F r a t t a l i

il Codice Segreto della Natura

Un viaggio matematico tra l'ordine del caos e le geometrie nascoste dell'universo

di Michele Valentino

Copertina ed immagini generate con l'uso della IA.

Prima Edizione: giugno 2026

Prefazione

Tornare a parlare di frattali, dopo trentacinque anni dalla pubblicazione del mio saggio *Viaggio nell'Universo Frattale*, è come riaprire un dialogo con una parte di me che non ha mai smesso di osservare il mondo attraverso la lente della complessità.
Nel 1991, quel primo libro nasceva dal desiderio di raccontare la meraviglia matematica nascosta nelle forme della natura — una meraviglia che allora sembrava confinata ai laboratori e alle immagini generate dai primi computer. Oggi, quella stessa geometria è diventata linguaggio, estetica, persino filosofia.

In questi decenni, la mia vita professionale si è intrecciata con la finanza, la psicologia del rischio e la tecnologia. Ma i frattali sono rimasti una costante: un modo per comprendere come l'ordine possa emergere dal caos, come la bellezza possa nascere dalla ripetizione e dalla variazione infinita.
Frattali, Il Codice Segreto della Natura non è solo un ritorno, ma un'evoluzione.

È un viaggio visivo e concettuale che unisce scienza e arte, numeri ed emozione, rigore e stupore. Ogni immagine, ogni riflessione, è un invito a riconoscere la struttura nascosta che lega il microcosmo al macrocosmo, la mente umana all'universo.
Dopo trentacinque anni, il fascino dei frattali non è diminuito: si è trasformato.

Oggi li vedo non solo come formule, ma come metafore della vita stessa — della sua imprevedibilità, della sua armonia segreta, della sua capacità di ripetersi senza mai essere uguale. Potrei dire che questo libro nasce dalla stessa curiosità che mi accompagnava allora, ma oggi quella curiosità ha nuovi strumenti, nuove domande e nuove immagini. In questi anni ho imparato che la complessità non è soltanto un concetto matematico: è una chiave per leggere i mercati, le relazioni umane, i sistemi viventi.

Per questo ho scelto di affiancare alla riflessione teorica una dimensione visiva più ampia, capace di mostrare ciò che le parole da sole non possono raccontare. Le immagini che compongono questo volume non sono semplici illustrazioni: sono mappe dell'invisibile, tracce di un ordine profondo che attraversa la natura e la mente. È in questo dialogo tra scienza e percezione, tra rigore e immaginazione, che ho ritrovato il senso di tornare ai frattali dopo tanti anni.

Quando ero ragazzo, le prime intuizioni sull'intelligenza artificiale non arrivarono da un manuale di informatica, ma dalle pagine dei romanzi che leggevo con voracità. **Asimov** (1920–1992), più di ogni altro, aveva saputo trasformare la speculazione scientifica in una visione coerente del futuro: robot capaci di dialogare con l'uomo, sistemi logici in grado di prendere decisioni autonome, macchine che non erano semplici strumenti, ma interlocutori. All'epoca, quelle idee appartenevano al territorio della narrativa; erano ipotesi affascinanti, ma lontane.

Oggi, mentre scrivo questo libro, mi trovo a interagire quotidianamente con un'intelligenza artificiale che comprende il linguaggio naturale, elabora concetti complessi e restituisce risposte con una naturalezza che avrebbe stupito persino il lettore più ottimista degli anni Ottanta. È un passaggio storico che merita di essere riconosciuto: ciò che un tempo era immaginazione letteraria è diventato parte integrante del metodo scientifico e del processo creativo. Non è solo un progresso tecnologico, ma un cambiamento culturale profondo, che ridefinisce il rapporto tra conoscenza, strumenti e pensiero umano.

In questo senso, Asimov non è soltanto un riferimento letterario della mia giovinezza: è il ponte ideale tra la fantascienza che mi ha formato e la realtà con cui oggi dialogo mentre esploro la geometria nascosta della natura.

