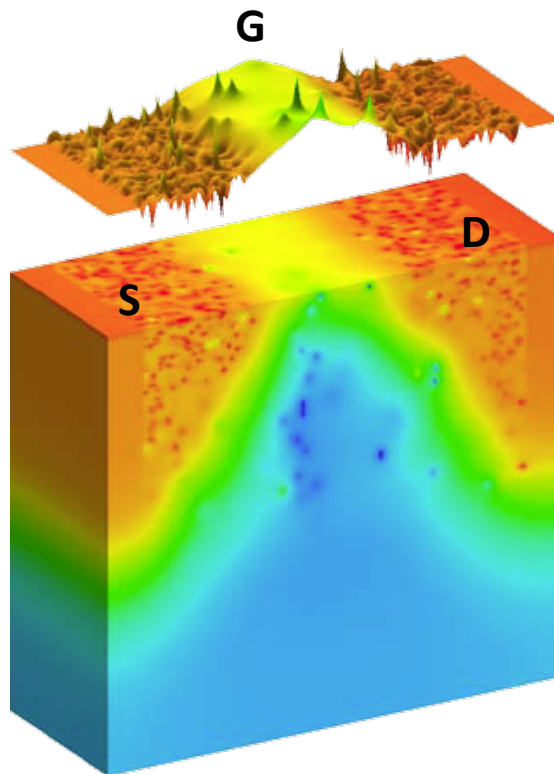
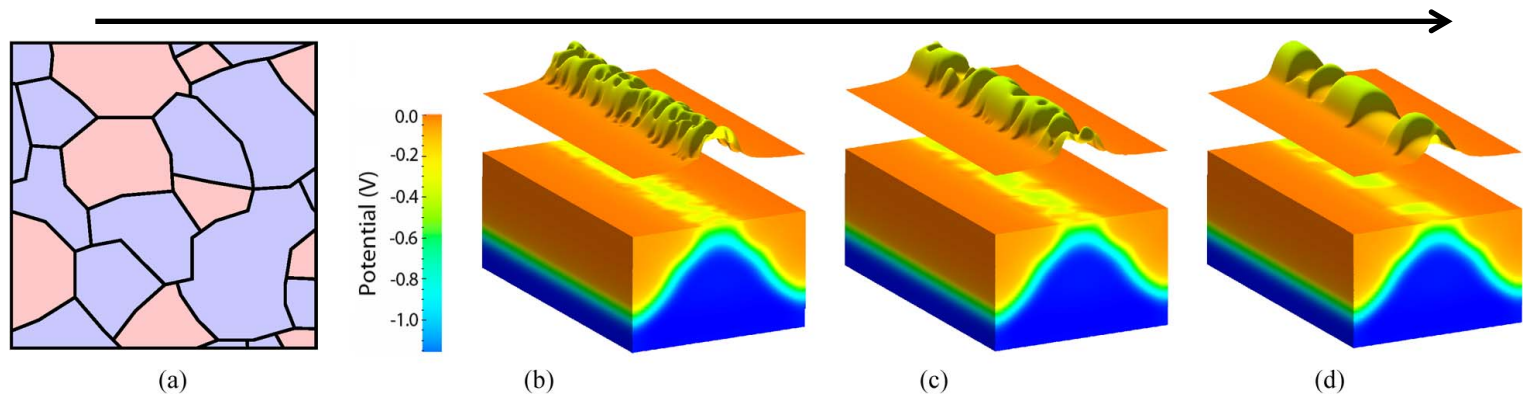
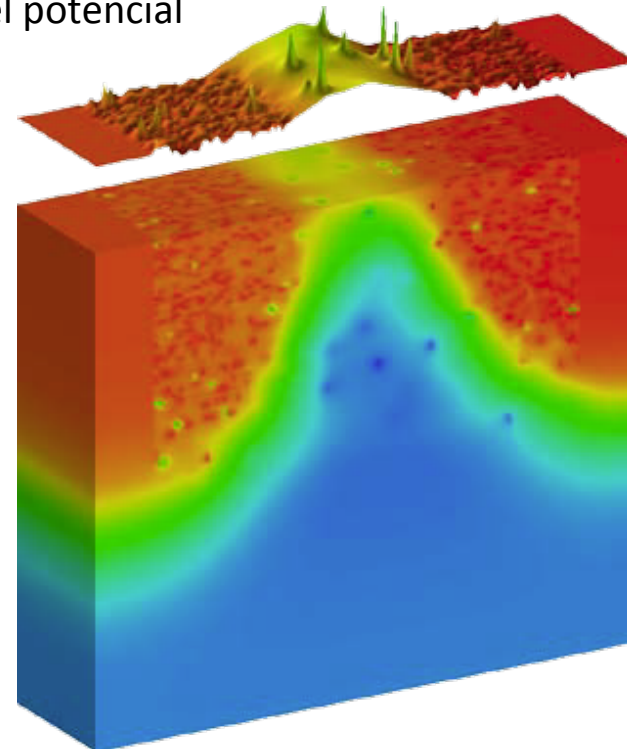


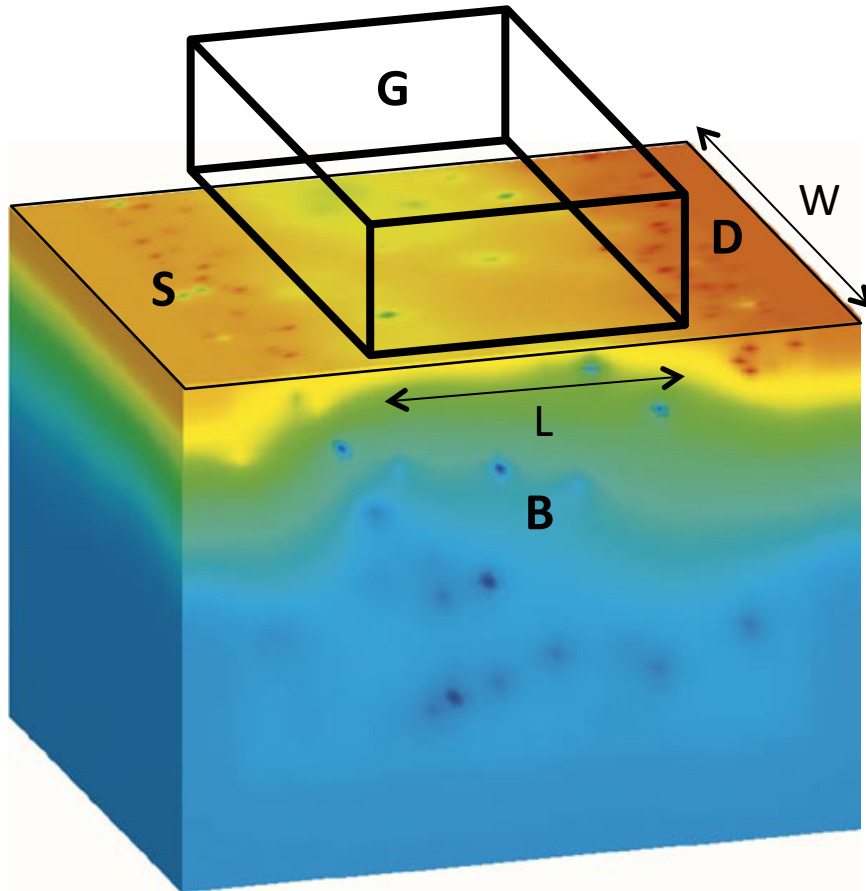
## Tamaño del grano en la compuerta metálica



