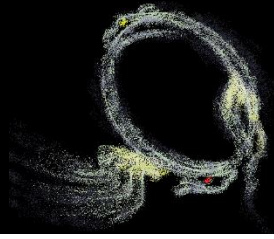
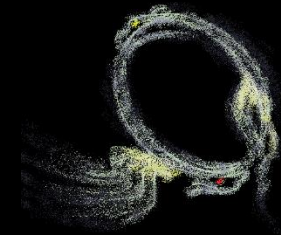


ENTROPIA

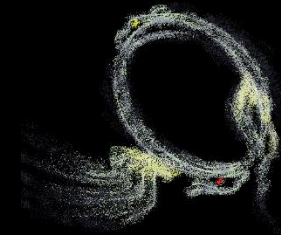


ENTROPIA ... ??



- Quais, dos abaixo, são verdadeiros ?
 1. Entropia sempre aumenta
 2. Aumento de entropia = aumento de estados acessíveis num sistema
 3. Aumento de entropia = espontaneidade
 4. Aumento de entropia = diminuição de energia
 5. Entropia = bagunça
 6. Variação de entropia = seta do tempo

ENTROPIA ... ??



- Quais, dos abaixo, são verdadeiros ?
 1. Entropia sempre aumenta
 2. Aumento de entropia = aumento de estados acessíveis num sistema
 3. Aumento de entropia = espontaneidade
 4. Aumento de entropia = diminuição de energia
 5. Entropia = bagunça
 6. Variação de entropia = seta do tempo

ENTROPIA



1. Entropia → num sistema isolado, sempre aumenta até atingir um máximo

ENTROPIA



1. Entropia → num sistema isolado, sempre aumenta
2. Aumento de entropia → aumento de estados acessíveis num sistema

ENTROPIA



1. Entropia → num sistema isolado, sempre aumenta
2. Aumento de entropia → aumento de estados acessíveis num sistema
3. Num processo espontâneo, há aumento de entropia

ENTROPIA



1. Entropia → num sistema isolado, sempre aumenta
2. Aumento de entropia → aumento de estados acessíveis num sistema
3. Num processo espontâneo, há aumento de entropia
4. Aumento de entropia = diminuição de energia **livre**

ENTROPIA



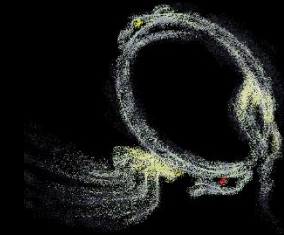
1. Entropia → num sistema isolado, sempre aumenta
2. Aumento de entropia → aumento de estados acessíveis num sistema
3. Num processo espontâneo, há aumento de entropia
4. Aumento de entropia = diminuição de energia **livre**
5. Entropia $\neq$ bagunça

ENTROPIA



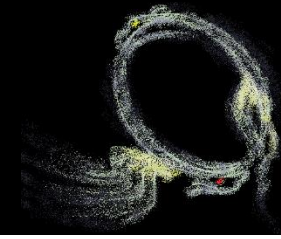
1. Entropia → num sistema isolado, sempre aumenta até atingir um máximo
2. Aumento de entropia → aumento de estados acessíveis num sistema
3. Num processo espontâneo, há aumento de entropia
4. Aumento de entropia = diminuição de energia **livre**
5. Entropia $\neq$ bagunça
6. Entropia $\neq$ seta do tempo

AUMENTO DOS ESTADOS ACESSÍVEIS



- I. Numa interpretação microscópica da entropia, esta é associada ao número de estados que os constituintes de um sistema podem acessar.
 - II. O aumento da temperatura está relacionado ao aumento do número de estados que as moléculas de um sistema ocupam.
 - III. Como a espontaneidade está relacionada ao aumento da entropia, o final do Universo se dará num inferno astral (fim quente)
- Comente.

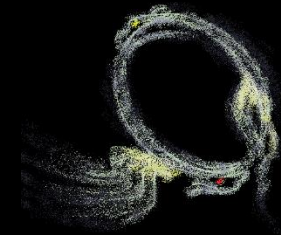
ENTROPIA: PORQUE NÃO É “BAGUNÇA”



2. Aumento de entropia → aumento de estados acessíveis num sistema

5. Entropia $\neq$ bagunça

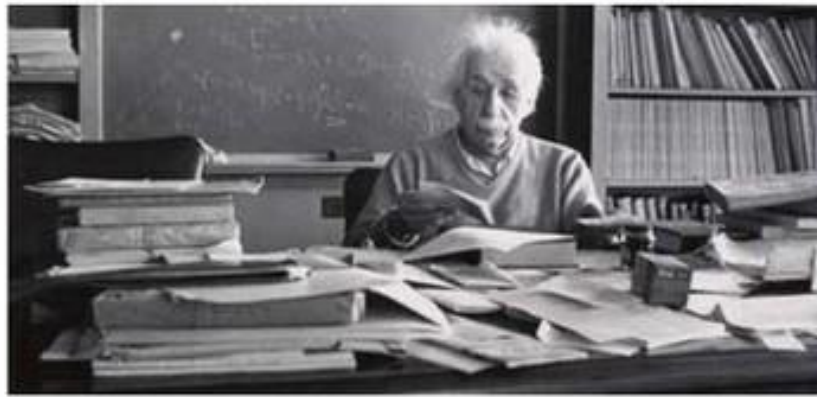
ENTROPIA: PORQUE NÃO É “BAGUNÇA”



"IMAGEM" CLÁSSICA DE ENTROPIA



ENTROPIA: PORQUE NÃO É “BAGUNÇA”



“If a cluttered desk is a sign of a cluttered mind, then what are we to think of an empty desk?”

-Albert Einstein

ENTROPIA: PORQUE NÃO É “BAGUNÇA”



“But this way I know where everything is.”

ENTROPIA: PORQUE NÃO É “BAGUNÇA”

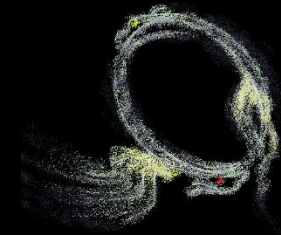


ESSA É A ESSÊNCIA: PARA DIZER O QUE É “BAGUNÇA”, É PRECISO TER UMA DEFINIÇÃO DO QUE É ORDEM E TAL DEFINIÇÃO DEVE SER COMUM A TODOS E A TODOS OS SISTEMAS ...

