

# **El Reto de la Complejidad al Pensamiento Científico**

**Chris Stephens,**

C<sub>3</sub> Centro de Ciencias de la Complejidad y  
Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM

Conferencia, Diplomado Medicina y Complejidad, UNAM, 14/04/2010

**¿Qué es el objeto de estudio?**

**Los sistemas complejos**

**¿Qué es un sistema complejo?**

**Un sistema que exhibe la complejidad**

**¿Qué es la complejidad?**

**...?**

# **Fenomenología y taxonomía**

**Complejidad “física”**

# ¿Qué es seguramente complejo?

¿Esto...?



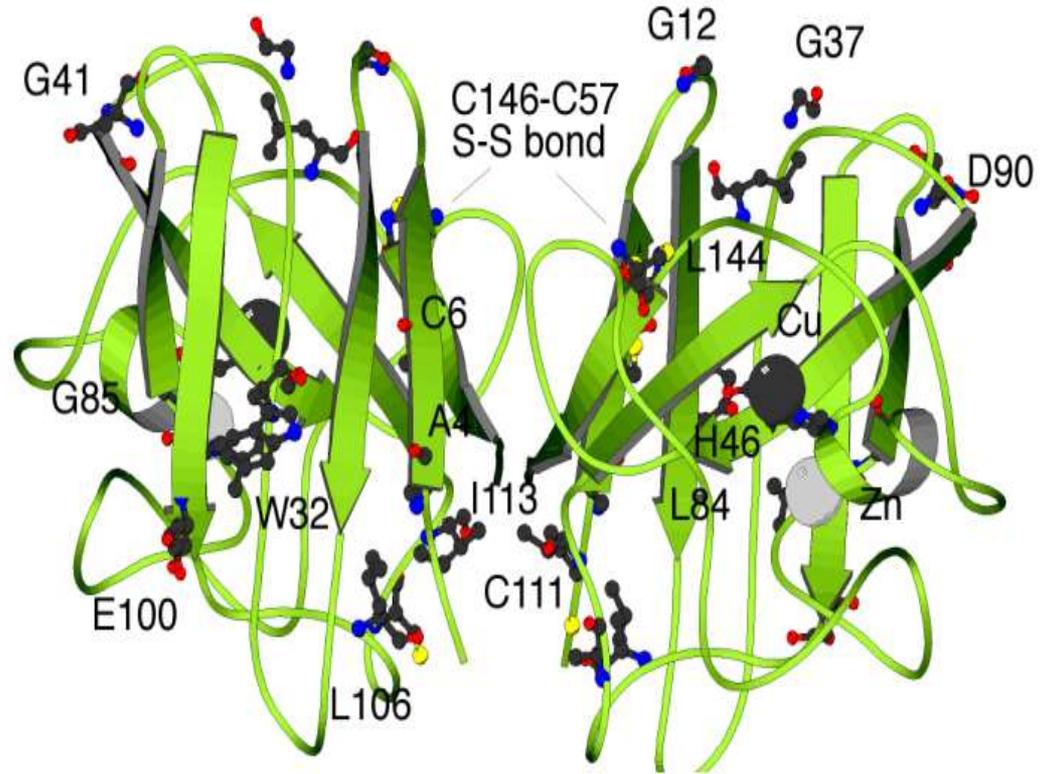
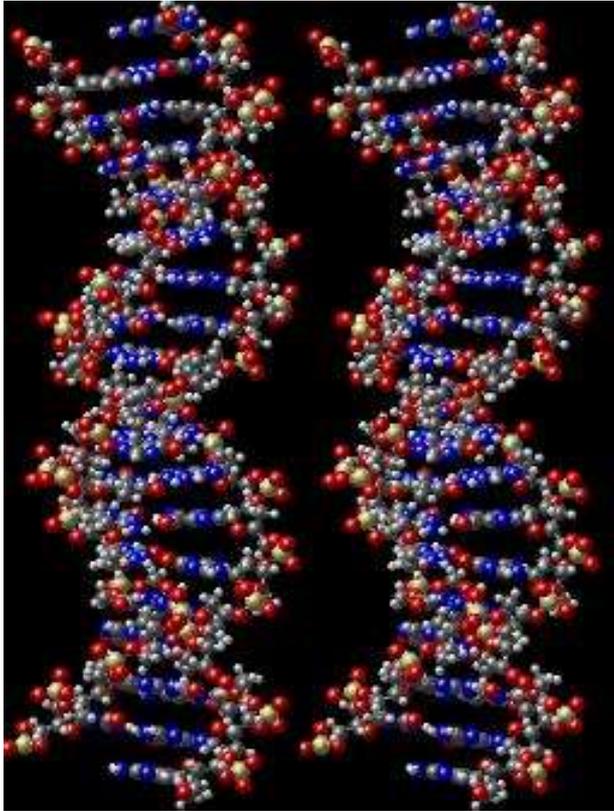
No, ¿Qué tal esto...?



¿Y esto...?