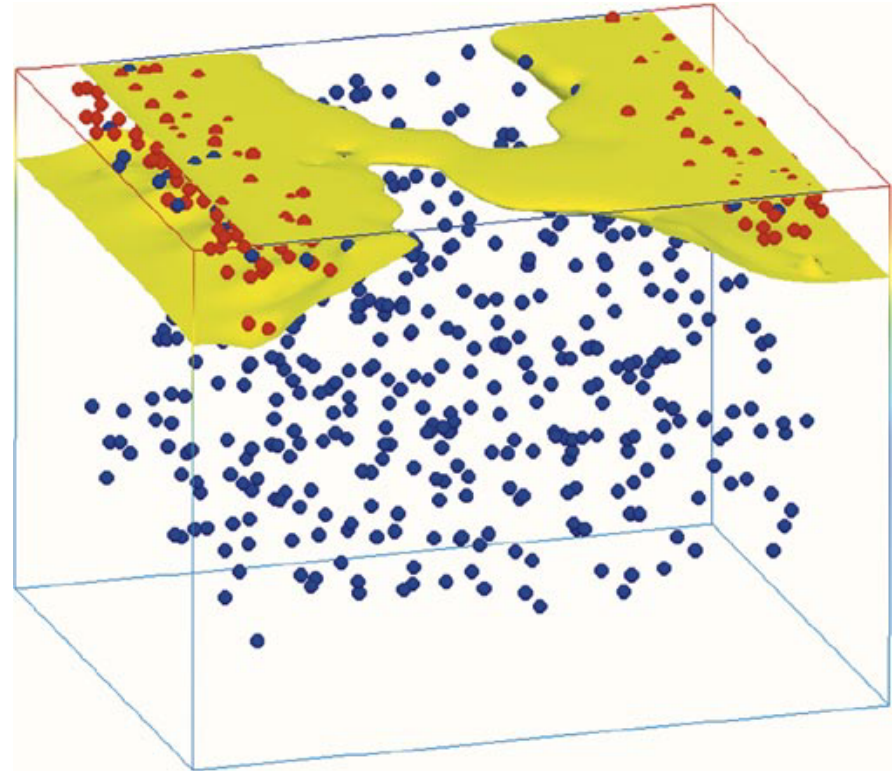
Efecto sobre el potencial



## Variaciones a escala atómica

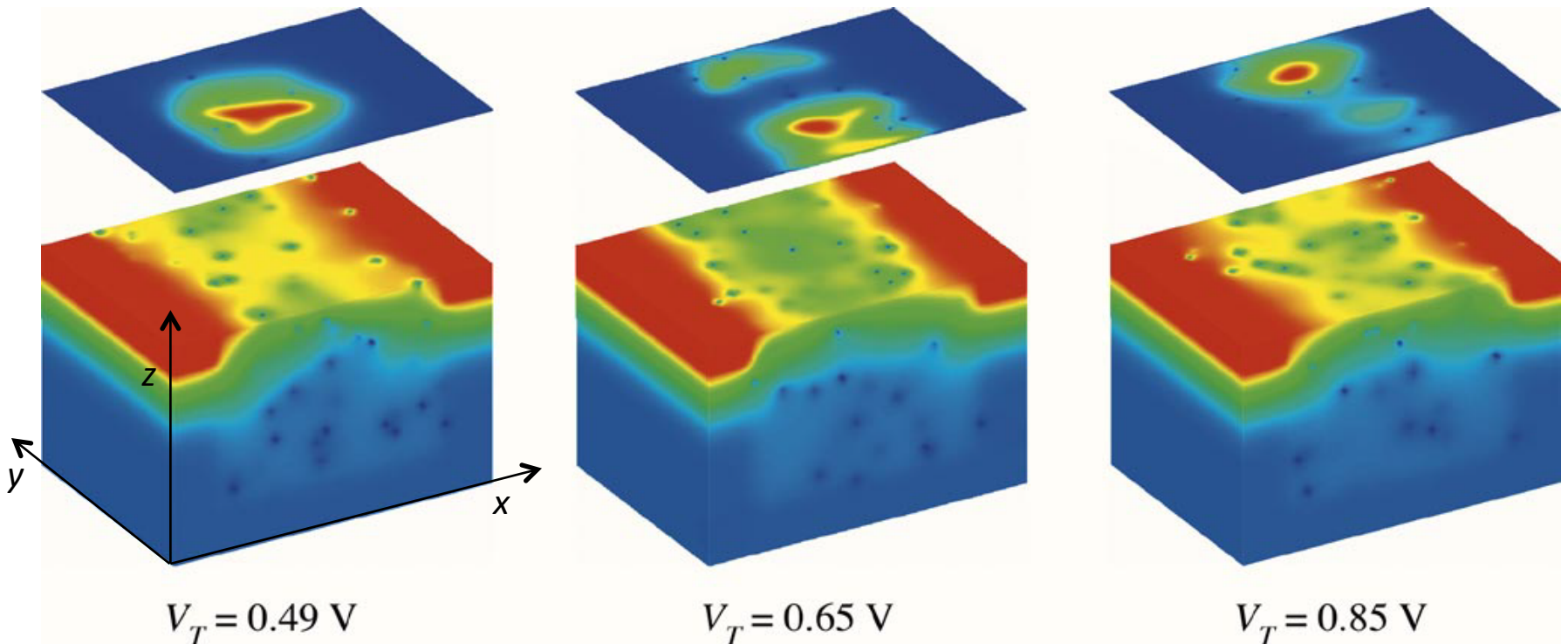
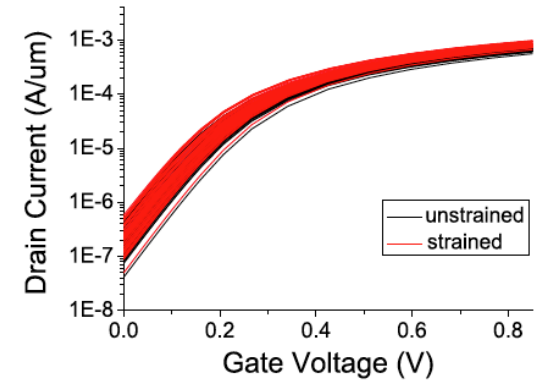
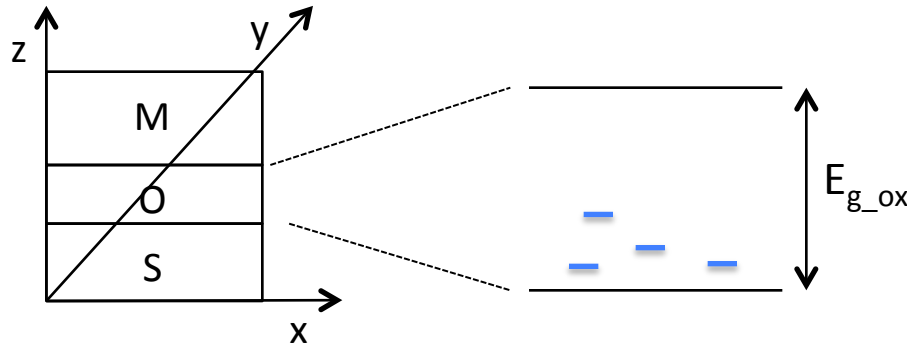


Simulación atomística de la  
distribución de potencial según A.  
Asenov



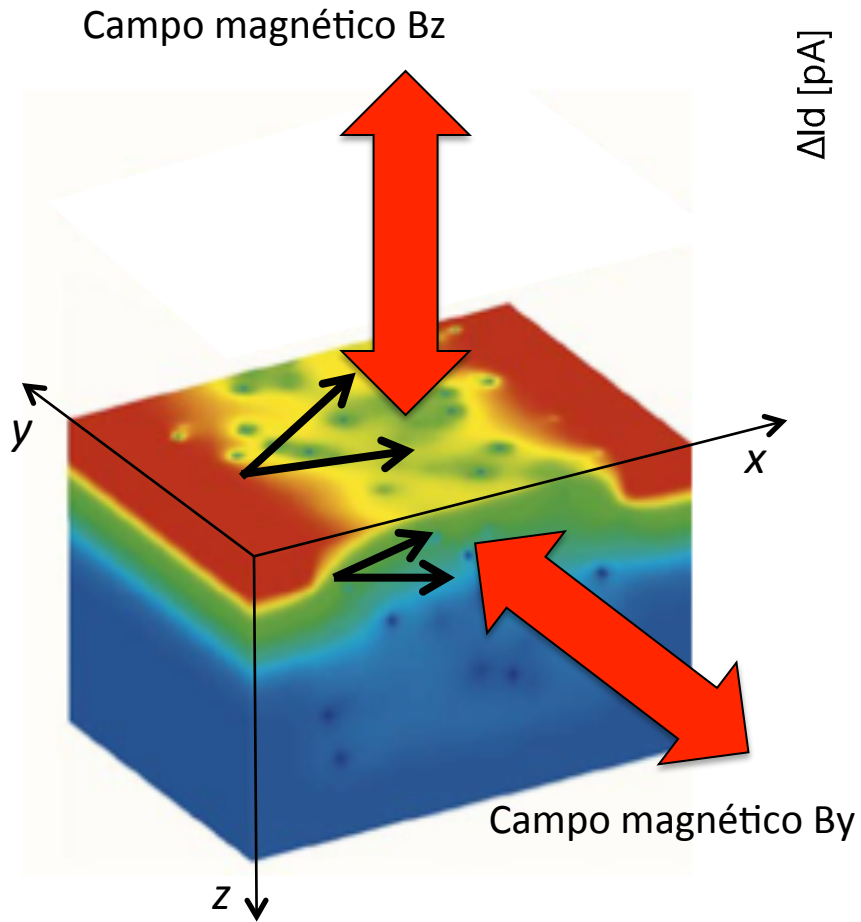
Contornos de equi-distribución de  
carga según A. Asenov

# Variaciones atómicas producen defectos en la interfaz semiconductor-óxido y en el óxido mismo

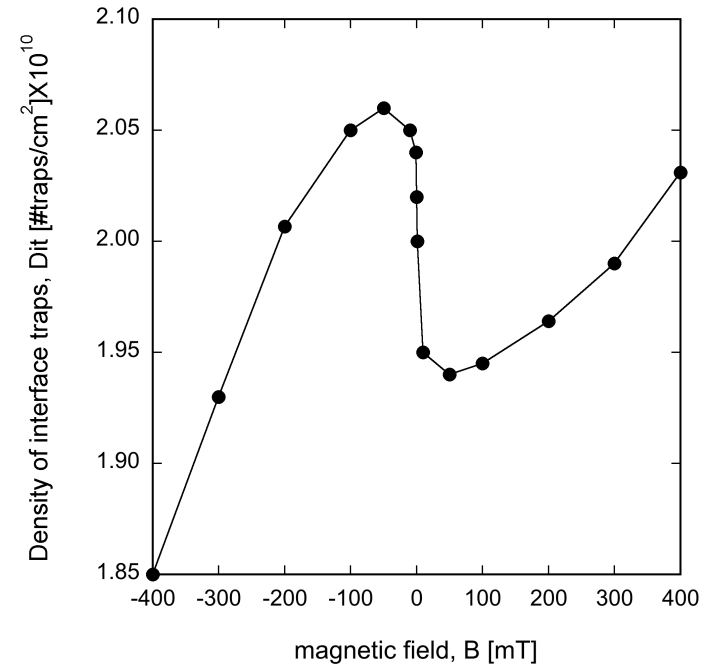
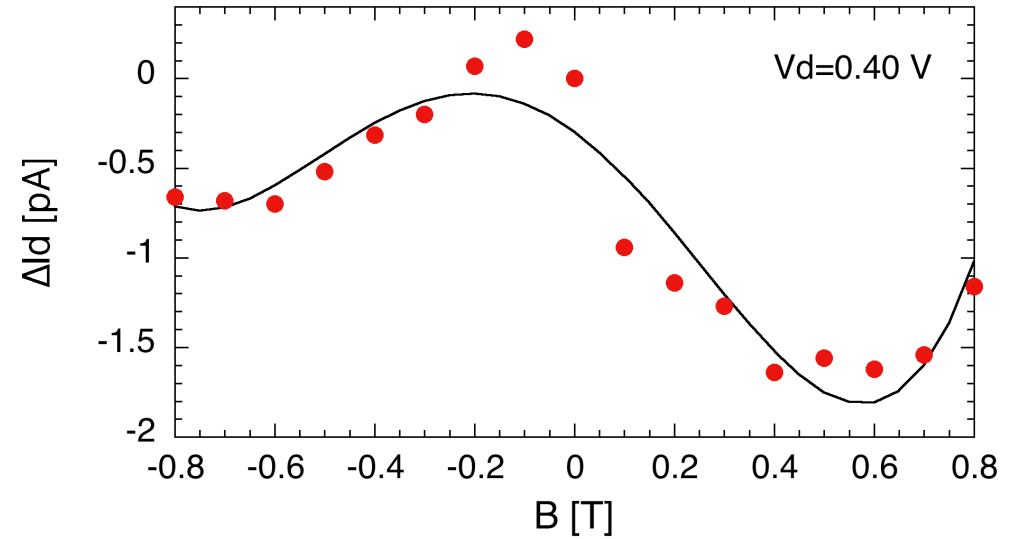


Variaciones en el voltaje de encendido  $V_T$

# Investigación realizada en INAOE

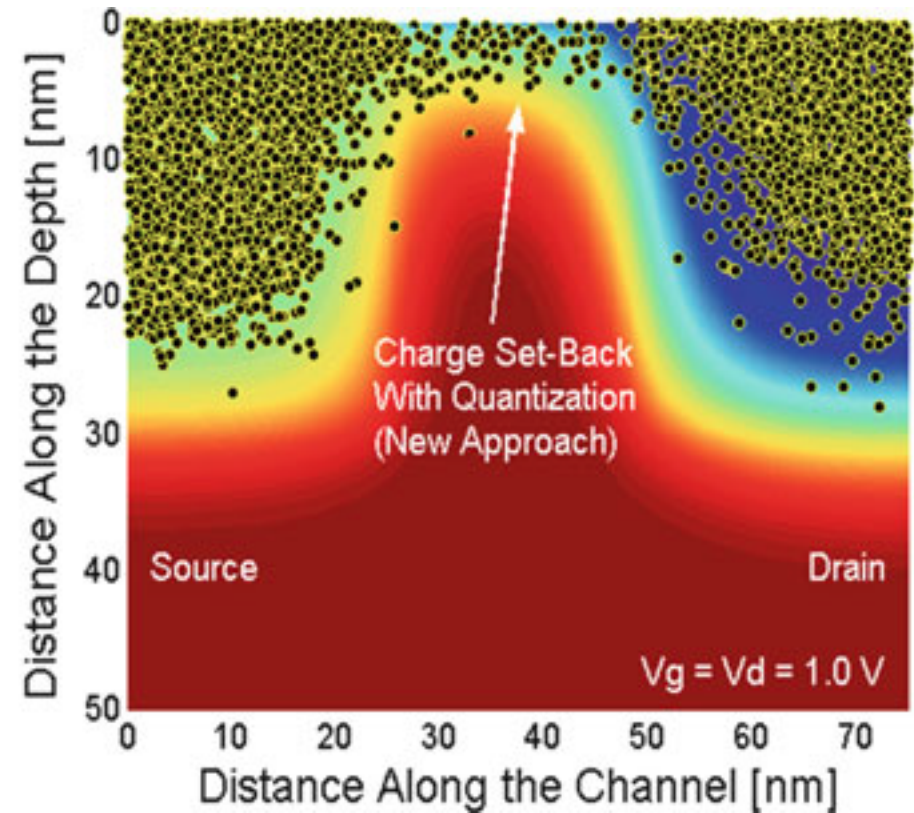
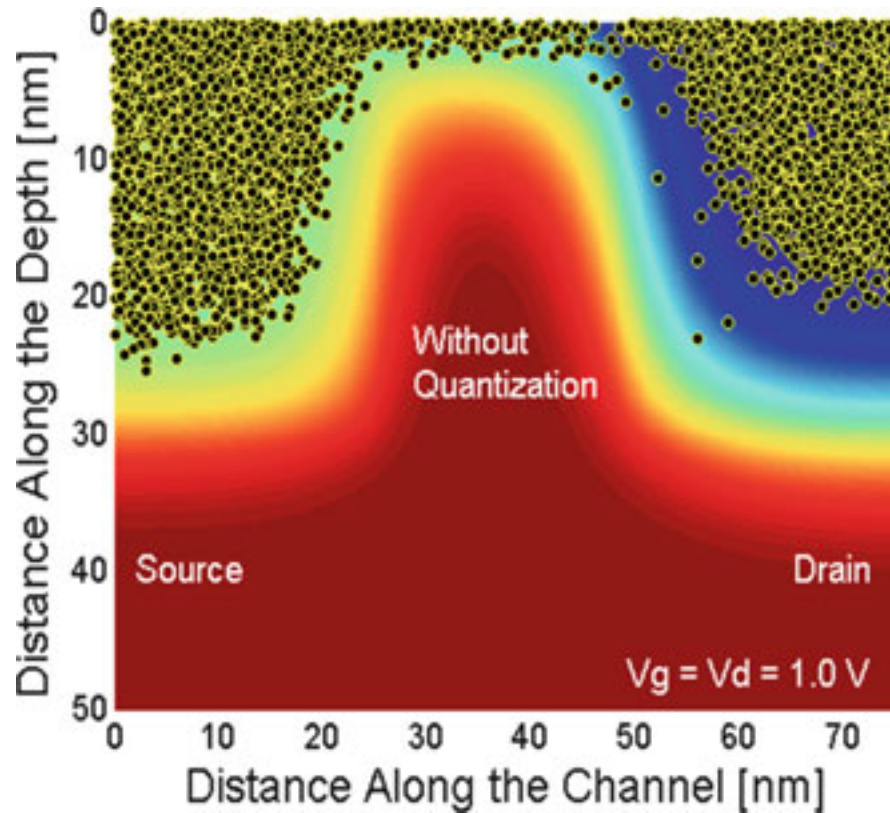