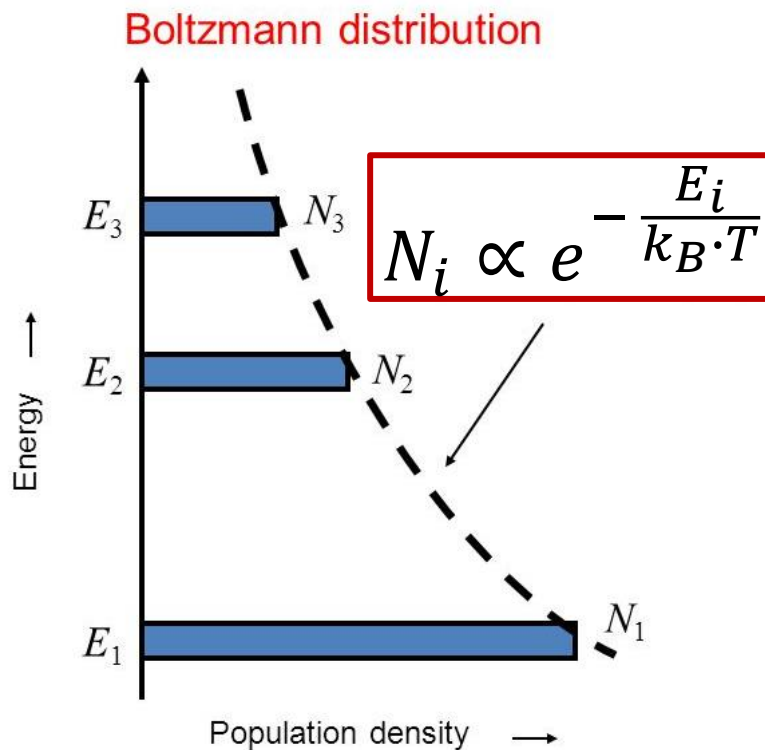


“But this way I know where everything is.”

A DEFINIÇÃO DE ORDEM NA TD VIA MECÂNICA ESTATÍSTICA



DISTRIBUIÇÃO DE BOLTZMANN



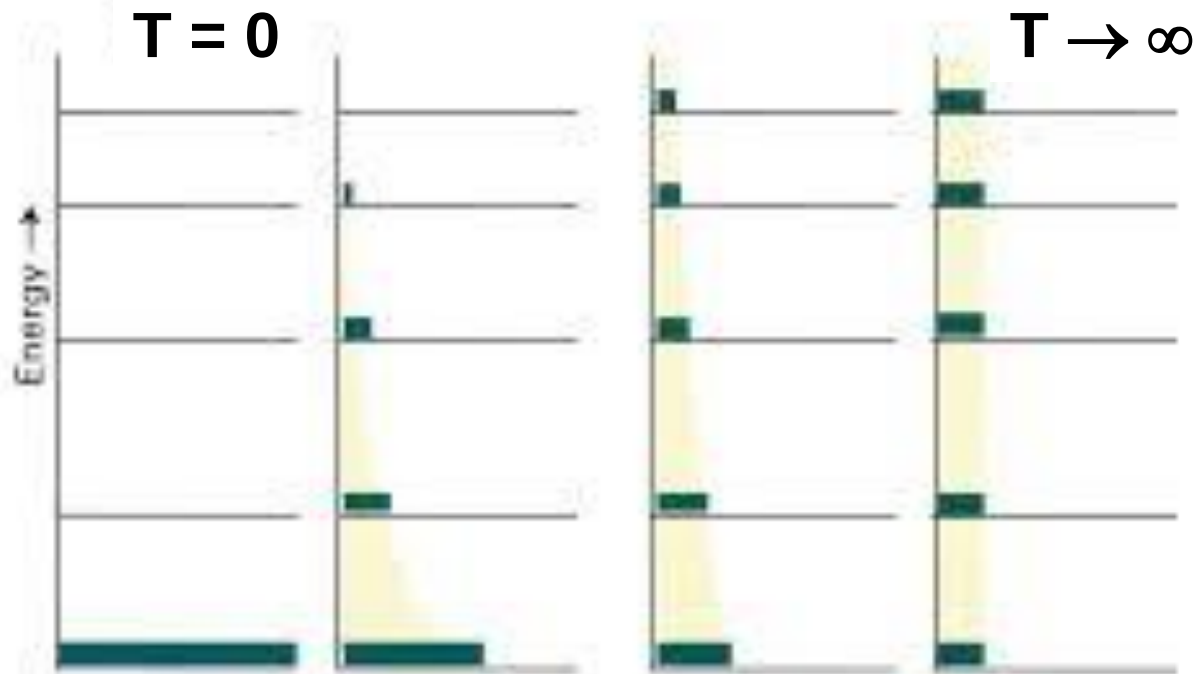
N_i é a densidade de moléculas num dado estado (nível de energia)

T is the temperature, and k_B is Boltzmann's constant - relates energy at the particle level to temperature.

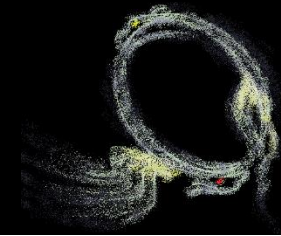
Boltzmann's factor: $\exp[-E/kT]$ – expresses the probability of a state of energy E relative to a state of zero energy.

The probability of a given energy state decreases exponentially with energy.

TEMPERATURA E NÍVEIS DE ENERGIA



ORDEM PELA ÓPTICA DA ME



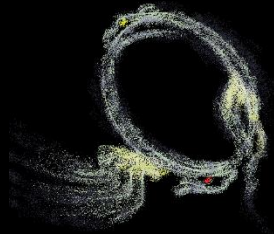
- Desta maneira, via mecânica estatística, existe uma definição de “ordem” que é específica para relacionar ocupação de níveis de energia e temperatura
- Quanto menor o número de níveis de energia ocupado, mais ordenado é o sistema no sentido de se saber a densidade de partículas num dado nível

E, PARADOXALMENTE ...



- ... é isso que dá origem a “bagunças” ao se tomar o aumento de entropia (com aumento de níveis acessados *num sistema TD*) como critério de desordem para *qualquer sistema*.

VOLTANDO À TD



ENTROPIA E O DIFERENCIAL EXATO DO CALOR



$$dU = \cancel{\delta w} + \delta q$$

energia é função de estado

↓

$$dU = \delta q = dq$$

Buscamos, então, uma variável que se combine com a temperatura, que é uma variável intensiva e de estado, e resulte no equivalente de variação de energia interna, que é uma variável de estado, através de trocas de calor.