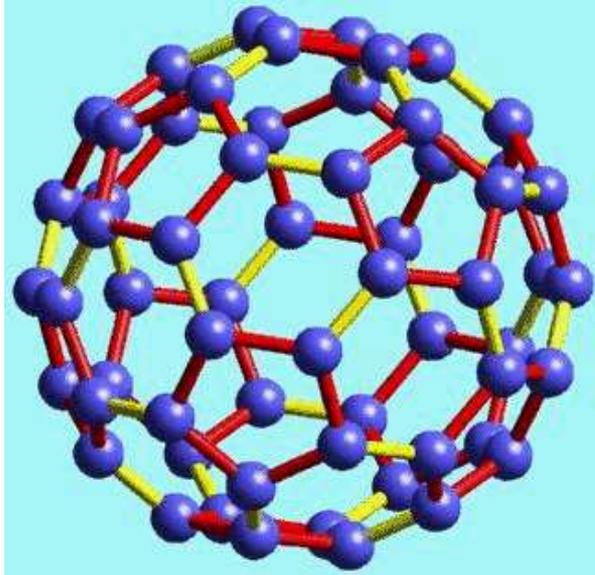


# ¿Y estas?

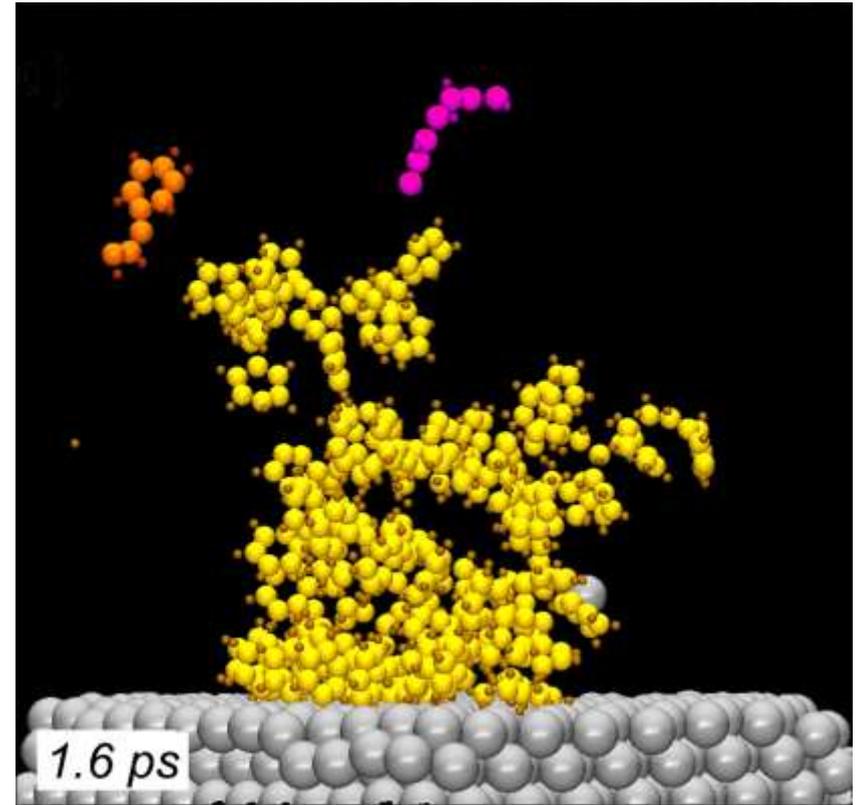


Model illustrating the formation of a misfolded species (M) from a folding intermediate (I). The region of the protein that misfolds is shown in red. The misfolded protein itself, or a self-assembled form, may be toxic to cells, leading to disease. The black arrows represent the relative rates of the various conformational events under native physiological conditions in the absence of mutation. The blue dash arrows represent the possible effects of mutation.

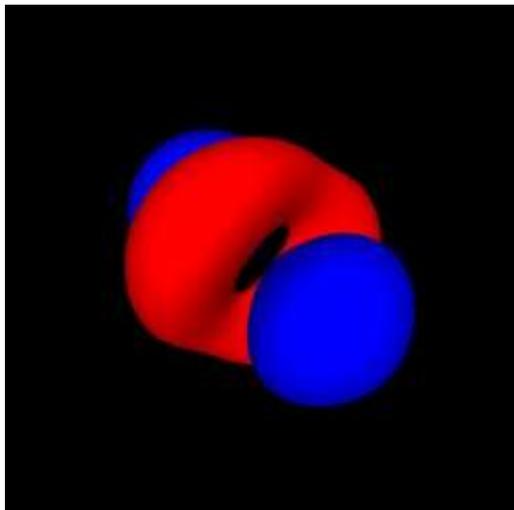
¿Y que tal estos?



Buckyball  $C_{60}$



Polystyrene on a silver surface



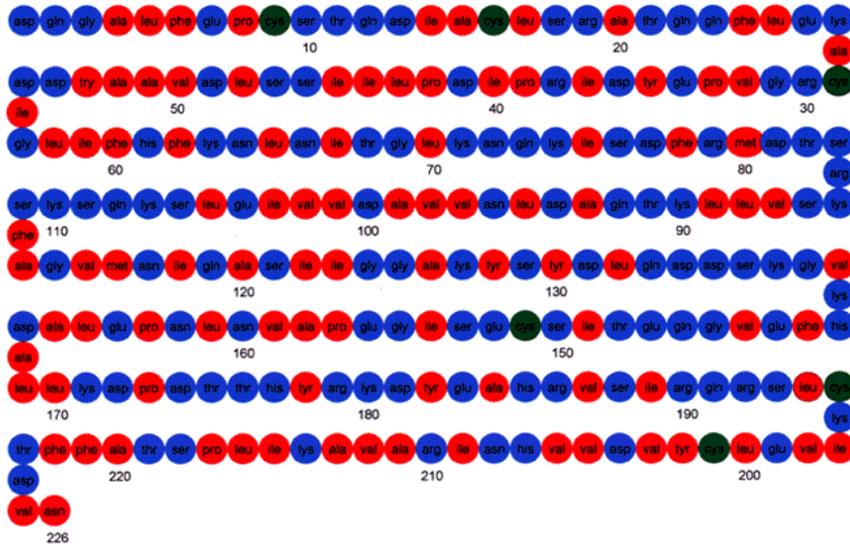
$n=3, l=2$  energy level of H

**Complejidad  
“simbólica”**

To be, or not to be--that is the question:  
 Whether 'tis nobler in the mind to suffer  
 The slings and arrows of outrageous fortune  
 Or to take arms against a sea of troubles  
 And by opposing end them. To die, to sleep--  
 No more--and by a sleep to say we end  
 The heartache, and the thousand natural shocks  
 That flesh is heir to. 'Tis a consummation  
 Devoutly to be wished. To die, to sleep--  
 To sleep--perchance to dream: ay, there's the rub,  
 For in that sleep of death what dreams may come  
 When we have shuffled off this mortal coil,  
 Must give us pause.

