

Mundo ordinario, mundo extraordinario. Importancia da escala

Constantino Armesto Ramón

Instituto Illa de Tambo, Marín

Introdución^{i ii iii}

Algunhas ideas son transversais, aparecen na ciencia unha e outra vez, xa se estea a estudar unha estrela, o corpo humano, unha bacteria ou unha civilización, transcenden os límites dunha disciplina concreta e revélanse frutíferas tanto nas explicacións teóricas coma no deseño das observacións. Dende que Galileo tratou a influencia da escala, en *Dúas novas ciencias* (1638), os científicos aprenderon moito sobre o tema.

A gama de magnitudes no universo é inmensa; moitos dos descubrimentos físicos son incomprensibles debido a que entrañan fenómenos en escalas afastadas á experiencia humana. É posible medir a velocidade da luz, a distancia ás estrelas, o número de galaxias no universo observable e a idade do Sol, pero son tan inmensas que non se comprenden de xeito intuitivo; é posible medir o tamaño dos átomos ou as minúsculas cantidades cuánticas, pero tamén superan a comprensión intuitiva. As nosas limitadas percepcións e a nosa limitada capacidade de procesamento da información non poden manexar a gama completa de magnitudes do cosmos; non obstante é factible usar instrumentos para facer observacións e representalas con números.

É difícil abstraerse dos efectos da escala humana; por iso, frecuentemente, a mellor guía para comezar o estudo dun sistema consiste en descubrir como cambia o seu comportamento ao variar a escala das súas magnitudes características; ao facelo pódense descubrirse fenómenos non evidentes na experiencia normal. Ás cegas non se poden ampliar ou reducir as dimensións dun corpo: se se proxecta un obxecto de gran tamaño baseándose nun pequeno, debe previrase a aparición de efectos primordiais, demasiado pequenos para ser detectados á nosa escala. O físico examina o moi grande e o moi pequeno (o macrocosmos e o microcosmos), o lento e o rápido, o quente e o frío (os fenómenos a altas enerxías e a baixas), os sistemas de moitos compoñentes (cumpren leis estatísticas) e os de poucos (manifestan efectos cuánticos subordinados ás leis de conservación), a cantidade de conexións que se establecen entre os compoñentes dun sistema, a natureza dos compoñentes (campos ou ondas) dun sistema, os cambios

de escala na xeometría de dimensións enteiras e na xeometría de dimensións fraccionarias, e todas as demais circunstancias que se poidan idear. Aínda que a natureza abrangue dende as xigantescas galaxias ata as minúsculas partículas subatómicas, a tecnoloxía do ínfimo -a nanotecnoloxía- e do xigantesco -a terraformación de planetas- pertence ao futuro; é posible que chegue en día en que se convertan en realidade, pero de momento, e dentro do previsible, a escala humana será a que fixe a natureza da tecnoloxía.

Obxectivos, metodoloxía e recursos

Obxectivos. 1 Estimar o valor numérico en calquera circunstancia de distintas magnitudes observables na natureza e comparalo cos valores numéricos nas circunstancias humanas habituais. 2 Coñecer os máximos e mínimos de distintas magnitudes observables na natureza. 3 Estimar a influencia da escala no número compoñentes dun sistema e nas conexións entre eles. 4 Estimar a influencia da escala na xeometría euclidiana e na xeometría fractal. 5 Valorar os fenómenos inapreciables na escala humana.

Metodoloxía. Construiremos táboas numéricas onde se consignen as distintas ordes de magnitude de lonxitude, tempo, enerxía, densidade, presión, velocidade e tamén do número de compoñentes dun sistema. Identificaremos os fenómenos non habituais que aparecen nas distintas escalas de lonxitude, tempo, enerxía, densidade, presión, velocidade e número de compoñentes dun sistema (e conexións entre eles), tamén os efectos do cambio da escala na xeometría euclidiana e na xeometría fractal.

Recursos. Revisión bibliográfica.

Resultados

1. Lonxitude^{iv v vi vii viii}

Unha das propiedades máis prominentes da natureza é a diversidade de tamaños (ou escalas de lonxitude) na estrutura do mundo. Hai fenómenos que só se manifestan a unha escala concreta. Moitas veces, os sucesos que se diferencian por unha gran disparidade de tamaño teñen pouca influencia mutua, por iso, os fenómenos asociados con cada escala poden tratarse independentemente; o éxito de moitas teorías usuais da física baséase en illar un rango limitado de escalas de lonxitude. Unha distancia de

dezasete ordes de magnitude separa as correntes oceánicas terrestres das moléculas de auga; non obstante a interacción entre dúas moléculas é a mesma se as moléculas están no océano Atlántico ou nun vaso; a onda do océano pode describirse como unha perturbación dun fluído continuo sen atender a estrutura molecular do líquido.

