore Technology Strategy di Intel.

Altri, come ZettaCore, Nantero e Molecular Imprints, stanno investendo su soluzioni radicalmente diverse, tenendo conto anche del fatto che individuare *una* soluzione potrebbe fruttare miliardi di dollari in concessioni

di licenze e royalties se i concorrenti avessero convenienza nell'adottare quel nuovo standard.



*nell'imprint lithography un template trasparente è usato come stampo per creare il tracciato di un circuito su un wafer di silicio*

“I progressi finora compiuti sono impressionanti. Nel 1955 la produzione annua di transistor poteva essere misurata in milioni. Nel 2003 l'ordine di grandezza della produzione era di  $10^{30}$ ” ha detto Dan Hutcheson, CEO di VLSI Research. Nel 1954 il prezzo medio di un transistor era \$5,52. Nel 2004 il costo medio era 191 miliardesimi di dollaro.

Va inoltre tenuto conto della complessità degli strumenti necessari alla produzione. Nel 1957 i tran-

sistors potevano essere dipinti in cera con un pennello in pelo di cammello da 10 cents. Oggi le macchine litografiche costano oltre 20 milioni di dollari, mentre le fabbriche valgono diversi miliardi.

Fino a circa 22 nm le tecniche operative sono state definite in modo più o meno preciso.

Per i 65 nm si sfrutta la *litografia ad immersione*, dove i circuiti vengono disegnati sul chip con un laser mentre il wafer è immerso in acqua depurata. L'acqua rifrange la luce, permettendo di disegnare circuiti più sottili.

Fino ai 45 nm si possono operare delle revisioni alle macchine litografiche.

Dai 32 nm, la fotolitografia va sostituita con altro, come l'*impiantazione molecolare* o l'*EUV, Extreme Ultraviolet*, con macchine che vanno dai 10 ai 50 milioni di dollari.

Per i 22 nm ci si possono aspettare nuove tecnologie, come i nanotubi in silicio ma, come dice Theis di IBM, serviranno svolte radicali nel modo di produrre. I chips a tre dimensioni permetterebbero agli ingegneri di continuare ad aumentare la densità senza necessariamente cambiare materiali, sebbene la loro

fattibilità sia tuttora incerta.

Le previsioni sulla morte della Legge di Moore sono state errate molte volte. Lo stesso Moore pensava che il trend si sarebbe interrotto a 250 nm, una soglia superata nel 1997.

“Sono ottimista sulla creatività delle persone, che continua a sorprendermi,” ha detto Stork, di Texas Instruments. “Piuttosto, sono cauto sulla possibilità che ad un certo punto l’economia e la fisica si trovino in diretto contrasto”.

## 5.2 Ai confini della legge

In un’intervista del 13 Aprile 2005, nella ricorrenza dei quarant’anni dalla pubblicazione della sua legge, Gordon Moore ha affermato che essa non potrà rimanere valida indefinitamente: “Non può continuare per sempre.

Per la natura stessa dei fenomeni descritti da leggi esponenziali, se si continua a spingerli oltre ad un certo punto esplodono.”

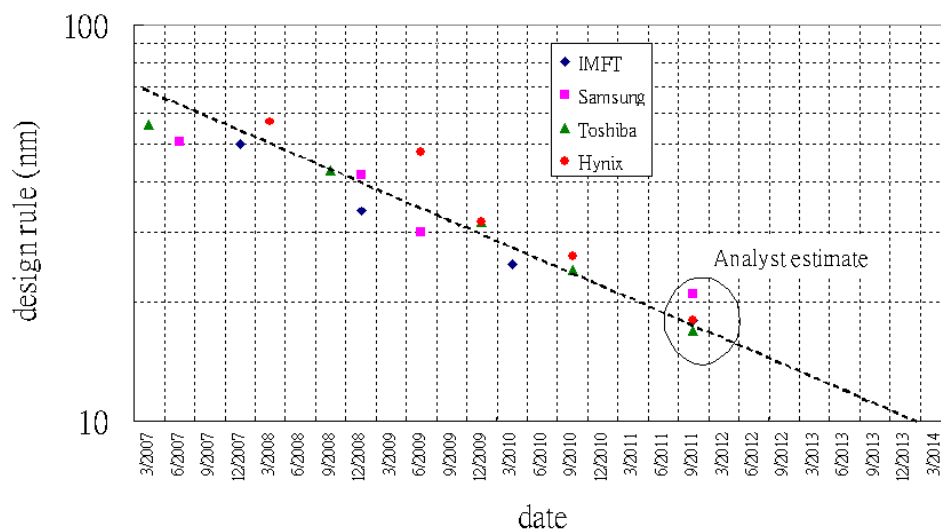
Moore inoltre ha sottolineato che i transistor raggiungeranno i limiti della miniaturizzazione, quando si arriverà a dimensioni con ordine di grandezza atomico:

“In termini di dimensioni [dei transistor], prima o poi raggiungeremo quella dell’atomo, una barriera fondamentale, anche se ci vorranno almeno due o tre generazioni prima che ciò accada. Questo comunque è l’orizzonte più lontano che abbiamo mai potuto osservare. Abbiamo altri dieci o vent’anni prima di raggiungere il limite fondamentale. E a quel punto si sarà probabilmente in grado di produrre chips più grandi, con miliardi di transistor.”

Riguardo a quale sarebbe potuta essere l’evoluzione dell’informatica senza la Legge di Moore, Gordon ha ricordato come all’inizio l’impatto non fosse stato notevole, almeno fino all’entrata nel mercato delle memorie da parte dei giapponesi. L’industria sembrava muoversi senza orientamento, mentre i nuovi arrivati mostrarono quanto fosse efficiente seguire una guida quale si è poi rivelata essere la Legge di Moore. [Dubash2005]

Egli inoltre non ritiene affatto che la nanotecnologia rimpiazzerà l’elettronica in un prossimo futuro:

“I circuiti integrati sono stati il risultato di investimenti cumulativi pari ad oltre \$100 miliardi e un rimpiazzo, partendo da una



*L'andamento dello sviluppo per le memorie flash tipo NAND*

piccola base qual è quella dell'attuale nanotecnologia, è improbabile. L'elettronica è un'industria matura e si sta già operando ben sotto i 100 nm, soglia che sembrava essere prettamente di competenza della nanotecnologia. C'è differenza tra fare macchine piccole e collegarne insieme miliardi. La nanotecnologia avrà di certo un impatto, ma non al punto da sostituire l'elettronica.

Costruire a partire dal fondo, atomo per atomo, deriva da una diversa ottica. Non si tratta di un rimpiazzo dei ICs.”

Infine, chiedendogli se avesse delle altre nuove leggi per i prossimi quarant'anni, Moore ha risposto: “Preferisco adagiarmi sugli allori! Non sono più abbastanza vicino alle novità del settore da poter fare nuove previsioni. Molte cose sono state definite “Seconda Legge di Moore”, ma non posso prendermi il merito per nessuna di queste.”

**Quantum tunnelling.** Il processo di produzione a 16 nm, atteso - con stime conservative - per il 2018, sembra essere un limite fondamentale, o quasi. Anche secondo i ricercatori di Intel, da sempre tra i pareri più ottimistici. La strategia finora adottata per rispettare la Legge di Moore, ovvero la riduzione delle dimensioni dei transistor, è stata ridiscussa all'ultimo *International Technology Roadmap for Semiconductors* (ITRS), tenutosi nel 2003 a Taiwan. L'ITRS, che comprende diverse organizzazioni, come

la Semiconductor Industry Association, delinea le sfide e il calendario di massima dell'industria per i successivi 15 anni.

Il principale problema che i produttori di chips si trovano ad affrontare è il controllo, dato che l'affidabilità e la robustezza dei dati prodotti o immagazzinati dai transistors dipende dal controllo di gate e canale. Quando la lunghezza del gate scende sotto i 5 nm (chip realizzato con processo a 16 nm), si verifica l'*effetto tunnel*: gli elettroni passano spontaneamente attraverso il canale, anche quando non viene applicata alcuna tensione al gate, a causa dell'eccessiva vicinanza di source e drain.