PROPRIEDADE: FIXA NUM PROCESSO ADIABÁTICO REVERSÍVEL



$$\Delta U = -\int p(V)dV$$

variação de energia interna na forma de trabalho

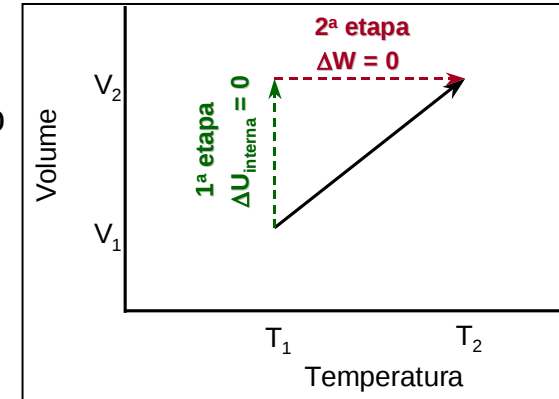
$$-\int p(V)dV \mapsto -\Delta T$$

$$W_{\alpha,r} = -\int p(V)dV = \Delta U = \int f(T)dT = (Q_r)_V$$

o trabalho adiabático corresponde a uma transferência de calor a volume fixo

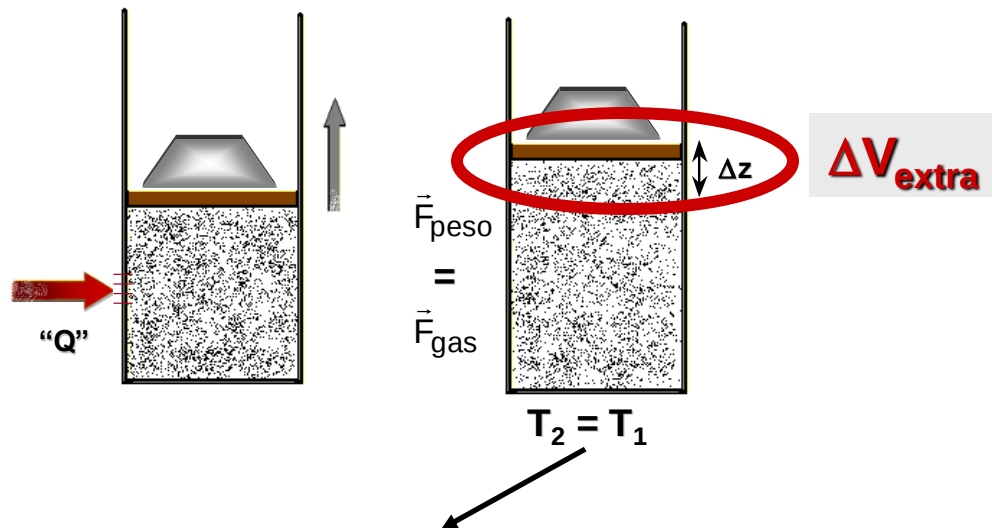
$$\Delta U = k \cdot \Delta T$$

empiricamente, a variação da energia interna no $W_{\alpha,r}$ é linear à ΔT



Portanto, como toda a variação de energia interna é dada pela variação de temperatura (variável de estado), *então não há outra variável de estado que possa ser associada à variação da energia interna.*

PROPRIEDADE: RELACIONADA AO CALOR NUM PROCESSO ISOTÉRMICO



A variação de volume é uma
variável de estado, ou seja,
independe do modo como se
realizou a mudança

$$\Delta U = k \cdot \Delta T = k \cdot 0 \Rightarrow \Delta U = 0??$$

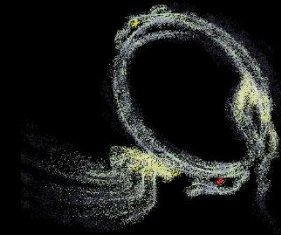
como trabalho foi realizado (pois houve ΔV)

$$Q_{\theta,r} \propto \Delta V_{\text{extra},r}$$

variável que se busca

$$T \cdot \Delta X_r = Q_{\theta,r}$$

QUAIS SÃO AS PROPRIEDADES DESTA VARIÁVEL ?



- Extensiva
- De estado
- Fixa (= constante) para um processo adiabático reversível
- Relacionada ao calor em um processo isotérmico

ENTROPIA



$$T \cdot \Delta X_r \equiv Q_{\theta,r}$$

εντροπια

batizada, por Clausius, como **entropia**
com o símbolo S

entropia: mudança

Assim:

- Trabalho é relacionado às variáveis p e V
- Calor é relacionado às variáveis T e S

ENTROPIA “MECÂNICA”



Uma vez que calor tem uma definição mecânica,
podemos transferir essa definição para a entropia

$$\Delta S_r \propto \Delta V_{\text{extra},r}$$

Como a definição mecânica de
calor é independente da
reversibilidade do processo ...

$$\Delta S \propto \Delta V_{\text{extra}}$$

Não que se obtenha, necessariamente, esse volume extra, mas o processo de transferência de energia entre o sistema e o entorno *teria possibilitado* tal volume extra, independentemente deste haver ou não se realizado.

ENTROPIA E IRREVERSIBILIDADE



- A entropia é uma das “entidades” mais místicas da Ciência contemporânea.
- O que há de tão especial ?
- A entropia parece estar ligada à irreversibilidade dos processos, o que não se faz presente nas demais variáveis termodinâmicas.

$$A_{2^A} [EI]$$



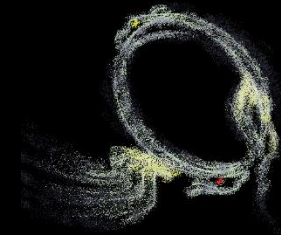
$$T \cdot dS \geq \delta q_r$$

Note: é uma desigualdade

que pode ser transformada numa igualdade

$$T \cdot \underbrace{(dS_r + dS_{\sim r})}_{dS_{\text{total}}} = \underbrace{\delta q_r + \delta q_{\sim r}}_{\delta q_{\text{total}}}$$

UMA CONSTATAÇÃO EMPÍRICA



**calor sempre flui de uma fonte quente para
um sorvedouro frio**

ASSIM ...



$$T \cdot \underbrace{(dS_r + dS_{\sim r})}_{dS_{\text{total}}} = \underbrace{\delta q_r + \delta q_{\sim r}}_{\delta q_{\text{total}}}$$

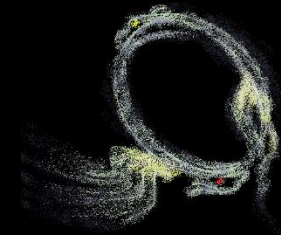
calor trocado de maneira reversível implica que a troca seja feita através de dT

→ logo, não há, efetivamente, diferença de temperatura

$$0 \leq dS_{\text{total}}$$

dada a constatação empírica citada ...

A DESIGUALDADE DE CLAUSIUS



$$0 \leq dS_{\text{total}}$$

Essa é a celebrada desigualdade de Clausius:

“a entropia sempre aumenta”

UM POSTULADO EQUIVALENTE À 2ª LEI



$$T \cdot dS \geq \delta q_r$$



**calor sempre flui de uma fonte quente
para um sorvedouro frio**

A PROVA DA SETA DO TEMPO



- Por décadas, iniciando-se, talvez, com Boltzmann, procurou-se demonstrar ou provar que a 2ª Lei é necessária (inerente aos processos, de *origem determinística*), ou seja, que $dS_{\text{total}} > 0$ num processo espontâneo
- Isto equivaleria a provar que calor **tem que** fluir de uma fonte quente a um sorvedouro frio → *o que é uma ocorrência estatística*

NUNCA SE CONSEGUIU

A 2ª LEI ...