- Táboa de lonxitudes

Radio universo observable	$100 \cdot 10^{24}$ m
Distancia Terra galaxia Nube de Magallanes	170 000 anos-luz
Radio da Vía Láctea	10^{21} m = 50 000 anos-luz
Distancia Terra estrela Sirio	8,6 anos-luz
Distancia Terra Sol	$150 \cdot 10^9$ m = 8 minutos-luz
Radio dunha estrela (Sol)	$695 \cdot 10^6$ m
Distancia Terra Lúa	$380 \cdot 10^6$ m = 1,3 segundos-luz
Radio dun planeta (Terra)	$6,37 \cdot 10^6$ m
Espesor folla papel	$0,1 \cdot 10^{-3}$ m
Célula humana	$0,01 \cdot 10^{-3}$ m
Distancia moléculas aire	$1 \cdot 10^{-6}$ m
Distancia moléculas auga	$31 \cdot 10^{-9}$ m
Distancia átomos metálicos	$5 \cdot 10^{-9}$ m
Tamaño dun átomo	$0,1 \cdot 10^{-9}$ m
Tamaño protón	10^{-15} m
Lonxitude de Planck	$1,61 \times 10^{-35}$ m

- Fenómenos extremos

- Constante cosmolóxica. Na teoría da relatividade xeral é posible incluír unha forza de gravidade repulsiva (constante cosmolóxica) que aumenta coa distancia e só se mostra a moi grande escala. Na teoría cuántica de campos pode interpretarse a constante cosmolóxica como a enerxía do baleiro; pódese calcular e medir a densidade de enerxía do baleiro; o problema consiste en que o valor calculado é 10^{120} superior ao valor observado.
- Se ignora se o principio de Mach é correcto. Para Newton a inercia debíase ao baleiro; a forza da inercia estaba causada pola reacción do espazo a un corpo acelerado. Para Ernst Mach todas as forzas (a inercia tamén) son

causadas por outros corpos materiais; a inercia de calquera sistema é o resultado da súa interacción coa masa do resto do Universo (principio de Mach).

- No microcosmos non se cumpren as leis do movemento de Newton; as partículas elementais, os átomos e as moléculas seguen as leis da mecánica cuántica.
- Efecto Casimir. Entre dous obxectos metálicos, separados por unha distancia extremadamente pequena comparada co seu tamaño, aparece unha forza atractiva entre ambos os dous debido ao efecto do baleiro (a densidade de enerxía do baleiro será menor entre as placas que no exterior, producíndose unha diferenza de presión que tende a achegar as placas). Para os mecanismos con compoñentes nanotecnolóxicos este efecto convértese na forza dominante; porque por debaixo do micrómetro esta forza chega a ser tan forte que, en separacións de 10 nm, produce presións de 10^5 Pa.
- As escalas de lonxitude máis pequenas e as máis grandes están determinadas pola gravidade; entre ambas as dúas áchanse as estruturas dominadas pola forza forte, a débil e a electromagnética. Durante o tempo de Planck o universo observable hoxe tería o tamaño de Planck, a gravidade sería unha forza relevante, polo que se necesita dunha teoría cuántica da gravidade (inexistente): a física deses momentos é especulativa.

2. Tempo^{ix x xi xii xiii xiv}

A duración da vida humana limita a cantidade de fenómenos que se poden observar.

- Táboa de tempos

Tempo que tarda en evaporarse un burato negro de masa solar	10^{66} s
Vida do protón	$> 10^{33}$ anos
Idade do universo	$13,7 \cdot 10^9$ anos = $0,5 \cdot 10^{18}$ s
Idade da Terra	$4,5 \cdot 10^9$ anos
Idade da vida	$3,5 \cdot 10^9$ anos
Tempo formación primeiras galaxias	10^9 anos
Tempo formación primeiras estrelas	$100 \cdot 10^6$ anos
Período de revolución solar na Vía	$230 \cdot 10^6$ anos

Láctea (ano galáctico)	
Idade da humanidade	120 000 anos = $4 \cdot 10^{12}$ s
Vida piñeiro americano	5100 anos
Vida tartaruga xigante	150 anos
Vida persoa	70 anos = $2 \cdot 10^9$ s
Dúas semanas	10^6 s
Latexo corazón	1 s
Tempo dunha reacción química rápida (explosión)	$10 \cdot 10^{-6}$ s
Vida do muón	$2,2 \cdot 10^{-6}$ s
Tempo luz atravesa o vidro dunha ventá	$10 \cdot 10^{-12}$ s
Tempo que podería existir un par electrón positrón virtual	10^{-21} s
Tempo de Compton do protón	$4,41 \cdot 10^{-24}$ s
Remata a inflación	10^{-33} s despois do cero
Comeza a inflación no universo	10^{-35} s despois do cero
Tempo de Planck	$5,39 \cdot 10^{-44}$ s despois do cero

- Fenómenos extremos

- Non se pode observar a evolución dunha galaxia, dunha estrela, nin sequera dun planeta; pero, a partir dos datos obtidos das observacións podemos construír modelos que predín o seu comportamento. Unha modelización da fusión entre a Vía Láctea e Andrómeda para dar unha galaxia elíptica xigante, suceso que acontecerá dentro de $8 \cdot 10^9$ anos pode verse nun vídeo de 81 s de duración (cada segundo corresponde a cen millóns de anos). Estímase que existen máis de 10^{11} de galaxias no universo observable, a maioría ten un diámetro entre 10^2 e 10^5 parsec e están separadas por distancias da orde de 10^6 parsec. As estrelas do halo e disco dunha galaxia (que non se agrupan en cúmulos) están moi afastadas entre si, a distancia media entre as estrelas próximas ao Sol é 6-7 anos-luz e o raio do Sol $7 \cdot 10^8$ m. Cos datos dos tamaños e distancias das galaxias e estrelas recorreremos a un símil: se as estrelas tivesen o tamaño dun chícharo a distancia de

separación sería 150 km, dedúcese que é moi improbable que choquen; as galaxias, encóntranse relativamente máis próximas, se tivesen o tamaño dun chicharo distarían 20 cm, dedúcese que é probable que choquen.