# ¿Que tal la complejidad en este caso?

Amino Acid Sequence of hJHBP



Human nucleotide sequence

```

AAAAGAAAAGGTTAGAAAAGATGAGAGATGATAAAAGGGTCCATTTGAGGTTAGGTAAT
ATGGTTTGGTATCCCTGTAGTTAAAAGTTTTTGTCTTATTTTAGAATAC TGTGACTA
TTTCTTTAGTATTAATTTTTCCTTC TGTGTTTTCCTCATCTAGGGAACCCCAAGGCAT
CCAATAGAAGCTGTGCAATTATGTAAAATTTTCAACTGCTTTCCTCAAATAAAGAA
GTATGGTAATCTTTACTGTATACAGTGCAGAGCCTTCTCAGAAGCACAGAATATTT
TTATAATTTCTTTATGTGAATTTTTAAGCTGCAAATCTGATGGCC TTAATTTCTTTT
TTGACACTGAAAAGTTTTGTAAAAGAAATCATGTC CATA CACTTTGTTGCAAGATGTG
AATTAATTGACACTGAACTTAATAACTGTGTACTGTTGGAAGGGGTTCC TCAAATTT
TTTGACTTTTTTTGTATGTGTGTTTTTTC TTTTTTTTTAAGTTCTTATGAGGAGGGA
GGGTAAATAAACCACTGTGCGTCTTGGTGTAA TTTGAAGATTGCCCATCTAGACTA
GCAATCTCTTCATTAATCTCTGCTATATA TAAAA CGGTGCTGTGAGGAGGGGAAAA
GCAATTTTCAATATATGAAC TTTTGTACTGAATTTTTTTGTAATAAGCAATCAAGG
TTATAATTTTTTTTTAAAA TAGAAAATTTGTAA GAAGGCAATATTAACCTAATCACCA
TGTAAGCACTCTGGATGATGGATTCCACAAA AACTTGGTTTTATGGTTACTTCTTCTC
TTAGATTCTTAAATTCATGAGGAGGGTGGGG GAGGGAGGGAGGGAGGGGTTT
CTCTATTAATAATGCATTC GTTGTGTTTTTAA GATAGTGTAACTTGC TAAAATTTCTT
ATGTGACATTAACAAA TAAAAAGCTCTTTTAA TATTAGATAA
  
```

# ¿...y aqui?

aaaa aaaa aaaa aaaa aaaa aaaa aaaa... "cristalina"

asmjgre fj sdjf s rege geoiie rgeasdffi... "amorfa"

...\_ \_ \_ ... .. \_ \_ \_ ... .. \_ \_ \_ ... .. \_ \_ \_ ... "layered"

1001 110 11001 1111 10101 1 10010 101 1101 1 10010 10010 ... "?"

If you are married or are a man and woman living together as "complejo"  
if you are married you must claim jointly ...

¿Como se reconoce la "complejidad"?

**Ha habido muchas definiciones de la complejidad, el problema es que las definiciones de complejidad no discriminan – ¡demasiado falsos positivos!**