Che questa lettura possa aprire una porta — piccola o grande — su un modo nuovo di osservare il mondo.

Capitolo 1 - Oltre Euclide: La nascita della Rugosità

«L'ordine della natura nasce dal disordine che non riusciamo a misurare.»

«Ciò che sembra caos è solo una geometria che non abbiamo ancora compreso.»

Prendete un righello e misurate la costa della Norvegia. Ora usatene uno più corto: la lunghezza aumenterà. Riducete ancora l'unità di misura e crescerà di nuovo. Spingete questo processo fino all'assurdo e vi troverete davanti a una costa di lunghezza tendenzialmente infinita. Questo non è un errore di misurazione: è la natura che rivela i limiti degli strumenti con cui, per secoli, abbiamo descritto il mondo.

Questa osservazione, nota come **paradosso della costa**, fu uno dei punti di partenza di **Benoît Mandelbrot (1924–2010)** quando, negli anni Sessanta e Settanta, iniziò a costruire un sistema matematico completamente nuovo. Mandelbrot non era un matematico accademico nel senso tradizionale: lavorava all'IBM Research Center di Yorktown Heights, dove analizzava il rumore nei segnali di trasmissione dati. Eppure, osservando quei grafici pieni di fluttuazioni irregolari, vide ciò che i suoi colleghi non vedevano: **una struttura che si ripeteva a scale diverse**, ostinata e precisa.

Per capire la portata di questa intuizione, bisogna prima comprendere cosa stava mettendo in discussione.

La geometria che ci ha insegnato a vedere il mondo

Per oltre duemila anni, la geometria euclidea è stata il linguaggio con cui gli esseri umani hanno descritto e costruito il mondo. Negli *Elementi*, Euclide definì oggetti perfetti: punti, rette, piani, cerchi, sfere, coni, cilindri. Tutti accomunati da una proprietà fondamentale: **la liscezza**. Una sfera è perfettamente rotonda, una retta non ha spessore, un cerchio ha una circonferenza esatta a qualsiasi scala.

Questa geometria ha funzionato straordinariamente bene per edifici, macchine, traiettorie e orbite. Il problema è che il mondo reale **non è fatto di forme lisce**.

Come ricordava **Mandelbrot**: *«Le nuvole non sono sfere, le montagne non sono coni, le coste non sono cerchi, la corteccia dell'albero non è levigata, né un fulmine viaggia in linea retta.»*

La natura è **irregolare a tutte le scale**. E per secoli non abbiamo avuto una matematica capace di descrivere questa irregolarità.

Mandelbrot all'IBM: quando il rumore ha una struttura

Negli anni Sessanta, gli ingegneri IBM erano alle prese con segnali disturbati da errori apparentemente casuali. I modelli statistici classici non riuscivano a prevederli: si assumeva che fossero rumore bianco, privo di memoria.

Mandelbrot osservò gli stessi dati e vide altro. Notò che i periodi senza errori erano seguiti da cluster di errori, e che questi cluster si ripetevano a scale temporali diverse. Ingrandendo qualsiasi porzione del grafico, la struttura rimaneva simile all'intero. Era **auto- somiglianza**.

Lo stesso schema appariva nei dati storici del prezzo del cotone: le fluttuazioni giornaliere avevano la stessa struttura statistica di quelle mensili e annuali.

Fenomeni lontanissimi — segnali elettrici, mercati finanziari, coste, montagne — mostravano la stessa proprietà: **una geometria ricorrente, non liscia, non casuale**.

Mandelbrot aveva trovato un filo comune. Ora serviva un linguaggio matematico per descriverlo.

Liscio contro rugoso

Una curva euclidea, ingrandita, diventa sempre più semplice: a scale sufficientemente piccole è indistinguibile da una retta. È **differenziabile**, la sua complessità locale è nulla.

Un oggetto frattale si comporta all'opposto: più lo si ingrandisce, più emergono dettagli. La costa della Norvegia, da satellite, mostra fiordi; da un aereo, insenature; da terra, rocce e crepe; al microscopio, ulteriori strutture. Il dettaglio non si esaurisce.