- Evaporación de buratos negros por radiación de Hawking. As flutuacións cuánticas do baleiro son consecuencia do principio de incerteza de Heisenberg: consisten na creación da nada, de pares partícula-antipartícula virtuais, que se desintegran rapidamente, devolvendo a enerxía prestada para a súa formación. No bordo externo do horizonte de sucesos dun burato negro, créanse pares, pero a probabilidade de que un membro do par se forme no interior e o outro no exterior non é nula. Este fenómeno ten como consecuencias a emisión de radiación por parte do burato negro (e a diminución de masa deste a un ritmo inversamente proporcional á súa masa), e a evaporación do burato negro.
- Creación das partículas durante o Big-bang. Ao rematar a inflación (cada rexión do universo do tamaño de Planck aumentou ata alcanzar un tamaño de 1 m) a enerxía de baleiro que impulsa a expansión acelerada do universo materialízase en partículas.

3. Enerxía ^{xv xvi xvii xviii xix xx}

Consideremos, en primeiro lugar, que temperatura absoluta e masa son diferentes formas de expresar a mesma magnitude, a enerxía; a constante de Boltzmann e o cadrado da velocidade da luz no baleiro son as constantes que converten en enerxía ambas as dúas cantidades. Os fenómenos que se observan a enerxías altas son moi diferentes dos que aparecen a enerxía baixas.

- Táboa de temperaturas

Temperatura de Planck	10^{32} K
Gran Colisionador de Hadróns (LHC) de Xenebra	10^{12} K
Radiación de Hawking dun microburato negro tamaño protón (10^{-15} m) e masa dunha montaña (10^{12} kg)	10^{11} K
Núcleo supernova	10^{11} K
Créanse pares electrón positrón a partir da radiación	10^{10} K
Nucleosíntese helio cando idade do universo 3 minutos	10^9 K
Interior Sol	$1,5 \cdot 10^7$ K

Superficie do Sol	6000 K
Ebulición volframio	5555 °C
Fusión volframio	3422 °C
Formación de átomos e universo transparente cando a idade do universo é 300 000 anos	3000 K
Combustión	500-1500 °C
Lava volcán	1000 °C
Ebulición nitróxeno	-195,8 °C
Fusión nitróxeno	-209,9 °C
Ebulición helio	-268,9 °C
Radiación de fondo cósmica de microondas (detectada)	2,72 K
Fondo cósmico de neutrinos (non detectada)	< 2 K
Radiación gravitatoria de fondo cósmica (non detectada)	1 K
Fusión helio	-272,2 °C
Radiación de Hawking burato negro de masa solar	10^{-5} K
Mínimo alcanzado (ano 2003)	$5 \cdot 10^{-10}$ K
Temperatura mínima	0 K = -273,15 °C

- Fenómenos extremos
 - Sospéitase que as catro forzas da natureza son manifestacións a baixa temperatura dunha única forza fundamental que se manifesta á temperatura de Planck.
 - A temperaturas altas créanse pares partícula-antipartícula a partir da radiación.
 - A partir de 10^6 - 10^7 K prodúcense reaccións de fusión nuclear.
 - A partir de 10^4 K a materia encóntrase en estado plasma.
 - A baixas temperaturas aparece a superfluidez: a viscosidade do Helio-4 anúlase.
 - A baixas temperaturas aparece a supercondutividade: a resistencia eléctrica dos metais anúlase.

- El neutrino electrónico é a partícula material (masa en repouso non nula, velocidade inferior á velocidade da luz no baleiro, espín impar) cuxa masa en repouso é mínima; non se mediu, pero estímase en 0,05 eV, 10^{-7} a masa dun electrón (0,511 MeV), a enerxía da radiación infravermella.

4. Densidade ^{xxi xxii}

Unha magnitude tan sinxela como a densidade proporciónanos moita información sobre as características dun sistema.

- Táboa de densidades

Densidade de Planck	10^{96} kg/m^3
Microburato negro tamaño dun protón (10^{-15} m) e masa 10^{12} kg (montaña)	10^{56} kg/m^3
Burato negro de 10 masas solares	10^{17} kg/m^3
Núcleos atómicos	10^{17} kg/m^3
Estrelas de neutróns	10^{12} a 10^{17} kg/m^3
Ananas brancas	10^9 a 10^{10} kg/m^3
Núcleo Sol	$160 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$
Osmio	$22,5 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$
Chumbo	$11,4 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$
Núcleo Terra	$11 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$
Terra	$5,515 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$
Sol	$1,411 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$
Xúpiter	$1,330 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$
Corpo humano	$1,07 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$
Auga	$1 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$
Burato negro supermasivo 10^8 masas solares	10 kg/m^3
Aire terrestre superficial	$1,3 \text{ kg/m}^3$
Aire a 20 km de altura	$0,09 \text{ kg/m}^3$
Baleiro interestelar	10^{-20} kg/m^3
Densidade crítica do universo (materia visible + materia escura) para $H=70 \text{ km/s.Mpc}$	$5 \text{ átomos hidróxeno /m}^3 = 10^{-26} \text{ kg/m}^3$

Densidade de materia visible do universo	1 átomo hidróxeno /m ³
Densidade da radiación do universo	10 ⁻¹⁴ J/m ³ = 10 ⁻³¹ kg/m ³

- Fenómenos extremos

- A grande escala o universo parece homoxéneo, non obstante a escala menor aparecen heteroxeneidades. A gravidade concentra a materia en rexións do espazo, planetas, estrelas, galaxias, cúmulos, supercúmulos dispostos en follas ou en filamentos, separados por inmensas rexións de espazo practicamente baleiro. A forza electromagnética xunta electróns con núcleos para dar átomos e une uns átomos con outros para dar moléculas. A forza nuclear forte une protóns con neutróns para dar núcleos atómicos.
- A distribución da materia nas galaxias e nos átomos é moi heteroxénea: minúsculos valores de densidade nas nubes de gas e po interestelares e valores máximos de densidade nas estrelas densas; minúsculos valores de densidade na codia atómica e densidade máxima nos núcleos.
- Cando a densidade alcanza un límite nas estrelas densas (ananas brancas, formadas por plasma de núcleos e electróns, e estrelas de neutróns) os orbitais dos átomos solápanse e aparecen forzas repulsivas debidas ao principio de exclusión de Pauli (se os átomos da Terra se condensasen en núcleos, o noso planeta converteríase nunha esfera de 10² m de diámetro e unha persoa non pasaría de 0,02 mm de altura).
- A densidade da materia (visible e escura) do universo é igual á densidade crítica (se deduce un universo aberto).
- Ignórase a constitución da materia escura.
- No universo actual a densidade da materia supera a densidade da radiación; non sempre foi así.