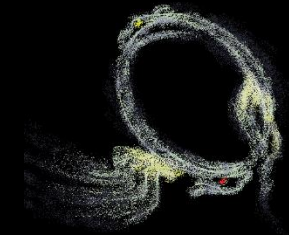


$$T \cdot dS \geq \delta q_r$$

$$0 \leq dS_{\text{total}}$$

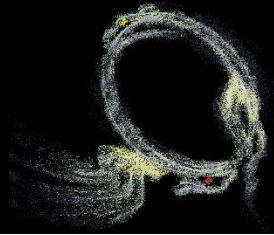
... É CONTINGENTE, E NÃO CAUSAL

RESUMO DA HISTÓRIA



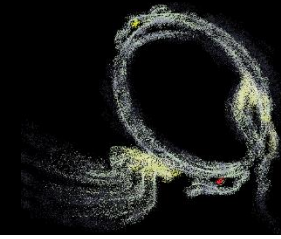
- Aumento de entropia equivale a dizermos que calor flui de uma fonte quente para um sorvedouro frio;
- O fluxo de calor no sentido apontado não tem natureza causal determinística, é uma ocorrência de natureza estatística;
- O fluxo de calor pode ser associado ou definido mecanicamente, e, assim, o mesmo pode ser feito em relação à entropia.

A ENTROPIA DE BOLTZMANN-GIBBS



$$S_{BG} = k_{BG} \cdot \ln W$$

A ENTROPIA DE BOLTZMANN-GIBBS

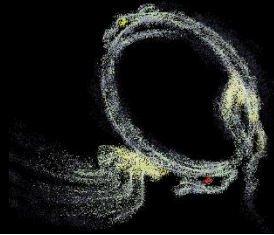


$$S_{BG} = k_{BG} \cdot \ln W$$



estados acessíveis no sistema

ENTROPIA X INFORMAÇÃO



ENTROPIA



- Ainda não vimos isso, mas pode-se adiantar que um sistema TD atinge um estado de equilíbrio no qual não existe mais a possibilidade de se obter trabalho (útil) do (ou no) sistema.
- Neste estado, a entropia do sistema é máxima.

ENTROPIA



- Ainda não vimos isso, mas pode-se adiantar que um sistema TD atinge um estado de equilíbrio no qual não existe mais a possibilidade de se obter trabalho (útil) do (ou no) sistema.
- Neste estado, a entropia do sistema é máxima.
- Como, espontaneamente, a entropia num sistema isolado somente aumenta, então este sistema se torna inoperante no sentido de obtenção de trabalho

ENTROPIA



→ “NÃO HÁ ALMOÇO GRÁTIS”

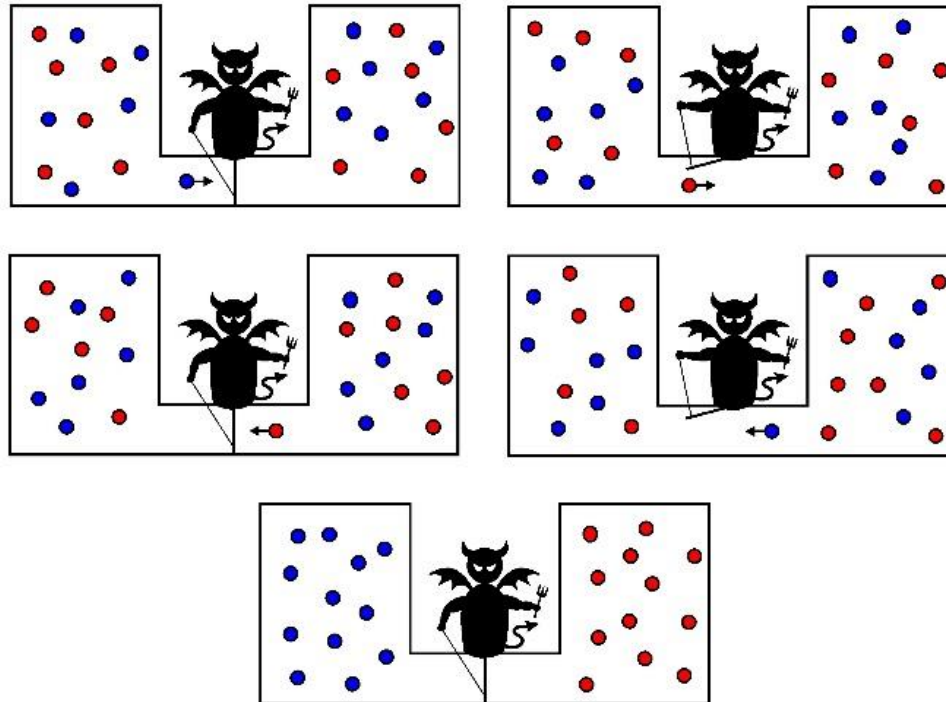
ENTROPIA



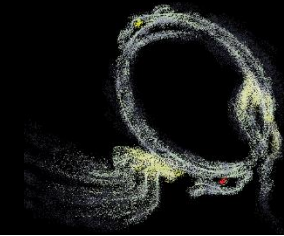
→ “NÃO HÁ ALMOÇO GRÁTIS”

ou seja, calor só flui do quente para o frio e é um evento estatístico

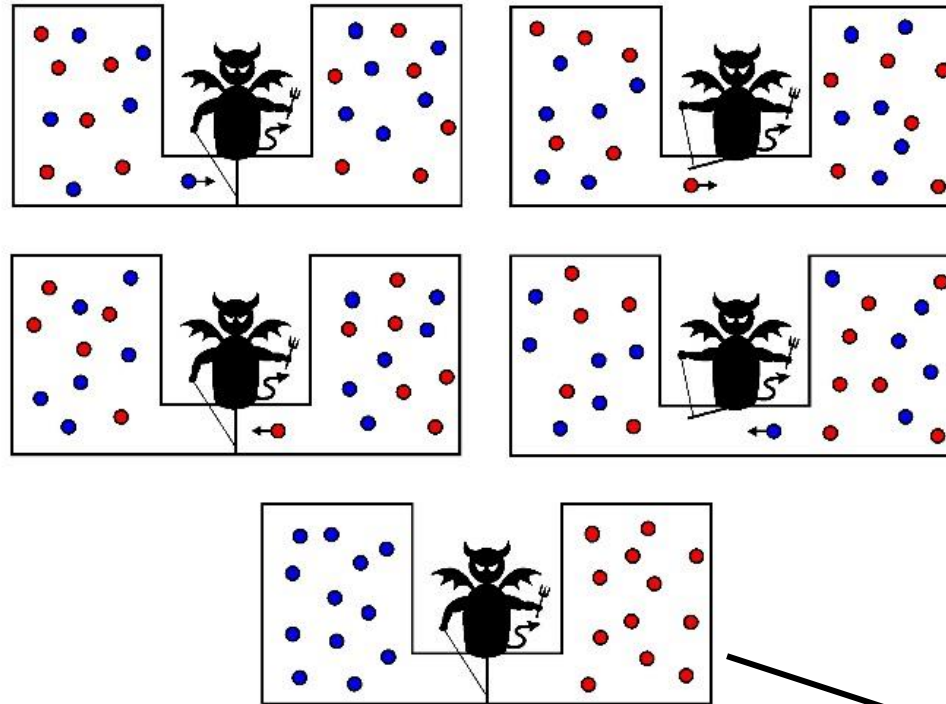
O DEMÔNIO DE MAXWELL (1867)