Quando questi chips inizieranno ad essere prodotti è ancora materia di dibattito. I produttori comunque hanno recentemente iniziato a ritardare l'introduzione di nuovi processi. Utilizzando un calendario con generazioni di tre anni anzichè due, i chips con gate da 5 nm non appariranno prima del 2018-2019, con una barriera pressochè invalicabile per il 2021.

Gli effetti di *tunnelling*, ha detto Paolo Gargini, si verificheranno a prescindere dalla chimica dei materiali utilizzati nei transistors. Molti ricercatori infatti hanno erroneamente predetto, nel corso degli anni, la fine della Legge di Moore, commettendo però l'errore di estrapolare esclusivamente sulla base dei materiali esistenti. I progettisti, sia di Intel che di AMD, continuano invece a provare nuove combinazioni di materiali e strutture nei semiconduttori, come ad esempio il rimpiazzo dei gates in silicio con gates metallici nella produzione a 45 nm (gates da 18 nm).

Gargini continua dicendo che si potrebbe forse arrivare anche ai 4 nm, ma a quel livello i problemi di energia necessaria (e conseguente dissipazione del calore prodotto) sarebbero praticamente ingestibili:

“Dal punto di vista dell'energia complessiva del sistema, non puoi ingannare madre natura”.

Infine, anche risolvendo il problema del tunnelling e del consumo di energia, i transistors raggiungeranno il limite quando il gate arriverà ad una lunghezza di 1,5 nm, valore che deriva da un calcolo che i ricercatori hanno fatto esaminando qual è la più piccola *well* dalla quale un elettrone può essere estratto. Un transistor con un tale gate potrebbe però essere strutturato non più orizzontalmente, bensì verticalmente.

Ai confini di cosa la teoria permette potenzialmente di fare, esiste poi l'idea di *riusare gli elettroni*. Nelle attuali architetture, gli elettroni viaggiano da source a drain e poi vengono distrutti. Riciclandoli, si potrebbero eseguire molti più calcoli.

I nanotubi in carbonio e i nanofili in silicio sono un'altra alternativa. I transistors realizzati con questi materiali avrebbero infatti dimensioni compatibili, con un consumo di energia decisamente ridotto. Queste esotiche strut-



ture avranno forse un futuro in tecnologia CMOS, con aumenti di prestazioni o forse semplificazione dei processi di produzione. [Kanellos2003]

**Capacità totale di information-processing.** I limiti fisici del calcolo sono stati accuratamente analizzati negli scorsi dieci o vent'anni con indagini teoriche sul possibile impatto che i processi della meccanica quantistica potrebbero avere su di esso, iniziando a presentarsi possibili configurazioni sperimentali realizzabili.

In un articolo del 10 Maggio 2004 intitolato “*Universal Limits on Computation*”, Lawrence M. Krauss e Glenn D. Starkman hanno dimostrato che l'accelerazione dell'Universo osservata può definire un limite universale sulla quantità totale di informazione che può essere immagazzinata e processata nel futuro, ponendo un limite ultimo alla tecnologia futura di ogni civiltà, incluso un limite di tempo alla Legge di Moore, pari a circa 600 anni. I limiti che ne derivano sono rigorosi e includono le possibilità che i calcoli avvengano sia in modo locale che distribuito. [Krauss,Starkman2004]