5. **Presión** xxiii xxiv xxv xxvi xxvii

Aínda que a presión mide o fluxo do momento lineal (momento lineal dividido entre unidade de tempo e unidade de área), a súa análise dimensional delata que ten as unidades de densidade de enerxía. Podemos distinguir entre a presión térmica (dun gas quente), a presión cuántica (de dexeneración, debida a un gas frío) e a presión de radiación (gas de fotóns).

- Táboa de presións

Presión de Planck (en unidades naturais:, $G=1$, $c=1$, $\hbar$ reducida=1)	$4,6 \cdot 10^{113}$ Pa
Presión dexeneración estrela neutróns	10^{30} Pa
Presión dexeneración estrela anana branca	10^{23} Pa
Explosión atómica	10^{18} Pa
Centro do Sol	$2,7 \cdot 10^{16}$ Pa
Núcleo de Xúpiter	7000 GPa
Probable síntese artificial de hidróxeno metálico	600 GPa
Centro da Terra	350 GPa
Síntese artificial de hidróxeno metálico durante 100 ns	140 GPa
Explosión química	30 GPa
Presión do gas de electróns nun metal	10 GPa
Síntese artificial de diamantes	5 GPa
Cravar unha agulla	1 GPa
Fondo do océano	$1000 \cdot 10^5$ Pa
Cachalote mergullo	$120 \cdot 10^5$ Pa
Presión osmótica	$100 \cdot 10^5$ Pa
Superficie Terra	10^5 Pa
Altitude 5,5 km	$5 \cdot 10^4$ Pa
Altitude 16 km	10^4 Pa
Auga ferve á temperatura corporal (37 °C)	$6,26 \cdot 10^3$ Pa
Superficie Marte	700-900 Pa
Luz solar (á distancia da Terra)	$4 \cdot 10^{-6}$ Pa
Vento solar (á distancia da Terra)	$2 \cdot 10^{-9}$ Pa
Superficie Lúa	$3 \cdot 10^{-10}$ Pa

- Fenómenos extremos
 - A presións extremadamente altas a química dos elementos da táboa periódica pode ser diferente á habitual: hidróxeno metálico.
 - A presións altas disólvense os gases no sangue, esmáganse os organismos vivos, defórmase a codia dos átomos, destrúense os átomos, fórmanse buratos negros.

- O vento solar causa as dúas colas dos cometas: a cola de plasma diríxese sempre no sentido perfectamente contrario ao da luz do Sol, a cola de po retén a inercia orbital.
- As velas solares con impulso fotónico son posibles. O Ikaros, lanzada o 20-5-2010, é unha sonda espacial xaponesa enviada a Venus impulsada parcialmente mediante unha vela solar. A NASA lanzou, o 20-11-2010, o minisatélite NanoSail-D2 que conseguiu despregar con éxito unha vela solar en órbita.

6. Velocidade ^{xxviii xxix xxx xxxi}

É enorme a diferenza entre as nosas capacidades e a realidade que nos afecta, salvamos o abismo seleccionando que atender. Algunhas veces a selección vénnos imposta polas limitacións dos nosos sentidos; só vemos as radiacións electromagnéticas cuxa lonxitude de onda está comprendida entre 380 nm e 760 nm; só oímos as ondas sonoras comprendidas entre 20 Hz e 20 kHz; non dispoñemos de sentidos para detectar o magnetismo ou a electricidade. A natureza tamén nos impón limitacións para observar o que sucede fóra da Terra: a atmosfera absorbe as radiacións electromagnéticas que veñen do exterior e só permite o paso da luz visible (ventá óptica) e as ondas de radio (ventá de radio). Noutros casos é o propio observador quen fai a selección: prescinde dos efectos gravitatorios se fai $G=0$, elude os efectos cuánticos se fai $\hbar=0$ e prescinde dos efectos relativistas se fai que $c^{-1}=0$.

A estrutura do noso mundo está determinado polas forzas da natureza (gravidade, electromagnética, forte e débil) e polas leis que gobernan o movemento dos corpos baixo a influencia desas forzas. Na escala humana estas leis son as leis do movemento de Newton; non obstante non describen o mundo en tres circunstancias: cando a velocidade dos corpos se aproxima á velocidade da luz no baleiro, cando os campos gravitatorios son intensos e no microcosmos. Imos centrar a atención na velocidade.

