

## SITEMI FRATTALI IN BIOLOGIA ED IN MEDICINA UMANA

BUDETTA GIUSEPPE COSTANTINO

### Abstract.

Nell'organismo umano, esistono numerosi fattori che contribuiscono a rendere stabili i suoi numerosi sistemi frattali biologici. Nel presente lavoro di anatomia comparata e di fisiologia, illustro alcuni di questi sistemi ad invarianza di scala; descrivo le principali forze che li determinano, li regolano e li stabilizzano. Riporto altresì alcune patologie, collegate alle alterazioni della (FD) dimensione frattale.

### Premessa.

Nel 1975, Mandelbrot rendendosi conto delle correnti parallele emergenti in fisica decise che doveva dare un nome appropriato a quelle forme, a quelle speciali dimensioni e a quella speciale geometria. Usò il termine *frattale* per queste dimensioni frazionarie emergenti dalla realtà e dalla fisica. *Frattale* è quindi un tipo di ripetizione di struttura a scale sempre più piccole. Ogni parte di un frattale è simile all'insieme più ampio di cui è parte. Diversamente dalla geometria lineare, i frattali consentono di rappresentare agevolmente l'azione di forze similari a vari livelli di scala. Forze similari potrebbero essere anche quelle insite in un sistema caotico. La *grande macchia rossa* del pianeta Giove è un vasto ovale vorticoso, una gigantesca tempesta che non si sposta mai all'interno dell'atmosfera caotica del pianeta, né si esaurisce. La morfologia della *grande macchia rossa* di Giove è immutabile nello spazio e nel tempo, pur immersa in un sistema altamente turbolento quel'è la restante atmosfera. Era stata scoperta nel 1665 da Gian Domenico Cassini e descritta in seguito da Galilei. Nel 1978, Voyager 2 evidenziò che la *grande macchia rossa* era un uragano immenso con rotazione anticiclonica (senso orario). Sulla Terra, gli uragani si estinguono in pochi giorni. Osservando le immagini di Voyager 2, gli scienziati dedussero che Giove era tutta una massa fluida in movimento. La *grande macchia rossa* era un sistema auto - organizzatesi, creato e regolato dalle stesse variazioni non lineari che creano turbolenza imprevedibile attorno ad essa. Si tratta di un caos stabile. In sintesi, la *grande macchia rossa* nell'atmosfera di Giove è un sistema auto - organizzantesi creato e regolato dalle stesse variazioni non lineari che creano la turbolenza imprevedibile attorno ad essa. E' un caos stabile nel suo complesso: Gleick J. (1997). All'interno del disordine, possono apparire isole di struttura. Un sistema complesso può dare origine nello stesso tempo a turbolenza ed a coerenza. Quindi, nel caos possono esserci isole di struttura come l'attrattore di Lorenz dimostra. Secondo alcuni, l'attrattore di Lorenz è un frattale perché ne ha la caratteristica distintiva: complessità a qualunque livello di dettaglio. Un sistema complesso può dare origine a turbolenza e coerenza. Un frattale è un sistema ad invarianza di scala sospeso tra caos ed ordine. Nei sistemi naturali, la struttura dell'intero sistema è spesso riflessa in ogni sua parte. La spiegazione potrebbe essere che le forze modellanti l'intero sistema somigliano a quelle che ne modellano una singola parte. Infatti, un sistema è autosomigliante se forze simili operano a vari livelli di scala.

Autosimilarità. Due figure sono simili se hanno la stessa forma. Questo non vuol dire che basta una vaga rassomiglianza. Una gomma può essere simile a quella vista in vetrina solo perché ha lo stesso colore. Se però siamo sotto il dominio della matematica, *simile* è un termine univoco. Ad esempio, due poligoni sono simili se e solo se hanno gli angoli uguali ed i lati in proporzione.

Sistemi biologici reali. Nel mondo reale, i sistemi biologici - per esempio un albero di felce - sono soggetti all'azione di forze complesse ad ogni livello di scala nel corso del loro sviluppo. La forma pura definita dal codice genetico è alterata per la comparsa di variazioni in apparenza casuali. I disegni di piante frattali elaborati dai computer secondo formule matematiche precise sono troppo perfetti per essere reali. Le elaborazioni dei computer che riflettono alberi o altri sistemi biologici

sono stilizzate perché non tengono conto degli aspetti casuali, delle eventuali malattie e della imprevedibilità che col tempo ne alterano in parte la conformazione. Pertanto, un frattale definisce l'aspetto essenziale di una data specie o tipo, non l'aspetto di uno specifico individuo.

Uso della teoria dei frattali nel campo delle neuroscienze. Vaste applicazioni nelle neuro – scienze trova l'analisi che si basa sulla dimensione frattale (FD), già usata in altri campi d'indagine. Fernández E & Jelimek Herbert F. (2001) dicono che la dimensione frattale può servire alla classificazione dei neuroni in base alle caratteristiche morfologiche delle ramificazioni. Partendo da alcuni parametri di base, si può avviare l'analisi della geometria frattale applicata ad una data cellula dell'organismo, ad un tessuto o ad uno specifico organo. Per quanto riguarda le cellule nervose, le loro funzioni sono un gran parte dipendenti dalla relativa struttura. Per capire come un neurone integri le migliaia di punti sinaptici al fine di generare una risposta appropriata, è necessaria la completa conoscenza della geometria e morfologia cellulare.

Problematica. Si può avanzare questa breve classificazione.

- Esistono strutture biologiche frattali che oltre un certo limite passano in un nuovo sistema frattale di diversa conformazione e funzioni (trachea ed albero bronchiale)
- Esistono strutture biologiche frattali isolate, ma che si ricollegano ad una struttura frattale di ordine superiore (molti tipi di neuroni e il sistema macroscopico delle circonvoluzioni cerebrali).
- Strutture biologiche frattali isolate (le penne degli uccelli).

### 1) Esempi di strutture biologiche frattali che si continuano in un nuovo sistema frattale.

Nei ruminanti (bovini, pecore, capre, bufali, bisonti, cervi, alci ecc.) sono presenti i prestomaci: rumine, reticolo ed omaso. A livello dei prestomaci, c'è una microflora e microfauna batterica e protozoaria formata da batteri, protozoi e lieviti. Questa micropopolazione simbiotica è in grado di fermentare la cellulosa delle piante. In sintesi, questi animali trasformano l'erba di cui si nutrono in carne. La mucosa di questi pre – stomaci presenta una tipica morfologia frattale che è data nel rumine dalla presenza delle papille fogliate tra loro somiglianti, nel reticolo da numerose cellette esagonali nelle quali sono presenti cellette minori similari. Nell'omaso esiste una successione regolare di lamine, detta ciclo delle lamine: I – IV – III – IV – II – IV – III – IV. Le pliche (o lamine della mucosa) di I ordine sono le più alte; quelle di IV ordine le più basse. Queste estroflessioni della mucosa con regolarità di scala, intrinseche in ogni pre - stomaco scompaiono nel quarto stomaco o abomaso, o stomaco ghiandolare vero e proprio. Nell'abomaso, esistono pliche della mucosa anche molto alte, disposte lungo l'asse longitudinale dell'organo, ma sono irregolari. Però, nell'abomaso è individuabile un altro sistema frattale, collegato alla funzione escretoria dell'organo: le fossette gastriche che hanno morfologia regolare tra loro, ad invarianza di scala, appunto. Per quanto riguarda gli aspetti della mucosa interna dei prestomaci nei ruminanti, la struttura frattale collegata alle pliche della mucosa, viene meno nel IV stomaco o abomaso, dove però si riscontra un'altra conformazione molto regolare data dalle fossette gastriche in cui sboccano ghiandole tubulari semplici. L'attrattore di Lorenz - di cui ho accennato nella premessa – si ricollega alle tre equazioni:

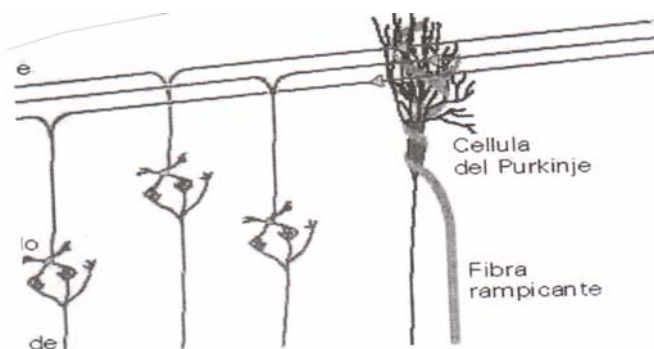
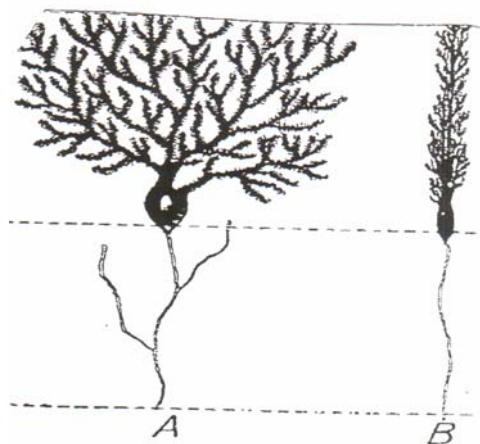
$$\frac{dx}{dt} = a(y - x) ; \frac{dy}{dt} = bx - y - zx ; \frac{dz}{dt} = xy - cx$$

dove  $x, y, z$  sono le variabili da osservare ed  $a, b, c$ , sono le costanti. Nell'abomaso (IV stomaco dei ruminanti), esistono numerose pliche gastriche secondo l'asse longitudinale dell'organo. Non ci sono papille. Le estroflessioni della mucosa abomasale sono irregolari per cui i valori di  $x, y, z$  sono elevati. Nel rumine, reticolo ed omaso dove le pliche della mucosa formano estroflessioni con regolarità di scala,  $x, y, z$  sono bassi. In senso lato nei prestomaci dei ruminanti, i valori di  $x, y, z$  potrebbero essere collegati alla caotica presenza della microbi simbiotici che fermentano la cellulosa. Un altro esempio di un sistema frattale che s'interrompe bruscamente, ma continuandosi con uno diverso è dato dagli anelli cartilaginei della trachea e dall'albero bronchiale che si dirama

dalla trachea stessa. In tutti i mammiferi Uomo compreso, la trachea è formata da uno scheletro cartilagineo: gli anelli tracheali con successione regolare e metamERICA. La funzione principale degli anelli tracheali è di mantenere beante il condotto in modo che l'aria espiratoria ed inspiratoria possa fluire di continuo ai polmoni anche quando l'individuo dorme. Tra un anello cartilagineo e l'altro, una lamina fibrosa dà elasticità al condotto che segue i movimenti del collo. Ogni anello cartilagineo è simile all'altro. Al di sopra della base cardiaca, la trachea si divide nei due bronchi principali, ognuno dei quali penetra nel corrispondente polmone. Nei ruminanti e nel maiale, esiste anche un terzo bronco – bronco epiarterioso destro – che si stacca un po' prima dei due bronchi principali e raggiunge l'apice del polmone di destra. All'interno dei polmoni non esistono più anelli cartilaginei come nella trachea. Però a questo punto subentra una nuova struttura frattale: l'albero bronchiale con le ramificazioni, prima dicotomiche e poi monopodiche dei due bronchi principali. Man mano che si procede in questo tipo di ramificazioni, la parete bronchiale si riduce gradualmente, così come l'epitelio respiratorio che da pseudo – stratificato diventa via via cilindrico semplice, cubico semplice ed infine pavimentoso semplice. Alle funzioni meccaniche della trachea, subentrano - a livello di albero bronchiale - quelle prevalenti dell'ematosi: lo scambio gassoso tra aria inspirata e sangue circolante all'interno dei polmoni. C'è da fare questa generica considerazione: come gli alberi, i polmoni (e l'albero bronchiale in essi contenuto) mantengono un rapporto costante tra aria superficiale e volume.