O DEMÔNIO DE MAXWELL (1867)



sistema em
equilíbrio

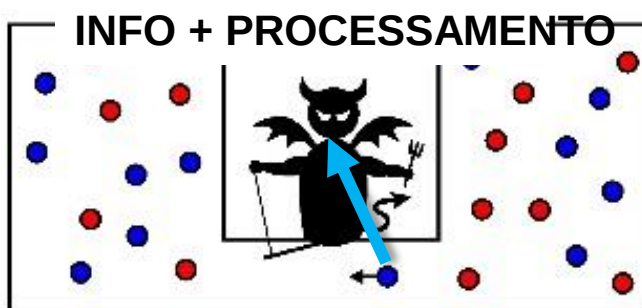
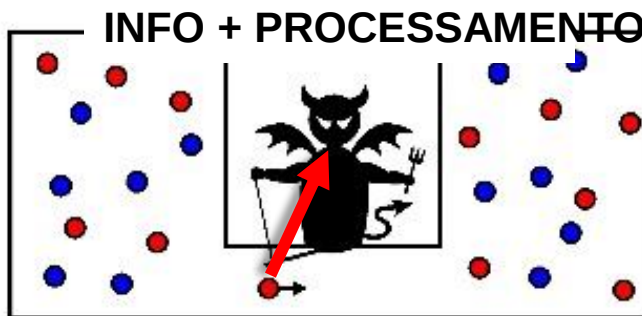


almoço
grátis !!

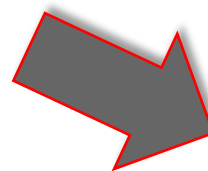
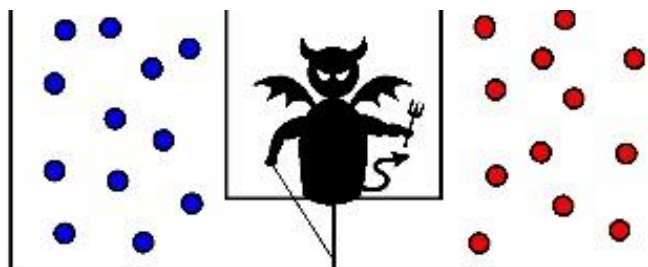
A IDEIA DE MAXWELL FOI MOSTRAR QUE A 2ª LTD É ESTATÍSTICA E NÃO DETERMINÍSTICA (O DEMÔNIO “NÃO FUNCIONA”)



- Contudo, a quantidade de debates que foi originada a partir deste “demônio” é incrivelmente vasta, e surge uma ligação com “informação” ...

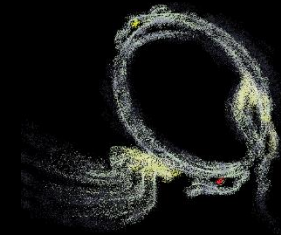


APAGAR INFO ; RESETAR PROCESSAMENTO



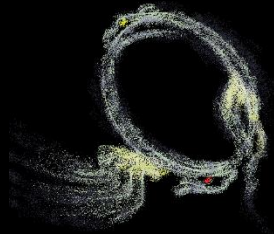
GERAÇÃO DE
ENTROPIA:
O ALMOÇO NÃO
É GRÁTIS !

TEORIA DA COMUNICAÇÃO



- ou, como nasceu a Entropia Informacional a partir da Medida de Incerteza de Shannon

INCERTEZA DE SHANNON



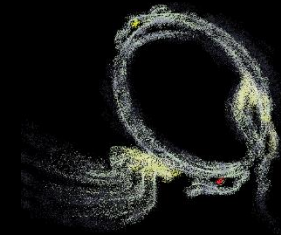
O QUE SHANNON BUSCAVA



- Estávamos no pós 2ª G.M. imediato
- A problemática enfrentada por Shannon dizia respeito às probabilidades de uma dada mensagem no receptor frente à mensagem oriunda do emissor.
- Shannon procurava estabelecer “o que fazer com uma mensagem que chega incompleta”
- Por exemplo, você recebe a seguinte mensagem:

H O ? E

É PRECISO UM ALFABETO ...



- A B C D E F G H I J L M N O P Q R S T
U V X Z

UM ALFABETO ...



- A B C D E F G H I J L M N O P Q R S T
U V X Z
- ou
- A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S
T U V W X Y Z
- ?

UM ALFABETO ...



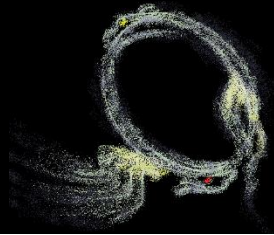
- A B C D E F G H I J L M N O P Q R S T U V X Z
- O U
- A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z
- O U
- A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z 0
1 2 3 4 5 6 7 8 9
- ?

... E UM VOCABULÁRIO



H O J E

... E UM VOCABULÁRIO



H O J E

OU

H O M E

? ?

ASSIM



- A reconstrução da mensagem incompleta no receptor não é desprovida de um relacionamento direto com a mensagem oriunda do emissor: ambas partilham um mesmo alfabeto e um mesmo vocabulário

A INCERTEZA DO TODO DEVE SER IGUAL À INCERTEZA DAS PARTES



INCERTEZA DISSO DEVE SER A MESMA QUE A INCERTEZA DISSO

__TE_ ES_AV____VENDO

__TE_

ES_AV_

____VENDO

O BARALHO É UMA COMBINAÇÃO



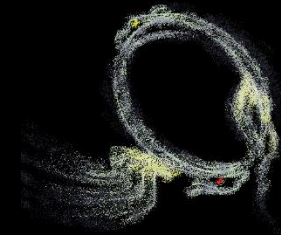
- Um exemplo mais concreto é o seguinte: a incerteza de obtermos um certo número (no conjunto dos naturais) entre 1 e 52 deve ser a mesma de obtermos uma carta específica do baralho tradicional, que tem 4 naipes e 13 valores (resultando em 52 cartas).

naipe



valor

A AXIOMÁTICA DE SHANNON



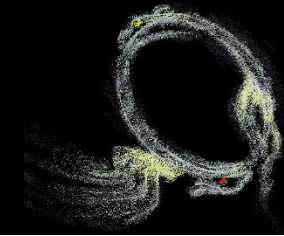
- A partir desta perspectiva, Shannon propõe a seguinte axiomática para estabelecer a incerteza H de uma dada resposta A_i

AXIOMA I



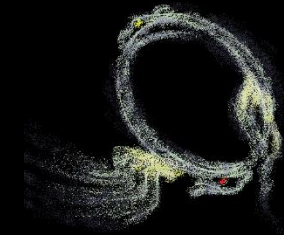
- A incerteza deve ser uma função contínua de $P(A_i)$. De uma maneira intuitiva, isso quer dizer que pequenas mudanças nos valores das probabilidades dos eventos devem resultar em uma pequena mudança na incerteza $H(A)$ associada.

