

TEORIA SOLUTIILOR POLIMERE

Curs master – Fizica polimerilor

Vlad Popa-Nita

Bibliografie recomandata

1. L. Georgescu, L. Constantinescu, E. Barna, C. Berlic C. Miron, *Introducere in fizica polimerilor* (Univ. Buc. Ed. Credis, 2004).
2. L. Georgescu, *Termodinamica sistemelor polimere*, (Univ. Buc. Ed. Credis, 2003).
3. P. J. Flory, *Principles of Polymer Chemistry*, (Cornell University Press, Ithaca, NY, 1953).
4. M. Rubinstein and R. H. Colby, *Polymer Physics* (Oxford University Press, 2003).

Polimeri. Notiuni fundamentale

- **Definire**
- **Homopolimeri si heteropolimeri**
- **Clasificarea polimerilor**
- **Istoric**
- **Aplicatii**
- **Natura fractala a conformatiilor polimere**

Polimer (multe parti): molecule alcatuite din multe unitati elementare, numite monomeri

Monomeri: unitati structurale repetabile legate prin legaturi covalente (punere in comun de electroni.

Doua tipuri de monomeri:

Monomeri chimici: unitati repetabile corespunzand unor molecule mici care sunt legate pentru a forma lantul polimeric.

Monomeri Kuhn (model teoretic): o sectiune mai mare a lantului care contine mai multi monomeri chimici.

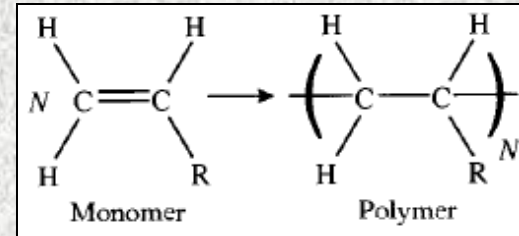
Structura polimerului este formata in timpul polimerizarii, procesul in care monomerii chimici sunt legati covalent

Grad de polimerizare N: numarul de monomeri dintr-o molecula de polimer

Masa moleculara a polimerului M : gradul de polimerizare N inmultit cu masa moleculara a unui monomer chimic M_{mon}

$$M = N \cdot M_{\text{mon}}$$

Ex.: polimerizarea monomerilor vinil:



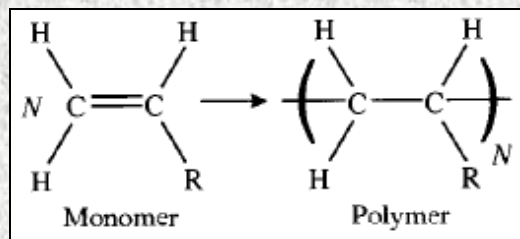
Daca gruparea R este hidrogen, polimerul este polietilena (polimerii sunt numiti dupa monomerii folositi in sinteza lor); in acest caz etilena ($\text{CH}_2=\text{CH}_2$). Daca gruparea R este un inel benzenic, polimerul format este polistirenul.

**Masa moleculara a unui lant polimeric: masa unei molecule gram (mol) (contine numarul lui Avogadro molecule)
 $N_{\text{Av}}=6.02 \cdot 10^{23}$ molecule/mol**

Ex.: masa moleculara a unei molecule de polietilena care contine
 $N=1000$ monomeri chimici, fiecare cu masa molară
 $M_{\text{mon}}=28$ g/mol este: $M=28000$ g/mol \rightarrow
 N_{Av} molecule au 28000 g sau o moleculă cântărește
 $M/N_{\text{Av}}= 28000 \text{ g}/6.02 \cdot 10^{23} \text{ molecule/mol} \approx 4.65 \cdot 10^{-20} \text{ g/moleculă}$

Proprietățile unui polimer sunt determinate de:

- i) identitatea chimică a monomerilor**
- ii) microstructura polimerului – organizarea atomilor în lanțul polimeric**

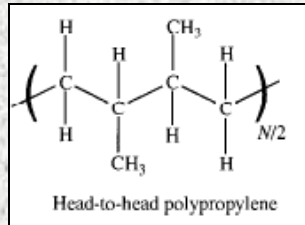


Când dubla legătură polimerizează, pot apărea o varietate de diferiți monomeri ai unităților repetabile din lanț.