**2) Strutture biologiche frattali isolate che si ricollegano ad una struttura frattale di ordine superiore.**

I dendriti delle cellule del Purkinje sono percorsi in trasversale da fibre nervose e ne intercettano i segnali. Questi dendriti sono tipiche strutture frattali perché i rami principali si suddividono in prolungamenti via via minuscoli e con rapporti scalari, costanti tra loro. Questo concetto riportato già da Takeda et al. (1992). Qui sotto: cellula di Purkinje, A, di fronte; B, di profilo.



Ogni cellula di Purkinje riceve una fibra rampicante con cui può formare fino a 26.000 contatti sinaptici. Ogni cellula di Purkinje riceve anche circa 175.000 contatti sinaptici dalle fibre parallele

(e) (nel Ratto). Ogni fibra parallela (e) ha contatto con numerosissime cellule del Purkinje. Attraverso i nuclei cerebellari, gli assoni delle cellule del Purkinje sono la principale via efferente del cervelletto. Isaeva V.V. (2004) usando il metodo Box counting per calcolare la dimensione frattale (D) rileva nelle arborizzazioni dendritiche di alcuni neuroni di pesci teleostei (*Pholidatus dybowskii*, *Oncorhynchus keta*) una struttura frattale simile a quella descritta da altri autori, Chris C. (1991), Kiselev, V. G., et al.(2002), nel cervello umano. Caserta F. et al. (1990), Fernández E. et al. (1994) affermano che la dimensione frattale può essere un parametro per quantificare la complessità dei bordi di un neurone. Secondo Montague P.R. et al. (1989), Montague P.R. et al. (1991), la dimensione frattale servono a determinare in che modo le ramificazioni di un neurone riempiono il suo campo dendritico. Le cellule nervose cerebrali si ricollegano ad una struttura frattale più generale come il lavoro di Anca-Larisa-Sandu et al. (2008) dimostra. Gli Autori hanno usato la dimensione frattale (FD) nei rilievi d'irregolarità strutturali cerebrali in pazienti schizofrenici. FD è l'unica via per poter quantificare la complessità di forma legata alle circonvoluzioni cerebrali del cervello umano. Gli Autori hanno ottenuto immagini MR da sette pazienti affetti da schizofrenia, comparati a sei soggetti di controllo sani. Le immagini con la MR sono state segmentate e da esse è stata rilevata la FD, tenendo conto dei seguenti parametri secondo le metodiche di Box – counting e di quella di Minkowski - Bouligant: rapporto sostanza grigia/ sostanza bianca, volume cranico totale, rilievi morfo-strutturali su ciascun emisfero.

I risultati mostravano che gli schizofrenici avevano valori di FD più ampi rispetto ai controlli sani, in riferimento al volume cranico totale e in riferimento all'emisfero destro. In particolare, gli autori fornivano questi dati.

	SOGGETTI SANI DI CONTROLLO	SCHIZOFRENICI	
Volume cranico	2.470	2.479	Metodo
emisfero destro	2.410	2.422	Box
emisfero sinistro	2.421	2.419	Counting
volume cranico	2.536	2.546	METODO
emisfero destro	2.474	2.486	Minkowski
emisfero sinistro	2.475	2.474	Bouligant

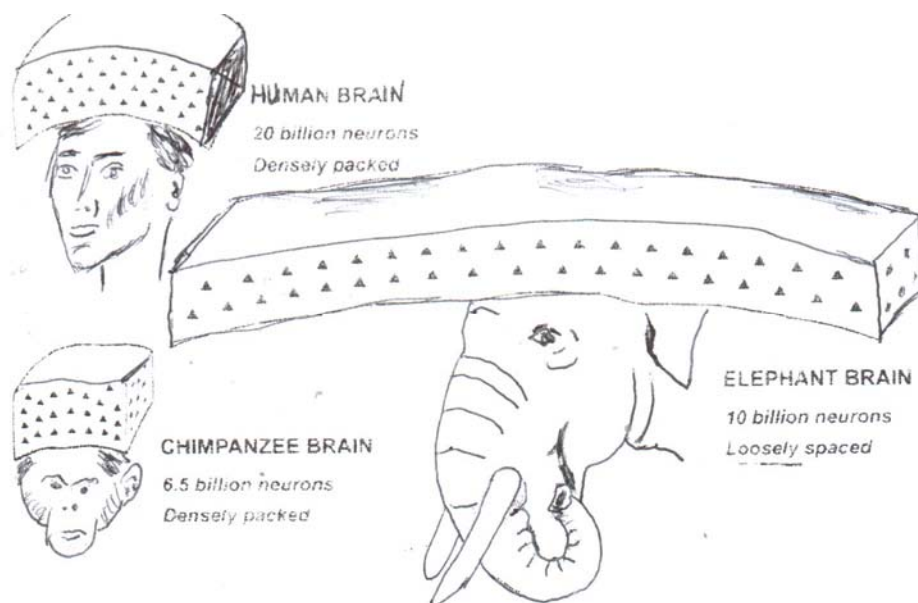
Quindi, negli schizofrenici c'è incremento di sostanza bianca corticale che ne modifica la normale configurazione frattale. Segnalo tre particolari che gli autori della ricerca non riportano. In tutti i mammiferi, il lobo destro è più ampio del sinistro, ma con minore densità neuronale. *Homo Neanderthalis*, specie umana estintasi migliaia di anni fa, aveva un volume cranico complessivo maggiore di *Homo sapiens sapiens*. Specie di delfini dell'Eocene avevano un volume cranico molto superiori a specie attuali. La tabella A qui di seguito è tratta da un lavoro di Marino et al. (2000) e dimostra che durante l'Eocene, alcuni tipi di *Dorodum atrox* avevano volume endocranico elevato.

Tab. A:

<b>Specie</b>	<b>volume endocranico (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>rete mirabile volume (cm<sup>3</sup>)</b>
<u><i>Dorodun atrox</i></u>		
NHML M9265	800,0	135,8
NHML M10173	785,0	153,1
UM 93235	1046,0	245,2
UM 93234	780,0	126,3
UM 94795	1170,0	245,1
UM 94796	1225,0	246,7
UM 97506	-	
UM 1000139	-	
UM 101222	-	

Con stupore, gli Autori ammettono che razze di delfini dell'Eocene avessero raggiunto notevole massa encefalica in una remota epoca. Lo sviluppo cerebrale potrebbe essere stato favorito dalla presenza di estese reti mirabili come stabilizzatrici di flusso, vantaggio rispetto a razze di pesci concorrenti nel procacciamento dell'alimento. Nei calchi dei delfini dell'Eocene, pur essendoci un notevole sviluppo del neurocranio, non sono state segnalate asimmetrie.

Hart B.L. et all. (2008) descrivono la cito architettura neuronale corticale nell'Elefante, nelle grandi scimmie e nell'Uomo, affermando che la densità cellulare in queste aree cerebrali è molto maggiore nell'Uomo rispetto alle scimmie e all'Elefante. I primati – Uomo compreso – hanno maggiore densità neuronale, mentre l'Elefante sebbene abbia un cervello molto pesante, ha una densità neuronale molto bassa. Nell'Uomo, le interazioni tra neuroni corticali sembrano essere più estese e determinate aree hanno una maggiore densità cellulare. Inoltre, l'elaborazione delle informazioni a livello corticale sembra procedere più lentamente nel cervello di Elefante rispetto ai Primati. Specialità accentuate nell'Uomo. Nei cervelli con superiori prestazioni, la capacità di elaborare informazioni dipende dal numero dei neuroni, dalla loro disposizione spaziale, dalle prestazioni e tipo di interconnessione, oltre che dalla distanza tra neuroni interagenti. In linea generale, un cervello con minore connettività corticale ha lenti processi di elaborazione delle informazioni. Nel cervello degli schizofrenici, come sottolineato dal lavoro di Anca-Larisa-Sandu et all. (2008) c'è incremento di sostanza bianca corticale e possibile riduzione di concentrazione neuronale corticale che ne modifica la normale configurazione frattale e di conseguenza il rendimento cerebrale, in senso lato. Il disegno qui di seguito è tratto dal lavoro di Hart B.L. et all. (2008) e dimostra la differente concentrazione neuronale corticale nell'Uomo, Scimma ed Elefante.



Ritornando alla ricerca di Anca-Larisa-Sandu et all. (2008), gli Autori hanno fatto riferimento alla struttura frattale per evidenziare irregolarità strutturali del cervello in pazienti affetti da schizofrenia, comparati ad un gruppo di soggetti sani di controllo. Si sa bene che i solchi e le circonvoluzioni cerebrali corticali del cervello umano hanno struttura non completamente determinabile, usando le tradizionali metodiche di morfometria con la MR, oppure se si fa ricorso alla geometria euclidea. In precedenza, Narr et all. (2004) avevano mostrato con la MR anomalie volumetriche della sostanza grigia nella schizofrenia. Anca-Larisa-Sandu et all. (2008) estendono il

campo applicativo di questo tipo di scoperte chiedendosi se simili anomalie collegate ad irregolarità delle circonvoluzioni cerebrali possano essere evidenziate coi tradizionali metodi morfometrici con la MR.

Sallet et al. (2003), hanno trovato differenze cerebrali tra gruppi di pazienti schizofrenici, paragonati a gruppi di persone normali. Le differenze più marcate erano a livello dell'ippocampo, del Planum temporale e delle cavità dei ventricoli cerebrali. I pazienti schizofrenici mostravano:

1. Coefficiente di asimmetria emisferica destra verso sinistra più alta che nella norma (maggiore ampiezza dell'emisfero destro).