AXIOMA 2



- Para eventos equiprováveis, $H(A)$ deve ser monótona crescente. O que quer dizer que, se $P(A_1) = P(A_2) = \dots = P(A_n)$, então $H(A)$ é tanto maior quanto maior for n , ou seja, a incerteza aumenta conforme aumenta o número de resultados possíveis (isto é, aumento no alfabeto e aumento no vocabulário).

AXIOMA 3



- $H(A)$ deve ser aditiva. Se o resultado da realização de um experimento aleatório pode ser dividido em resultados de experimentos independentes, então a incerteza associada à realização conjunta de dois experimentos independentes pode ser obtida como a soma das incertezas individuais dos dois experimentos separadamente (são os exemplos da frase e do baralho dados anteriormente).

A MEDIDA DE INCERTEZA INFORMACIONAL DE SHANNON (MIS)



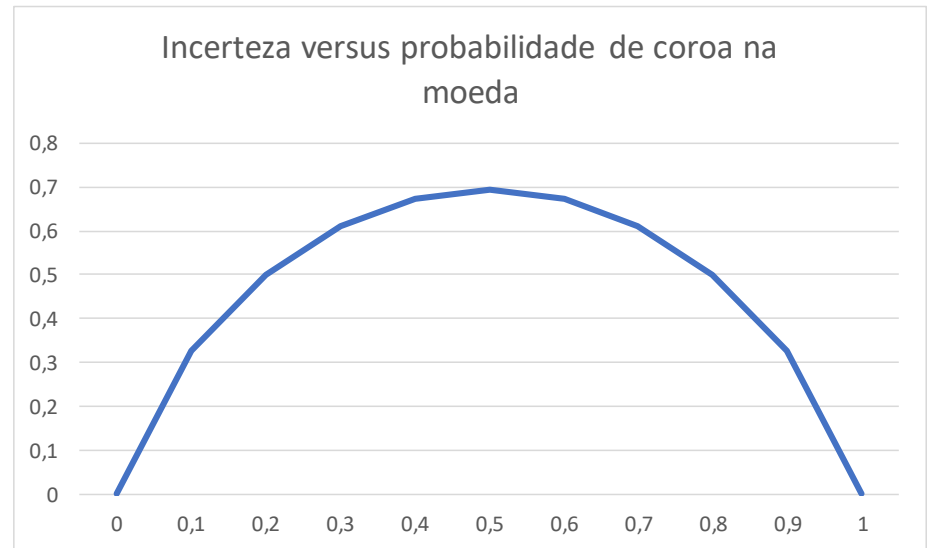
- Destes axiomas, Shannon prova que a única função a satisfazê-los é:

$$H(X) = -k \sum_{i=1}^n p(x_i) \cdot \ln(p(x_i))$$

POR EXEMPLO ...



- Suponha que se saiba que uma moeda é viciada, com probabilidade de 20% de coroa. A MIS vale (a constante k é apenas um fator de normalização):
- $H = -[0.2 \cdot \ln(0.2) + 0.8 \cdot \ln(0.8)] = 0.50$
- Já a MIS de uma moeda honesta vale:
- $H = -[0.5 \cdot \ln(0.5) + 0.5 \cdot \ln(0.5)] = 0.69$
- Note que os valores de H não são probabilidades. Ou seja, o 0,5 e o 0,69 não estão dizendo a você as probabilidades de ocorrer cara ou coroa. Estão dizendo a você que o sistema “moeda viciada” tem uma incerteza menor que o sistema “moeda honesta”.



O DESSERVIÇO DE VON NEWMAN



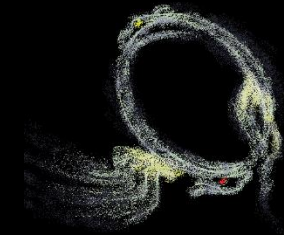
- Shannon lidava com a função H como sendo uma *medida de incerteza* na mensagem. Então, antes da publicação da obra “*The Theory of Communication*” em 1948, von Newman sugere ...
- “Você deveria chamá-la de entropia por duas razões. Em primeiro lugar, sua função de incerteza tem sido utilizada na mecânica estatística sob tal designação, e, assim, esta função já tem um nome. Em segundo lugar, e mais importante, ninguém realmente sabe o que entropia realmente é, e, assim, em um debate, você sempre terá a vantagem.”
 - John von Neumann

E A CONFUSÃO ESTAVA FEITA



- Ou seja, a entropia da mecânica estatística tem a mesma função para seu cálculo que a função H de incerteza de Shannon.
- Contudo, não há uma real justificativa para se trocar uma pela outra.
- Entretanto, o fato empírico é que a confusão se fez e a Medida de Incerteza de Shannon (MIS) passou a ser tratada como a entropia termodinâmica, havendo, inclusive, autores que se referem à S_{BGS} : entropia de Boltzmann-Gibbs-Shannon.

IGUALDADE ENTRE S E H?

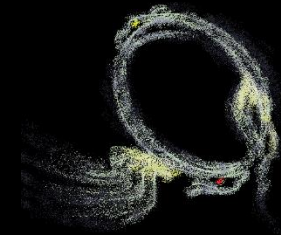


- Considere que não se tenha informação alguma acerca de uma mensagem de símbolo único recebida. Qual é a probabilidade de ser um dos símbolos do alfabeto? $\rightarrow 1/n$
- H é máxima para a situação de desconhecimento sobre a mensagem (ou sobre o sistema, como na moeda)
- S é máxima para a condição de equilíbrio num sistema termodinâmico, no qual os microestados são equiprováveis $\rightarrow 1/n$
- Nesta situação (*E SOMENTE NESSA*), as formulações de $H_{\max}$ e S_{eq} têm valores iguais (ou tornáveis iguais)

$$H(X) = -k \sum_{i=1}^n p(x_i) \cdot \ln(p(x_i))$$

$$S_{BG} = k_{BG} \cdot \ln W$$

ENTROPIA X INFORMAÇÃO

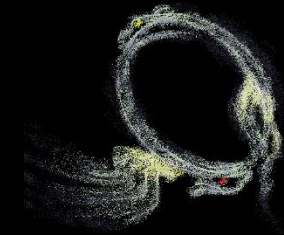


“The meaning of *entropy* is not the same in all respects as that of anything which has a familiar name in common use, and it is, therefore, impossible to give a simple verbal description of it which is, at the same time, an accurate definition.”