“scanner” electro-magnético





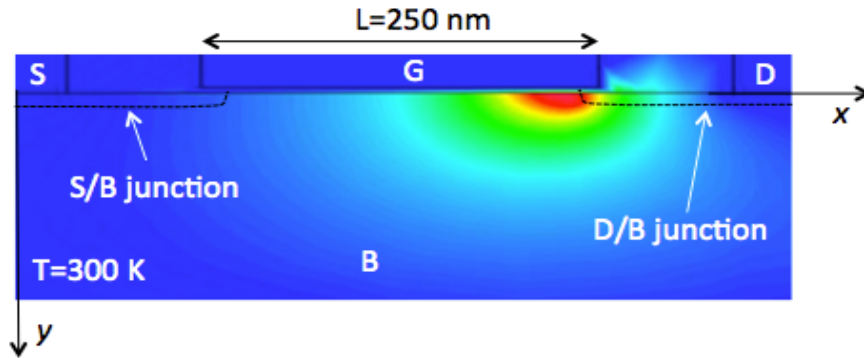
## ...Una simulación mas cercana a la realidad



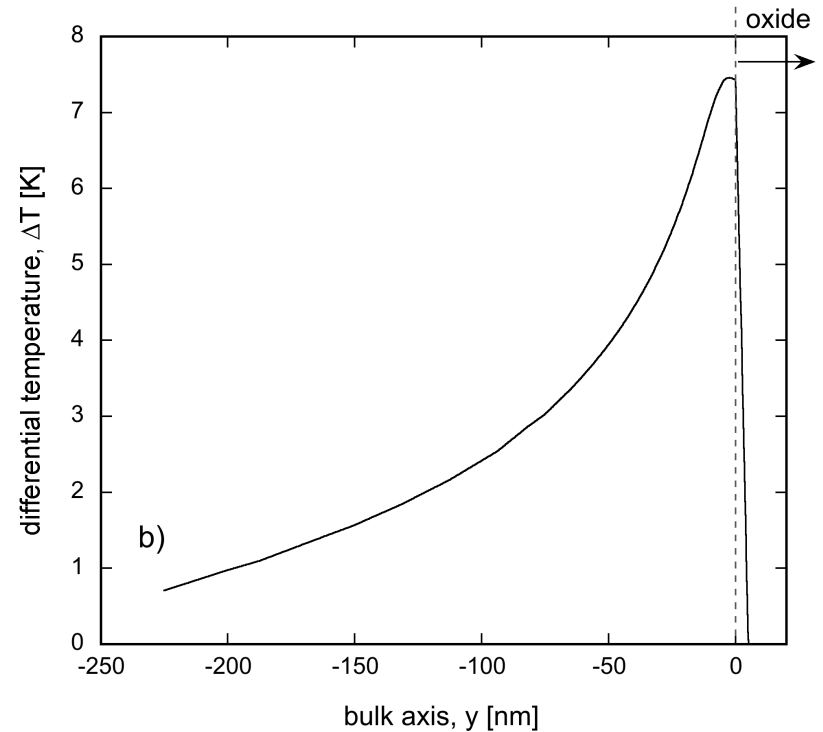
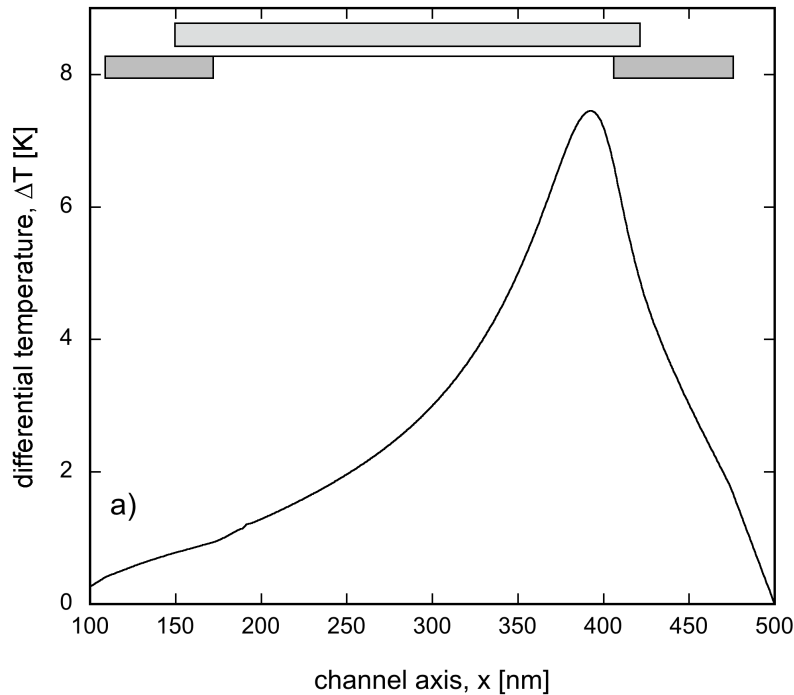
[D. Vasileska, et al]

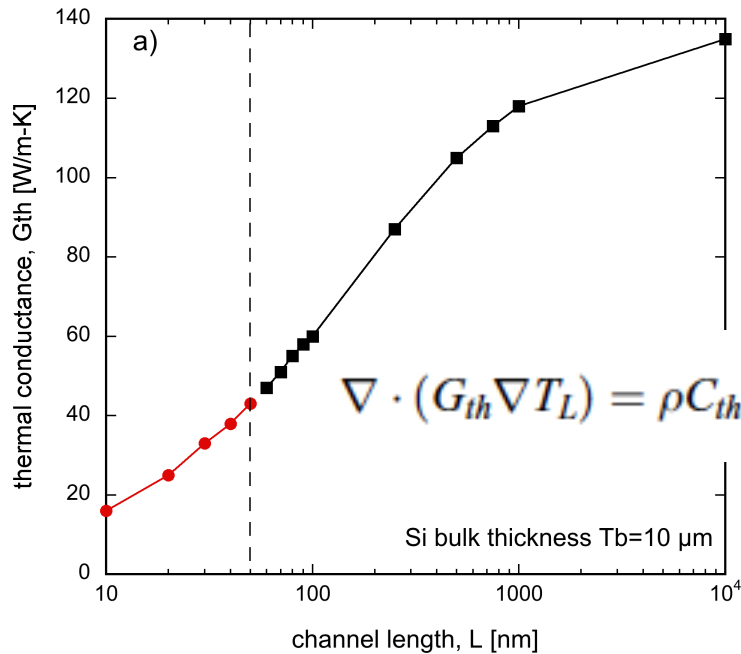
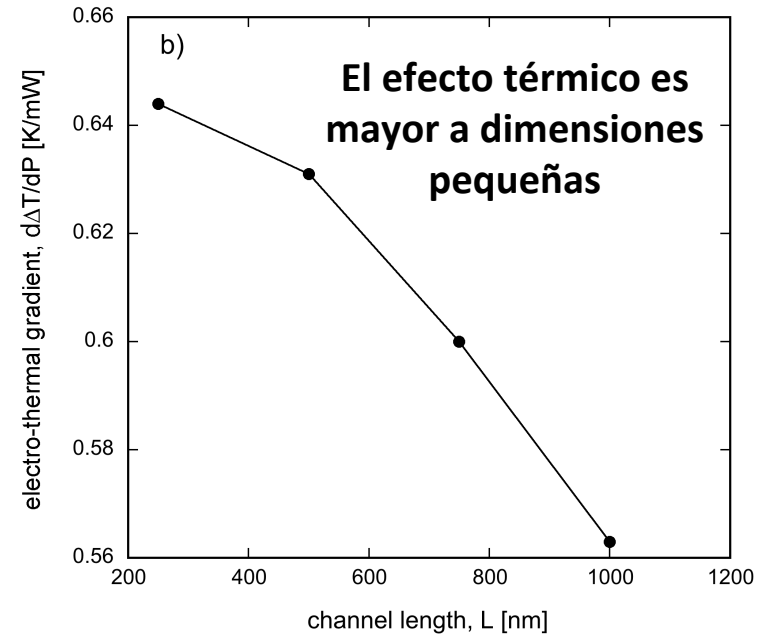
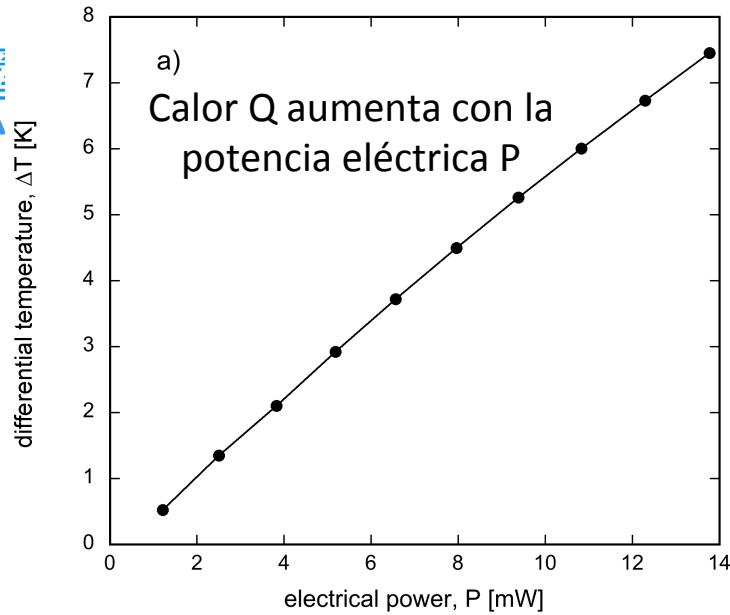
# La complejidad del sistema ya es alta, pero no termina allí...