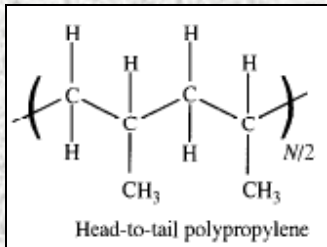
Microstructura polimerului poate fi schimbată numai prin ruperea legăturilor covalente.

Trei categorii de izomeri:

1. Izomeri secventiali ai polipropilenei:

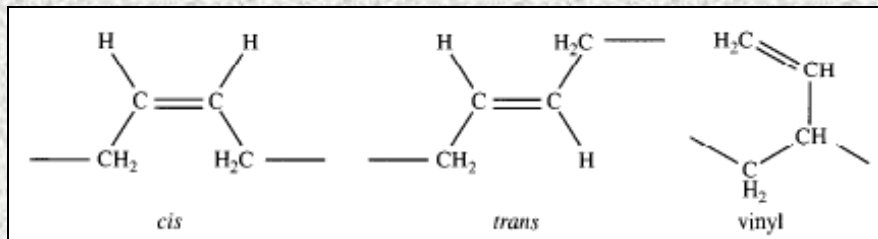


- doi monomeri adiacenti au gruparile CH_3 atasate atomilor de carbon adiacenti



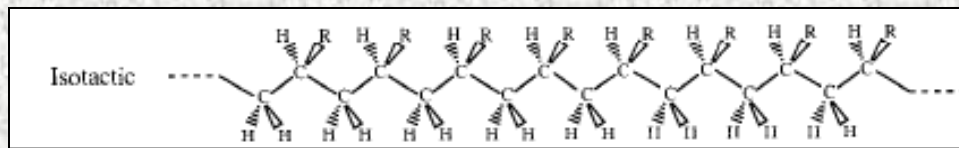
- gruparile CH_3 nu sunt atasate atomilor de carbon adiacenti. Izomerul cap-coada apare mult mai des, dar proprietatile se schimba radical cu fractia de izomer cap-cap prezenta

2. Izomerii structurali ai polibutadienii (apar la polimerii care contin o legatura dubla (rigida, nu se poate roti)

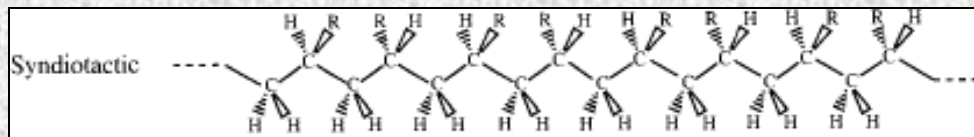


Aparitia lor depinde de conditiile de polimerizare

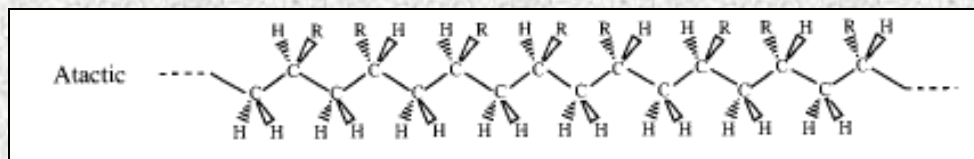
3. Stereo-izomerismul – cele patru legaturi ale unui atom de carbon au o structura tetragonala. Daca atomii de carbon ai lantului principal au o structura de zig-zag in acelasi plan, monomerii adiacenti pot avea gruparile R de aceiasi parte sau de parti diferite ale planului. Acest tip de stereo-izomerism este descris de tacticitatea polimerului.



gruparile R- de aceiasi parte a lantului



gruparile R – alterneaza



gruparile R alterneaza complet aleatoriu

Polimerii vinil au o legatura simpla de carbon in lantul principal, legaturi ce permit rotatiile, dar aceste rotatii nu schimba tacticitatea. Multi polimeri sintetici vinil nu corespund tacticitatii simple descrise.