- Táboa de velocidades

Velocidade da luz no baleiro	$3 \cdot 10^8$ m/s = 10^9 km/h = 7 xiros á Terra / s
Raios cósmicos (protóns)	Case c ($3,2 \cdot 10^{20}$ eV)
Partículas nos grandes aceleradores	$0.999999991c$ (10^{12} eV)

Sol arredor do núcleo da galaxia	230 km/s = 230.10 ⁶ anos/volta
Terra arredor Sol	30 km/s = 120 000 km/h
Vehículo espacial	11 km/s = 40 000 km/h
Son	330 m/s = 1200 km/h
Falcón	50 m/s = 180 km/h
Guepardo	30 m/s = 105 km/h
Atún	20 m/s = 70 km/h
Persoa	10 m/s = 36 km/h

- Fenómenos extremos
 - Ningunha partícula material pode alcanzar a velocidade da luz no baleiro.
 - A velocidade da luz nun medio transparente (auga, vidro) é menor que no baleiro: unha partícula material pode moverse a unha velocidade maior que a luz nese medio.
 - Os raios cósmicos de baixa enerxía -a maioría- proveñen de lugares da nosa galaxia (supernovas); en cambio, algúns raios cósmicos –escasos- teñen máis enerxía que ningunha outra partícula do universo $3 \cdot 10^{20}$ eV (cen millóns de veces a dos máis grandes aceleradores terrestres); ignórase a súa orixe, aínda que se estima que probablemente proveñan de fóra da nosa galaxia. A velocidades próximas á luz, a masa e o tempo de vida dos raios cósmicos aumenta e contráese a lonxitude (a altura da atmosfera é menor que para nós).
 - A velocidades próximas á luz, a masa e o tempo de vida das partículas nos grandes aceleradores aumenta e contráese a lonxitude.

7. Número de compoñentes elementais dun sistema^{xxxii xxxiii xxxiv xxxv xxxvi xxxvii xxxviii xxxix}

Cando o número de compoñentes dun sistema é extremadamente grande presenta efectos estatísticos. Os sistemas físicos, ecosistemas e sociedades humanas, en ocasións, inclúen tantos compoñentes, que desafían unha descrición precisa, por iso, débese recorrer a magnitudes medias (como a temperatura absoluta ou a rende per cápita) que representen un resumo das características xerais do sistema.

- Táboa de número de compoñentes

Fotóns do universo	10^{89}
Partículas materiais do universo	10^{80}
Partículas nunha galaxia	10^{68}
Partículas do Sol	10^{57}
Átomos da Terra	10^{51}
Átomos dunha balea azul	10^{32}
Virus nos océanos	10^{30}
Átomos dun humano	10^{29}
Moléculas nun gramo de auga	10^{22}
Grans de area de todas as praias do mundo	10^{20}
Formigas	10^{16}
Células dun humano	10^{14}
Neuronas do noso cerebro	10^{11}
Estrelas da Vía Láctea	10^{11}
Galaxias do universo observable	10^{11}
Seres humanos	10^9
Formigas nun formigueiro	10^7
Pelos dunha cabeza humana	10^5

- As conexións internas entre os elementos constituíntes dun sistema presentan un efecto de escala. O número de pares posibles (conexións telefónicas, unións neuronais, amizades) aumenta (aproximadamente) proporcionalmente ao cadrado do número de elementos do sistema. Unha poboación humana dez veces máis grande terá aproximadamente cen veces máis relacións interpersoais: por iso unha cidade non é unha aldea grande.
- Existen sistemas con alto grao de orde e estabilidade (cristais) e sistemas completamente aleatorios (fluídos turbulentos e gases quentes); os obxectos complexos (seres vivos) aparecen na fronteira entre uns e outros, entre a orde e o azar. Os expertos non acaban de poñerse de acordo nunha definición da complexidade de calquera sistema (físico, biolóxico, social ou informático). Seth Lloyd recompilou unha lista cunha trintena de definicións; comentarei brevemente a entropía e a emerxencia.
- Entropía, fenómenos extremos:

- A entropía está definida só en sistemas pechados e en estado de equilibrio, para calcular a entropía noutros sistemas hai que aplicar a termodinámica dos procesos irreversibles. Calquera ser vivo constitúe un sistema aberto, aínda cando se encontre nun estado estacionario (non confundir co estado de equilibrio). Os estados estacionarios de sistemas lineais son estables a pequenas perturbacións; algúns estados estacionarios de sistemas non lineais non son estables respecto a pequenas perturbacións, o sistema desprázase a outro estado estacionario máis afastado do equilibrio; o sistema adopta un estado estacionario de alta orde a expensas de disipar enerxía.
- Cando a entropía dun sistema aumenta estamos habituados a pensar que a desorde aumenta; non sempre sucede así. A pesar da identificación entre entropía e desorde hai transicións de fase nas cales emerxe unha fase ordenada e ao mesmo tempo a entropía (definida pola ecuación de Boltzmann como proporcional ao número de microestados posibles das súas partículas elementais) aumenta. Tanto a cristalización dun fluído (de esferas duras) coma a separación dos compoñentes dunha mestura binaria ilustran o fenómeno; nun volume caben máis esferas se están ordenadas que se se meten ao azar: as esferas ordenadas teñen máis entropía.
- Aínda se dubida como afecta a gravidade á entropía: a escala humana, o gas emitido por un vehículo espacial disípase no espazo; a escala astronómica, unha nube de gas con suficiente masa condénsase nunha estrela. En presenza de buratos negros (almacenan a entropía dos obxectos que engolen na superficie do horizonte de sucesos) a segunda lei da termodinámica só se cumpre se se utiliza a entropía xeneralizada (Jacob Bekenstein), unha magnitude que suma á entropía convencional un factor: a constante de Boltzmann multiplicada pola cuarta parte da área do horizonte de sucesos de todos os buratos negros do universo, medida en unidades de Planck. A xeito de comparación a entropía dun burato negro de 1 m^2 de diámetro sería 10^{70} bits, aproximadamente, unha cantidade enorme. Aínda está sen resolver o paradoxo de información: destrúese totalmente a información que cae na singularidade dun burato negro; suceso que contradí o principio da reversibilidade da mecánica cuántica (sempre será posible reconstruír as configuracións orixinais das partículas a partir dos produtos finais).