## Auto-generación de calor



La temperatura interna se incrementa provocando flujo de calor y cambio en el transporte de carga





**La conductancia térmica se reduce conforme el dispositivo se reduce a escala nanométrica**

$$\varepsilon \Delta \varphi = q(n - p - C)$$

$$qR = \nabla \cdot \vec{J}_n - q \frac{\partial n}{\partial t}$$

$$-qR = \nabla \cdot \vec{J}_p + q \frac{\partial p}{\partial t}$$

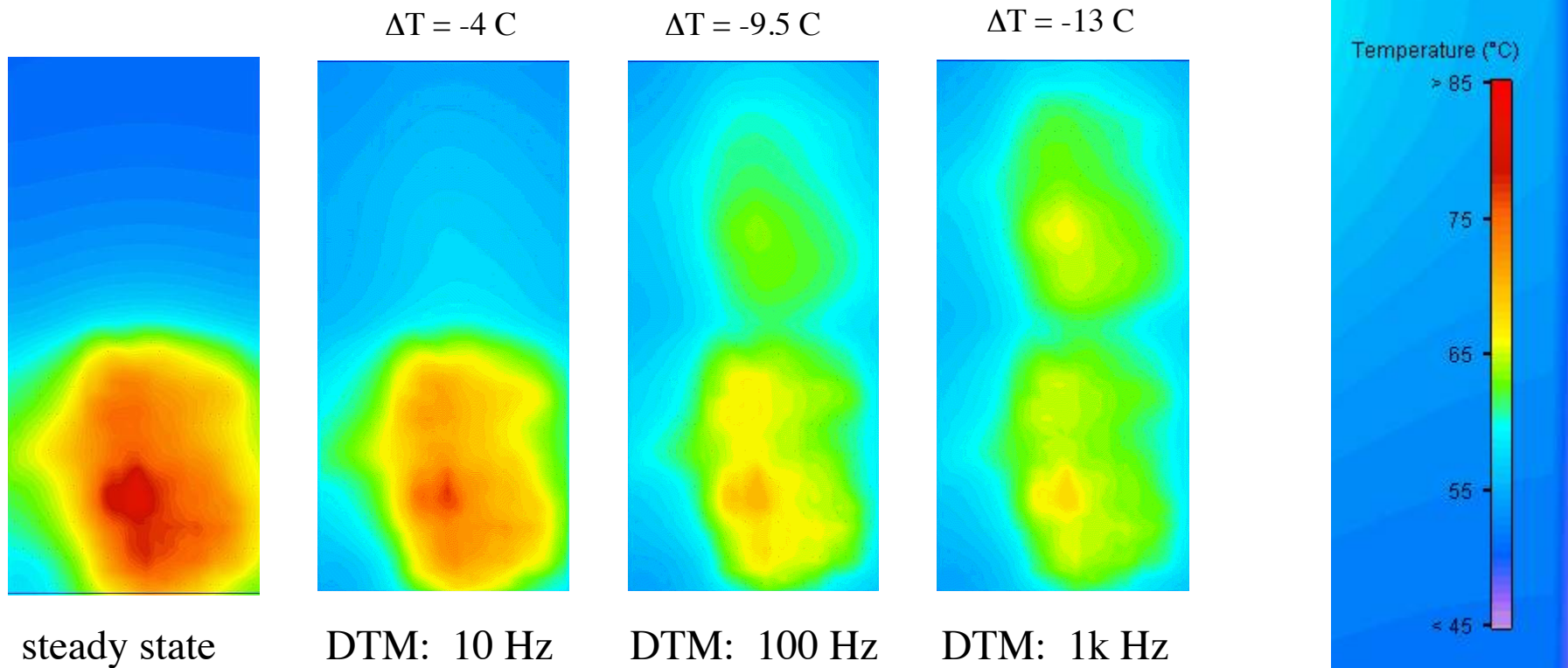
$$\vec{J}_n = q\mu_n n \left[ \nabla \left( \frac{E_c}{q} - \varphi \right) + \frac{kT_L}{q} \cdot \frac{N_c}{n} \nabla \left( \frac{n}{N_c} \right) \right]$$

$$\vec{J}_p = -q\mu_p p \left[ \nabla \left( \frac{E_v}{q} - \varphi \right) - \frac{kT_L}{q} \cdot \frac{N_v}{p} \nabla \left( \frac{p}{N_v} \right) \right]$$

$$\nabla \cdot (G_{th} \nabla T_L) = \rho C_{th} \cdot \frac{\partial T_L}{\partial t} - H$$

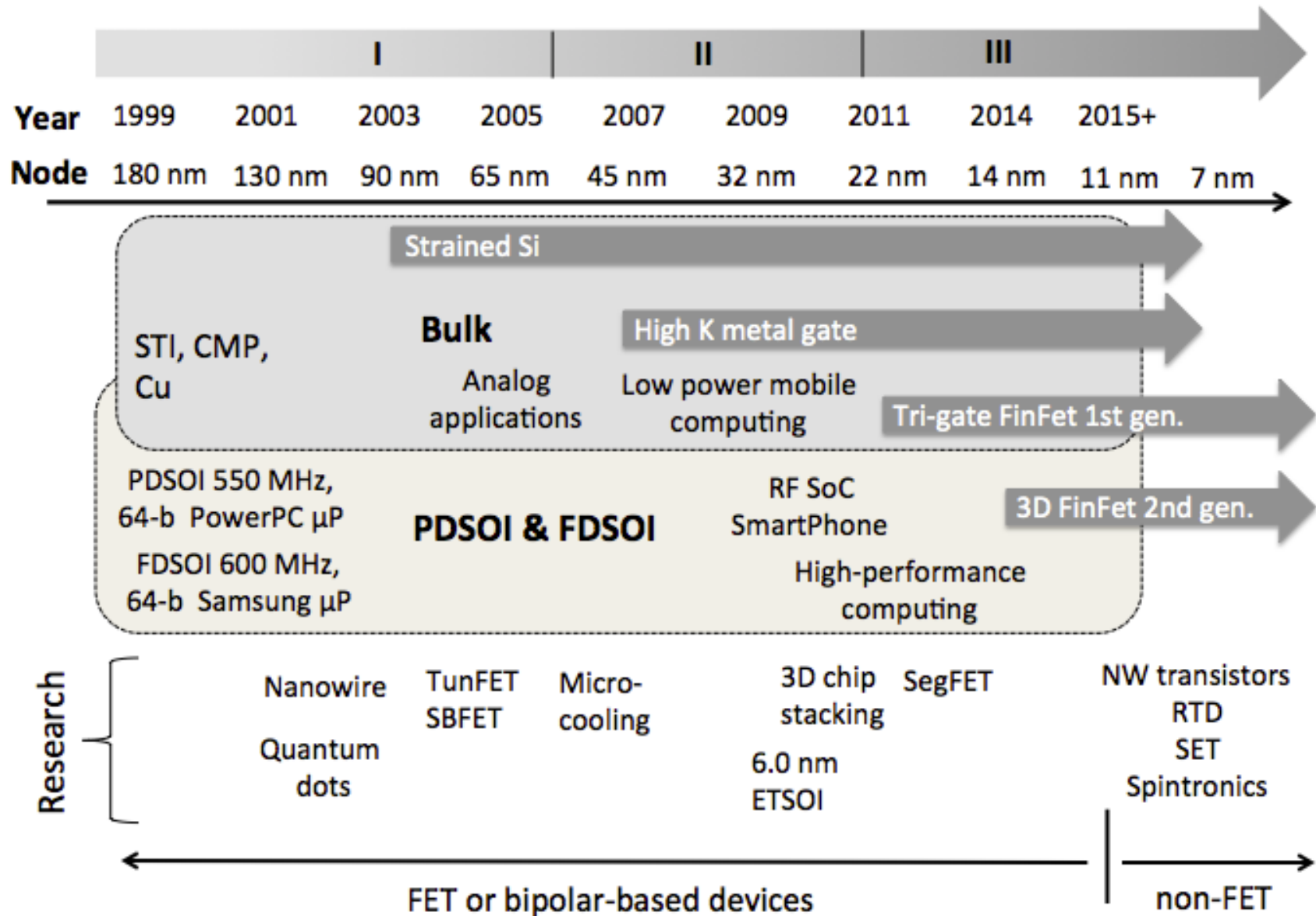
# El efecto “papa caliente”

Conmutación de carga de proceso en un microprocesador dual





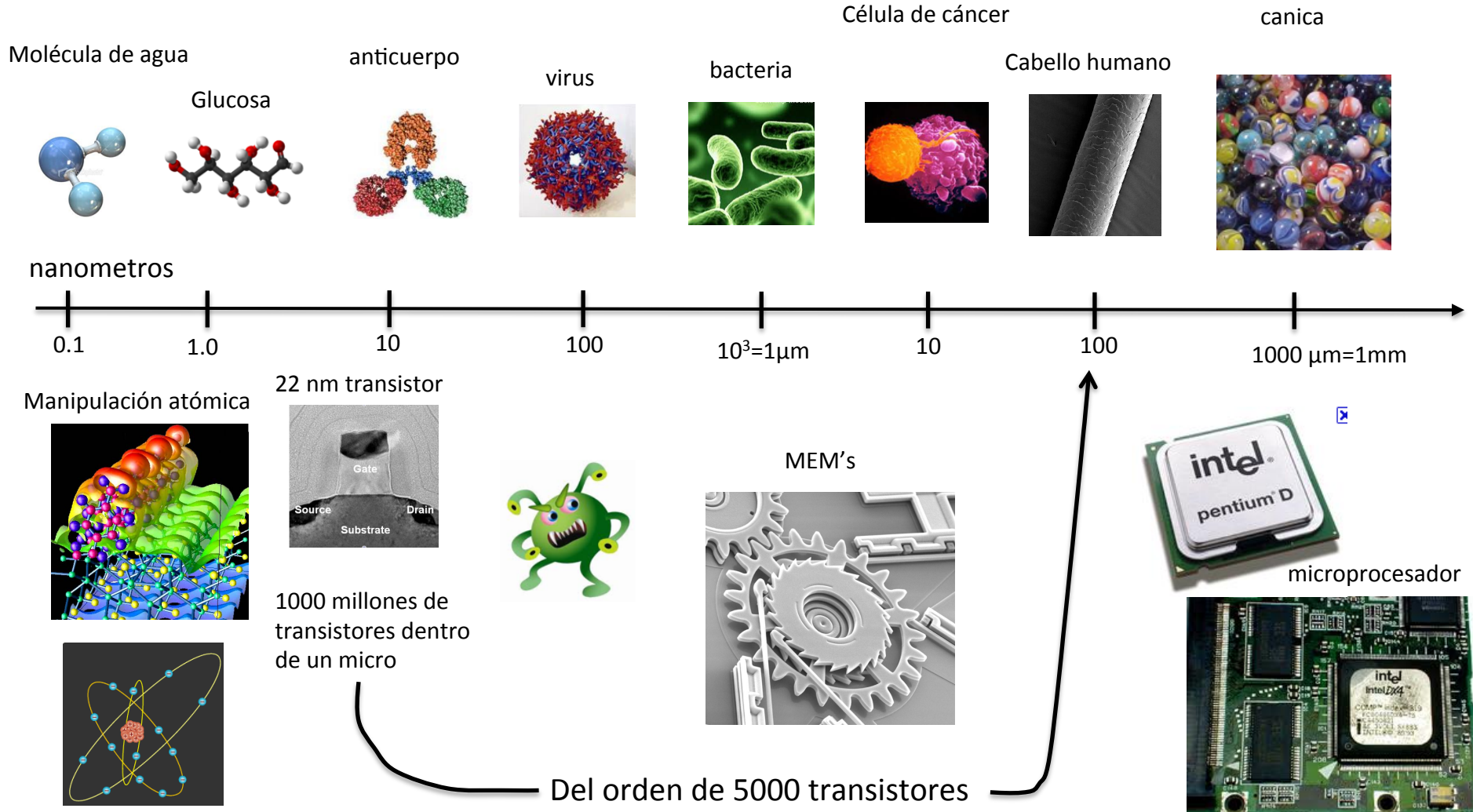
# Evolución de la tecnología de dispositivos/circuitos integrados