### 5.3 I futuristi e la singolarità tecnologica

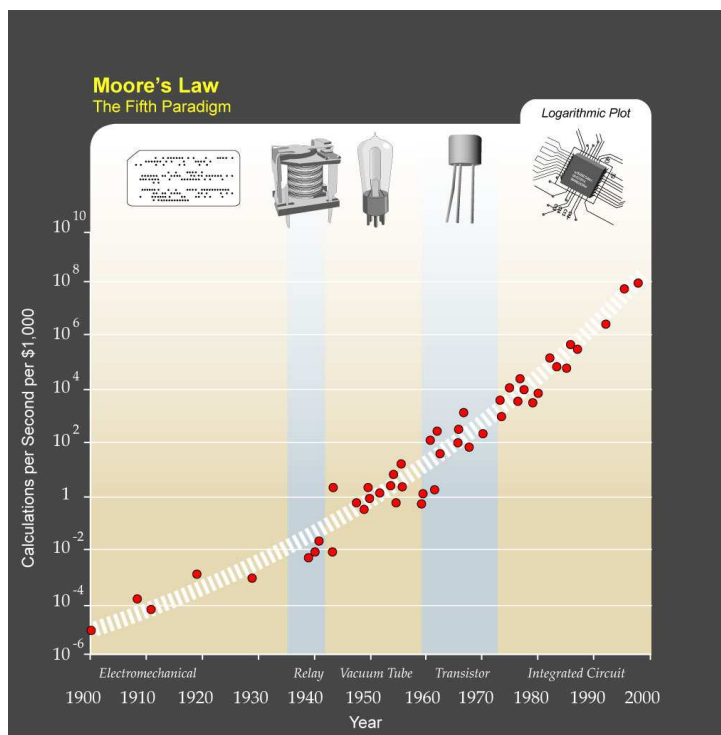
I futuristi come Ray Kurzweil, Bruce Sterling e Vernor Vinge credono che il miglioramento esponenziale descritto dalla Legge di Moore porterà infine ad una *singolarità tecnologica*: un punto, previsto nello sviluppo di una civilizzazione, dove il progresso tecnologico accelera oltre la capacità di comprendere e prevedere degli esseri umani moderni. La Singolarità può, più specificamente, riferirsi all'avvento di una intelligenza superiore a quella umana, e ai progressi tecnologici che, a cascata, si presume seguirebbero, salvo un importante aumento artificiale delle facoltà intellettive di ciascun individuo.

Sebbene Kurzweil concordi sul fatto che dal 2019 le attuali tecniche fotografiche diventeranno obsolete, egli sostiene che ciò non significherà la fine della Legge di Moore: “La Legge di Moore non è stato il primo, ma il quinto paradigma sulla previsione dell'aumento del rapporto prezzo/prestazioni. Subentreranno certamente nuove scoperte in grado di rimpiazzare ICs e le attuali tecnologie”.

Lloyd, professore di ingegneria meccanica al MIT che si occupa di meccanica quantistica, ha dimostrato come la capacità di calcolo potenziale di un chilogrammo di materia equivalga a  $\frac{\pi E}{h}$ , dove  $E$  è l'energia e  $h$  la costante di Planck. Il valore che ne risulta è decisamente grande, circa  $5,0 \cdot 10^{50}$  operazioni al secondo.

Egli ritiene che la crescita esponenziale della Legge di Moore proseguirà oltre l'uso dei circuiti integrati, verso tecnologie che condurranno alla *singo-*

larità tecnologica. La Legge dei Profitti Accelerati, o *Accelerating change*<sup>4</sup>, descritta da Ray Kurzweil ha in molti casi alterato la percezione generale



*Estensione di Kurzweil della Legge di Moore*

della Legge di Moore. È infatti un'idea comune che la Legge di Moore faccia previsioni riguardanti tutte le forme di tecnologia, mentre si è finora rivelata valida solo nell'ambito dei circuiti a semiconduttori. Tuttavia molte persone, tra cui Richard Dawkins, hanno osservato che la legge di Moore si applica - almeno per deduzione - ad ogni problema inerente al digital computing ed è di per sé una questione legata all'universo digitale.