2. Ippocampo: il sinistro è minore del destro negli schizofrenici. Nei soggetti normali di controllo non c'erano significative differenze di volume, né coefficiente di asimmetria.

3. Planum temporale: non c'erano differenze significative tra schizofrenici e gruppi normali di controllo, in riferimento al coefficiente di asimmetria e differenze di volume.

4. Ventricoli cerebrali: la *ratio* dei ventricoli cerebrali non mostrava significative differenze coi soggetti normali, però le cavità ventricolari nei soggetti schizofrenici erano mediamente più ampie.

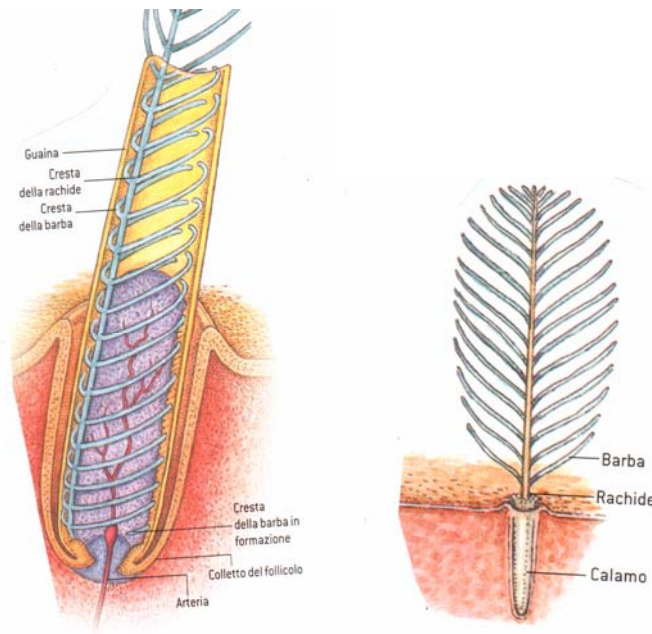
Alsop D.C. et al. (2008) descrivono la costante iperfusione nell'ippocampo in pazienti schizofrenici rispetto a soggetti sani.

Taylor S.T., et al. (1999) descrivono una generale iperfusione del flusso sanguigno cerebrale in pazienti schizofrenici. Le aree più intensamente coinvolte erano quelle del cingolato anteriore.

Come più avanti sarà esposto nei dettagli, Jayalalitha G. et al. (2008) offrono un modello frattale di flusso sanguigno riferito al sistema cardio – vascolare umano, ricollegandosi a leggi fisiche che regolano l'emodinamica dei vasi sanguigni come l'equazione di Poiseuille, la legge di Darcy ed il numero di Reynolds. Nei soggetti con patologie vascolari, i valori calcolati con le predette formule erano molto differenti da quelli dei soggetti normali. Fattori vascolari che possono contribuire allo sviluppo della demenza hanno crescente attenzione. In particolare, l'ipertensione arteriosa spesso associata ad arteriosclerosi è stata ritenuta una delle cause che portano all'insorgenza del morbo di Alzheimer, Farkas E. et al. (2000). Secondo questi Autori, nell'Alzheimer ci sarebbe un marcato decremento regionale del volume di flusso sanguigno in particolare a livello della formazione ippocampale, corteccia temporale, aree parietali e frontali. Altri Autori hanno riscontrato strette connessioni tra demenza vascolare ed alta pressione sanguigna. Nei pazienti con demenza senile, i valori del numero di Reynolds e quelli forniti dalla Legge di Poiseuille sono molto alterati: Cacabelos R. (2003), Taddei S (2001), Anderson T.J. (1999), Farkas K, et al. (2004), Kalaria R.N. (1997), Andin U et al. (2007), Hoth KF et al. (2007).

**3) Strutture biologiche frattali isolate.** Un esempio di sistema frattale isolato è dato dalle penne degli uccelli. Lo strato epidermico più esterno ne forma la guaina, struttura temporanea a protezione della penna in accrescimento (schema 1). Lo strato epidermico interno si divide in una serie di comparti (creste delle barbe) che formeranno le barbe della penna (schema 2). Le penne degli uccelli sono in contatto diretto con il sistema caotico dell'atmosfera.

## SCHEMA 1



Schema 2

Nel seguente paragrafo A, c'è l'elenco - da me elaborato - di sistemi biologici riconducibili alla geometria frattale, facenti parte dell'organismo umano e di alcuni mammiferi. Nel paragrafo B, c'è la descrizione di un modello frattale di flusso sanguigno riferito al sistema cardio - vascolare umano. Nello stesso paragrafo B, c'è la formula da me medesimo elaborata del parametro FD (FD = dimensione frattale) che può esprimere lo stato patologico o meno di un segmento del sistema cardio-circolatorio umano. Nel paragrafo C descrivo la struttura frattale all'interno di ciascun rene. Nel D, faccio riferimento ad una possibile struttura frattale del linguaggio umano.

### A) Elenco di sistemi biologici frattali in un mammifero.

Apparato respiratorio.

- Cornetti nasali. I cornetti nasali sono particolari strutture ossee collegate alla superficie interna delle ossa mascellari (cornetti ventrali) e nasali (cornetti dorsali). Sono due per lato, uno dorsale ed uno ventrale ed aumentano la turbolenza di flusso dell'aria inspirata che viene ad essere meglio riscaldata a contatto con la mucosa nasale, cedendo anche sostanze odorifere. I cornetti nasali sono fatti di una lamina di tessuto osseo papiraceo che come dice il nome (lamina papiracea) è sottilissima, come la pagina di un libro. Il cornetto dorsale si ripiega su se stesso con un andamento dorso - latero - ventrale, l'altro ha andamento opposto. Hanno conformazione irregolare in apparenza. La loro regolarità dipende dal grado in cui ciascuna lamina ripiega su se stessa, dalle loro dimensioni rapportabili reciprocamente (tra un cornetto nasale e l'altro) secondo aspetti di autosimilarità, dai parametri delle loro lunghezze e larghezze all'interno delle cavità nasali.
- Al fondo delle cavità nasali esistono altre lamine ossee dette turbinati distinte in ecto ed endo turbinati. Queste formazioni costituiscono le masse laterali dell'etmoide e sono arrotolate su se stesse come i cornetti nasali. Gli ecto turbinati hanno arrotolamento in senso laterale, gli endo turbinati, più vicini alla lamina perpendicolare dell'etmoide hanno andamento opposto. Sia gli endo che gli ecto turbinati hanno conformazione regolare e

similare, circondando i nervi olfattivi che attraversano la lamina cribrosa dell'etmoide e terminano nel rinencefalo.

- Anelli tracheali. Hanno disposizione metamerica e conformazione autosimilare. Funzione: mantengono beante il lume tracheale, indispensabile per il passaggio dell'aria inspirata ed espirata anche quando l'individuo dorme. Gli anelli tracheali insieme con le strutture fibrose che li uniscono seguono i movimenti del collo.
- Albero bronchiale. Dai bronchi principali si originano ramificazioni dapprima secondo un tipo di divisione dicotomica e infine monopodica. La parete dell'albero bronchiale si va progressivamente riducendo in modo da permettere l'ematosi a livello degli alveoli polmonari.

#### Apparato digerente.

- Microtubuli scavati nella dentina. Hanno disposizione a raggiera. Contengono miofibrille nervose derivanti da branche del trigemino e trasmettono sensazioni connesse al freddo ed al caldo: per lo più liquidi caldi o freddi a contatto coi denti, mentre si beve.
- Papille linguali (fungiformi, filiformi, coniche, lenticolari, vallate). Ricevono sensazioni di dolce, amaro, ruvidezza ecc., collegate al bolo alimentare masticato ed insalivato.
- Creste trasversali del palato duro (creste palatine): sono conformazioni ondulate della mucosa che si susseguono con regolarità dalla papilla incisiva fino all'imbocco del palato molle.
- Pliche della mucosa nella superficie interna del rumine (papille fogliate), del reticolo (cellette esagonali che ne delimitano altre più piccole e così via) e quelle che formano il ciclo delle lamine, in omaso. Queste estroflessioni della mucosa nei pre – stomaci dei ruminanti sono tipiche strutture ad invarianza di scala e sono connesse ai microbi simbiotici preposti alla digestione della cellulosa.
- Nell'abomaso (lo stomaco ghiandolare dei ruminanti), c'è una diversa configurazione frattale data dalle fossette gastriche al fondo della quali ci sono gli sbocchi delle ghiandole gastriche, tubulari semplici produttori acido cloridrico e pepsina.
- Villi intestinali e microvilli intestinali. Il sistema dei microvilli intestinali ha la funzione di ampliare all'ennesima potenza la superficie assorbente degli enterociti ed ha una struttura molto regolare, ad invarianza di scala. Per esempio, la scogliera irregolare di una costa aumenta la superficie di contatto tra litorale e mare. Funzioni analoghe hanno i microvilli ed i villi intestinali: aumentare la superficie assorbente intestinale. La struttura frattale viene però persa a scale superiori come nelle ondulazioni irregolari della mucosa del tenue.
- Muscolatura liscia dell'intestino tenue. La muscolatura liscia dell'intestino tenue è controllata dai plessi intrinseci di Meissner ed Auerbach (sistema nervoso autonomo). Questo tipo di muscolatura presiede ai movimenti peristaltici intestinali ed ha una disposizione regolare: ad anello trasversale nella parte interna della parete mucosale e longitudinale all'esterno. La particolare disposizione ripetitiva ed autosomigliante della muscolatura liscia del tenue permette contrazioni regolari e la progressione dell'alimento digerito verso gli scomparti posteriori del tubo digerente.
- Pliche semilunari dell'intestino crasso. In molte specie compreso l'Uomo, la parete del grosso intestino presenta numerose bozzere, separate da pliche semilunari. Ogni bozzere delimita internamente una cavità detta tasca. C'è autosomiglianza a livello delle tasche coliche e cecali e autosomiglianza a livello delle pliche semilunari.
- Fegato. La struttura microscopica epatica è molto regolare essendo l'organo formato da numerose unità fondamentali: i lobuli epatici. Ogni lobulo ha forma di piramide tronca ed è percorso nella parte centrale da una vena centrolobulare. Alla periferia di ogni lobulo ci sono gli spazi porto biliari del Kiernan. Tra spazi porto biliari e vena centrolobulare, è presente una rete di speciali capillari sinusoidali, contenenti cellule stellate con proprietà fagocitarie e granuloplessiche. Questa struttura globulare si ripete con regolarità in tutto il



parenchima dell'organo. E' una tipica struttura regolare, frattale ad invarianza di scala e collegata alle molteplici e vitali funzioni epatiche, sia esocrine che endocrine.