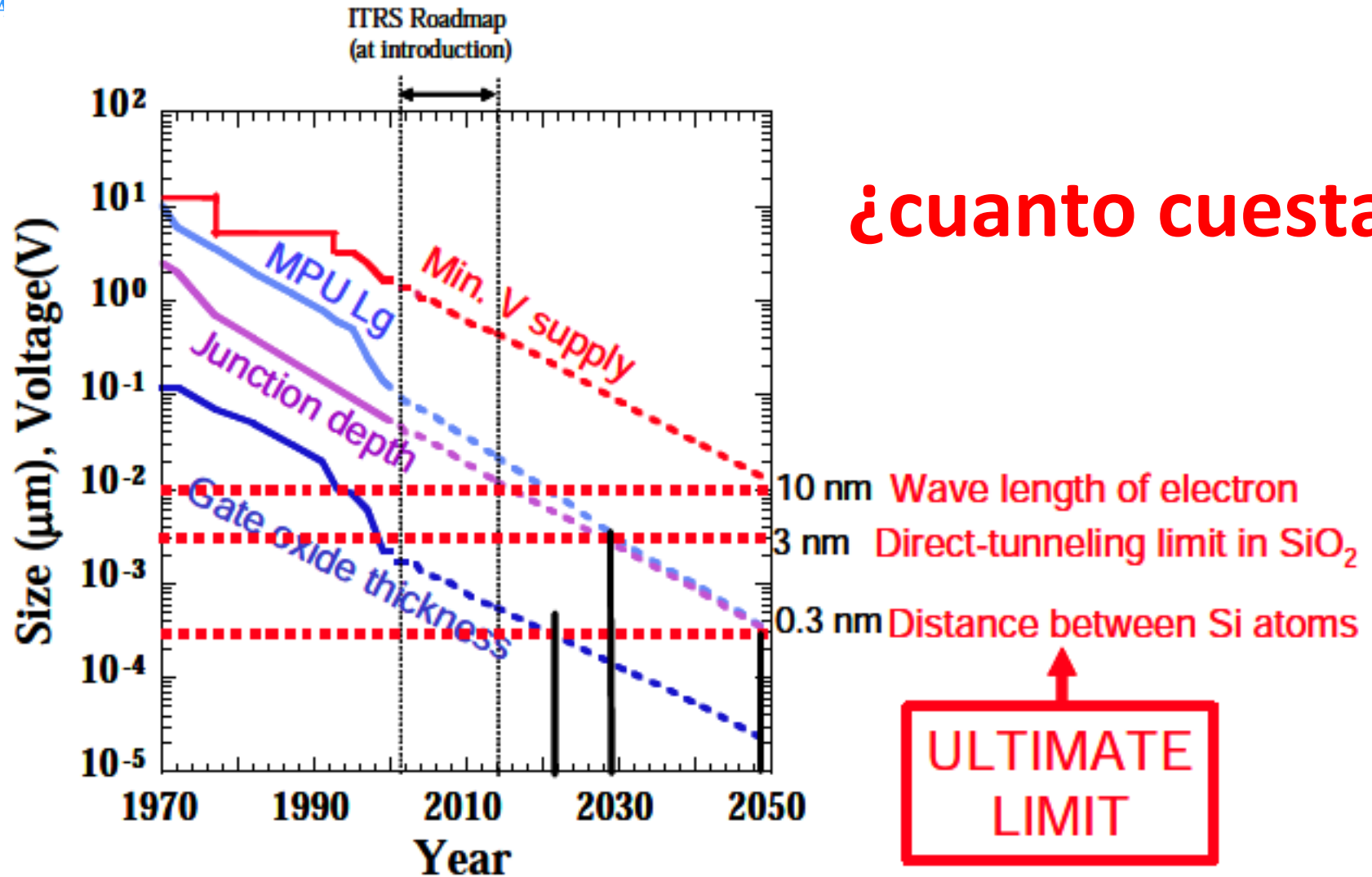
# El mundo **micro-** y **nanoscópico**

$\mu=1$  metro/1 millón  
 $n=1$  metro/1000 millones



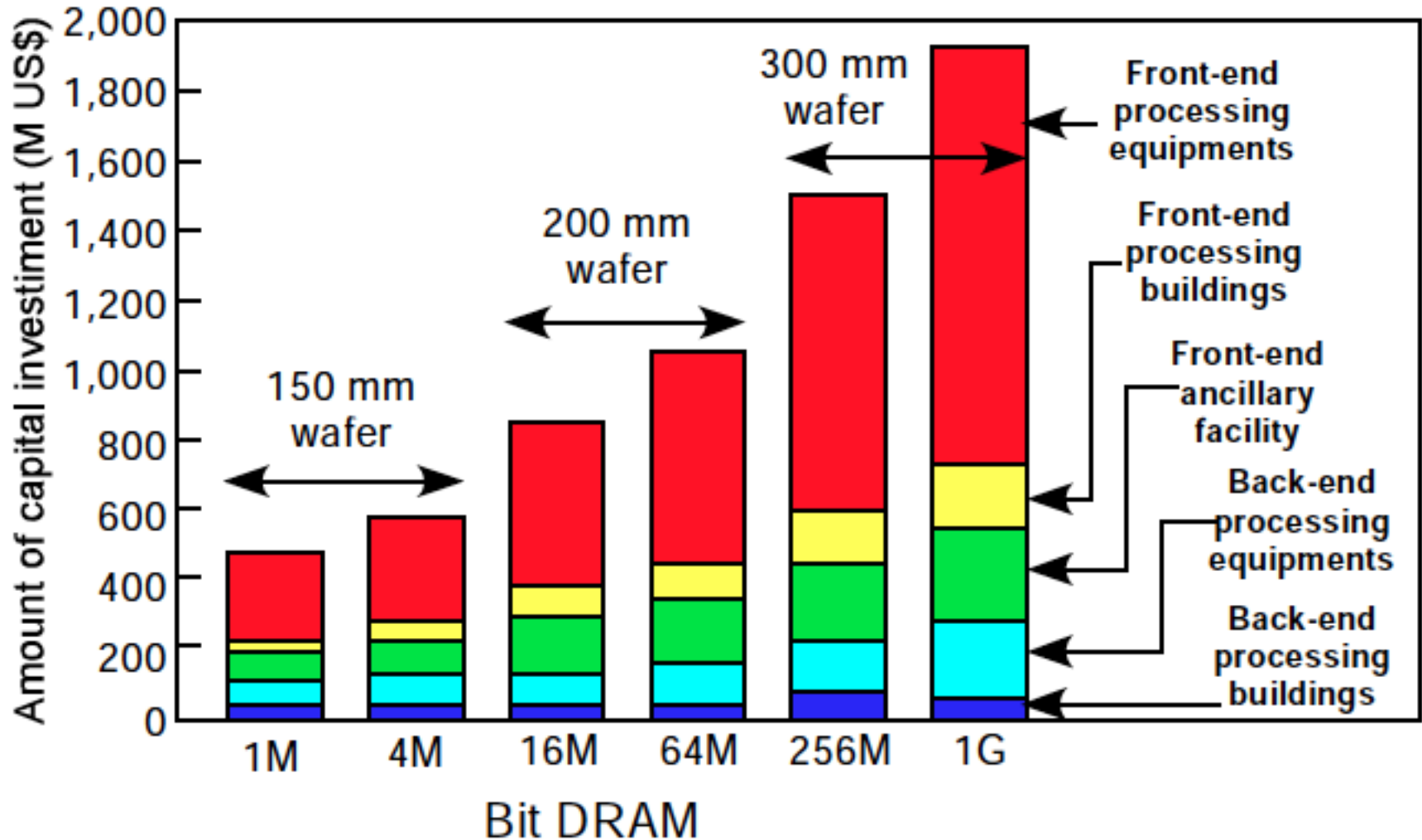
# Proyección de la miniaturización

¿cuanto cuesta?



# Costo de las fabricas de semiconductores

28 nm  $\approx$  6,000 M US\$





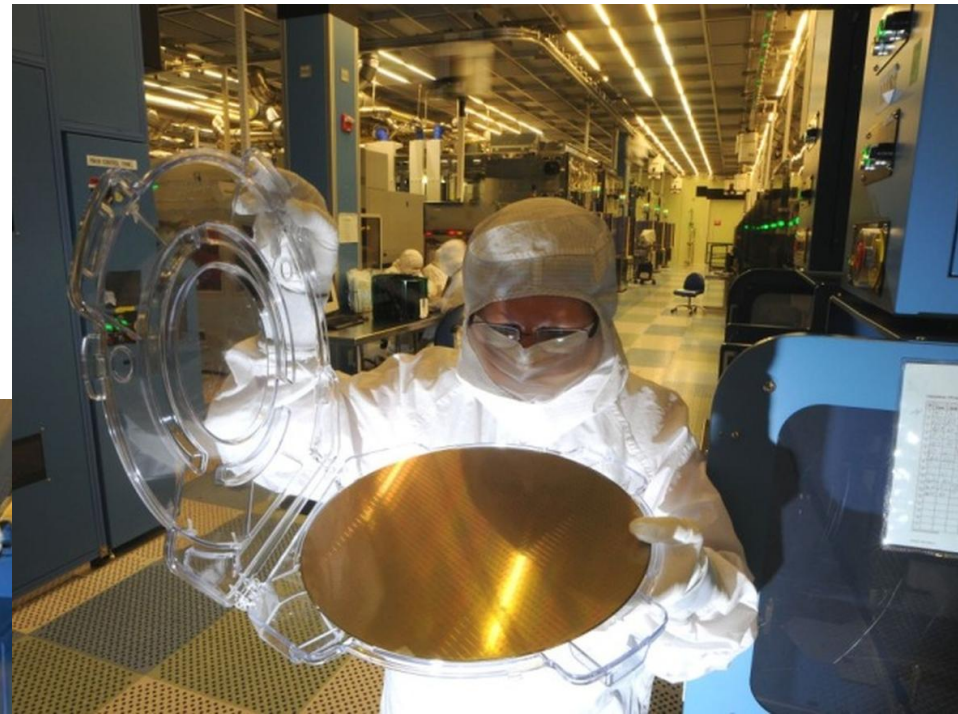
Fab in 1960s and 70s

**Toshiba Corporation**





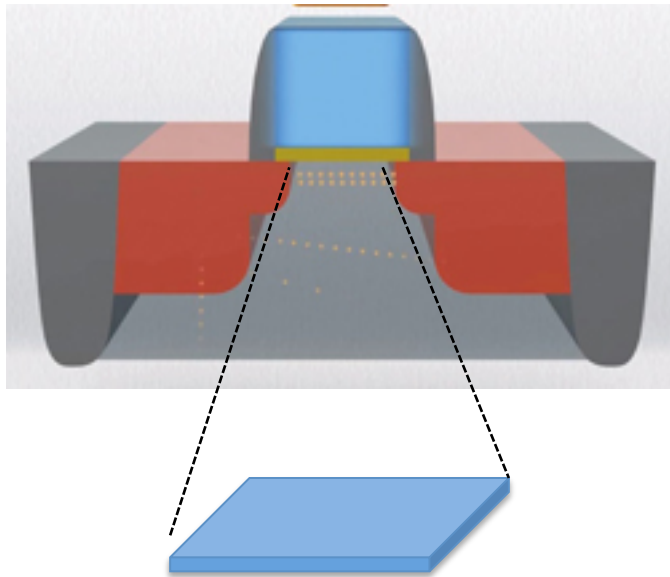
## 300 mm IBM fab





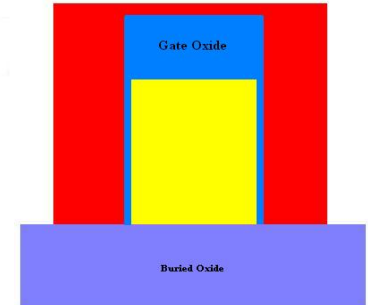
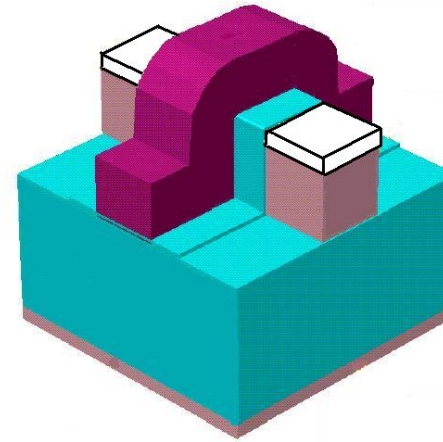
# Cambios estructurales en el transistor