Questa proprietà si chiama **auto- similitudine**: ogni parte, a qualsiasi scala, assomiglia all'intero, in modo identico o statistico.

La differenza non è estetica: è matematica. Una curva liscia ha una lunghezza ben definita. Una curva frattale può avere una lunghezza che cresce senza limite al diminuire dell'unità di misura.

Il termine che cambiò tutto

Nel 1975, **Mandelbrot** coniò il termine **frattale** (*fractus*, "spezzato") per descrivere oggetti la cui struttura è frammentata e la cui **dimensione non è un numero intero**.

Una curva può avere dimensione 1.26; una superficie, 2.7. Questi valori misurano quanto un oggetto "riempie" lo spazio in modo irregolare. Il concetto formale — la **dimensione di Hausdorff** — sarà affrontato nel prossimo capitolo.

Geometrie non euclidee e nuove metriche

La geometria frattale non appartiene alla tradizione delle geometrie non euclidee ottocentesche, ma ne condivide lo spirito: abbandonare un'ipotesi ritenuta universale.

La geometria classica presuppone che, a scale sufficientemente piccole, ogni forma sia approssimabile da rette e piani. La natura smentisce questa ipotesi.

Per descrivere oggetti irregolari, le metriche euclidee sono inadeguate:

la lunghezza di una curva frattale non è un numero fisso

l'area di una superficie frattale può essere infinita pur essendo contenuta in uno spazio finito

il bordo di un insieme può essere esso stesso un frattale

Strumenti anticipatori esistevano già — **Georg Cantor (1845–1918)**, **Giuseppe Peano (1858–1932)**, **David Hilbert (1862–1943)**, **Helge von Koch (1870–1924)** — ma erano considerati curiosità patologiche. **Mandelbrot** capì che erano **modelli della realtà**.

La natura non è euclidea

Guardate un albero: il tronco si divide in rami principali, poi in rami secondari, poi in ramoscelli, poi in nervature. Guardate un polmone: bronchi, bronchioli, alveoli. Guardate un fiocco di neve, una costa, una galassia.

La natura è **ramificata, rugosa, auto- simile**. La geometria frattale è l'unica in grado di descriverla con precisione.

Cosa significa per chi costruisce modelli

La distinzione tra liscio e rugoso ha implicazioni concrete:

nei videogiochi, i terreni realistici richiedono algoritmi frattali

le nuvole sintetiche devono usare rumore frattale

nei mercati finanziari, le fluttuazioni reali non seguono la gaussiana liscia dei modelli classici

Capire la rugosità è la differenza tra un modello che funziona e uno che fallisce nelle situazioni estreme.

Il confine fisico della rugosità

La matematica permette frattali infiniti. La fisica no: il mondo è fatto di atomi.

La costa è rugosa fino alla scala dei granuli di sabbia. Il polmone si ramifica fino agli alveoli. La rugosità naturale ha sempre un limite inferiore.

Eppure, alcune teorie — come la gravità quantistica a loop — suggeriscono che lo spazio stesso possa avere una struttura granulare o frattale alla scala di Planck.

Se così fosse, la rugosità non sarebbe solo un modello utile: sarebbe una proprietà fondamentale della realtà.

Il punto di partenza

Mandelbrot non inventò la rugosità. La rugosità era sempre stata lì, in ogni costa, in ogni nuvola, in ogni albero. Quello che inventò fu **il modo di vederla**, e poi di **misurarla**. Costruì un linguaggio matematico in cui la complessità irregolare del mondo reale non era un'anomalia da ignorare, ma una proprietà da quantificare.