#### Sistema circolatorio.

- Muscolatura cardiaca. È formata da cellule autosomiglianti, separate da una membrana cellulare ispessita da desmosomi. Ogni cellula cardiaca ha nucleo centrale ed il suo citoplasma è pieno di miofilamenti di actina e di miosina, regolarmente disposti come nel muscolo scheletrico.
- La conformazione spaziale arboriforme del sistema circolatorio è stata analizzata nella sua dimensione frattale (FD) da molti autori tra i quali Jayalalitha G. et al. (2008).
- I vasi sanguigni del sistema circolatorio hanno ramificazioni di tipo frattale. Dai rami principali si staccano vasi via via di calibro minore. Ciò anche dal punto di vista della emodinamica: la frequenza cardiaca umana normale registrata per 300, 30 e tre minuti ha fluttuazioni simili: chiaro esempio di processo temporale di tipo frattale.
- Globuli rossi. I globuli rossi maturi umani e di molti mammiferi sono anucleati ed hanno tutti una conformazione autosimilare. Variazioni nella loro concentrazione e forma possono causare gravi malattie ematiche, oltre ad incidere sul coefficiente di viscosità sanguigna.

#### Pelle ed annessi.

- Tessuto podovilloso e podofiloso dello zoccolo equino. Sono tessuti molto irrorati che hanno andamento regolare ed estroflessioni che si alternano ad introflessioni dermiche. I due tessuti s'ingranano nella struttura cornea ed amorfa dello zoccolo, soggetta a crescita ed a usura continua. Anche il tessuto cheratofiloso nella superficie interna della parete cornea ha tipica struttura frattale, essendo formato da 600 lamelle cornee autosomiglianti con disposizione obliqua rispetto al suolo.
- Lo zoccolo è una struttura che potrebbe considerarsi frattale. La *parete* ha la massima inclinazione in punta e la sua direzione rispetto al suolo si riduce man mano che ci si porta verso i *talloni* e le *barre*. Nella parte intermedia, la parete è perpendicolare al terreno e nei talloni e barre, la sua direzione s'inverte. Anche la distanza tra il bordo superiore della parete e l'inferiore (margini coronari e margini pre – plantari) decresce secondo parametri costanti. Lo stesso dicasi per la concavità della suola e per il dinamismo e morfologia del fettone.

#### Muscoli ed ossa.

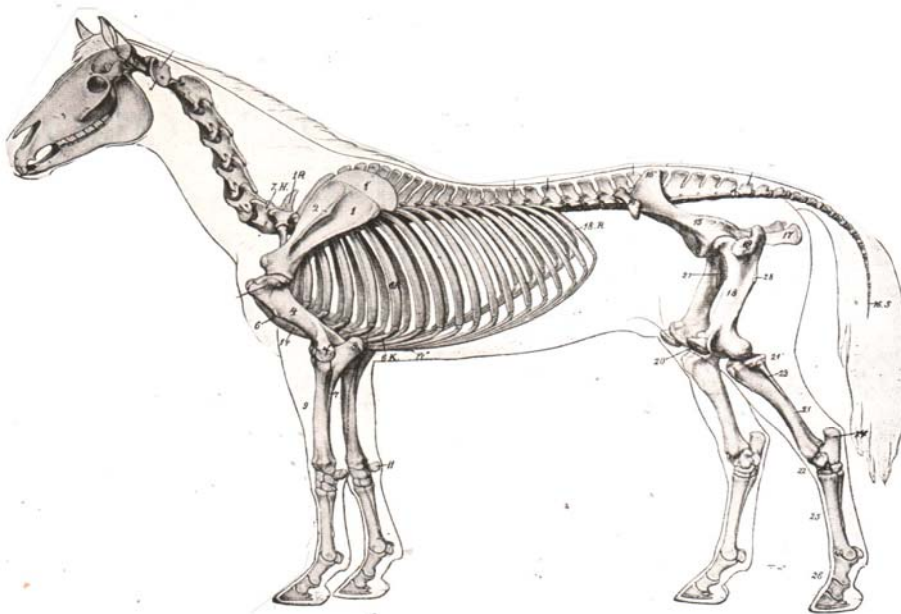
- Tessuto muscolare scheletrico. Le cellule muscolari striate hanno una regolare successione di miofilamenti di elastina e di miosina formanti un tipico sistema frattale, sia nella disposizione dei miofilamenti che nei reciproci rapporti spaziali. Questo sistema è collegato allo scheletro e presiede al movimento ed alla postura. Il normale movimento del corpo è soggetto alla forza della gravità: **2g**. La struttura microscopica si riflette nella macroscopica. Infatti, i muscoli scheletrici si dividono in lunghi, larghi e brevi (orbicolari e sfinterici). Tutte e tre le categorie presentano strutture autosomiglianti, in particolare per quanto concerne la disposizione spaziale delle cellule muscolari striate.
- Vertebre della spina dorsale. La colonna vertebrale è formata dalla successione regolare in senso cranio – caudale di ossa con disposizione metamerica. Senza considerare la prime due vertebre cervicali, le altre fino all'osso sacro, hanno strutture simili. Dalla terza vertebra cervicale, i processi spinosi vanno aumentando di altezza fino alla settima (prominente). Nelle vertebre toraciche, l'altezza dei processi spinosi aumenta fino alla quarta (negli equini) e va riducendosi gradualmente verso le vertebre lombari. Conformazioni regolari e con rapporti scalari esistono tra i processi trasversi delle vertebre lombari, tra le superfici articolari degli archi di tutte le vertebre fino al sacro e tra i dischi intervertebrali. Nelle vertebre sacrali – fuse in un unico osso – ci sono regolarità scalari a livello delle faccette articolari dorsali e ventrali delle ali sacrali e tra i processi spinosi.
- Costole. Delimitano la cavità toracica ed hanno geometria e disposizione scalare.

- Nelle ossa compatte, è presente una struttura ricorrente che conferisce rigidità al tessuto osseo: gli osteomi e canali di Havers.

Ghiandole endocrine ed esocrine.

- Strutture autosomiglianti si osservano in alcune ghiandole endocrine: tiroide, corticale delle surrenali. La mammella – ghiandola cutanea - ha una struttura frattale formata dagli acini ghiandolari secernenti e da una serie di condotti via via di calibro maggiore.

Il disegno qui di seguito - da me elaborato – è tratto da Sisson e Grossman (Anat. degli animali domestici) e mostra la disposizione e conformazione metamERICA e scalare delle vertebre facenti parte della spina dorsale. Anche le costole hanno tra loro rapporti costanti di scala.. Il disegno ritrae lo scheletro di un cavallo.



## **B) Modello frattale di flusso sanguigno riferito al sistema cardio – vascolare umano.**

Partendo dal presupposto che l'autosomiglianza è la maggiore caratteristica di un oggetto frattale, Jayalalitha G. et al. (2008) hanno studiato il flusso sanguigno nel sistema cardio – vascolare, proponendone un modello biologico di struttura arboriforme autosimilare. Data la regolare frequenza cardiaca, il sistema cardio-vascolare umano è un esempio di frattale. Per confermare le loro ipotesi, gli Autori sono ricorsi alla Legge di Darcy, alla formula del numero di Reynolds ed all'equazione di Poiseuille. Il modello elaborato ha una specifica disposizione spaziale in lunghezza ed in larghezza dei suoi rami principali e secondari; è quindi dipendente dalla pressione sanguigna e dalla geometria vascolare ed è finalizzato ad una corretta ossigenazione dell'organismo. Più precisamente, gli Autori hanno sviluppato un sistema computerizzato che simula la complessità geometrica di un vaso sanguigno con elevato numero di diramazioni, irregolarmente distribuite nello spazio 3 D (spazio tridimensionale: lunghezza, larghezza e profondità). Gli Autori hanno rilevato la quantità di flusso ( $Q$  = la quantità di flusso) è il volume di fluido che scorre lungo la sezione vasale in un secondo) con la formula  $Q = A \cdot V$ . Dove  $Q$  è la quantità di flusso sanguigno

(ml/sec.);  $A$  = l'area della sezione trasversale del vaso considerato;  $V$  = velocità del sangue. Con la legge di Poiseuille gli Autori hanno rilevato altri parametri di regolazione di flusso. L'equazione di Poiseuille è:

$$Q = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot \Delta p}{8 \eta l}$$

Dove  $Q$  è la quantità di flusso sanguigno che scorre in un vaso per un certo periodo di tempo (per unità di tempo).  $\Delta p$  è la differenza di pressione ( $P_1 - P_2$ );  $\eta$  è la viscosità del sangue espressa in POISE,  $l$  è la lunghezza del vaso. Questa legge dimostra che il maggiore fattore di controllo della circolazione del sangue è collegato al raggio del vaso sanguigno. Il rapporto forze viscosive/forze di inerzia è detto numero di Reynolds e si esprime con la seguente equazione:

$$R = \frac{D u l}{\mu}$$

$D$  = massa volumica,  $u$  = velocità del fluido,  $l$  = lunghezza del vaso considerato,  $\mu$  = viscosità del fluido. Se il numero di Reynolds è elevato, il flusso sanguigno da laminare diventa turbolento. Ciò vuol dire che la parete del vaso in questione è ruvida, che possono esserci delle placche arterosclerotiche, oppure che c'è una ostruzione, oppure che il lume vasale si è ristretto nel complesso. La permeabilità vasale è data dalla legge di Darcy:

$$Q = - \frac{k A \Delta p}{\eta l}$$

dove  $Q$  è la quantità di flusso,  $K$  è il coefficiente di permeabilità vasale,  $A$  è l'area della sezione trasversale del vaso,  $l$  è la lunghezza del vaso sanguigno,  $\eta$  è la viscosità;  $\Delta p$  è la differenza di pressione tra due estremità del vaso in questione. Il segno negativo è dato dal fatto che il fluido in questione (il sangue) scorre da una pressione alta ad una bassa.