**Quizá contienen algunas condiciones necesarias pero, indudablemente, no suficientes**

Muchos grados de libertad

Interacciones no lineales

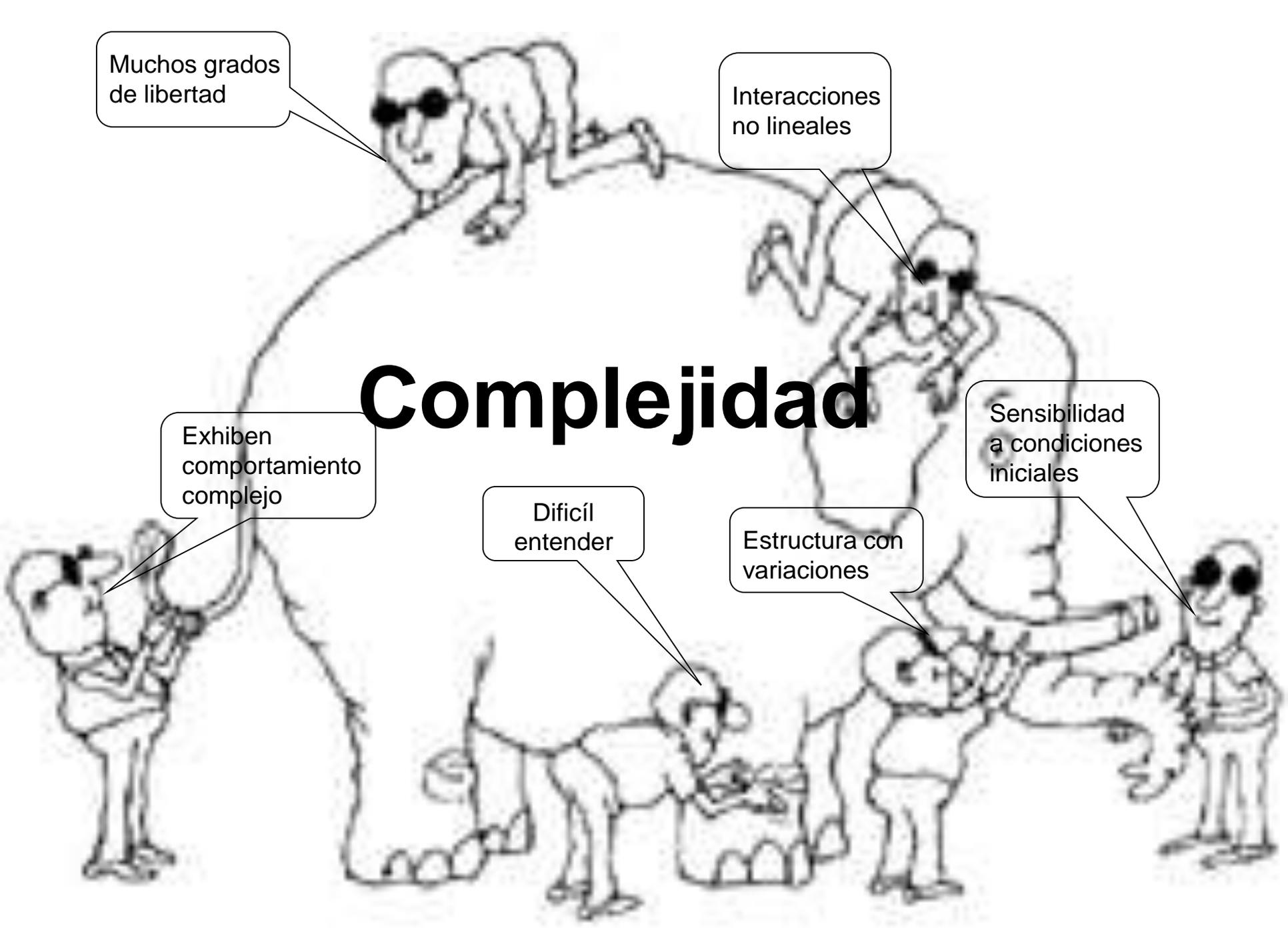
# Complejidad

Exhiben comportamiento complejo

Difícil entender

Estructura con variaciones

Sensibilidad a condiciones iniciales



# ¿Qué distingue los fenómenos complejos de los no complejos?

- Una “jerarquía” de muchas diferentes escalas
- Grados de libertad efectivos (“colectividad”) cualitativamente diferentes a escalas diferentes
- Jerarquía de **bloques constructores**
  
- Sistemas que son adaptativos
- Una evolución dinámica que depende de muchas reglas/estrategias diferentes.
- Sistemas que “aprenden” (retroalimentación del ambiente al sistema que se usa para actualizar las reglas)
  
- Comportamiento más complejo (el “fenotipo”)
- Mejor descritos en términos de lo que hacen más que en los que son

**¿Dónde termina lo simple y empieza lo complejo?**

Quizas podemos estar de acuerdo con que es definitivamente complejo y que definitivamente no es complejo. Pero, ¿qué distingue, y donde cambiamos del, uno al otro?

*¿La "Borde del Caos"?*

# ¿Al “Borde del Caos” en la “micro”-física?

“Sucio”

# ¿Al “Borde del Caos” en la “micro”-física?

Cerca a la  
críticidad

**Fenómeno crítico típico mostrando  
comportamiento colectivo y escalamiento  $Y \sim X^a$**

**Pero...**

- Únicamente existe una escala importante – la longitud de correlación – que determina el grado de “colectividad”; Invariancia de escala cerca al punto crítico (transición de fase) – “colectividad” maxima
- Únicamente un tipo de grado de libertad efectivo – una “avalancha” de dominios magnéticos, pero ...
- ¿Complejo? Una vez especificado el espectro de tamaños de las “avalanchas” no hay nada mas por decir. No es muy interesante estar al “Borde del Caos” en la física!
- Es lo mismo para cualquier otro fenómeno crítico ordinario o auto-organizado

# ¿Qué tal un Borde de Caos “simbólico”?

el ....

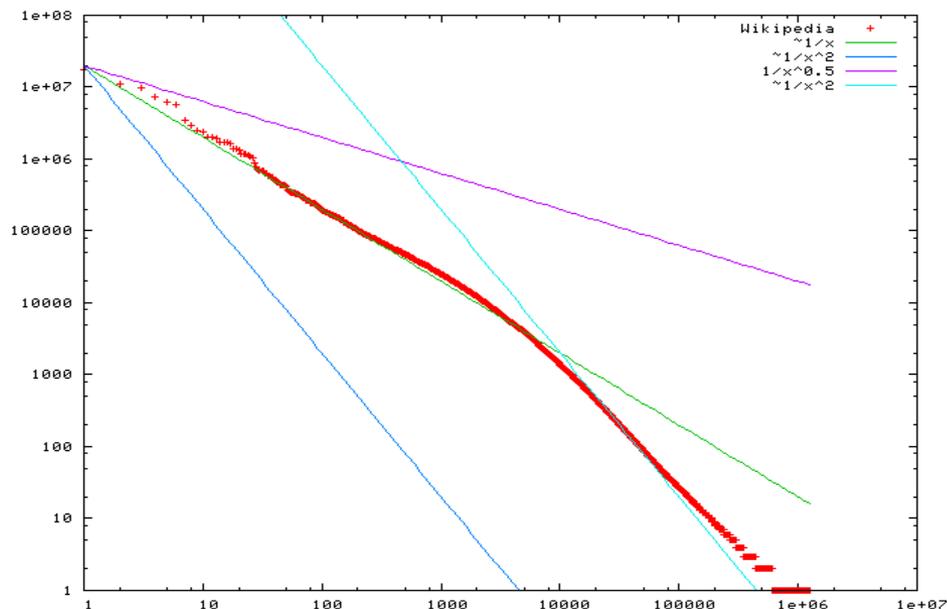
ordenado

cuadro ridículo artillería parado bofetada inconsciente que...

desordenado

Parametro para distinguir entre los estados ordenados y desordenados...

s – donde:



Zipf's law may be stated mathematically as:

$$f(k; s, N) = \frac{1/k^s}{\sum_{n=1}^N 1/n^s}$$

where  $N$  is the number of elements,  $k$  is their rank, and  $s$  is the exponent characterizing the distribution. In the example of the frequency of words in the English language,  $N$  is the number of words in the English language and, if we use the classic version of Zipf's law, the exponent  $s$  will be equal to unity.  $f(k; s, N)$  will then be the fraction of the time the  $k$ th most common word occurs.

Extinciones de especies

Velocidad de  
Volar de insectos

Distribución de palabras

electromagnetismo

# The Edge of Chaos

Precios en  
Mercados  
financieros

fluidos

Pilas de arena

$$f(x) \sim x^{-\beta}$$

gravedad

Poblaciones  
de ciudades

ferromagnetos

temblores

Taza metabólica

Distribuciones  
de ingresos

En Hamlet (y en lo general en lenguajes naturales) es aproximadamente 1

¡Así, el lenguaje está al “Borde del Caos”!

¿Da una descripción adecuada de Hamlet? ¿Qué la distribución de frecuencias de las palabras es invariante de escala con exponente  $s$ ?

**¡NO!**

Entonces, ¿Qué hay en Hamlet que no está en la “pila de arena”?