Caz general:

p_m - probabilitatea ca un monomer sa se ataseze lantului cu
cu grupul R de aceiasi parte ca a monomerului anterior

$1-p_m$ - probabilitatea ca monomerul sa se ataseze cu gruparea R de
cealalta parte.

Adesea: $p_m \approx \frac{1}{2}$.

Ex.: R=Cl (policlorura de vinil): $p_m = 0.45$

R= benzen (polistirenul): $p_m = 0.5$

Polimeri izotactici: $p_m = 1$

Polimeri sindiotactici: $p_m = 0$

Polimeri atactici: $p_m = \frac{1}{2}$ dar orice probabilitate $0 < p_m < 1$ este
posibila

Diferite scheme de polimerizare aplicate aceluiasi monomer pot
duce la diverse valori ale probabilitatii p_m .

Microstructura unui lant polimeric poate fi determinata
experimental prin masuratori RMN.

Microstructura lantului polimeric determina proprietatile fizice ale polimerului (ex.: polimerii izotactici si sindiotactici se pot cristaliza mult mai usor decat cei atactici)

Homopolimeri si heteropolimeri

Homopolimeri – macromolecule care contin monomeri de un singur tip:

...-A-A-A-A-A-A-...

Pot diferi prin microstructura sau grad de polimerizare.

Gradul de polimerizare N (sau numarul de legaturi principale n) – factor major care determina multe proprietati ale polimerului.

Oligomer – o molecula cu un numar mic de monomeri (< 20)

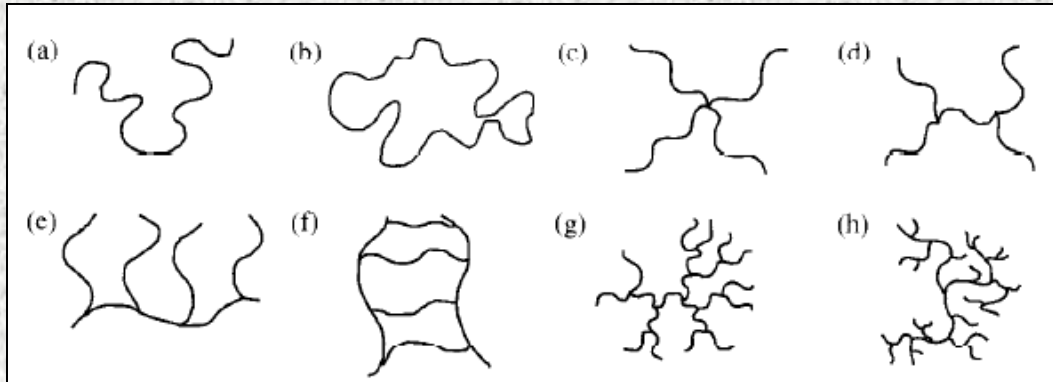
Polimerii liniari – contin intre 20 si 10^7 (cel mai lung cromozom cunoscut) monomeri.

Proprietatile moleculelor polimere sunt influentate de:

1. Numarul de monomeri din lant (ex.: hidrocarburi alcan)

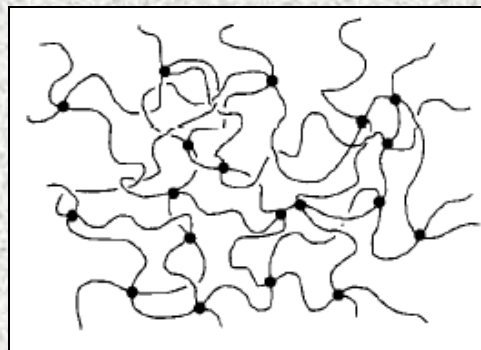
Nr. atomi de carbon	Stare la 25°C	Exemplu	Folosire
1-4	Gazoasa	Propan	Combustibil
5-15	Lichid cu vasc. mica	Gaz	Combustibil si solvent
16-25	Lichid cu vasc. mare	Ulei de motor	Ulei
20-50	Solid “moale”	Ceara de parafina	Straturi protectoare
>1000	Solid plastic	Polietilena	Sticle si jucarii

2. Arhitectura polimerului



a) liniar; b) inel; c) legaturi in stea; d) legaturi H; e) pieptene; f) scara; g) dendrimer; h) legaturi aleatoare (aplicatii industriale la fabricarea sticlelor si a foliilor protectoare).