Attraverso il numero di Reynolds, la legge di Darcy e l'equazione di Poiseuille, Jayalalitha G. et al. (2008) hanno ricavato dati inerenti la variazione della dimensione frattale in varie parti del sistema cardiovascolare umano, in soggetti sani ed in soggetti con cardiopatie ed altre alterazioni circolatorie. Questi parametri di riferimento possono essere presi in considerazione per cure e prevenzioni di cardiopatie ed altre sindromi del sistema circolatorio, più o meno gravi. Nella geometria frattale, i processi caotici e complessi, dopo un alto numero d'interazioni – scambio di azioni reciproche - si riproducono nel tempo di crescita; creano spontaneamente delle regolarità (attrattori) dovute ad un numero di variabili che rendono prevedibile lo sviluppo del processo di crescita. Il numero di Reynolds, la legge di Darcy e l'equazione di Poiseuille dipendenti dalla frequenza cardiaca, dal diametro vasale e dalla viscosità del sangue potrebbero giocare il ruolo di attrattori per la regolarità di flusso sanguigno nel sistema circolatorio. I tre parametri forniti dal numero di Reynolds, dalla legge di Darcy e dall'equazione di Poiseuille influiscono sul corretto funzionamento non solo del sistema circolatorio sanguigno, ma anche dei restanti organi del corpo umano. Il sistema circolatorio sanguigno **non** è una struttura frattale di supporto per la fisiologia degli altri organi, ma elemento di primaria importanza.

Partendo dal rapporto di base pressione sistolica/diastolica e moltiplicando questo rapporto per la somma del numero di Reynolds di un dato segmento vasale di albero circolatorio + il valore ricavato dall'equazione di Poiseuille, riferito allo stesso segmento e sottraendo il totale così ottenuto per il valore negativo dato dalla legge di Darcy, otteniamo il risultato finale che dev'essere diviso

per  $2g$  (la forza di gravità universale). Questo parametro è la dimensione frattale (FD) del segmento di albero circolatorio in questione. Qualora il suo valore si discosti dal corrispondente dedotto su omologo segmento arboriforme di circolazione sanguigna, riferito a persona sana di controllo si entra nella patologia circolatoria con un una determinata incidenza di gravità. Pertanto, la formula che misura il grado di patologia o la normalità di FD riferita ad un dato segmento di sistema circolatorio è (formula, 1):

$$(1) \quad FD = \frac{P.sist}{P.diast} \cdot [(Re + P) - D] \cdot \frac{1}{2g}$$

FD = dimensione frattale riferita ad un dato segmento arboriforme di sistema circolatorio sanguigno sott'osservazione medica. P sist. = pressione sistolica; P.diast. = pressione diastolica cardiaca; Re = numero di Reynolds del segmento di sistema circolatorio sanguigno in questione; - D = valore (che è un parametro negativo) dato dalla formula (legge) di Darcy;  $2g$  è la forza universale di gravità. Per esempio, se applico i tre parametri (numero di Reynolds, equazione di Poiseuille e formula di Darcy), utilizzando la menzionata **formula (1)** su un segmento di arteria cerebrale media di sinistra e su alcune delle sue diramazioni immediate, si ricava un certo valore numerico. Qualora questo valore numerico si discosta dal corrispettivo di un soggetto normale di controllo, avendo una FD diversa da una normale, il segmento di arteria cerebrale media di sinistra da noi considerata, è in uno stato patologico più o meno grave.

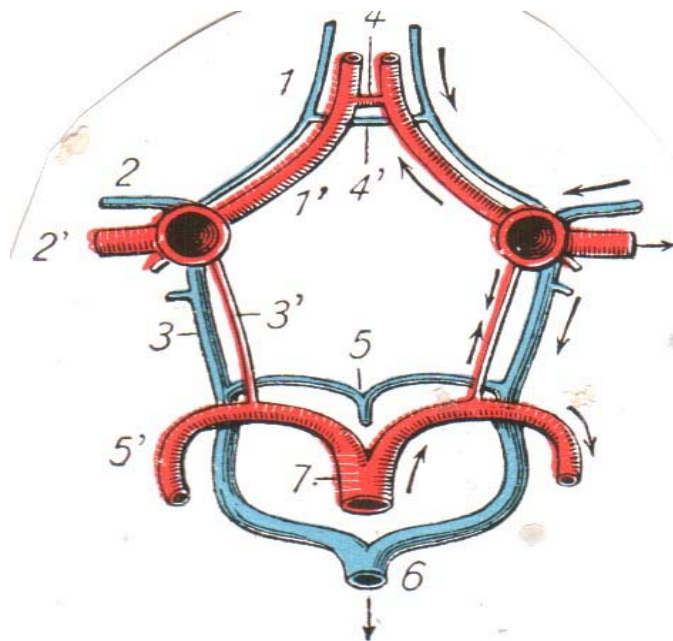
Lee et al. (1999), riportano alcuni dati da pazienti schizofrenici, confrontati con gruppi di soggetti normali. Gli autori premettono che branche corticali derivanti dalla cerebrale media si distribuiscono alla maggior parte dei lobi frontale, parietale, temporale, insula ed arterie perforanti raggiungono molte parti dei gangli basali. Queste strutture nervose implicate nella patologia schizofrenica presentano:

- Ampie oscillazioni emodinamiche, variabili dal 15% al 35% rispetto alla media della velocità sanguigna nelle cerebrali medie.
- Anomali indici di pulsazione nelle stesse arterie.
- Aumento delle resistenze periferiche nelle aree nervose menzionate.

Esempi di sistemi frattali ad invarianza di scala nel sistema circolatorio sanguigno finalizzati al mantenimento di un flusso costante di sangue.

- Se un dispositivo di stabilizzazione della pressione idrostatica del sangue è concentrato a livello del circolo di Willis, un analogo dev'essere presente a livello della circolazione venosa del cranio. Nell'Uomo ed in diverse specie di mammiferi, questo dispositivo è individuabile alla base cranica dove in parallelo al circolo arterioso di Willis, esiste uno omologo sottostante circolo di Willis venoso, (Fig. 1). Da me elaborata, la fig. 1 è presa da Testut & Latariet, Trattato di Anatomia umana (1966).

Fig. 1



Parallelismo del poligono venoso e del poligono arterioso alla base dell'encefalo.

1, v. cerebrale anteriore; 1', a. cerebrale anteriore; 2, v. insulare; 2', arteria cerebrale media; 3, v. basilare; 3', a. comunicante posteriore; 4, a. comunicante anteriore; 4', vena comunicante anteriore; 5, v. comunicante posteriore; 5', a. cerebrale posteriore; 6, v. *cerebri magna*; 7, tronco basilare.

Questi due circoli (arterioso e venoso) sono anche molto vicini tra loro. Per poter bilanciare meglio le fluttuazioni di pressione idrostatica tra sistema arterioso e venoso cerebrale (particolarmente intense durante i movimenti della testa e del collo), è importante che i due poligoni arteriosi – l'arterioso ed il venoso - siano molto ravvicinati. Questa caratteristica vascolare si osserva anche in altre parti del corpo come nel mesentere dell'intestino (arterie e vene intestinali), a livello delle estremità degli arti, nel collo e nei mammiferi con coda anche a livello di questa zona anatomica. Infatti, negli animali domestici, le vene e le arterie coccigee decorrono strettamente affiancate, spesso formando intricate reti artero-venose. Nell'Uomo, un valido esempio è dato dalle

arterie linguali che hanno andamento flessuoso all'interno di un organo mobilissimo come la lingua. Nel loro decorso, le arterie sono strettamente circondate dalle vene linguali che assumono l'aspetto di plesso venoso. Analoghe formazioni *a rete* di arterie e vene strettamente intrecciate si hanno all'interno dello zoccolo nel Cavallo, come ho potuto constatare approfondendo la circolazione sanguigna di questa regione attraverso la ricerca di Skov K., (2001) e il Trattato di Barone R. (1983). Anche nello zoccolo equino, forti sbalzi di pressione idrostatica che potrebbero ripercuotersi a livello dei capillari, sono contrastate dalle reti artero venose strettamente avvicinate tra loro. Per la precisione, questo sistema *a rete* origina superiormente col plesso venoso ed arterioso coronale e si prolunga nel tessuto *podovilloso e podofiloso* dello zoccolo (fig. 2).

Fig 2



Nei reni, invece arterie e vene non decorrono affiancate. Questo comportamento sembra contraddire quanto affermato. In genere, i reni sono organi fissi con minima mobilità. Fa eccezione il rene sinistro bovino che si sposta sotto il destro, se il ruminante è pieno. In questi organi, la pressione idrostatica elevata e costante è alla base dei meccanismi di ultrafiltrazione glomerulare. Però nei reni, vene ed arterie non decorrono affiancate (tranne il rene sinistro nei bovini) perché in un organo fisso la pressione idrostatica sanguigna non subisce oscillazioni, Skov K. (2001). Più un organo è mobile – come la lingua, la coda, o le estremità degli arti – oppure incapsulato in una cavità soggetta a spostamenti continui come quella cranica che segue i movimenti della testa e più arterie e vene decorrono in stretta connessione.

Necessità di pressione idrostatica costante > rene fisso > arterie e vene non affiancate (perché il rene è fisso).

Necessità di pressione idrostatica costante > cranio mobile > arterie e vene cerebrali affiancate.

C) La circolazione sanguigna renale è data dalle due arterie renali che si staccano dall'aorta. Ognuna di esse penetra nel rispettivo organo, dividendosi nelle arterie interlobari, nelle arciformi, nelle arteriole interlobulari, intralobulari, nelle afferenti dei glomeruli, nelle rette vere e spurie. Le unità funzionali dei reni sono i nefroni, ognuno dei quali ha origine con una dilatazione invaginata, detta capsula di Bowman. Ogni nefrone è autosomigliante come gran parte del sistema sanguigno intrarenale (arterie intralobari, arciformi, intralobulari, arterie afferenti dei glomeruli). Il rapporto diretto tra pressione sanguigna, circolazione sanguigna renale, area complessiva delle arteriole renali ed il volume dell'organo è sottolineato dalla ricerca di Skov et al. (2001). In una popolazione

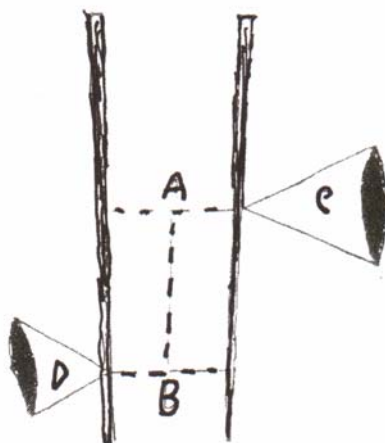
di *Cercopithecus aethiops*, i ricercatori hanno trovato il 10% degli individui con pressione sanguigna elevata. Si aveva la seguente patologia renale.

1. riduzione del numero glomerulare;
2. riduzione del numero delle arteriole afferenti;
3. restringimento del diametro delle arteriole afferenti;
4. aumento delle resistenze periferiche;
5. aumento della pressione sanguigna.