- A entropía específica do universo é da orde de 10^9 fotóns por cada protón: a entropía do universo está na radiación. Podemos concluír que a morte térmica do universo xa aconteceu nos primeiros segundos do universo. Se todas as partículas materiais se convertesen en radiación a entropía apenas aumentaría unhas mil millonésimas.
- Emerxencia

Cando un sistema adquire certa complexidade pode mostrar características que son impredecibles a partir das interaccións dos seus compoñentes, aínda que as interaccións se comprendan. As propiedades emerxentes aparecen nun sistema non lineal (o seu comportamento non pode expresarse como suma dos comportamentos dos seus elementos constituíntes) e poden requirirse novos principios, que non sexan incompatibles cos subxacentes. Son fenómenos emerxentes: un tornado, as correntes convectivas nun líquido ou nun gas, a reacción de Belousov-Zhabotinsky, os patróns na cotización de accións nas bolsas, a formación de cardumes ou bandadas, unha colonia de formigas, o comportamento autoorganizado dun ecosistema (a autoorganización é un proceso no que a organización interna dun sistema aumenta de complexidade sen ser guiado por ningún axente externo). Dous fenómenos emerxentes merecen un comentario particular: a mente (que emerxe do funcionamento conxunto de moitas células nerviosas) e a vida celular (que emerxe do funcionamento conxunto de moitas moléculas). Non hai nada na vida que viole as regras da química, para explicar a un ser vivo ou a súa evolución non fan falta novas leis; a vida é química no sentido de que non necesita máis que os seus compoñentes organizados en certa forma para que exista; pero non só é química, se consideramos que se trata dun fenómeno tan complexo que non pode ser descrito unicamente a nivel químico. Non hai xeito de predicir, tomando en conta as leis da física ou da química, que un conxunto de moléculas ou de neuronas presentará as funcións que coñecemos como vida ou intelixencia; trátase de fenómenos que xorden da organización do sistema, pero impredecibles.

8. A escala na xeometría euclidiana e na xeometría fractal ^{xl xli xlii xliii xlv xlv xlvii}

- Xeometría euclidiana

A medida que aumenta (ou diminúe) o tamaño dos obxectos ou dos animais, o seu volume aumenta (ou diminúe) máis rápido que a súa superficie; polo tanto as propiedades que dependen do volume (como o peso) cambian de proporción coas que dependen da súa área (como a resistencia dos soportes ou a actividades da superficie).

- Fenómenos extremos

- O tamaño dos edificios non pode aumentar sen que a súa estrutura experimente cambios fundamentais. Non é posible facer edificios de cen pisos co mesmo deseño e materiais que os de dous pisos: colapsarían debido ao seu propio peso.
- Ao aumentar o tamaño dos animais, o grosor das súas patas aumenta en maior proporción do que aumenta o seu volume: as patas dun animal cuadrúpede de cento corenta toneladas terían que ser tan anchas que se tocarían unhas con outras: trátase dun límite do peso dun animal terrestre (hai outro límite: un animal de máis de cen toneladas non terían tempo para inxerir todo o alimento que necesitara).
- O aumento de tamaño animal significa maior capacidade de manter a temperatura corporal; constitúe unha alternativa á endotermia (un mamífero gasta o 80% da enerxía que produce en manter a súa temperatura, un réptil só o 8%).
- Unha substancia disólvese ou reacciona máis rápido finamente dividida que se está nun só bloque: as labras de madeira arden máis rapidamente que as árbores, o sal ou o azucre disólvense máis rapidamente en po que nun bloque.
- Ao diminuír o tamaño do animal, aumenta a cantidade de calor perdida pola pel, en consecuencia aumenta a cantidade de alimento que debe inxerir e por iso aumenta a súa mobilidade e tempo dedicado á busca ou captura dos alimentos.
- Se unha mosca se molla, adhírese tanta auga á súa superficie, que mollada pesa o dobre que seca.
- Algúns insectos (zapateiro, *Gerris lacustris*) poden desprazarse na auga sen afundirse: a tensión superficial supera o peso.

- Xeometría fractal

Os elementos da xeometría euclidiana son entes ideais concibidos para construír modelos dos fenómenos naturais e cuantificalos medindo lonxitudes, áreas ou volumes; pero os entes naturais poden ser tan e irregulares que a medición euclidiana careza de sentido; non obstante, pode medirse o grao de irregularidade, avaliando o rápido que aumenta a lonxitude, a superficie ou o volume, se medimos en escalas cada vez máis pequenas. Mandelbrot adoptou este enfoque e acuñou o termo fractal para designar

entes moi irregulares, pero autosemellantes. A xeometría fractal intenta describir matematicamente obxectos naturais que teñen unha forma complexa, e cuxa estrutura básica se repite a diferentes escalas (presentan unha invarianza de escala) de tal modo que as súas partes teñen a mesma forma que o todo. A xeometría euclidiana diferénciase da xeometría fractal en que a dimensión espacial dun obxecto euclidiano é un valor enteiro (0 para o punto, 1 para a liña, 2 para o plano, 3 para o volume), mentres que a dimensión dun fractal pode adoptar valores non enteiros. As montañas non son conos, as nubes non son esferas, as illas non son círculos, os raios non son liñas rectas, as formas de moitos obxectos naturais son fractales, como tamén o son as redes neuronais, a rede vascular, os pulmóns, os fentos, os litorais ou as folerpas de neve.