Ad ogni modo lo stesso Moore, che non ha mai dato alla sua legge un significato tanto ampio quanto quello che deriva dalle teorie di alcuni futuristi, una volta ha detto, scherzando:

“È stato definito *Legge di Moore* tutto ciò che varia con andamento esponenziale. Vi dico, se Gore ha inventato Internet, io ho inventato l'esponenziale!”<sup>5</sup>

<sup>4</sup>negli studi futuristici e in Storia della Tecnologia, è un incremento percepito nella velocità dei progressi tecnologici attraverso la storia

<sup>5</sup>Moore qui si riferisce ironicamente a una diffusa affermazione secondo cui l'allora vicepresidente Al Gore avrebbe detto di aver inventato Internet. Il fatto, ovviamente, si basava su un malinteso.

# Capitolo 6

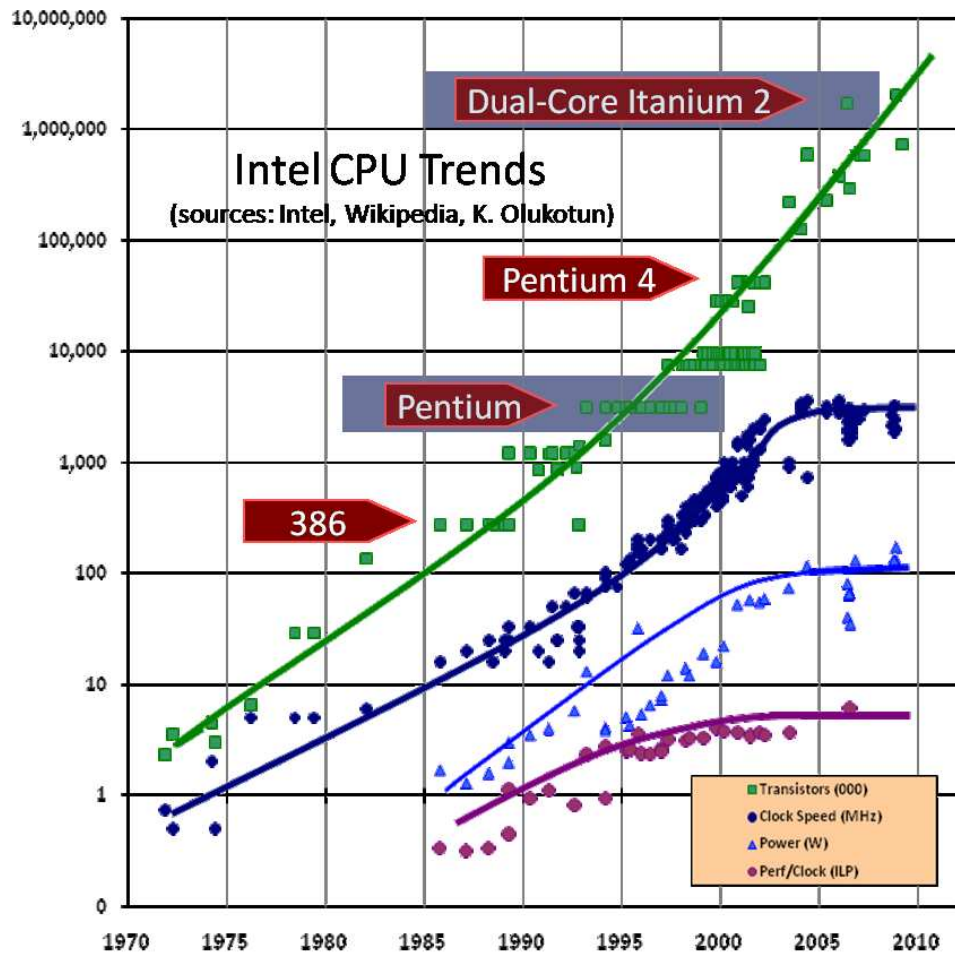
## Conseguenze e limiti

Come è stato evidenziato parlando del TGMLC, la crescita esponenziale del numero di transistors nei processori non sempre si è tradotta in aumenti altrettanto esponenziali delle performances complessive dei sistemi. Questo perchè la CPU non è l'unico componente e, di conseguenza, va analizzata tenendo conto delle diverse interazioni.