Gli Autori fornivano altri parametri di emodinamica renale: area media delle arteriole afferenti di ogni rene:  $370 \mu m^2$  – controlli:  $387 \mu m^2$ ; Volume corticale renale:  $62,2 cm^3$  – controlli:  $68,5 cm^3$

In conseguenza della riduzione glomerulare, del numero e diametro delle arteriole afferenti, c'era una riduzione media di area e di volume renale, in particolare a livello corticale dove sono ubicati i glomeruli renali. All'interno di ciascun rene, dal punto di vista funzionale, il sistema arterioso può essere ricondotto nella sua totalità ad una struttura conica – cono arterioso – con apice nel punto di origine della corrispondente arteria renale come la figura (fig. 3) qui sotto mostra.

Fig. 3



C = circolazione arteriosa nel rene destro. D = circolazione arteriosa nel rene sinistro.

Mediamente nei mammiferi – sono da considerare individui della stessa specie – il volume dei due coni arteriosi è direttamente proporzionale alla lunghezza AB. Più il segmento AB è lungo e maggiore è la differenza di volume e di forma, tra cono C e quello D (a favore del cono C). In quasi tutti i mammiferi, il rene destro è ubicato più cranialmente del sinistro. Dalla conformazione frattale dell'albero arterioso all'interno di ciascun rene, possiamo trarre alcune costanti di emodinamica. L'ultrafiltrazione a livello della capsula di Bowman avviene secondo la seguente formula che tiene conto della pressione idrostatica e sistolica del sangue circolante:

$$P_f = P_c - (\Pi_e + P_e)$$

Dove:  $P_f$  è la pressione di filtrazione renale,  $P_c$  è la pressione intracapsulare,  $\Pi_e$  è la pressione colloidale osmotica.  $P_e$  è la pressione di membrana. Le pressioni colloidale-osmotica delle proteine plasmatiche e quella di membrana dovuta alle pareti formate dall'endotelio dei vasi sanguigni e pedicelli dei podociti, si oppongono alla ultrafiltrazione sanguigna. Tra i coni arteriosi (C e D) sono inoltre valide le similitudini geometrica, cinematica e dinamica.

#### SIMILITUDINE GEOMETRICA

I sistemi arteriosi schematizzati nei due coni C e D, si dicono simili dal punto di vista geometrico allorché esiste una corrispondenza biunivoca tra gli elementi dei due sistemi, ed il rapporto di segmenti omologhi assume un valore costante L che è preso come rapporto di similitudine geometrica o scala di riduzione delle lunghezze. Il verificarsi di tale ipotesi porta

all'uguaglianza di segmenti omologhi, di angoli omologhi, ad un rapporto tra aree omologhe (aree totali dei due coni) e ad un rapporto tra volumi omologhi.

#### SIMILITUDINE CINEMATICA

Geometricamente simili i due coni risulteranno cinematicamente simili se il rapporto tra le velocità di due dei qualsiasi punti omologhi si mantiene costante. Tale rapporto è da considerare con  $V$  e rappresenta la scala di riduzione delle velocità. Essendo  $V = L/t$ . Fissata la scala di riduzione delle lunghezze  $L$ , è definita la scala di riduzione dei tempi  $t$ . All'interno dei reni, il sangue arterioso ha velocità uniforme, però l'onda pulsatile ha picco prima nel cono più vicino al cuore (di solito il destro, che sarebbe il rene destro).

#### SIMILITUDINE DINAMICA

Due sistemi cinematicamente simili, risulteranno dinamicamente simili se il rapporto tra le forze omologhe agenti sui due sistemi è costante. Tale rapporto s'indicherà con  $F$  e definisce la scala di riduzione delle forze. Affinché i due sistemi (coni arteriosi C e D) possano essere considerati simili, devono soddisfare le seguenti condizioni. Similitudine geometrica, la quale impone:

$$\frac{D_1}{D_2} = L$$

$D_1$ : dimensione totale del sangue arterioso nel cono C,  $D_2$ : dimensione del sangue arterioso nel cono D,  $L$ : scala di riduzione delle lunghezze.

- Similitudine cinematica la quale richiede in ciascun punto l'uguaglianza dei rapporti delle velocità e dei relativi gradienti ( $L$ ) nei due sistemi frattali (nel cono C arterioso ed in quello D arterioso):

$$\frac{V}{L} = K$$

- Similitudine dinamica, la quale impone l'uguaglianza dei rapporti delle varie forze agenti sui rispettivi sistemi frattali: in questo caso le forze di viscosità e di inerzia. Il rapporto forze viscosive/forze di inerzia è detto numero di Reynolds e si esprime con la seguente equazione:  $R = \frac{D u l}{\mu}$

$D$  = massa volumica,  $u$  = velocità del fluido,  $l$  = lunghezza del vaso considerato,  $\mu$  = viscosità del fluido. Numeri di Reynolds equivalenti per C e D, assicurano il verificarsi della similitudine dinamica tra i due sistemi (cono arterioso C e cono venoso D) geometricamente simili.

$$\frac{R_1}{R_2} = K$$

I due reni hanno le stesse funzioni ed utilizzano entrambi la pressione sistolica del cuore per i fenomeni della filtrazione del sangue. Inoltre, hanno struttura simile. Si possono cogliere così analogie. Tra l'altro, le tre similitudini indicano uno stretto rapporto tra quantità di flusso sanguigno per unità di tempo diretto a ciascun rene ed il volume dell'organo. Anche il rapporto costante tra i numeri di Reynolds a livello dell'origine delle due arterie renali indica valori costanti (e tra loro direttamente proporzionali) tra volumi dei reni destro e sinistro. In riferimento ai reni, tutto ciò è indice di dimensione frattale (FD). Nell'Uomo si verifica:

1. Dovendo sopportare pressioni sistoliche più elevate, l'arteria renale di sinistra è maggiore della destra.

2. Il rene sinistro ha volume maggiore del destro.

Perché nell'Uomo, le due arterie renali (normalmente) non hanno origine simmetrica? Se ci addentriamo nei particolari, ci rendiamo conto che ciò non è possibile. A livello dell'arteria renale di sinistra, l'aorta addominale conserva una pur minima obliquità che si riduce ulteriormente nel punto di origine dell'arteria renale destra. Un ideale filo a piombo fatto cadere dall'arco aortico nel

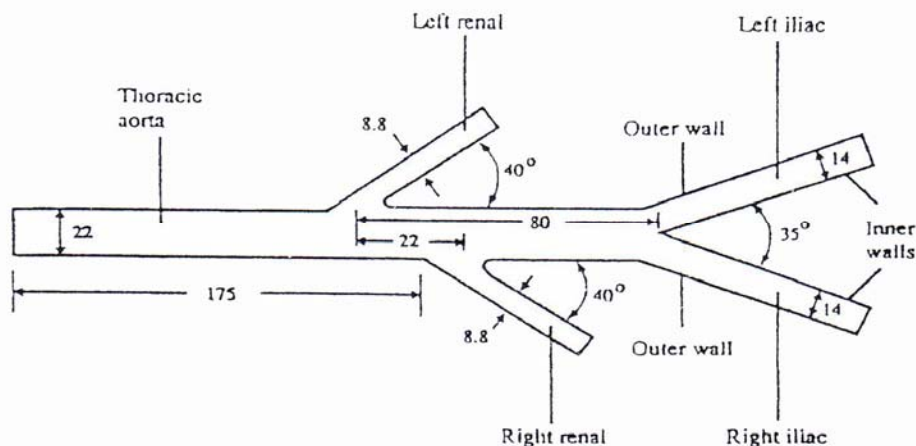


punto d'intersezione tra questo vaso ed il piano sagittale mediano, penderebbe esattamente dove si origina l'arteria renale di sinistra (che ha calibro maggiore dell'altra). Ciò indica che la pressione sistolica del flusso sanguigno proprio lì, si sovrappone perfettamente alla idrostatica. Di conseguenza, l'arteria renale del lato opposto (destra), non può originare sullo stesso piano (lato opposto), ma più in basso dove c'è flusso sanguigno caotico di rimbalzo (dall'imbocco dell'arteria renale di sinistra). Questo stato turbolento dissipa energia contribuendo a ridurre quella sistolica del sangue. Solo cinque, sei centimetri prima della sua terminazione, l'aorta addominale è chiaramente perpendicolare. In genere, i reni sono organi fissi con minima mobilità. Fa eccezione il rene sinistro bovino che si sposta sotto il destro se il ruminante è pieno. Nei reni, pressione idrostatica sanguigna elevata e con minime oscillazioni è alla base dei meccanismi di ultrafiltrazione glomerulare. Nei reni le vene non decorrono affiancate alle arterie (tranne il rene sinistro nei bovini) perché in un organo fisso la pressione idrostatica sanguigna non subisce oscillazioni. Più un organo è mobile – la lingua, o la coda, o le estremità degli arti – o in una cavità soggetta a spostamenti continui come il cervello nella cavità cranica e più arterie e vene decorrono in stretta connessione. In sintesi, si può fare il seguente schema:

1. Necessità di pressione idrostatica costante > rene fisso > arterie e vene non affiancate (perché il rene è fisso).
2. Necessità di pressione idrostatica costante > cranio mobile > arterie e vene cerebrali strettamente affiancate.

Il seguente schema è tratto da Shipkowitz et al. (1998). Nell'Uomo, le arterie renali si originano in modo asimmetrico, prima della biforcazione terminale dell'aorta. Mentre nel Cavallo è l'arteria renale di destra che si stacca prima della sinistra, nell'Uomo (stazione eretta) avviene il contrario.

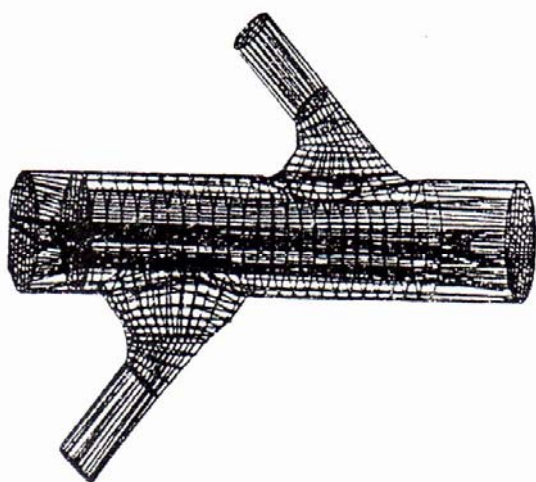
Fig. 4



**Fig. 4** – Illustrazione schematica di modello di aorta addominale (umana). Le dimensioni si basano su misurazioni *in situ* di proiezioni arteriose ed i dati compilati da Aronberg et al., 1984, Bargerone et al., 1986, Caro et al., 1985, Fitzgerald et al., 1971, Horejs et al., 1988, Pedersen et al., 1992, Ures et al., 1998, Walburn et al., 1979. Lunghezze e diametri espressi in unità millimetriche.