“É evidente, contudo, que o que se pretende em observações [como as dadas] é uma *estimativa* de algo como a diversidade entre inferências e, também, como a incerteza, de hipótese dada, no conjunto completo [das possibilidades].”

Richard T. Cox (1961). The Algebra of Probable Inference.

ENTROPIA E INFORMAÇÃO COINCIDÊNCIAS



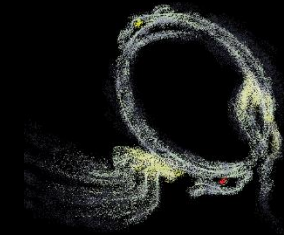
- **Informação**

- se a entropia irá medir a diversidade entre inferências, aquela precisa ser dependente do número destas, de modo crescente
- para uma única inferência, sem quaisquer outras alternativas, deve ser um mínimo global
- para ser uma medida de incerteza, deve envolver as probabilidades das proposições (inferências), de modo que proposições impossíveis devem adicionar nada à incerteza

- **Termodinâmica**

- quanto maior a quantidade de matéria envolvida, maior a entropia do sistema (S é extensiva)
- o aumento do número de estados possíveis aumenta S do sistema, e um único estado possível representa um mínimo de S
- estados não possíveis não acarretam aumento de S

MIAS COINCIDÊNCIAS



- A entropia informacional mede incerteza e diversidade num senso restrito: diferenças de significado num conjunto de proposições (inferências) somente são significativas se afetam as probabilidades das proposições.
- TD: a entropia de uma mistura depende da detecção de diferenças entre os tipos de substâncias envolvidos na mistura, mas não da natureza e da “magnitude” das diferenças entre os tipos.