Un numar mare de legaturi poate forma o retea polimera



Heteropolimeri – mai multe tipuri de monomeri intr-un lant polimeric

Proprietatile depind de: i) compozitie (fractia fiecarui tip de monomer prezent si de ii) secventa monomerilor in lant

Copolimeri – macromolecule cu doua tipuri de monomeri

Pot fi:

1) alternativi $\boxed{\dots-A-B-A-B-A-B-A-B-\dots}$ 3) grefati

2) aleatorii $\boxed{\dots-A-A-B-A-B-B-B-A-A-B-A-\dots}$

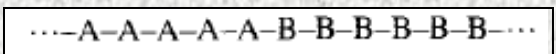
4) dibloc copolimeri (contin doua blocuri)

5) tribloc copolimeri $\boxed{\dots-A-A-A-B-B-\dots-B-B-A-A-A-\dots}$

6) polibloc copolimeri $\boxed{\dots-A-A-B-B-\dots-B-B-A-A-\dots-A-A-B-B-\dots-B-B-A-A-\dots}$

7) copolimeri aleatorii $\boxed{\dots-A-B-B-C-C-B-A-B-C-B-A-B-B-B-A-C-C-B-A-A-C-\dots}$

8) tribloc ABC $\boxed{\dots-A-A-A-A-A-A-B-B-B-B-B-\dots-B-B-B-B-B-C-C-C-C-C-C-\dots}$



Multi biopolimeri sunt heteropolimeri:

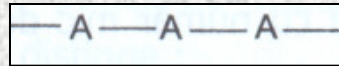
Ex.: i) acidul dezoxiribonucleic este un heteropolimer alcatuit din patru tipuri de monomeri (nucleotide)

ii) proteinele – heteropolimeri alcutiti din 20 de tipuri diferite de monomeri (amino acizi).

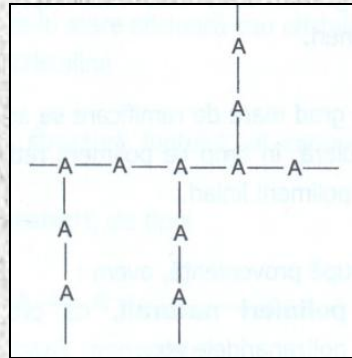
CLASIFICAREA POLIMERILOR

Dupa forma geometrica a lantului

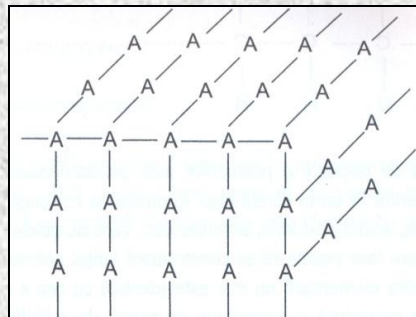
Polimeri liniari - ex.: polietilena, cauciucul, celuloza, proteinele



Polimeri ramificati – ramificatii scurte pe catena principala



**Polimeri reticulati (tridimensionali sau sub forma de retea)
ex.: silicatii, sticlele anorganice)**



Dupa provenienta:

**Polimeri naturali – ex.: proteinele, albuminele, acizii nucleici,
polizaharidele, cauciucul**

**Polimeri artificiali – modificarea chimica a polimerilor naturali
ex.: celuloidul**

**Polimeri sintetici – obtinuti prin polimerizare si policondensare
cei mai raspanditi**

Dupa natura chimica

Polimeri organici – extrem de raspanditi si studiati

Polimeri anorganici – punti de carbon

**Polimeri elemento-organici – catene principale anorganice cu
grupe laterale organice**

Dupa comportarea la incalzire

Polimeri termoplastici – modificari reversibile sub actiunea caldurii

Polimeri termoreactivi – modificari ireversibile

Dupa proprietati tehnice

Elastomeri – capacitatea de a se deforma reversibil cu multe sute de procente sub actiunea unor forte foarte mici

Plastomeri – deformari reversibile mici, de pana la 25%.