## Bulk MOSFET

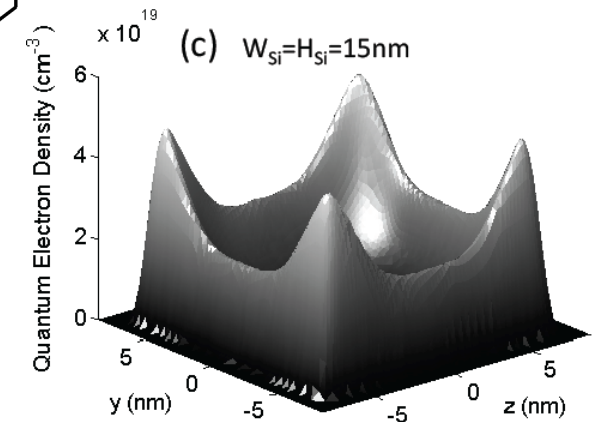
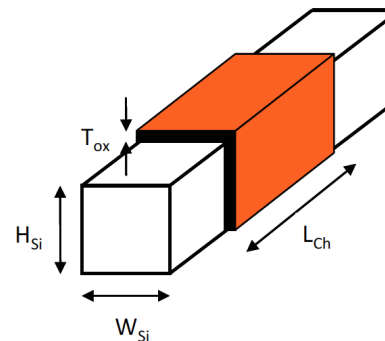


El canal de inversión es un plasma "bi-dimensional con un espesor de unas cuantas capas atómicas.

## FinFET

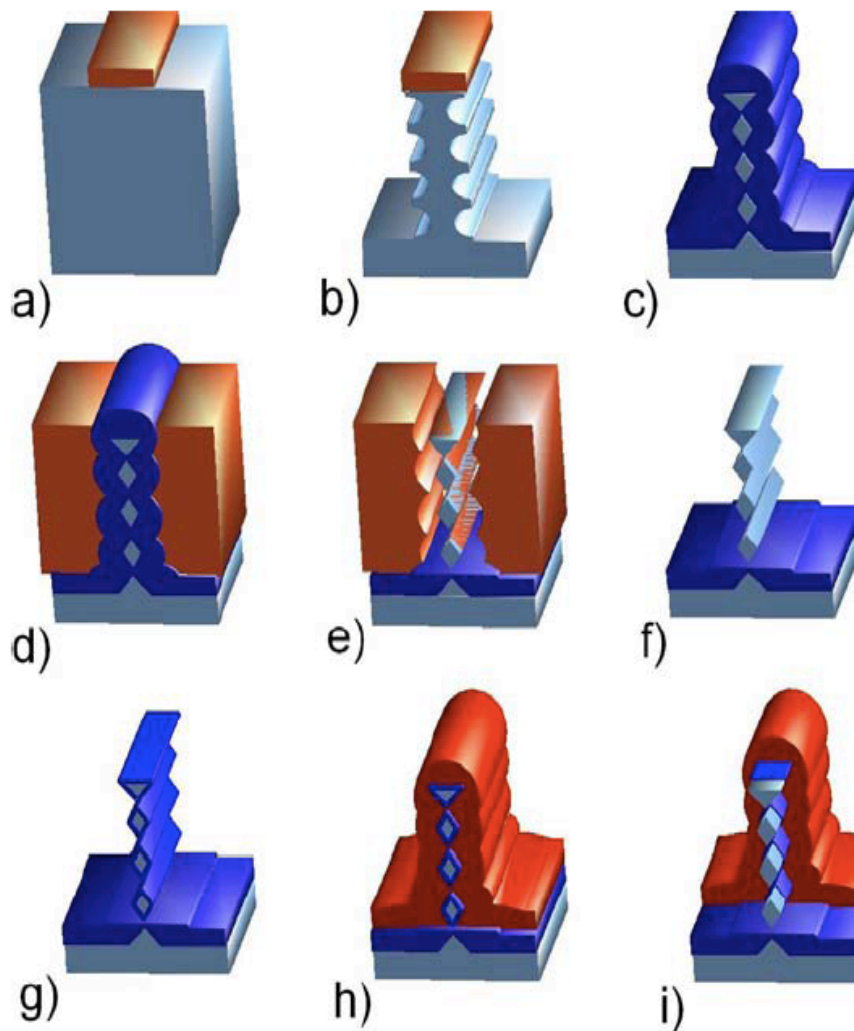


La distribución de carga es heterogénea





# Gate-All-Around FinFET



■ Silicon

■ Photoresist

■  $\text{SiO}_2$

■ Polysilicon

Pt mask

Poly-Si

Oxide

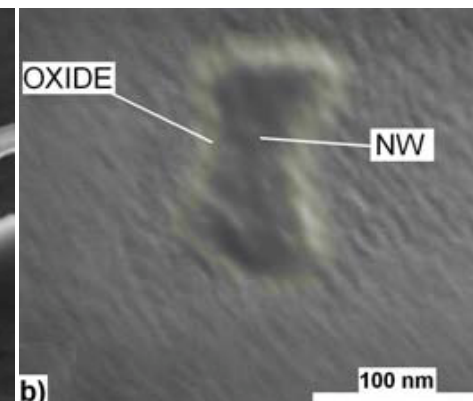
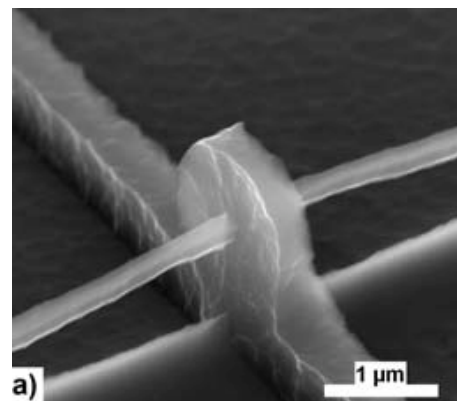
SiNW

b)

1  $\mu\text{m}$

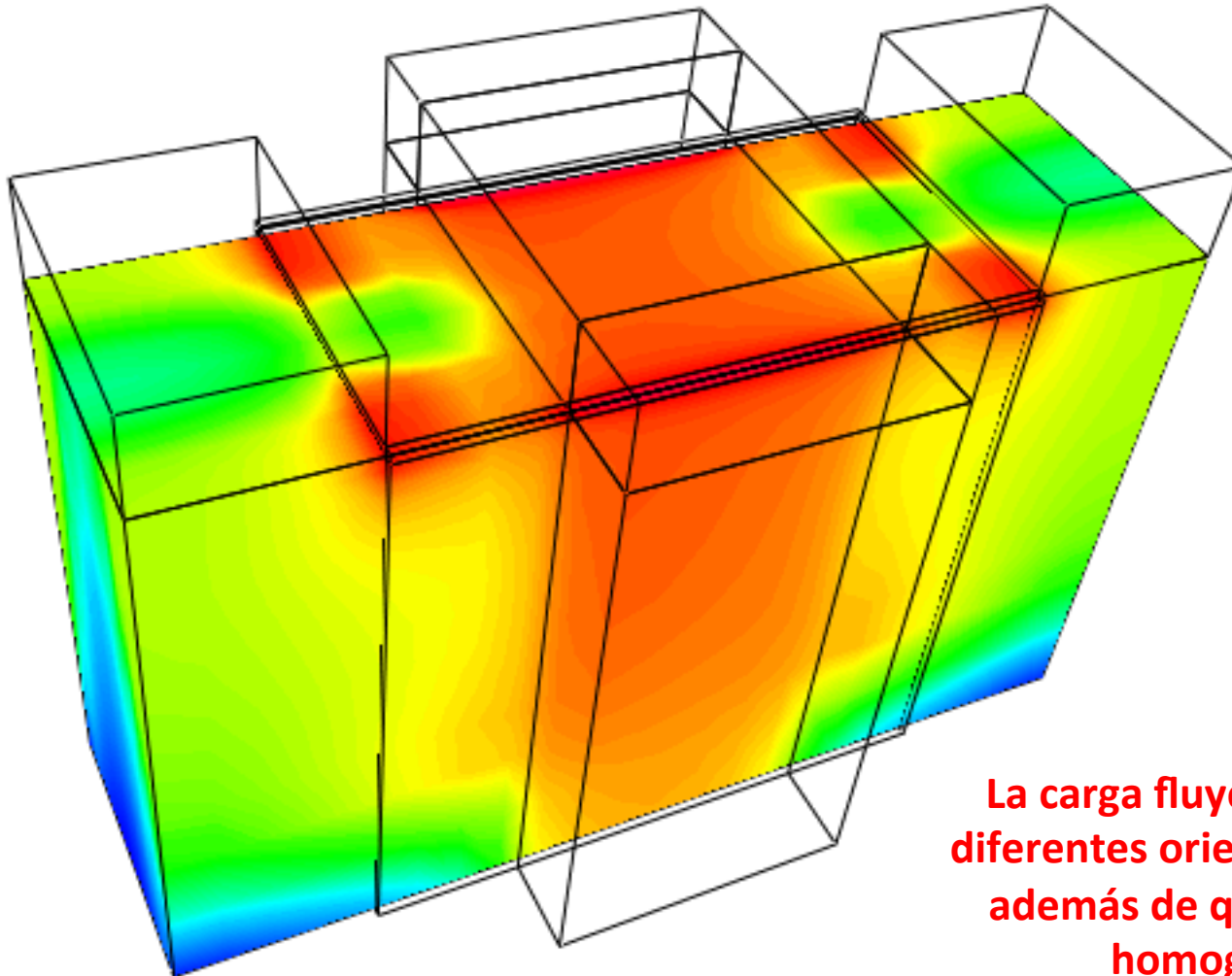
One-Fin FET

Cross section



**Sin embargo NO todo es felicidad en la vida**

**Y ahora, ¿cuál es el problema?**



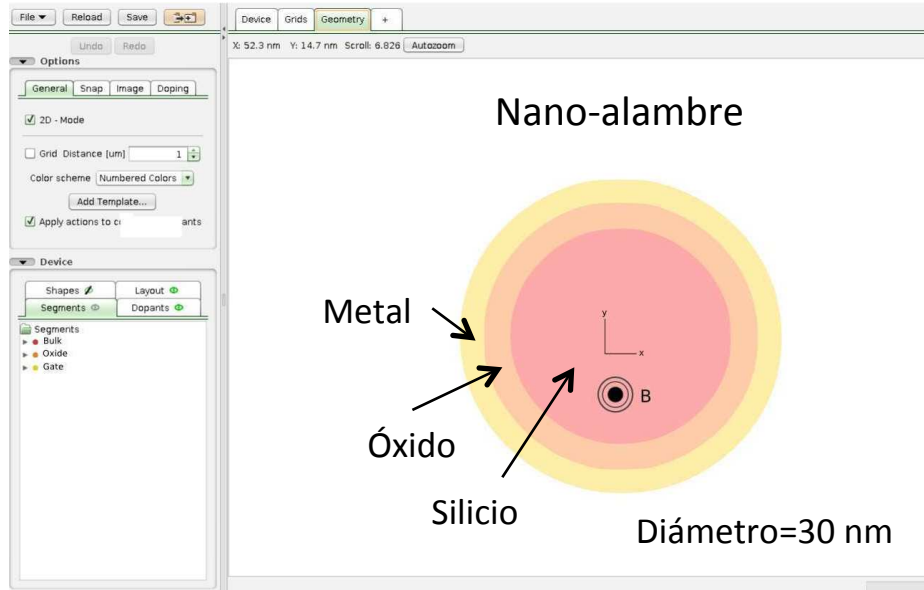
**La carga fluye por tres caras con diferentes orientaciones cristalinas, además de que no se distribuye homogeneamente.**