Questo cambio di prospettiva è il punto di partenza di tutto ciò che seguirà in questo libro. Nei capitoli successivi vedremo:

come si misura la rugosità con la **dimensione di Felix Hausdorff (1868–1942)**

come si costruiscono i frattali più celebri

come si programma un computer per generarli

come appaiono nei sistemi fisici, biologici e finanziari che ci circondano

Per ora, è sufficiente aver compreso una cosa: **il mondo non è euclideo. Non lo è mai stato.** E una volta che si inizia a vederlo attraverso la lente della geometria frattale, è impossibile tornare a vederlo come prima.

Esercizi

1. **Misurazione della Costa:** Prendete una mappa di una costa frastagliata, per esempio quella della Sardegna o della Norvegia, e provate a misurarne la lunghezza prima con un righello da 10 centimetri e poi con uno da 2 centimetri. Annotate i due risultati. La differenza che otterrete non è un errore: è la prima dimostrazione empirica che state incontrando un oggetto con proprietà frattali. Se volete approfondire, ripetete la misura con un righello da 1 centimetro e tracciate un grafico con la lunghezza ottenuta in funzione della lunghezza del righello usato.

2. **Caccia alla Rugosità:** Fotografate tre oggetti naturali, per esempio una foglia, una roccia e una nuvola. Per ciascuno, identificate almeno due scale di osservazione diverse e descrivete come cambia la struttura visibile passando da una scala all'altra. Poi provate a descrivere lo stesso oggetto usando solo forme euclidee: cerchi, triangoli, cilindri. Annotate dove la descrizione euclidea fallisce e dove diventa impossibile. Questo esercizio non richiede matematica: richiede osservazione.