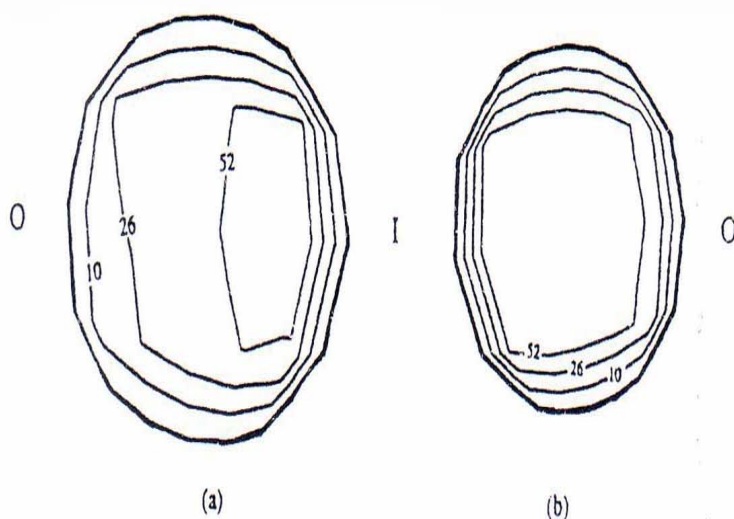
Dalla **fig. 4**, si vede che il diametro delle due arterie renali (8mm) e gli angoli tra arterie renali ed aorta addominale sono costanti (40°).

Fig. 5 (da Shipkowitz et al., 1998)



A fianco: rappresentazione tridimensionale computerizzata della parete aortica. L'origine delle arterie renali avviene nell'uomo, poco prima della biforcazione terminale dell'aorta. Da notare l'irregolare geometria del modello in questa regione. (Da un lavoro di Shipkowitz, T. et al., 1998).

Fig. 6

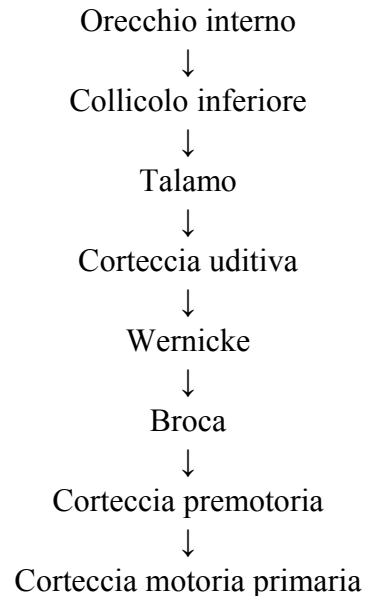


Axial velocity distribution in the renal arteries for a Reynolds number of 2115. Velocities are in units of  $\text{cm s}^{-1}$ . The inner wall is indicated by (I) and the outer wall by (O). (a) Left renal artery; (b) right renal artery.

Distribuzione assiale della velocità nelle arterie renali nell'Uomo. Sono riportati i valori riferiti ai numeri di Reynolds del flusso sanguigno (Fig. 5,6, Shipkowitz et al., 1998).

#### D) Possibile struttura frattale del linguaggio umano.

La produzione del linguaggio umano particolarmente complesso ed articolato, richiede il coinvolgimento di numerose aree nervose, nelle quali il flusso sanguigno dev'essere particolarmente costante e la velocità sistolica elevata.



Il linguaggio umano è collegato a strutture semantiche e grammaticali, il cui livello di complessità si è ampliato nel corso dell'evoluzione. Gli studi sull'asimmetria emisferica compiuti sulle impronte endocraniche di ominidi fossili sembrerebbero confermare il carattere evolutivo del linguaggio. Analoghe asimmetrie sono state individuate anche nelle scimmie antropomorfe, capaci di utilizzare un codice paleolinguistico - gesto-fonetico di comunicazione all'interno del gruppo.

Descrizione sintetica dei meccanismi di sviluppo del linguaggio. Stimoli visivi che dalla retina risalgono, attraverso il corpo genicolato laterale, sino alle aree 17 e 18 di Brodman (corteccia visiva) e gli stimoli acustici che pervengono alla corteccia associativa parieto-temporo-occipitale (giro angolare area 39 di Brodman), sono successivamente integrati ed inviati all'area di Wernicke, dove avviene una prima elaborazione acustica dello stimolo visivo-verbale. Veicolati dal fascicolo arcuato, gli stimoli nervosi raggiungono l'area di Broca dove hanno sede i circuiti deputati alla traduzione grammatico-fonetica del segnale ed allo schema sonoro della parola. Schema percettivo e schema sonoro appartengono pertanto a distinti domini neuronali.

Gruppi di neuroni o *sub-moduli* presiedono all'aspetto grammaticale, sintattico e fonetico ed hanno varie funzioni:

- Struttura della frase.
- Concatenamento delle frasi.
- Struttura delle frasi formulate in un discorso con coerenza logico-semanticamente.
- Struttura tematica.

Si ha in questo modo una strutturazione gerarchica delle singole parole all'interno della frase, o di un gruppo di frasi inserite dentro un discorso con coerenza logico-semanticamente. I sub moduli neuronali

formano i diversi livelli dove le parole di una frase sono ubicate stabilmente. Sono questi livelli, propri di una determinata popolazione e caratterizzati da invarianza di scala, a determinare la struttura frattale del linguaggio umano.

Duschek S. et al. (2008) hanno rilevato che è molto precoce l'intervallo di tempo intercorrente tra afflusso sanguigno cerebrale ed attività attenzionale. Cioè, perfusione e prestazioni cerebrali sono separate da uno specifico e molto breve intervallo temporale. E' come se due sistemi frattali - quello sanguigno della microcircolazione cerebrale locale e dei neuroni di una determinata area corticale preposta alla produzione del linguaggio - nella reciproca attivazione - siano separati da un lasso infimo di tempo. Non c'è istantaneità e quindi intrinseca continuità. La cosa interessante è che avviene prima l'attivazione di una determinata area corticale preposta al linguaggio e dopo c'è l'afflusso sanguigno nella stessa area. Come se si scavasse una fossa con uno stretto istmo che la separi dal mare aperto. Ad un certo punto, sistemi neuronali corticali decidono di rompere l'istmo e l'acqua piena di ossigeno entra nella fossa (scavata dagli stessi neuroni) incrementando la specifica attivazione neuronale.

Robins et al. (Oxford, 2001), trovarono in pazienti schizofrenici indebolimento nell'attivazione delle regioni frontali, coinvolte nella fluidità verbale. In tali regioni, il flusso sanguigno cerebrale aumentava quattro sec. dopo l'attivazione neuronale. Cioè l'intervallo di tempo era di molto superiore alla norma, sia pure invertito come pure accade nei soggetti sani.

Il lavoro di Poeppel (2003), mostra che alcune funzioni collegate all'ascolto del linguaggio umano, sono lateralizzate. Poeppel afferma che il linguaggio umano è analizzato in finestre con *integrazione temporale* ciascuna diversa dall'altra. La percezione linguistica secondo l'autore, è mediata da entrambe le corteccie uditive di sinistra e di destra. Però *l'input* del segnale linguistico avrebbe rappresentazione neuronale simmetrica bilaterale a cominciare da un livello di rappresentazione precoce. Oltre questo livello, il segnale acustico è elaborato in modo asimmetrico in aree corticali non primarie. In particolare nelle aree non primarie di sinistra il segnale viaggia a 25 m/sec. Al contrario nelle aree non primarie di destra, l'integrazione temporale è di 20 m/sec. Entrambi i campi corticali destro e sinistro contengono assemblaggi neuronali con **associazioni scalari multiple** (autosomiglianti e con invarianti parametri di scala). Ci sarebbe asimmetria funzionale collegata a specifiche funzioni acustiche relative al linguaggio. Secondo Poeppel, l'integrazione temporale acustica presuppone l'esistenza di una attività neuronale oscillante a differenti bande di frequenza.

## RIASSUNTO

Nel 1975, Mandelbrot usò il termine *frattale* per alcune speciali dimensioni frazionarie emergenti dalla realtà e dalla fisica. *Frattale* è quindi un tipo di ripetizione di struttura a scale sempre più ridotte. Ogni parte di un frattale è simile all'insieme più ampio di cui è parte. Diversamente dalla geometria lineare, i frattali consentono di rappresentare agevolmente l'azione di forze similari a vari livelli di scala. Attraverso il numero di Reynolds, la legge di Darcy e l'equazione di Poiseuille, Jayalalitha G. et al. (2008) hanno ricavato dati inerenti la variazione della dimensione frattale in varie parti del sistema cardiovascolare umano, in soggetti sani ed in soggetti con cardiopatie ed altri tipi di alterazioni circolatorie. Questi parametri di riferimento possono essere presi in considerazione per cure e prevenzioni di cardiopatie ed altre sindromi del sistema circolatorio più o meno gravi. Nella geometria frattale, i processi caotici e complessi, dopo un alto numero d'interazioni – scambio di azioni reciproche - si riproducono nel tempo di crescita; creano spontaneamente delle regolarità (attrattori) dovute ad un numero di variabili che rendono prevedibile lo sviluppo del processo di crescita. Il numero di Reynolds, la legge di Darcy e l'equazione di Poiseuille dipendenti dalla frequenza cardiaca, dal diametro vasale e dalla viscosità del sangue potrebbero giocare il ruolo di attrattori per la regolarità di flusso sanguigno nel sistema circolatorio. I tre parametri forniti dal numero di Reynolds, dalla legge di Darcy e dall'equazione di Poiseuille influiscono indirettamente sul corretto funzionamento non solo del sistema circolatorio sanguigno, ma anche sui restanti organi del corpo umano. Il sistema circolatorio sanguigno non è una struttura frattale di supporto per la fisiologia degli altro organi, ma elemento di primaria importanza.

Il parallelismo tra Poligono venoso ed arterioso di Willis alla base encefalica, umana dimostra una struttura ad invarianza di scala, tipica di un sistema frattale e finalizzata al mantenimento di un flusso sanguigno costante. Le tre similitudini ricavabili dall'emodinamica dei due reni e la geometria ad invarianza di scala dei nefroni dimostrano tutte una disposizione ordinata ed autosimilare, essenziale nei fenomeni di ultrafiltrazione del sangue.