## La partícula a disgusto con la onda

***Nadie me dijo que  
Tenía que trabajar  
con ella***





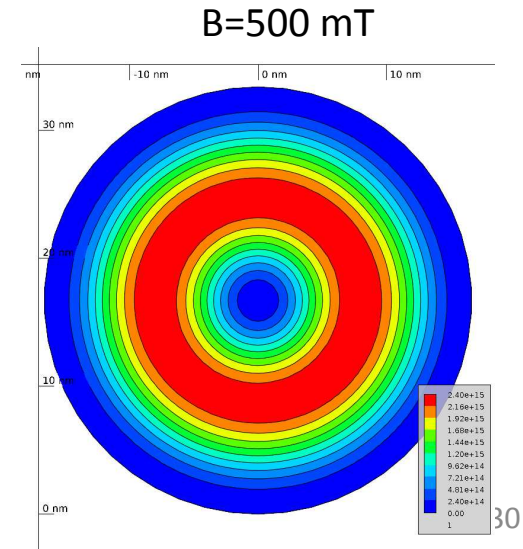
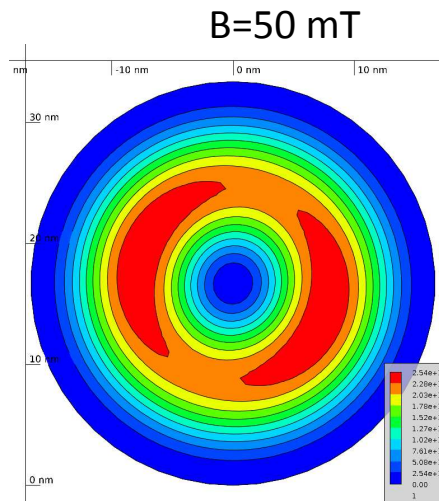
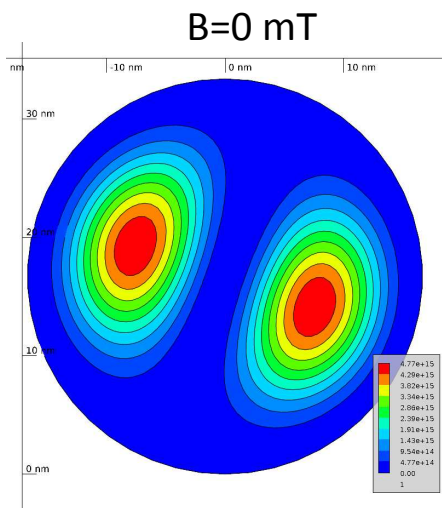


$$\left[ \frac{1}{2m^*} (\hat{p} - qA)^2 + V(r) \right] \psi(r) = E\psi(r) \quad \text{Schrödinger}$$

$$\nabla^2 \phi = -\frac{q}{\epsilon} (N_b - n(r)) \quad \text{Poisson}$$

$$n(r) = \frac{m^* kT}{2\pi \hbar^2} \sum_i |\psi_i|^2 \ln \left[ 1 + \exp \left( \frac{E_F - E_i}{kT} \right) \right]$$

$$J = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} TC(E_z) SF(E_z) dE_z$$



Probability density  $|\psi_2|^2$



## El impacto social de la miniaturización hacia la escala atómica

Insulated **G**ate **B**ipolar **T**ransistor **IGBT**:

interruptor de potencia para millones de conmutaciones por segundo, 1980 J. Baliga

IGBT-enabled application	Cumulative gasoline or energy savings		Consumer cost savings		Utility cost savings	
	United States	World	United States	World	United States	World
Electronic ignition system	318 B gallons	1477 B gallons	\$0.654 T	\$9.125 T	–	–
Adjustable speed motor drive	26,170 TWh	56,910 TWh	\$2.537 T	\$11.38 T	\$0.398 T	\$1.12 T
Compact fluorescent lamp	1550 TWh	16,120 TWh	\$0.156 T	\$3.224 T	\$0.26 T	\$2.98 T
Total			\$3.35 T	\$23.73 T	\$0.665 T	\$4.10 T



Se ha ahorrado cerca de 1 Trillón de galones de gasolina, se ha reducido el consumo de energía eléctrica por mas de 50,000 TeraWatts-hora, y se ha reducido la emisión de CO2 en mas de 75 trillones de libras.

**Equivalente a no construir 600 plantas de energía de 1 Giga-Watt cada una!**

$$1T=10^{12}$$

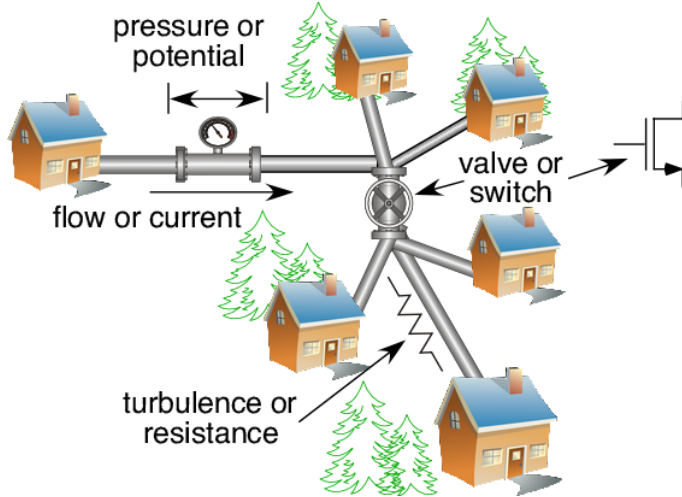
# Mejoramiento en la eficiencia energética

## Energy efficiency improvement

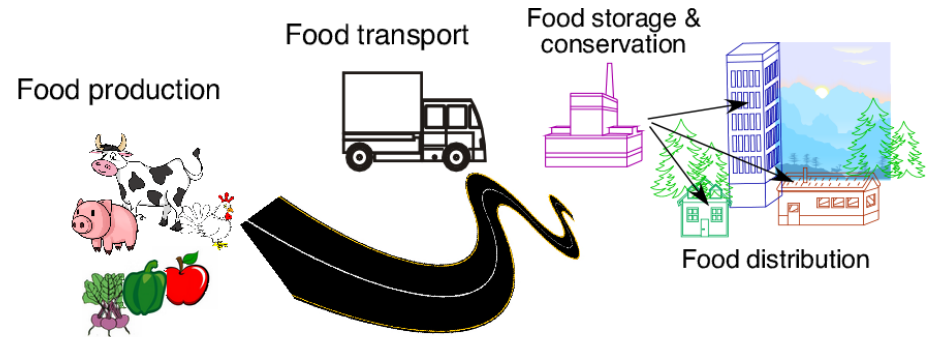
	40 %	121 %	132 %	167 %	339 %	2.8x10 <sup>6</sup> %
2008	20.0 miles per gallon of gas	50.4 revenue passenger miles per gallon	1.46 units of output per unit energy use	167 pounds of steel per MBtu	Compact fluorescent bulb 57 lumens/watt	40x10 <sup>6</sup> instructions per second/watt
1978	14.3 miles per gallon of gas	22.8 revenue passenger miles per gallon	0.63 units of output per unit energy use	63 pounds of steel per MBtu	Incandescent light bulb 13 lumens/watt	1400 instructions per second/watt
	<b>Automobil</b>	<b>Passenger plane</b>	<b>Agriculture</b>	<b>Steel Manufacturing</b>	<b>Lighting</b>	<b>Computer Systems</b>