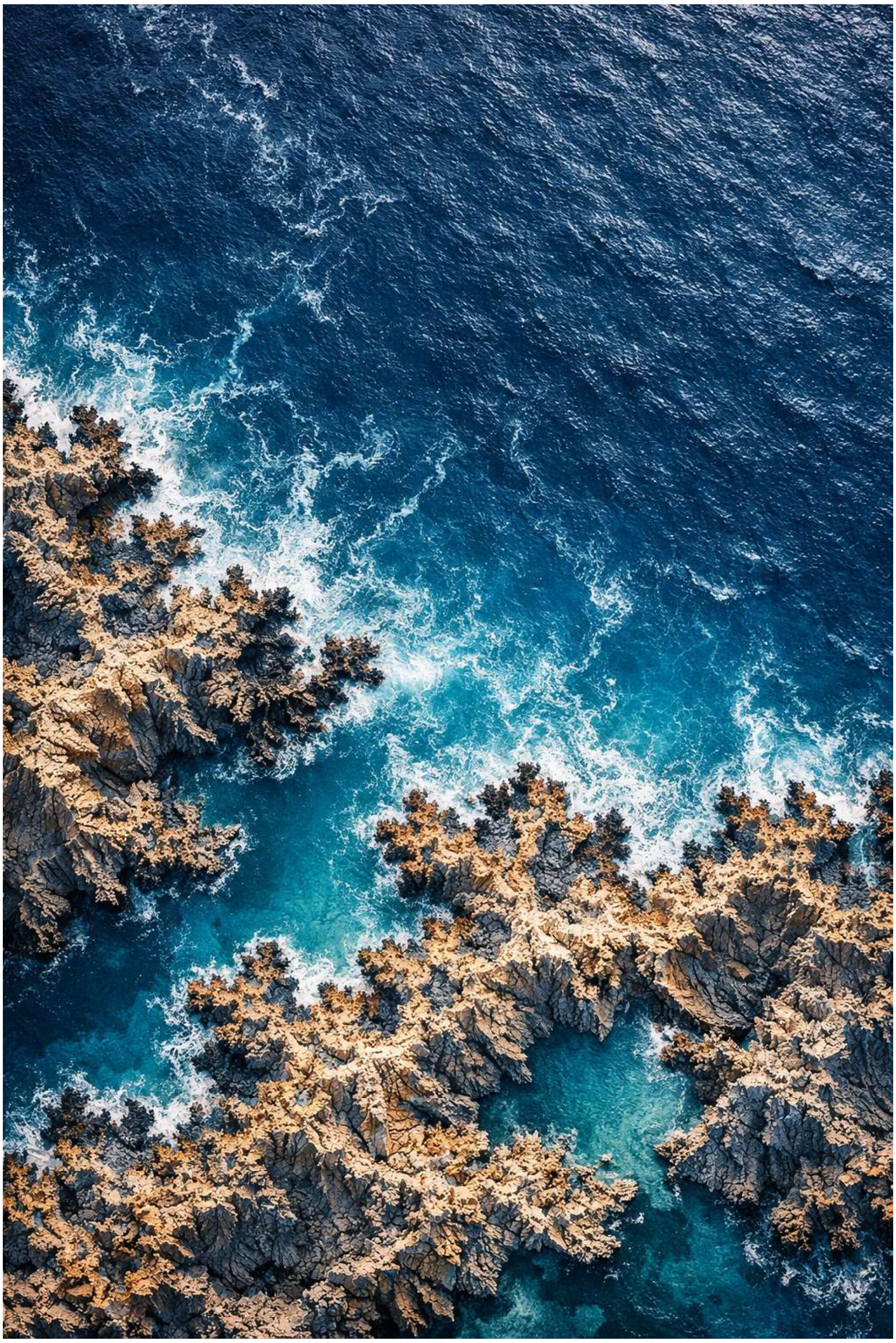

Figura 1 - Costa immaginaria, frattale

Immagine generata con l'ausilio dell'intelligenza artificiale

Riferimenti

[1] I frattali - La geometria della natura - A. Renieri - Ass.ne I Sette

"le nuvole non sono sfere, le montagne non sono coni, le coste non sono cerchi, la corteccia dell'albero non è levigata, né un fulmine viaggia in linea retta"

[2] Frattale - definizione da Wikipedia

"Il termine frattale venne coniato nel 1975 da Benoît Mandelbrot nel libro Les Objets Fractals: Forme, Hasard et Dimension per descrivere alcuni comportamenti matematici che sembravano avere un comportamento 'caotico'"

Capitolo 2 - La Dimensione di Hausdorff: Misurare l'Irregolarità

«L’infinito non è lontano: è nascosto in ogni dettaglio che si ripete.»

«Ogni curva della natura è una firma dell’eternità.»

Nel 1918, mentre l’Europa cercava di ricomporsi dopo una guerra che aveva frantumato ogni certezza, un matematico tedesco di nome **Felix Hausdorff (1868–1942)** pubblicava un lavoro destinato a passare quasi inosservato. Non parlava di geopolitica, né di ricostruzione. Faceva qualcosa di molto più radicale: dimostrava che la **dimensione di un oggetto non deve essere un numero intero**.

Per chiunque avesse studiato geometria, l’idea sembrava un’assurdità. Un punto ha dimensione zero. Una linea ne ha una. Una superficie ne ha due. Un solido ne ha tre. Questi numeri non erano il risultato di un calcolo: erano il modo stesso in cui si concepiva lo spazio. Mettere in discussione questa struttura significava mettere in discussione la base della realtà.

Hausdorff non stava negando la realtà. Stava mostrando che esistono oggetti che non sono linee né superfici, ma qualcosa di intermedio. E che questa “terra di mezzo” non è un difetto del linguaggio, bensì una proprietà misurabile con precisione matematica.

Il limite della dimensione intera

Per capire perché la dimensione intera non basta, consideriamo un segmento di lunghezza 1. Scalato di un fattore 3, contiene esattamente tre copie di se stesso. Un quadrato scalato di un fattore 3 contiene nove copie del quadrato originale. Un cubo scalato di un fattore 3 contiene ventisette copie del cubo originale.

Il pattern è evidente: per una linea, il numero di copie è 31; per un quadrato, 32; per un cubo, 33. L’esponente è la dimensione dell’oggetto.

Questo schema funziona perfettamente per gli oggetti euclidei. Ma non per tutti.