As medidas de distancias, áreas e volumes dependen da escala; non existen lonxitudes independentes da unidade de medida; por exemplo, a distancia ao redor dunha árbore non é a mesma para unha persoa que para unha formiga.

As ramificacións e repregamentos fractais amplifican grandemente a superficie das áreas de absorción (intestino, raíces), de distribución ou recolección (vasos sanguíneos, tubos bronquiais) e de procesamento de información (neuronas). A unha capacidade pulmonar humana de 6 litros correspóndelle 70 m² de área alveolar. A causa da súa redundancia e irregularidade, os fractais son robustos e resistentes ás lesións.

Unhas lagartixas (réptiles Gekkonidae, masa 60 g, peso 0,6 N) soben por superficies lisas verticais e camiñan polo teito.. As patas destes réptiles son rugosas, entre as catro conteñen, aproximadamente, dous mil millóns de peliños que lle serven para adherirse a calquera superficie mediante forzas de Van der Waals que proporcionanlle unha forza adhesiva de 40 N.

- Xerarquía de estruturas e relatividade de escala

Ao cambiar a escala á que se analiza un sistema encóntranse estruturas diferentes e apréciase unha xerarquía de estruturas; o número de unidades aumenta cara a abaixo e a complexidade estrutural das unidades aumenta cara a arriba; certamente o nivel superior contén os niveis inferiores. No microcosmos e no macrocosmos achamos distintos niveis de organización: partículas elementais, núcleos, átomos, moléculas; ou planetas, estrelas, galaxias e cúmulos, que poden formar supercúmulos, uns agregados que están dispostos en follas ou en filamentos. No mesocosmos tamén distinguimos niveis de organización: dende as células ata os organismos, poboacións, comunidades e biosfera; ou ben individuos, sociedades, civilizacións, historia. En moitos casos, non en todos,

pode estudarse cada nivel de organización sen referirse ao nivel inferior. En xeoloxía, é posible referirnos á erosión sen recorrer ás forzas eléctricas entre átomos. En fisioloxía, é posible describir o corazón como unha bomba hidráulica que opera coa sangue, sen que interveñan as células que o compoñen. En psicoloxía, é posible analizar a resposta dunha persoa a unha mensaxe, sen considerar o funcionamento das neuronas. En economía, é posible describir o comportamento da bolsa sen mencionar a ninguén en concreto.

Dende Newton a Einstein utilízase o método matemático diferencial para expresar os fenómenos físicos con ecuacións: descomponse un obxecto complexo nas súas partes máis simples (permiten unha descrición local), posteriormente intégrase para obter as propiedades globais. O método perde eficacia se as partes do obxecto inicial, en vez de máis simples, son diferentes ou máis complexas. Así sucede no microcosmos; aparecen estruturas novas a escalas menores; un novo método, a mecánica cuántica describe os seus comportamentos. A física de Newton e Einstein fundada na diferenciabilidade é incapaz de explicar os fenómenos cuánticos que se basean na non diferenciabilidade. A teoría da relatividade de escala xeneraliza o principio da relatividade de Einstein: as leis da natureza son as mesmas con independencia da escala do sistema de coordenadas. Cando se aplica ao espazo-tempo a idea que as magnitudes físicas dependen da resolución (da precisión da observación) chégase a que o espazo-tempo é un fractal e que as propiedades cuánticas son unha consecuencia da natureza fractal do espazo-tempo.

Conclusións

- Os tamaños, tempos e circunstancias que poden presentarse na natureza son extraordinariamente variadas; comparados con eles, o cosmos, a escala humana, abrangue unhas condicións moi reducidas.
- Podemos estimar, con números, os valores de moitas magnitudes observables dende un máximo a un mínimo.
- En condicións moi diferentes ás habituais aparecen fenómenos inesperados: resaltar o perigo das extrapolacións.
- A comprensión da complexidade dun sistema, a aplicación da termodinámica a calquera sistema e a avaliación da importancia dos fractais na natureza son problemas inacabados.

Bibliografía

-
- ⁱ Feynman, R. (1983). *La ley física*. Barcelona, Antoni Bosch, pp. 104-108.
- ⁱⁱ Physical Science Study Committee (1966): *Física*, 2ª edición, Reverté, Barcelona.
- ⁱⁱⁱ Rutherford, F. J. (1997): *Ciencia: conocimiento para todos*. Proyecto 2061 American Association for the Advancement of Science. Oxford university Press, Harla México, pp. 183-185.
- ^{iv} Elizalde, E. (2009): “El efecto Casimir”. *Investigación y ciencia*, marzo 390: 54-63.
- ^v Gardner, M. (1986): *La explosión de la relatividad*. Salvat, Barcelona, pp. 127-134.
- ^{vi} Davies, P. (1986): *El universo accidental*. Barcelona, Salvat, pp. 2-11, 47-79.
- ^{vii} Abbott, Larry (1988): “El misterio de la constante cosmológica”. *Investigación y ciencia*, julio, 142: 76-83.
- ^{viii} Krauss, L.M. y Turner, M.S. (2004): “La constante cosmológica”. *Investigación y ciencia*, noviembre, 338: 50-57.
- ^{ix} Hawking, S. (1977): “La mecánica cuántica de los agujeros negros”. *Investigación y ciencia*, marzo, 15: 22-31.
- ^x Shara, M. (2003): “Colisiones estelares”. *Investigación y ciencia*, enero 316: 14-21.
- ^{xi} Peebles, P. James E. (2001): “El sentido de la cosmología moderna”. *Investigación y ciencia*, marzo 294: 80-81.
- ^{xii} Verdes-Montenegro, Lourdes (2004): “Galaxias en colisión”. *Investigación y ciencia*, marzo, 330: 16-24.
- ^{xiii} Guth, A. y Steinhardt, P. (1984): “El universo inflacionario”. *Investigación y ciencia*, julio, 94: 66-79.
- ^{xiv} Weinberg, Steven (1981): “La desintegración del protón”. *Investigación y ciencia*, agosto, 59: 16-28.
- ^{xv} Weinberg, S. (1984): *Los tres primeros minutos del universo*. Madrid, Alianza.