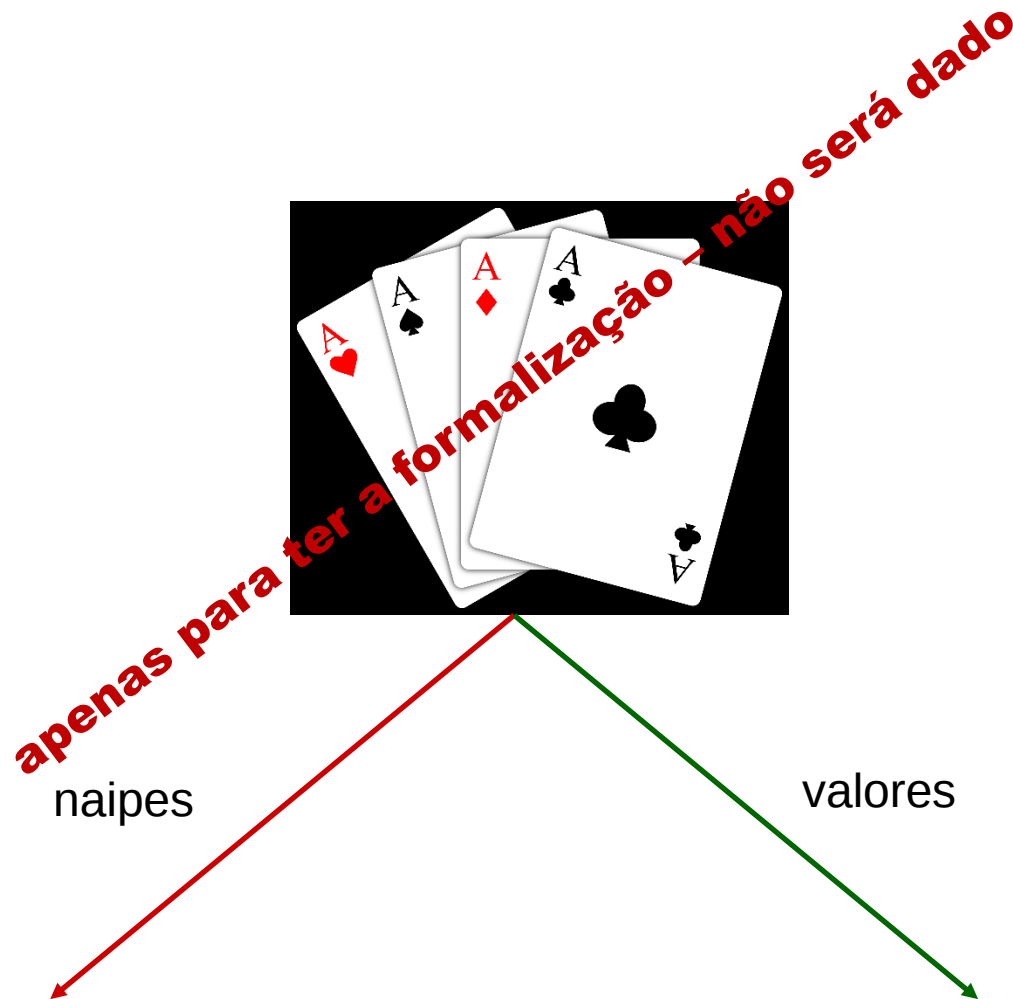
ENTROPIAS INFORMACIONAIS

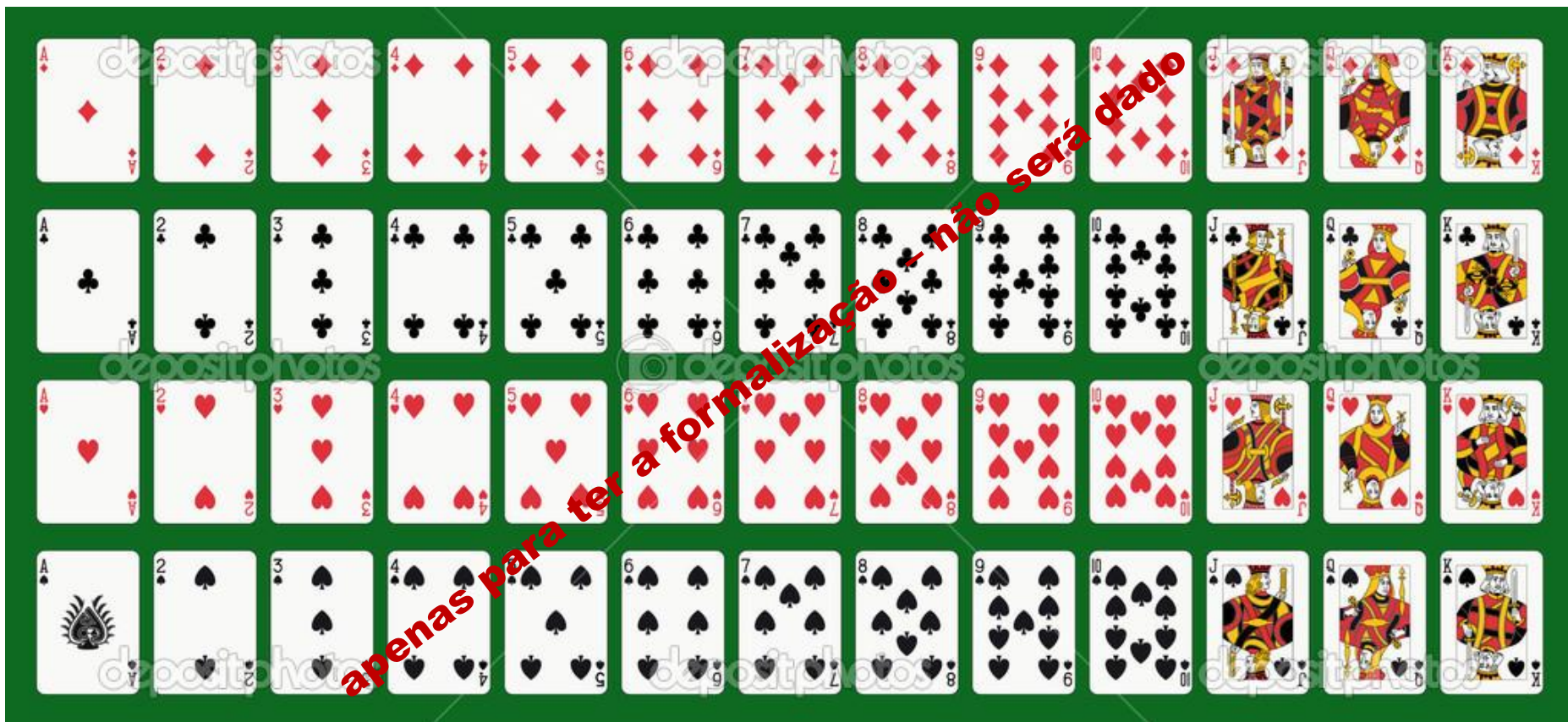


- Há centenas de entropias informacionais espalhadas pelo mundo, literalmente.
- Houve época em que eram lançadas em base mensal.
- Mas, note bem, não são entropias derivadas da mecânica estatística como S acima. São entropias relacionadas à incerteza de Shannon.
- Em outras palavras, são medidas de incerteza que não são fundamentadas na termodinâmica.
- Contudo, têm a mesma característica da MIS: todas assumem o mesmo valor, igual ao da entropia de Boltzmann-Gibbs, se aplicadas a um sistema em equilíbrio.

ENTROPIA INFORMACIONAL

PROPRIEDADES





Proposição: a carta retirada é a dama de paus ... ➔

É UMA CONJUNÇÃO ENTRE DUAS PROPOSIÇÕES ...



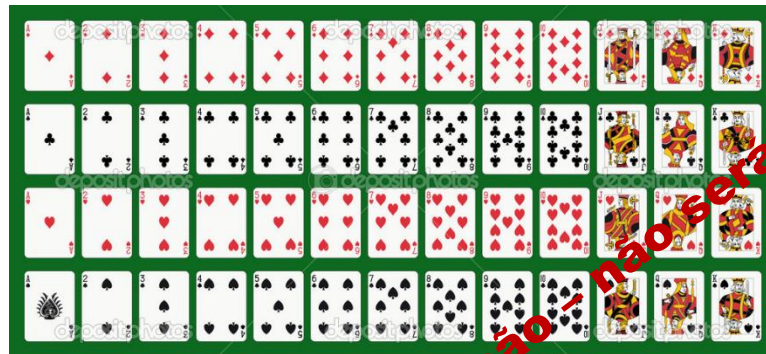
naipe

apenas para ter a formalização - não será dado



valor

A DIVERSIDADE DOS DOIS CONJUNTOS DEVE SER A MESMA DO BARALHO TODO



apenas para ter a formalização - não será dado

$$\eta(52) = \eta(4) + \eta(13)$$

generalizando

$$\eta(x \cdot y) = \eta(x) + \eta(y)$$

DERIVANDO FUNÇÕES ANINHADAS ...



$$H = F(G(w))$$

$$\frac{dH}{dw} = \frac{dF}{dG} \frac{dG}{dw}$$

$$\eta(x \cdot y) = \eta(x) + \eta(y)$$

$$\frac{d\eta(x \cdot y)}{dx} = \frac{d\eta(x \cdot y)}{d(x \cdot y)} \cdot \frac{d(x \cdot y)}{dx} = \frac{d\eta(x \cdot y)}{d(x \cdot y)} \cdot y = \frac{d\eta(x)}{dx}$$

Note: $d\eta(y)/dx \equiv 0$ pois x e y são variáveis independentes

RE-ARRANJANDO ...



$$\frac{d\eta(x \cdot y)}{d(x \cdot y)} \cdot y = \frac{d\eta(x)}{dx}$$

$$\frac{d\eta(x \cdot y)}{d(x \cdot y)} \cdot x = \frac{d\eta(y)}{dy}$$

apenas para ter a formalização - não será dado

$$d\eta(y) = \frac{dy}{y} \cdot \frac{x}{dx} \cdot d\eta(x)$$

Note: como x e y são variáveis independentes, então $d\eta(x) \cdot x/dx \equiv \text{constante para } dy$ (mutatis mutandis para x)

ASSIM ...



$$d\eta(y) = \frac{dy}{y} \cdot k_y \Leftrightarrow \eta(y) = k_y \cdot \ln(y) + C_y$$

$$d\eta(x) = \frac{dx}{x} \cdot k_x \Leftrightarrow \eta(x) = k_x \cdot \ln(x) + C_x$$

$$\eta(x \cdot y) = k_x \cdot \ln(x) + C_x + k_y \cdot \ln(y) + C_y$$

apenas para ter a formalização - não será dado

AS CONSTANTES C E K



$$\eta(x \cdot y) = \ln x^{k_x} + C_x + \ln y^{k_y} + C_y$$

Pela condição de que a entropia de inferências únicas é mínima, então:

$$x = 1 \wedge y = 1 \mapsto \eta(x \cdot y) = 0$$

$$\text{Logo: } C_x = C_y = 0$$

apenas para ter a formalização - não será dado

$$\text{Como } \eta(w) = k_w \cdot \ln(w)$$

$$\text{Tendo-se } w = x \cdot y$$

$$\Rightarrow k_x = k_y = 1$$

PORTANTO



- A função logaritmo na quantificação de entropia (info) surge em decorrência dos axiomas e condições colocados como pertinentes ao que se denominou por INFORMAÇÃO, e não em decorrência de ser a mesma função termodinâmica.
- Obviamente, sendo, matematicamente, a mesma função, propriedades são compartilhadas.

O PISTÃO MÁGICO, NOVAMENTE ...



- O pistão se encontra solto no espaço, numa órbita estacionária qualquer, em equilíbrio térmico com o entrono, sem receber radiação solar, etc. etc., e, de repente, o êmbolo fica livre ...
- O que irá ocorrer ?
- O cilindro se deslocará ? Se sim, para onde e até quando ? Se não, por que ?
- Há variação de temperatura ?
- Há variação de entropia ?
- O processo foi espontâneo ? Explique ...