Consideriamo la **curva di Koch**, costruita dividendo un segmento in tre parti uguali, sostituendo la parte centrale con due lati di un triangolo equilatero, e ripetendo il processo all'infinito. Scalando questa curva di un fattore 3, non si ottengono 3 copie né 9, ma 4. L'esponente che soddisfa 3D=4 non è né 1 né 2: è circa **1,26**.

La curva di Koch è più di una linea ma meno di una superficie. Hausdorff fornì gli strumenti per misurare esattamente questa "quantità di più".

La formula

Per gli oggetti auto- simili, la dimensione di Hausdorff assume una forma sorprendentemente semplice:

$$D=\log(N)\log(R)$$

dove N è il numero di copie e R il fattore di scala.

Applicata al segmento: $N=3, R=3 \Rightarrow D=1$. Applicata al quadrato: $N=9, R=3 \Rightarrow D=2$. Applicata alla curva di Koch: $N=4, R=3 \Rightarrow D=1{,}26$.

Questa formula non è un artificio: è la definizione operativa di dimensione per oggetti che non si comportano come quelli euclidei. La dimensione frattale misura il grado di irregolarità di un oggetto. Più la dimensione si avvicina al numero intero superiore, più l'oggetto tende a riempire lo spazio; più si avvicina a quello inferiore, più è rarefatto.

Cosa significa stare tra una linea e una superficie

Cosa significa, fisicamente, avere una dimensione di 1,26? Una linea non occupa area. Una superficie la occupa completamente. Un oggetto con dimensione 1,26 si colloca tra questi due estremi: non copre un'area piena, ma non è nemmeno così sottile da avere area zero. Si insinua nello spazio in modo irregolare, riempiendo alcune zone e lasciandone altre vuote.

La curva di Koch è un esempio perfetto. Ingrandendo qualsiasi porzione, non si vede mai una linea liscia: si vede sempre la stessa struttura irregolare. Se si prova a coprirla con strisce di carta sempre più sottili, ne servono molte più che per una linea retta, ma meno che per un rettangolo. Questa "quantità di copertura" è ciò che la dimensione di Hausdorff misura.

Lo stesso vale tra due e tre dimensioni. Una superficie frattale con dimensione 2,7 non è un piano, ma nemmeno un solido compatto. È una superficie talmente convoluta da riempire quasi completamente il volume in cui è contenuta. I polmoni umani sono un esempio naturale: la struttura alveolare, compressa in pochi litri, supera i **70 metri quadrati** di superficie.

Il metodo box- counting

La formula $D=\log(N)/\log(R)$ funziona per frattali costruiti con regole esatte. Ma come si misura la dimensione frattale di un oggetto reale, come una costa, una rete neurale o un'immagine al microscopio?

Si usa il **metodo box- counting**. Si sovrappone all'oggetto una griglia di quadrati di lato ε e si conta quanti quadrati contengono almeno una parte dell'oggetto: $N(\varepsilon)$. Poi si riduce la dimensione dei quadrati e si ripete. Se l'oggetto è frattale, il rapporto tra $\log(N(\varepsilon))$ e $\log(1/\varepsilon)$ converge a un valore costante: quello è la dimensione frattale.

Questo metodo è applicabile a qualsiasi immagine digitale e può essere implementato con poche righe di codice. Le applicazioni sono vastissime.

Reti neurali e reti stradali: misurare l'efficienza con la dimensione

La dimensione frattale è uno strumento potente per analizzare reti complesse: stradali, neurali, vascolari, elettriche. Tutte si ramificano per raggiungere il massimo numero di punti con il minimo percorso.

Una città americana pianificata a griglia ha una dimensione frattale vicina a 2. Una città medievale europea, cresciuta organicamente, ha una dimensione tra 1,6 e 1,9. Una rete più disordinata può scendere ancora.

Questi numeri non sono solo descrittivi: sono predittivi. Una rete con dimensione alta distribuisce meglio il traffico; una con dimensione bassa crea colli di bottiglia. Gli urbanisti usano la dimensione frattale come indicatore di efficienza.