I vasi sanguigni del sistema circolatorio hanno ramificazioni di tipo frattale. Dai rami principali, si staccano vasi via via di calibro minore. Anche dal punto di vista dell'emodinamica: la frequenza cardiaca umana normale registrata per 300, 30 e tre minuti ha fluttuazioni similari: chiaro esempio di processo temporale di tipo frattale. I globuli rossi maturi umani e di molti mammiferi sono anucleati ed hanno tutti una conformazione autosimilare. Variazioni nella loro concentrazione e forma può causare gravi malattie ematiche oltre ad incidere sul coefficiente di viscosità sanguigna.

Nel presente studio di anatomia e di fisiologia comparata, ho anche approntato un elenco di alcuni sistemi frattali presenti nell'organismo umano ed in alcune specie di mammiferi. Ho altresì riportato alcune patologie cerebrali come la schizofrenia, connesse ad alterazioni della FD (dimensione frattale). Nell'ultima parte, ho affrontato un argomento di ricerca attuale che riguarda la possibile conformazione frattale del linguaggio umano. In particolare, i gruppi di neuroni o *sub-moduli* che presiedono all'aspetto grammaticale, sintattico e fonetico avrebbero una tipica conformazione frattale, sia come singole cellule, sia nella disposizione spaziale 3D di tali specifiche aree.

Poeppel (2003) descrive alcuni campi corticali destro e sinistro preposti alle funzioni linguistiche dell'Uomo. Questi campi corticali conterebbero assemblaggi neuronali con **associazioni scalari multiple** (autosomiglianti e con invarianti parametri di scala).

E' da precisare che la dimensione frattale è solo un parametro descrittivo come l'area della superficie dendritica, o le dimensioni del corpo cellulare di un neurone. La dimensione frattale non implica necessariamente il coinvolgimento di alcun processo biologico, né di un qualche meccanismo coinvolto nell'evoluzione e sviluppo cellulare.

## BIBLIOGRAFIA

- Aleves, S.G. et al.: *Fractal patterns for dendites and axon terminals*. Physca A 232 (1996).
- Alsop D. et al.: *Hippocampal hyperperfusion in Alzheimer's disease*. NeuroImage: 42, 1267 – 1274 (2008).
- Anderson T.J.: *Assessment and treatment of endothelial dysfunction in humans*. J Am Coll Cardiol. 34: 631–638 (1999).
- Andin U, Passant U, Gustafson L, Englund E.: *Alzheimer's disease (AD) with and without white matter pathology-clinical identification of concurrent cardiovascular disorders*. Arch Gerontol Geriatr. 44: 277–286 (2007).
- Aronberg DG, Glazer HS, Madsen K.: *Normal thoracic aortic diameters by computed tomography*. J Comput Assist Tomography 8:2247-2250 (1984).
- Bargeron GB, Hutchins GM, Moore GW, Deters OJ, Mark FF, Friedman MH.: *Distribution of geometric parameters of human aortic bifurcations*. Arteriosclerosis 6:109-113 (1986).
- Barone R.: *Anatomia Comp. dei Mammiferi Domestici*. Vol. V. Edagricole (1983).
- Cacabellos R, Fernandez-Novoa L, Lombardi V, Corzo L, Pichel V, Kubota Y.: *Cerebrovascular risk factors in Alzheimer's disease: brain hemodynamics and pharmacogenomic implications*. Neurol Res. 25: 567–580 (2003).
- Caro CG, Parker KH, Fish PJ, Lever MJ.: *Blood flow near the arterial wall and arterial disease*. Clin Hemorheol 5 :849 - 871 (1985).
- Caserta F. et al. Phys, Rew. Lett. : 64, 95 – 98 (1990).
- Chris C., King Mathematics Department, University of Auckland: *Fractal and Chaotic Dynamics in Nervous Systems*. Progress in Neurobiology 36, 279-308 (1991).
- Duschek S. et al. : *Time-locked association between rapid cerebral blood-flow modulation and attentional performance*. Colinical Neurophysiology ; 1292 – 1299, 119 (2008).
- Farkas E. et al.: *Are Alzheimer's disease, hypertension, and cerebrocapillary damage related?* Neurobiology, 21, 235 – 243 (2000).
- Farkas K, Kolossváry E, Járαι Z, Nemcsik J, Farsang C. *Non-invasive assessment of microvascular function by laser Doppler flowmetry in patients with essential hypertension*. Atherosclerosis . 173: 97–102 (2004).
- Fernández E. and Jelimek Herbert F.: *Use of fractal theory in Neuroscience. Methods, advantages, and potential problems*. Methods: 24, 309 – 321 (2001).
- Fernández E. et al. J. Comp. Neurol.: 347, pagg. 397 – 408 (1994).
- Fitzgerald DE, Gosling RG, Woodcock JP.: *Grading dynamic capability of arterial collateral circulation*. Lancet 297(7689):66-67 (1971).
- Gleick J.: *Caos*. Ed. BUR (1997).
- Hart BL, Hart LA, Pinter-Wollman N.: *Large brains and cognition: where do elephants fit in?* Neurosci. Biobehav. Rev.: 32 (1): 86 – 98 (2008).
- Hoth K.F., Tate DF, Poppas A, Forman DE, Gunstad J, Moser DJ, Paul RH, Jefferson AL, Haley AP, Cohen RA.: *Endothelial function and white matter hyperintensities in older adults with cardiovascular disease*. Stroke. 38: 308–312 (2007).
- Horejs D, Gilbert PM, Burstein S, Vogelsang RL.: *Normal aorto-iliac diameters by CT*. J Comput Assist Tomography 12 :602-603. (1988).
- Hutsler J.J.: *The specialized structure of human language cortex : pyramidal cell size asymmetries within auditory and language - associated regions of the temporal lobes*. Brain & Language. 86:226-242 (2003).

- Isaeva, V. V. et al.: *The quasi fractal structure of fish brain neurons*. Russian Journal of Marine Biology of aging, Vol. 30, n. 2, pagg. 127 – 134 (2004).
- Jayalalitha G. et al.: *Fractal model for blood flow in cardiovascular system*. Computer in Biology and Medicine, 38, 684 – 693 (2008).
- Jemelek, H.F. et al.: *Neurons and fractals: how reale and usaful are calculations of fractal dimensions?* Journal of Neuroscience Methods 81, pagg. 9 – 18 (1998).
- Kalaria RN.: *Cerebrovascular degeneration is related to amyloid-beta protein deposition in Alzheimer's disease*. Ann N Y Acad Sci. 826: 263–271 (1997).
- Kaiser, D.A.: Dep. of Psychology, Univ. of Callifornia, Los Angeles (1990).
- Kauffman, S.: *Le leggi del caos e della complessità*. Editori Riuniti (2001).
- Kiselev, V. G., Hahn, Klaus und Auer, Dorothee P. : *Is the Brain Cortex a Fractal?* Sonderforschungsbereich 386, Discussion Paper 297. (2002)
- Lee A, Hobson RP.: *On developing self-concepts: a controlled study of children and adolescents with autism*. J Child Psychol Psychiatry 39(8):1131-1144 (1998).
- Lee D.: *Learning of spatial and temporal patterns in sequential hand movements*. Brain Res Cogn Brain Res 9:35-39 (2000).
- Lee D.: *Effects of exogenous and endogenous attention on visually guided hand movements*. Brain Res Cogn Brain Res 8:143-156 (1999).
- Mandelbrot, B.B.: *The fractal geometry of nature* (W.H. Freeman, New York, 1992).
- Montague P.R. et al. Proc. Natl. Acad. Sci. USA: 86, 7223 – 7227 (1989).
- Montague P.R. et al. J. Neurosci.: 5, 1440 – 1457 (1991).
- Narr K.L. et al.: *Abnormal gyral complexity in fist-episode schizophrenia*. Boil. Psychiatry. 55 (8): 859 – 867 (2004).
- Pedersen EM, Yoganathan AP, Lefebvre XP.: *Pulsatile flow visualization in a model of the human abdominal aorta and aortic bifurcation*. J Biomechanics 25 : 935-944 (1992).
- Poeppel D.: *The analysis of speech in different temporal integration windows: cerebral lateralization as asymmetric sampling in time*. Speech Communication. 41: 245-255 (2003).
- Poeppel D, Hickok G.: *Towards a new functional anatomy of language*. Cognition 92(1-2):1-12 (2004).
- Polka L, Bohn OS.: *Asymmetries in vowel perception*. Speech Communication 41(1):221-231 (2003).
- Robins NM, Chen CAN, Soni SD, Deakin JFW.: *Abnormal frontal erps during verbal fluency in schizophrenia*. Schizophrenia Res 29(1):108 (1998).
- Sallet PC, Elkis H, Alves TM, Oliveira JR, Sassi E, Carpi de Castro C, Busatto GF, Gattaz WF.: *Rightward cerebral asymmetry in subtypes of schizophrenia according to Leonhard's classification and to DSM-IV : a structural MRI study*. Psychiatry Res 123(1):65-79(2003).
- Sandu Anca-Larisa, et al.: *Fractal dimension analysis of MR images revelas grey matter structure irregularities in schizophrenia*. ScienceDirect. Computerized Medical Imaging and Graphics, 32, 150 – 158 (2008).
- Shipkowitz T, Rodgers VG, Frazin LJ, Chandran KB.: *Numerical study on the effect of steady flow development in the human aorta on local shear stresses in abdominal aortic branches*. J Biomechanics 31:995-1007 (1998).
- Sisson & Grossman: *Anatomia degli animali domestici*. Piccin, Padova ( 1982).
- Skov K, Hamet P, Nyengaard JR, Mulvany MJ.: *Morphology of renal afferent arterioles and glomeruli, heart weight, and blood pressure in primates*. Am J Hypertens 14 (4 Pt 1): 331-337 (2001).
- Taddei S, Virdis A, Ghiadoni L, Sudano I, Salvetti A.: *Endothelial dysfunction in hypertension*. J Cardiovasc Pharmacol. 38 [Suppl 2]: S11–S14 (2001)
- Takeda T. et al: *Fractal dimension of dendritic tree of cerebellar Purkinje cell durino onto – and phylogenetic development*. Neuroscience Research, 13, pagg. 19 – 31 (1992).

- Taylor S.T. et al.: *Global cerebral blood flow increase reveals focal hypoperfusion in schizofrenia*. Neuropsychopharmacology, vol. 21, No. 3 (1999).
- Testut L, Latarjet A.: *Trattato di Anatomia Umana*. UTET-Torino (1966).
- Ures S, Gatto IM, Prates JC, Ures J. : *The transverse diameter of the abdominal part of the aorta : an anatomo-radiological study through computerized tomography*. Anat Anz 166(1-5) :341-350 (1988).
- Walburn FJ, Blick EF, Stein PD.: *Effect of branch-to-trunk area ratio on the transition to turbulent flow : implications in the cardiovascular system*. Biorheology 16 :411-417 (1979).

F I N E