**Colli di bottiglia.** Con la disparità creatasi tra le prestazioni delle CPUs e gli altri componenti (velocità di accesso ai dischi, memorie...), i tempi di latenza sono sempre più spesso un autentico *collo di bottiglia* per il sistema, con hardware e software ad alte prestazioni progettati appositamente per ridurne l'impatto: esecuzioni fuori ordine, caching on-chip e prefetching, al costo di un maggior numero di transistors e maggiore complessità; compressione di dati da parte dei databases per ridurre i tempi di lettura da disco, a spese di un utilizzo aggiuntivo del processore per compressione e decompressione.

**Parallelismo.** Il calcolo parallelo si è reso necessario al fine di sfruttare al massimo i risultati ottenuti dalla Legge di Moore. Per anni, i produttori di processori hanno puntato sulla velocità di clock, ma oggi, per poter gestire la dissipazione del calore della CPU, la miglior soluzione si è rivelata essere il chip multi-core, sebbene ciò richieda software scritti in multi-thread, in grado di sfruttare tutti i cores contemporaneamente.

**Obsolescenza.** Un'implicazione negativa della Legge di Moore è l'obsolescenza: i rapidi miglioramenti delle tecnologie portano infatti ad un altrettanto rapido invecchiamento di quelle precedenti. Questo ha due principali conseguenze. Da un lato, la sempre maggior quantità di dati personali digitalizzati porta a rischi sempre maggiori in termini di sicurezza, a causa di



*aumento di performances non coerente per diversi fattori;  
ultimo aggiornamento dati Agosto 2009 [Sutter2005]*

una non corretta distruzione dei dati stessi nel momento in cui gli apparati di gestione e archiviazione vengono sostituiti, aggiornati o smantellati. In secondo luogo, l'utilizzo nei componenti tecnologici di molti materiali, con diverse caratteristiche a livello di riciclaggio o smaltimento e con diversi livelli di inquinamento ambientale, porta il problema della rapida obsolescenza in primo piano, con un richiamo obbligato all'internalizzazione di questi costi da parte delle aziende produttrici e ad una maggior consapevolezza da parte dei consumatori.

# Capitolo 7

## Conclusioni

La Legge di Moore è la storia dell'*information technology* degli scorsi 40 anni. Certamente essa ha dato una grande spinta all'industria dei semiconduttori ma, soprattutto, l'impatto che ha avuto in modo congiunto su computers, comunicazioni, componenti elettronici e industrie del software, ha cambiato il nostro mondo, oltre quanto Gordon Moore prevede in quel breve ma brillante articolo del 1965.

La Legge di Moore ha spesso implicato degli ostacoli, in prima apparenza insormontabili, ma che poi venivano immancabilmente risolti. In questo senso, Moore ha affermato di rivedere oggi la sua legge più bella di quanto non fosse in precedenza:

"Moore's law is a violation of Murphy's law. Everything gets better and better."



# Bibliografia

- [ ] **Moore's Law**  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Moore's\\_law](http://en.wikipedia.org/wiki/Moore's_law)
- [Liddle2006] **The Wider Impact of Moore's Law,**  
[http://www.ieee.org/portal/site/sscs/menuitem.f07ee9e3b2a01d06bb9305765bac26c8/index.jsp?&pName=sscs\\_level1\\_article&TheCat=2165&path=sscs/06Sept&file=Liddle.xml](http://www.ieee.org/portal/site/sscs/menuitem.f07ee9e3b2a01d06bb9305765bac26c8/index.jsp?&pName=sscs_level1_article&TheCat=2165&path=sscs/06Sept&file=Liddle.xml)  
(Settembre 2006)
- [Markoff2005] **It's Moore's Law, but Another Had the Idea First,**  
[http://www.nytimes.com/2005/04/18/technology/18moore.html?\\_r=1&pagewanted=all](http://www.nytimes.com/2005/04/18/technology/18moore.html?_r=1&pagewanted=all)  
(18 Aprile 2005)
- [Moore1965] **Cramming more components onto integrated circuits,**  
Electronics Magazine, Volume 38, Number 8  
(19 Aprile 1965)
- [Feng2003] **Making a Case for Efficient Supercomputing,**  
<http://queue.acm.org/detail.cfm?id=957772>  
(5 Dicembre 2003)
- [\*] **Total Cost of Ownership,**  
[http://it.wikipedia.org/wiki/Total\\_Cost\\_of\\_Ownership](http://it.wikipedia.org/wiki/Total_Cost_of_Ownership)
- [Walter2005] **Kryder's Law,**  
Scientific American Magazine  
(Agosto 2005)
- [Robinson2000] **Speeding Net-Traffic with tiny mirrors,**  
<http://www.eetimes.com/electronics-news/4040776/SPEEDING-NET-TRAFFIC-WITH-TINY-MIRRORS>  
(26 Settembre 2000)