^{xvi} Turner, M. S. (2009): “El origen del universo”. *Investigación y ciencia*, noviembre, 398: 18-25.

^{xvii} Mermin, N. y Lee, D. (1977): “Helio 3 superfluido”. *Investigación y ciencia*, febrero, 5: 26-37.

^{xviii} Kearns, E.; Kajita, T. y Totsuka, Y. (1999): “Detección de la masa de los neutrinos”. *Investigación y ciencia*, octubre, 277: 16-24.

^{xix} Collins, Graham (2005): “Creación de antimateria fría”. *Investigación y ciencia*, agosto, 347: 54-61.

^{xx} Bosman, M. y Rodrigo, T. (2012): “La búsqueda del bosón de Higgs”. *Investigación y ciencia*, septiembre, 432: 16-23.

^{xxi} Díaz Alonso, J. (1997): “Las estrellas densas”. *Investigación y ciencia*, agosto, 251: 76-85.

^{xxii} Schneider, P. (2010): “Cuestiones fundamentales de cosmología”. *Investigación y ciencia*, junio, 405: 60-68.

^{xxiii} Díaz Alonso, J. (1997): “Las estrellas densas”. *Investigación y ciencia*, agosto, 251: 76-85.

^{xxiv} Scandolo, S. y Jeanloz, R. (2004): “El interior de los planetas”. *Investigación y ciencia*, septiembre, 336: 6-16.

^{xxv} Nellis, William (2000): “Metalizar el hidrógeno”. *Investigación y ciencia*, julio, 286: 48-55.

^{xxvi} Harris, Henry M. (1999): “Velas de luz”. *Investigación y ciencia*, abril, 271: 74-75.

^{xxvii} Brandt, J.C y Niedner, J.C. (1986): “Estructura de la cola de los cometas”. *Investigación y ciencia*, marzo, 114: 34-43.

^{xxviii} Gardner, M. (1986): *La explosión de la relatividad*. Salvat, Barcelona.

^{xxix} Cronin, J.; Gaisser, T. y Swordy, S. (1997): “Rayos cósmicos en las fronteras de la energía”. *Investigación y ciencia*, marzo 246: 6-12.

^{xxx} Linsley, J. (1978): “Los rayos cósmicos de máxima energía”, *Investigación y ciencia*, septiembre, 24: 26-37.

^{xxxi} Cronin, J., Gaisser, T. y Swordy, S. (1997): “Rayos cósmicos en las fronteras de la energía”, *Investigación y ciencia*, marzo, 246: 6-12.

^{xxxii} Cuesta, José A. (2006): “La entropía como creadora de orden”, *Revista Española de Física*, diciembre, vol. 20, nº. 4, pp. 13-19.

^{xxxiii} Horgan, J. (1995): “De la complejidad a la perplejidad”. *Investigación y ciencia*, agosto. 227: 71-77.

^{xxxiv} Davies, P. (1986): *Dios y la nueva Física*. Barcelona, Salvat, pp. 59-65.

^{xxxv} Solé, R.; Bascompte, J.; Delgado, J., Luque, B. y Manrubia, S. (1996): “Complejidad en la frontera del caos”. *Investigación y ciencia*, mayo, 236: 14-21.

^{xxxvi} Gould, S. J. (1994): “La evolución de la vida en la Tierra”. *Investigación y ciencia*, diciembre, 219: 54-61.

^{xxxvii} Mandelbrot, Benoît (1996): “Del azar benigno al azar salvaje”. *Investigación y ciencia*, diciembre, 243: 14-20.

^{xxxviii} Bekenstein, Jacob (2003): “La información en el universo holográfico”, *Investigación y ciencia Investigación y ciencia*, octubre, 325: 36-43.

^{xxxix} Susskind, Leonard (1997): “Los agujeros negros y la paradoja de la información”, *Investigación y ciencia*, junio, 249: 12-18.

^{xl} Trefil, J. (1986): *El panorama inesperado*. Salvat, Barcelona, pp. 181-198.

^{xli} Treitz, N. (2011): “De visita en el país de Liliput”. *Investigación y ciencia*, septiembre, 420: 88-90.

^{xlii} Goldbeger, A.; Rigney, D. y West, B. (1990): “Caos y fractales en la fisiología humana”. *Investigación y ciencia*, abril 163: 30-38.

^{xliii} Pöppe, C. (2011): “El conjunto de Mandelbrot en tres dimensiones”. *Investigación y ciencia*, febrero, 413: 50-57.

^{xliv} Courty, J. y Kierlik, É. (2004): “Interacciones que pegan”. *Investigación y ciencia*, noviembre, 339: 86-87.

^{xlvi} Davies, P. (1986): *El universo accidental*. Barcelona, Salvat, pp. 2-11, 47-79.

^{xlvi} Wilson, K. (1979): “Problemas físicos en muchas escalas de longitud”. *Investigación y ciencia*, octubre, 37: 72-93.

^{xlvii} Nottale, L. (1997): “El espacio-tiempo fractal”. *Investigación y ciencia*, julio, 250: 66-73.