**¿Cómo medir la  
complejidad?**

# El lenguaje del punto de vista de un físico estadístico martiano

$$\langle \alpha_i \rangle \quad i \in a, b, \dots, z$$

$$\langle \alpha_i \alpha_j \rangle \quad i, j \in a, b, \dots, z$$

$$\langle \alpha_i \alpha_j \alpha_k \rangle \quad i, j, k \in a, b, \dots, z$$

t es de mas alta frecuencia que x

t y h estan mucho mas correlacionados que x and q; pico en posiciones adyacentes

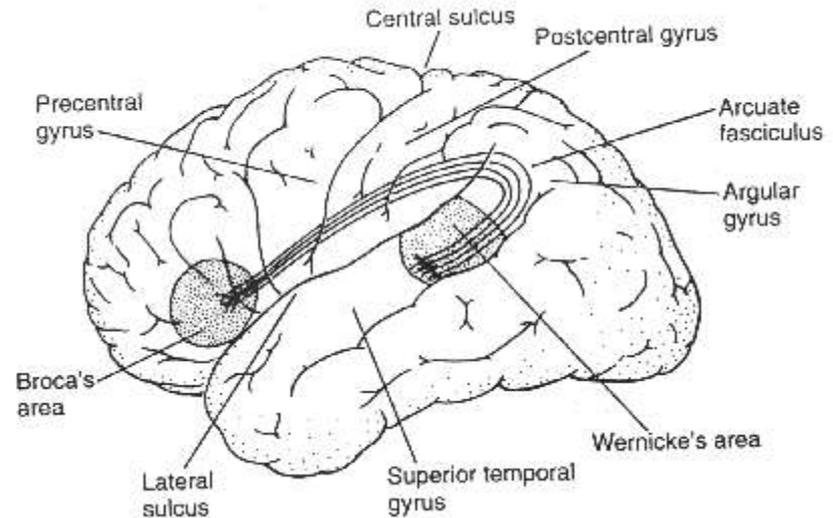
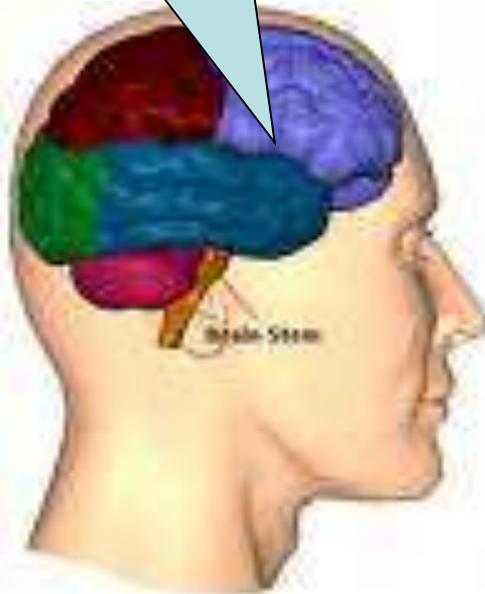
t, h y e estan muy correlacionados en posiciones adyacentes; detección de la “palabra” como grado de

libertad efectivo. Podemos estudiar funciones de correlación entre estos nuevos grados de libertad

- Así Hamlet mostrará funciones de correlación altamente no triviales que muestran ni orden ni desorden, pero mucho más estructura que el Borde del Caos. Las funciones de correlación son nuestra “detector de estructura/dispositivo de medición”. Pero, ¿son adecuadas?

# ¿Qué es un mejor aparato de medición?

To be or not to be that is the question.

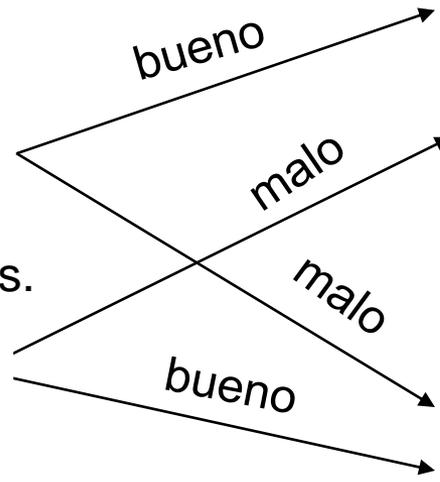


Este aparato seguramente es capaz de medir complejidad. ¿O quizás no...?

# ¿Como tan bueno es tu aparato?

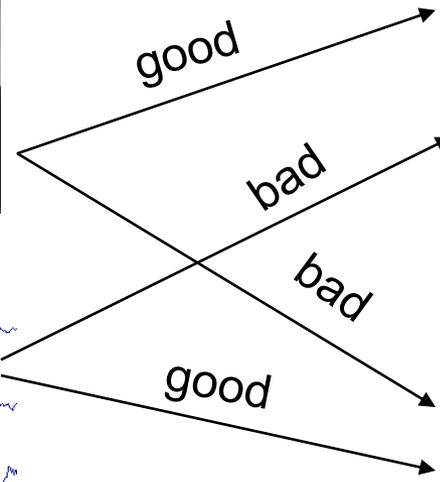
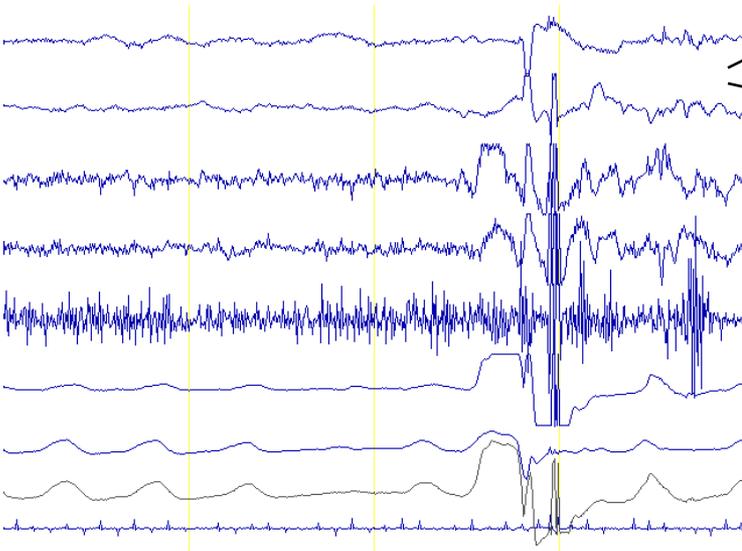
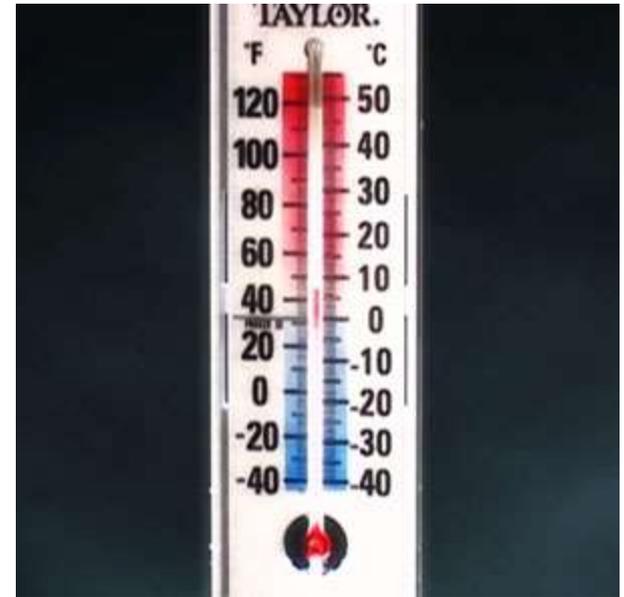
- To be or not to be that is the question.
- Para ser o no ser que es la pregunta.
- Om te zijn of te zijn niet dat de vraag is.