- [Myhrvold2006] **Moore's Law Corollary: Pixel Power,**  
[http://www.nytimes.com/2006/06/07/technology/circuits/07essay.html?\\_r=2](http://www.nytimes.com/2006/06/07/technology/circuits/07essay.html?_r=2)  
(7 Giugno 2006)
- [Kennedy2008] **Fat, fatter, fattest: Microsoft's kings of bloat,**  
<http://www.infoworld.com/t/applications/fat-fatter-fattest-microsofts-kings-bloat-278?page=0,4>  
(14 Aprile 2008)
- [Disco,Meulen1998] **Getting new technologies together: studies in making sociotechnical order [7.3.A],**  
di Cornelis Disco,Barend van der Meulen - ISBN 3-11-015630-X  
(Copyrights 1998)
- [Lemon,Krazit2005] **With chips, Moore's Law is not the problem,**  
<http://www.infoworld.com/t/hardware/chips-moores-law-not-problem-707?page=0,0>  
(19 Aprile 2005)
- [Mallozzi2004] **Building a Sustainable Future for Photomasks,**  
<http://www.rdmag.com/Featured-Articles/2004/06/Building-a-Sustainable-Future-for-Photomasks/>  
(16 Giugno 2004)
- [Geelan2008] **Moore's Law: "We See No End in Sight," Says Intel's Pat Gelsinger,**  
<http://java.sys-con.com/node/557154>  
(1 Maggio 2008)
- [\*\*] **Flops,**  
<http://it.wikipedia.org/wiki/Flops>
- [BBCnews2006] **Chilly chip shatters speed record,**  
<http://news.bbc.co.uk/2/hi/technology/5099584.stm>  
(20 Giugno 2006)
- [Strukov,Snider2008] **The missing memristor found,**  
Nature Magazine, Numero 453  
(1 Maggio 2008)
- [Johnson2010] **Junctionless Transistor Fabricated from Nanowires,**  
<http://spectrum.ieee.org/nanoclast/semiconductors/>



nanotechnology/junctionless-transistor-fabricated-from-nanowires  
(22 Febbraio 2010)

[Kanellos2005] **New Life for Moore's Law - prof. S.Chou (Nanonex),**  
[http://news.cnet.com/New-life-for-Moores-Law/2009-1006\\_3-5672485.html](http://news.cnet.com/New-life-for-Moores-Law/2009-1006_3-5672485.html)  
(19 Aprile 2005)

[Dubash2005] **Moore's Law is dead, says Gordon Moore,**  
<http://news.techworld.com/operating-systems/3477/moores-law-is-dead-says-gordon-moore/>  
(13 Aprile 2005)

[Kanellos2003] **Intel scientists find wall for Moore's Law,**  
<http://news.cnet.com/2100-1008-5112061.html>  
(1 Dicembre 2003)

[Krauss,Starkman2004] **Universal Limits on Computation,**  
<http://arxiv.org/abs/astro-ph/0404510>  
(10 Maggio 2004)

[Sutter2005] **A Fundamental Turn Toward Concurrency in Software,**  
Dr. Dobb's Journal, Numero 30  
(Marzo 2005)