Le reti neurali biologiche mostrano un comportamento analogo. La dimensione frattale della rete corticale umana è tra 1,4 e 1,7, con variazioni tra aree e individui. Aree con dimensione più alta tendono a essere più densamente connesse e a elaborare informazioni in modo più parallelo.

Reti vascolari e polmoni: quando la natura ottimizza

Il sistema circolatorio umano è un esempio straordinario di ottimizzazione frattale. L'aorta si divide in arterie principali, poi in arterie secondarie, poi in arteriole e capillari. La dimensione frattale del sistema vascolare è circa 2,7 nei tessuti più vascolarizzati: abbastanza alta da garantire che ogni cellula sia vicina a un capillare, ma non così alta da riempire completamente il volume.

I polmoni seguono lo stesso principio. La struttura bronchiale mantiene una dimensione frattale quasi costante attraverso tutti i livelli di ramificazione, garantendo una distribuzione uniforme del flusso d'aria.

Misurare ciò che non si vede

La dimensione di Hausdorff misura qualcosa che le metriche tradizionali non catturano: la complessità strutturale.

Nel tessuto tumorale, per esempio, i bordi cellulari sono più irregolari rispetto al tessuto sano. La dimensione frattale del bordo nucleare è un indicatore diagnostico utile. Lo stesso vale per i segnali EEG: un tracciato di un cervello sveglio ha una dimensione frattale più alta rispetto a uno in sonno profondo o durante una crisi epilettica.

La dimensione frattale non sostituisce l'analisi qualitativa: la integra, fornendo un numero oggettivo dove prima c'era solo una valutazione soggettiva.

La dimensione massima: un confine fisico?

Nella matematica pura, è possibile costruire insiemi con qualsiasi dimensione tra 0 e 3. Alcuni, come le curve di **Peano** e **Hilbert**, riempiono completamente una superficie pur essendo formalmente curve.

Gli oggetti fisici, però, hanno limiti. Una rete vascolare non può ramificarsi all'infinito: a un certo punto i vasi diventerebbero più piccoli delle molecole che trasportano. Una costa non può essere irregolare a scale inferiori ai cristalli minerali che la compongono.

Esiste anche un limite superiore: un oggetto con dimensione troppo vicina a 3 tenderebbe a riempire completamente lo spazio, diventando fisicamente impossibile. La natura si ferma prima.

Hausdorff e i suoi contemporanei

Hausdorff non era solo un matematico: era anche filosofo e scrittore. Nato a Breslavia nel 1868, insegnò a Bonn e Greifswald. La sua opera principale, *Grundzüge der Mengenlehre* (1914), è un pilastro della teoria degli insiemi.

La dimensione che porta il suo nome fu introdotta nell'articolo *Dimension und äußeres Maß* (1918). L'idea era tecnicamente complessa, basata sulla teoria della misura di Lebesgue, ma il principio era chiaro: la dimensione può variare continuamente.

Hausdorff non vide mai l'impatto del suo lavoro. Ebreo in Germania, subì le persecuzioni naziste e nel 1942 si suicidò insieme alla moglie e alla cognata per evitare la deportazione.

Quando **Mandelbrot** cercò gli strumenti per misurare la rugosità della natura, trovò nella dimensione di Hausdorff esattamente ciò che gli serviva.

Prima di Hausdorff, altri matematici avevano costruito oggetti "patologici": l'insieme di **Georg Cantor**, la curva di **Helge von Koch**, le curve riempitive di **Giuseppe Peano** e **David Hilbert**. Erano considerati curiosità. Hausdorff fornì il quadro teorico che permetteva di misurarli.

Limitazioni e cautele

La dimensione di Hausdorff è potente, ma richiede cautela.

La struttura frattale degli oggetti fisici esiste solo su un intervallo finito di scale. Il box- counting applicato su un intervallo troppo ristretto può produrre valori fuorvianti.

Oggetti molto diversi possono avere la stessa dimensione frattale: la dimensione è una misura sintetica e perde informazioni.