あるためまたはないため質問である



- Because of a certain or because it is not, it is question.
- Because or it is not for the sake of, that having asked and being convinced.
- Being not to be for the sake of, or that that, you ask, are convinced.
- It is that without having for the sake of, or, you ask, are convinced.

# ¿Pero es diferente eso que en el mundo físico?



Entonces, si la complejidad simbólica es una propiedad conjunta de un sistema y un dispositivo de medición, ¿Qué tal la complejidad física en sistemas como el clima y los mercados financieros?

Entonces, ¿Qué podemos concluir de esto?

- **¿Es útil distinguir entre complejidad intrínseca (solamente el sistema) versus extrínseca (sistema y dispositivo de medición)?**
- **Pienso que si – podemos hablar de correlaciones intrínsecas al sistema y correlaciones entre el sistema y un dispositivo de medición**

# **Bloques Constructores**

Botania, Ecologia, Biologia

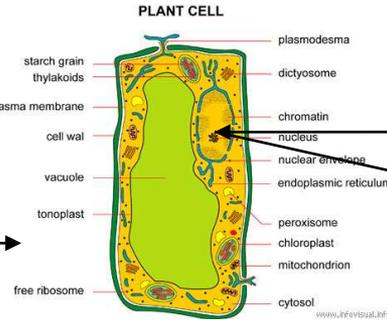
Biologia de células, Genética

Bioquímica, biofísica, física molecular

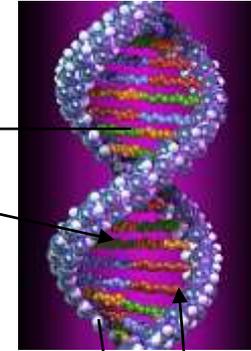
$10^{-1}m$



Color, tamaño, forma, hojas, raíces, frutas, número de pétalos, número de tipos de célula, número de genes, número y tipo de proteínas sintetizadas ...



$10^{-5}m$



Macromolécula compuesto de 4 bases C, G, T y U, H, C, N y O.

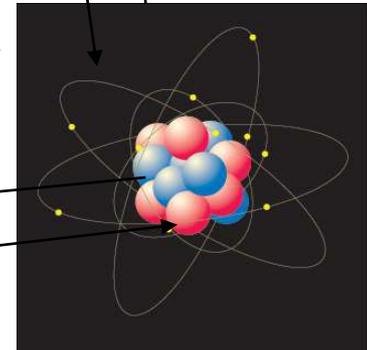
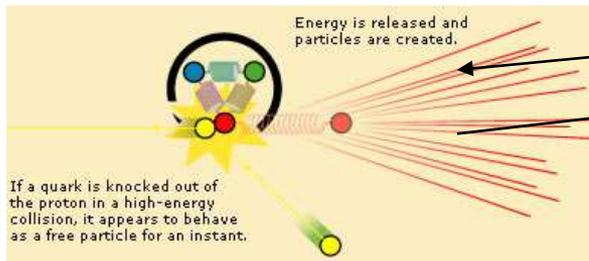
$10^{-9}m$

"Agentes"