# Agua y alimentos...

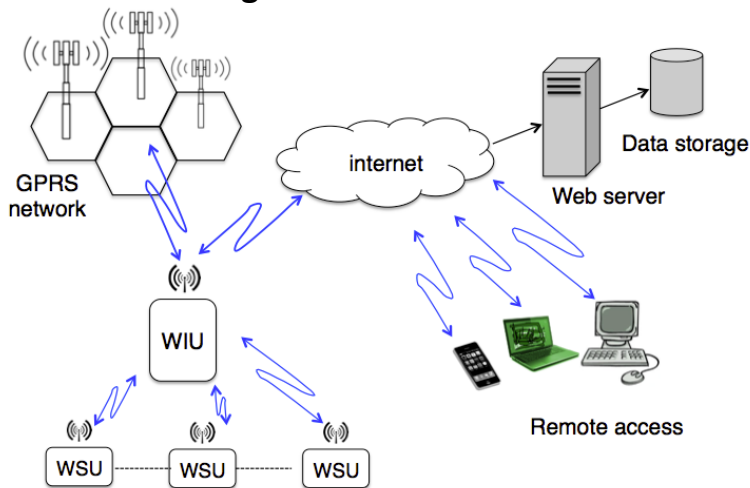
## Distribución y control de fugas



## Generación, distribución, y almacenamiento de alimentos

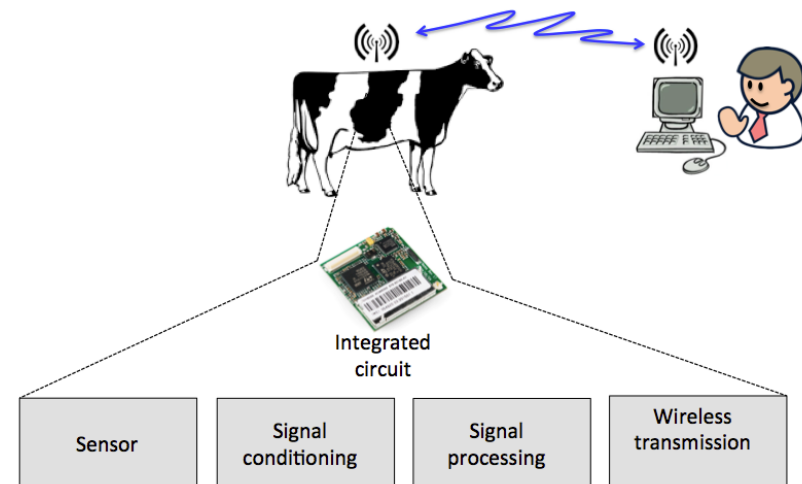


## Irrigación automatizada



90% ahorro de agua, J. Gutiérrez/CIBNOR

## Producción de leche/reducción de metano



Inst. Tecnol. de Veracruz

## LED's: Light Emmiting Diodes



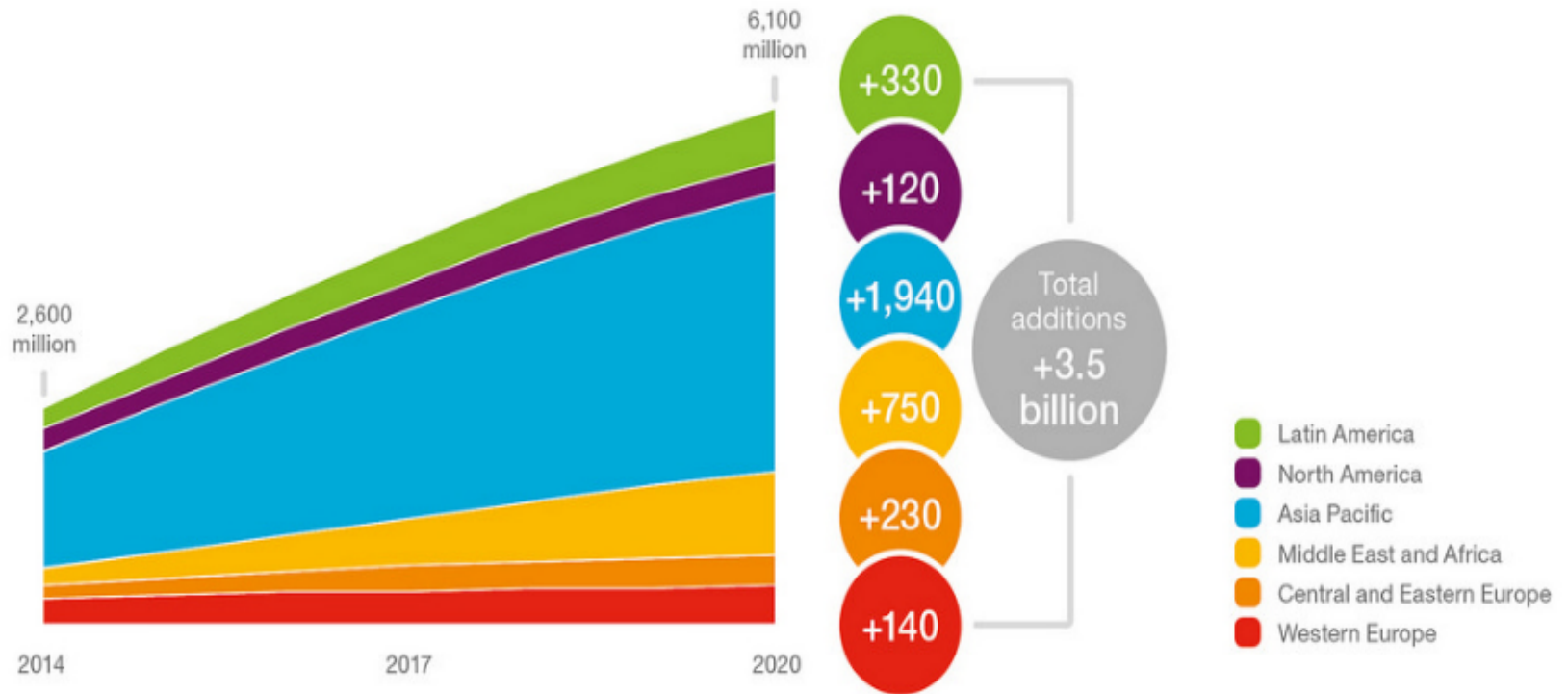
El record mas reciente es de 300 lumens/Watt, equivalente a 16 lámparas convencionales, o unas 70 lámparas fluorescentes.

**La iluminación consume el 25 % de la electricidad a nivel global.**

## Comunicación en cualquier momento en cualquier lugar

- Para 2017 se habrán descargado 77 mil millones de Apps
- Para 2020 habrá mas de 50 mil millones de dispositivos interconectados

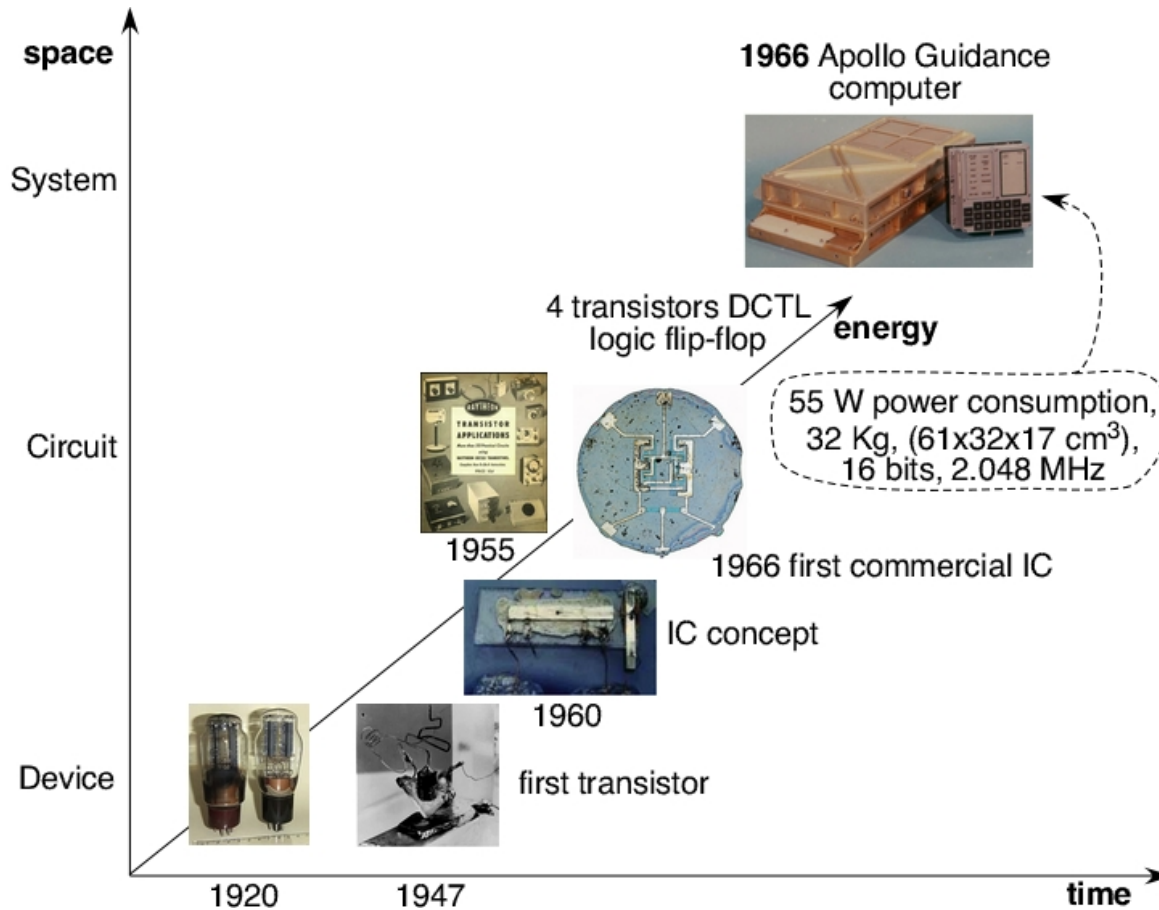
Smartphone subscriptions per region 2014–2020



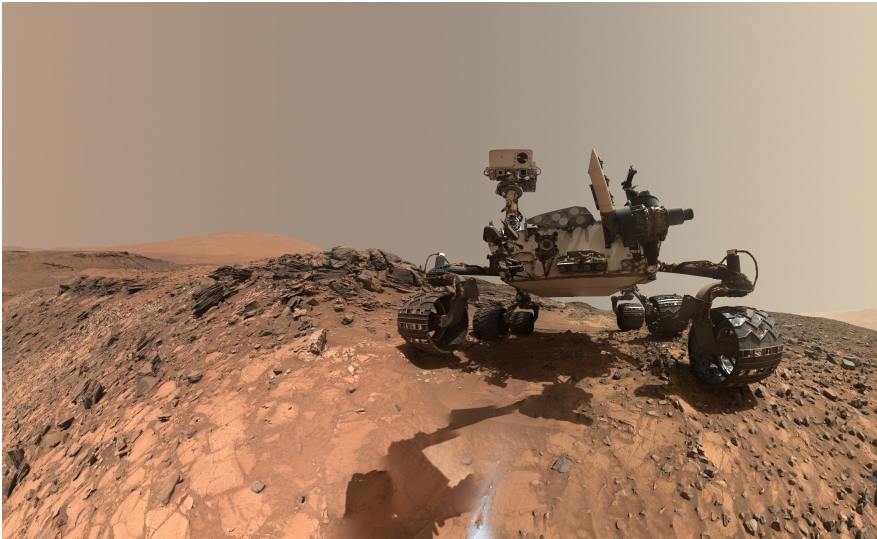
Cisco



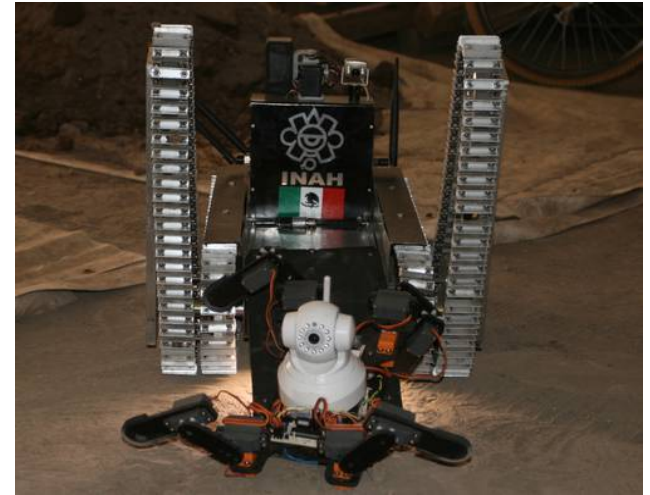
# La misión espacial Apolo 11, 1969



2015: NASA Mars rover



Tlaloc II



Drone technology



Prótesis





## La profundidad de la física escudriñada con la electrónica

### *El boson de Higgs descubierto con el Large Hadron Collider*

Centenas de miles de circuitos integrados de todo tipo están integrados en la instrumentación del experimento ATLAS.

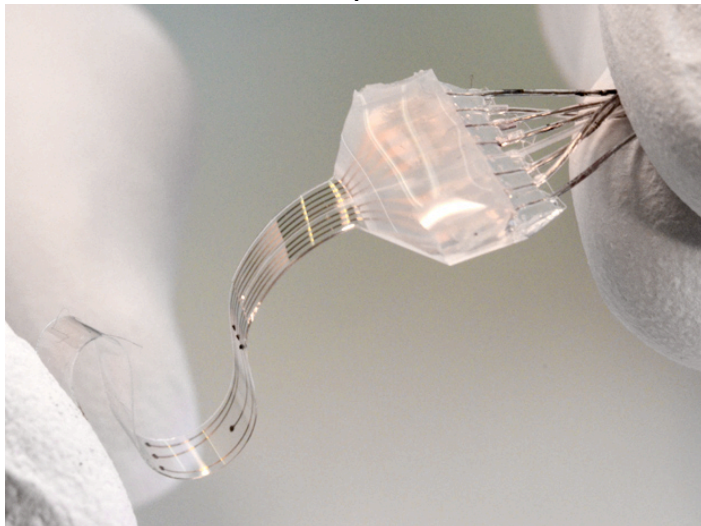


## Smart neural stimulators: controlling epilepsy

## Brain implanted electronics



## Flexible brain-compatible electronics





# Gracias

From earth and the human being to the outer space