Il metodo box- counting è sensibile alla qualità dell'immagine, alla soglia di binarizzazione e alla posizione della griglia. Per questo i protocolli scientifici sono rigorosi e ripetuti più volte.

Un numero che misura la complessità

La dimensione di Hausdorff ha trasformato la complessità da qualità vaga a quantità misurabile. La costa della Gran Bretagna ha dimensione circa 1,25. La costa della Norvegia circa 1,52. Questi numeri predicono come la lunghezza misurata cambia con la scala.

La dimensione frattale non è l'unica misura della complessità, ma è la più fondamentale. È la pietra angolare della geometria della natura di Mandelbrot.

Nel prossimo capitolo esploreremo l'**auto- similitudine**, la proprietà che lega la struttura che si ripete al numero che la misura.

Per ora, è sufficiente aver capito che la dimensione non è più una proprietà ovvia. È qualcosa che si calcola, si misura, varia continuamente tra i numeri interi. Ed è la firma quantitativa della complessità del mondo reale.

Esercizi

1. **Calcolo della Dimensione:** Utilizzando la formula D = log(N)/log(R), calcola la dimensione di Hausdorff di un frattale che si divide in 8 parti con un rapporto di scala di 3. Suggerimento: sostituisci N = 8 e R = 3 nella formula e calcola il logaritmo in base qualsiasi, purché lo stesso al numeratore e al denominatore. Il risultato è un numero razionale semplice.

2. **Box-Counting Manuale:** Sovrapponi una griglia quadrata all'immagine di una foglia di felce e conta quanti quadrati sono occupati. Dimezza la dimensione della griglia e ripeti per stimare la dimensione frattale. Se hai accesso a un foglio millimetrato e a una fotografia stampata, puoi fare questo esercizio senza alcun software: il risultato non sarà preciso come quello di un algoritmo, ma ti darà un'idea concreta di come funziona il metodo.

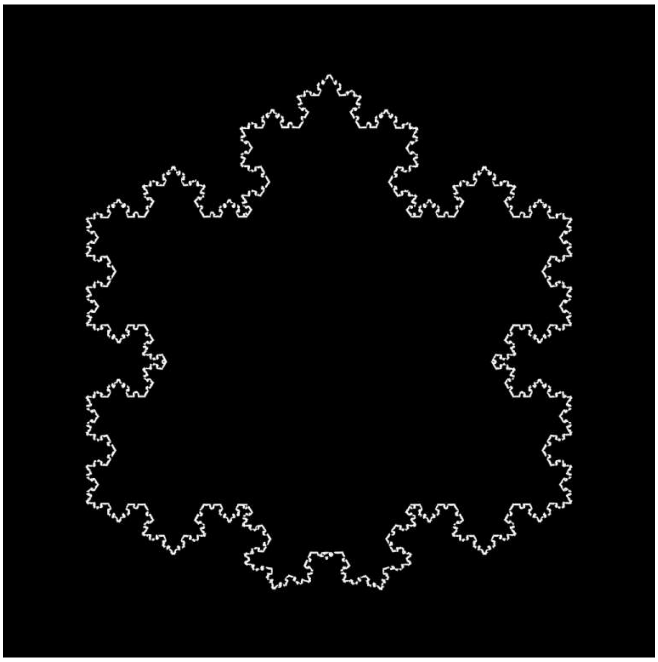

Tavola 1 - La curva di Koch

Immagine generata con l'ausilio dell'intelligenza artificiale

Riferimenti

[1] Frattale - definizione da Wikipedia, 1

"La dimensione frattale, o dimensione di Hausdorff, è un parametro molto importante che determina il 'grado di irregolarità' dell'oggetto frattale preso in esame."

[2] I frattali La geometria della natura - A. Renieri - Ass.ne I Sette, 0

"I frattali hanno una dimensione che può essere non solo intera (0,1,2,3) ma anche, in molti casi, frazionaria (compresa tra 0 e 3)"