Bloques Constructores

Química, Física atómica, Física nuclear

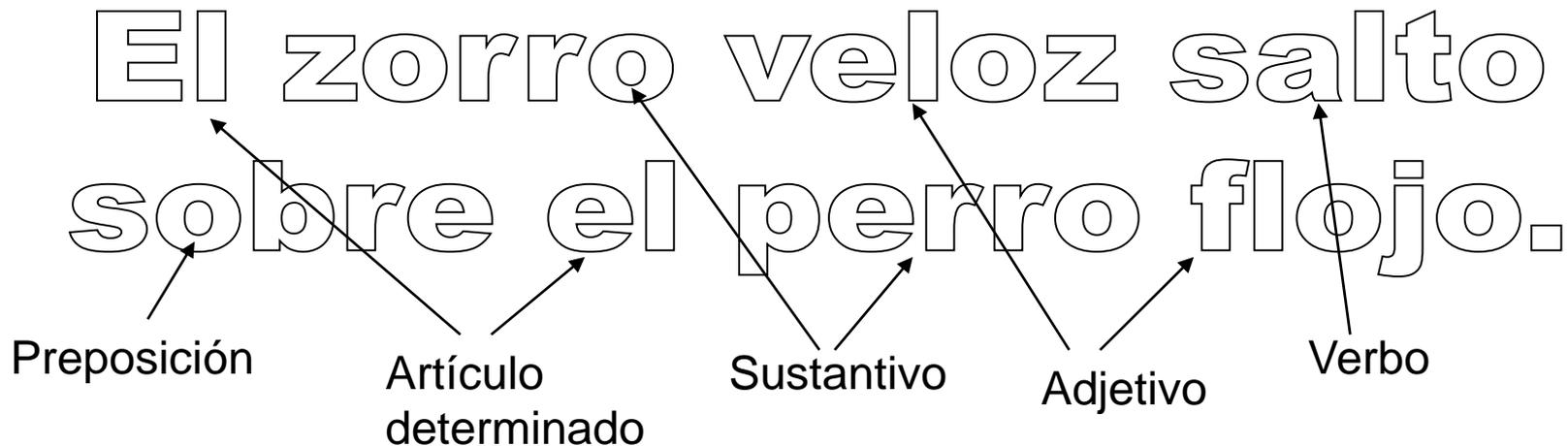
Física de partículas



$10^{-10}m$

Número de electrones, número de protones y neutrones, sus masas, cargas

# Los bloques constructores en los lenguajes



34 letras – 15 distintos tipos: clasificación a, b, c, ...

8 palabras – 7 distintos tipos: clasificación abacus, abrochar, ...

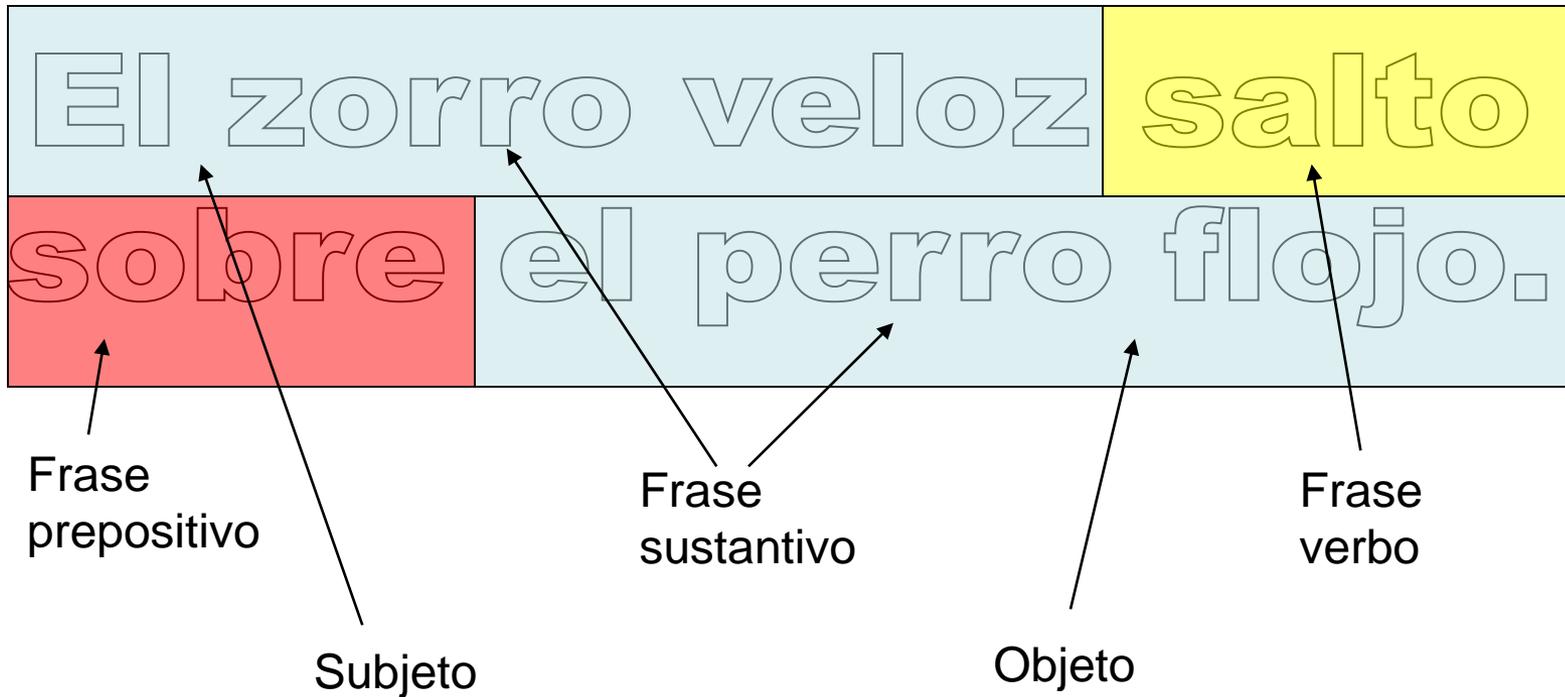
¿Qué otras clasificaciones hay?

Letras – consonantes versus vocales

Palabras – clasificación gramática

Por el momento, no hay interacciones mas allá que el nivel de letras dentro de una palabra

# Interacciones entre los bloques constructores en los lenguajes



**Interacciones inducidas por la gramática**

# Interacciones entre los bloques constructores en los lenguajes

El zorro veloz salto  
sobre el perro flojo.

Lima es el capital de Peru.

**No hay interacciones gramáticas entre estas dos oraciones. Además son lógicamente distintos.**

# Interacciones entre los bloques constructores en los lenguajes

El zorro veloz salto  
sobre el perro flojo.

El perro se despertó sorprendido.

**No hay interacciones gramáticas entre estas dos oraciones tampoco, pero si hay interacciones semánticas. Es la semántica que lleva a interacciones de larga distancia en los lenguajes.**

# **Modelación de complejidad y los sistemas complejos**

**La tiranía de las leyes  
físicas y la diferencia entre  
“ser” y “hacer”**



Considerar este modelo dinámico “simple”...

$$\mathbf{d}_i(t + \Delta t) = \sum_{j \neq i} \frac{\mathbf{c}_j(t) - \mathbf{c}_i(t)}{|(\mathbf{c}_j(t) - \mathbf{c}_i(t))|} + \sum_{j=1} \frac{\mathbf{v}_j(t)}{|\mathbf{v}_j(t)|}$$

Competencia entre una repulsión y atracción efectiva entre “partículas”

$$\hat{\mathbf{d}}_i(t + \Delta t) = \mathbf{d}_i(t + \Delta t) / |\mathbf{d}_i(t + \Delta t)|$$

$$\mathbf{d}_i'(t + \Delta t) = \frac{\hat{\mathbf{d}}_i(t + \Delta t) + \omega \mathbf{g}_i}{|\hat{\mathbf{d}}_i(t + \Delta t) + \omega \mathbf{g}_i|}$$

Ecuación para partículas “cargadas” siguiendo una fuerza externa  $\mathbf{g}_i$

**Couzin, I.D.**, Krause, J., Franks, N.R. & Levin, S.A.  
(2005) *Nature*, **433**, 513-516.

**¿Representa un sistema “complejo”?**



- En este modelo matemático hay nada más dos escalas :
  - El “micro-” asociada con peces individuales y sus distancias típicas
  - El “macro-” asociado con el banco de peces (recuerden la “pila de arena”)
- Decir que la colectividad es un fenómeno “emergente” es como decir que agua hirviendo igual es un fenómeno “emergente”

**Moralaje: Es importante distinguir entre una descripción de complejidad y una descripción no compleja de un fenómeno o comportamiento asociado con un sistema complejo.**



# La diferencia entre “ser” y “hacer”

En sistemas biológicos, económicos y sociales, organismos exhiben una alta diversidad de **ESTRATEGIAS** (reglas/modelos)

El estado dinámico de un individuo a  $t+1$  depende de no solamente el estado del individuo y de otros a tiempo  $t$  pero también de la estrategia (regla de actualización) seleccionada a tiempo  $t$ , que a su vez depende de las reglas de otros a  $t$

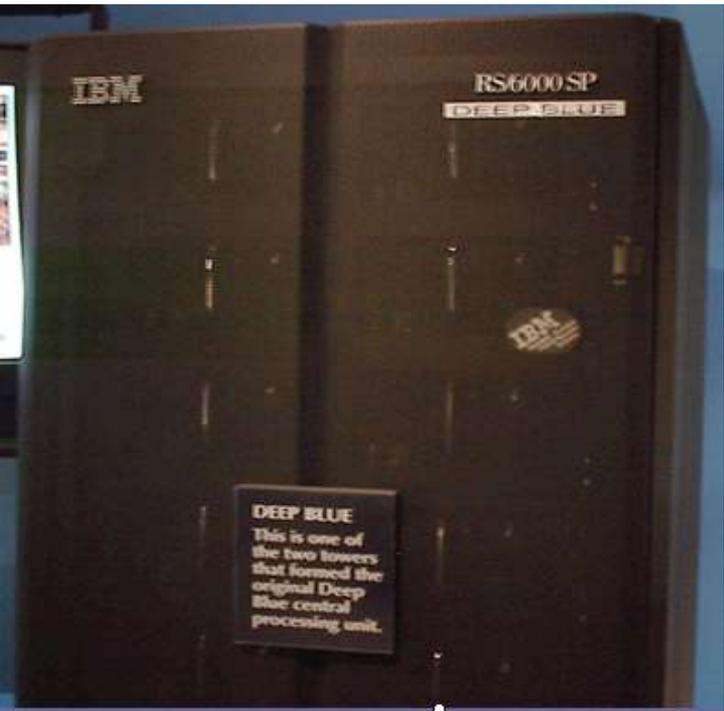
→ hay que trabajar en un espacio de estados  $Y$  estrategias/reglas/modelos – suena como teoría de juegos pero ...

¡No sabemos como es este espacio!

Además, la ganancia para una estrategia es RELATIVA no absoluta. Ganancia debe ser una propiedad emergente. Imagínense al inicio de la evolución especificando a priori la aptitud de un león o una cucaracha!

**Evolución y complejidad  
como el desarrollo de  
“multi-tasking” por  
especialización**

# La desventaja de la especialización



¿Quién es el mejor jugador de ajedrez?

Who writes better? Who reads better? Who runs better? Who can find food better? Who can find shelter better? Who can avoid danger better? Who can avoid predators better? Who can communicate better? Who can keep their own temperature constant better? Who can play cards better? Who can play tennis better? Who can make general mathematical models better? Who can make tools better? Who can drive a ...

**¿Quién muestra un comportamiento mas complejo?**

**¿Quién es mas “inteligente”?**

# Las ventajas de la especialización

PLANT CELL



Sitio para las reacciones dependientes de la luz de la fotosíntesis

starch grain  
thylakoids

plasma membrane

cell wal

Quitar "escombro";  
Aislar materiales peligrosas;  
Almacenamiento de materiales;  
Mantenamiento de presión o pH;

vacuole  
tonoplast

Construcción de proteínas

free ribosome

plasmodesma

Canales para transportación

dictyosome

Procesamiento y empaquetamiento de macromoléculas

chromatin

nucleus

Empaquetamiento y Fortalecimiento de ADN

nuclear envelope

endoplasmic reticulum

Regulación de expresión de los genes

peroxisome

chloroplast

Fotosíntesis

mitochondrion

Generación de energía

cytosol

# Retos para la modelación de la complejidad

## Fenomenología:

- Entender que son las propiedades “necesarios” y “suficientes” para la complejidad
- Adaptación – ¿qué es y cuando sale?
- Modularidad – entender como partes diferentes de un sistema logran fines distintos y luego se unen como “bloques constructores” para formar cosas más complejas – efecto de la multi-objetividad
- Aptitud como un fenómeno emergente
- El problema de la inferencia estadística en la observación de la complejidad

# Retos teóricos para la modelación de sistemas complejos

## Teoría

- ¿Qué paradigmas son útiles para la descripción de la complejidad? ¿De la física? ¿La biología? ... ¿Todos? ¿Ninguno?
- Desarrollo de marcos en que se puede trabajar en un espacio de “leyes” y estados
- Estar metido en un “juego” donde las reglas cambian y no sabemos las ganancias
- Entender como hacer un “coarse graining” (grupo de renormalización) para estudiar la emergencia de grados de libertad efectivos