Dupa proprietati specifice fazei

Materiale plastice – faza sticloasa sau cristalin-amorfa

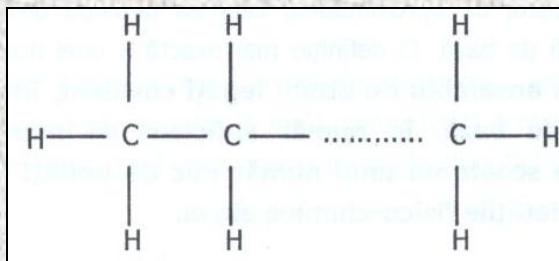
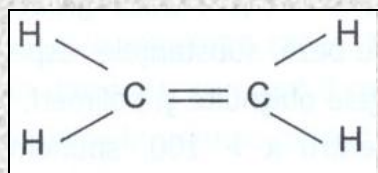
Fibre polimere – proprietati inalt-cristaline unidimensionale

Procedee de obtinere:

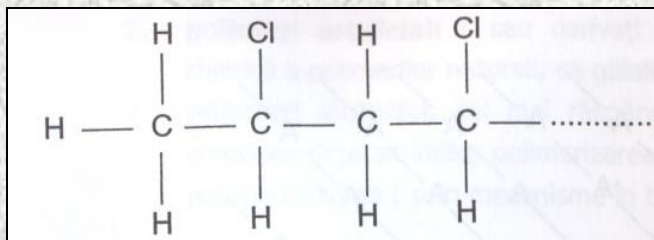
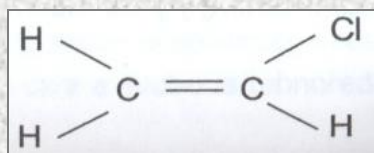
- i) polimerizare
- ii) policondensare

Polimerizare – reactia de unire a monomerilor prin ruperea unei legaturi, fara a forma compusi secundari

Ex.: etilena → polietilena cu gradul de polimerizare ~ 10^4



clorura de vinil → policlorura de vinil (PVC)



Metode industriale de polimerizare

- i) Polimerizare in bloc (masa) – monomerul constituie si mediul de polimerizare (gazos sau lichid). Metoda cea mai simpla.**
- ii) Polimerizare in solutie – monomerul si polimerul sunt solubile in mediul de polimerizare. Polimerul poate fi separat prin precipitare.**
- iii) Polimerizare in dispersie – monomerul in amestec cu mediul de polimerizare. Daca dimensiunea monomerului este de ordinul milimetrilor – polimerizare in suspensie; dimensiunea monomerului de ordinul micronilor formand cu mediul de polimerizare o emulsie – polimerizare in emulsie.**

**iv) Polimerizare in plasma – genereaza o descarcare in gaz pentru obtinerea de energie necesara initializarii polimerizarii.
Folosita pentru obtinerea de filme subtiri polimere.**

Reactiile de polimerizare

- **exoterme (caldura de reactie este cuprinsa intre 17 si 24 kcal/mol)**
- **favorizate de temperaturi scazute si presiuni ridicate.**

Agenti de polimerizare – influenteaza direct polimerizarea si proprietatile polimerului rezultat

- i) initiatori – activeaza si initiaza formarea polimerului**
- ii) catalizatori – maresc viteza de polimerizare prin intermediul ionilor formati cu monomerul**
- iii) inhibitori – intrerup reactia de polimerizare formand cu radicalii existenti substante stabile**
- iv) modificatori – regleaza gradul de polimerizare intrerupand procesul la diverse valori ale acestuia**
- v) mediile de polimerizare – disperseaza monomerul, dizolva polimerul obtinut sau il mentin in suspensie. Pot fi gazoase (azot, heliu, argon) sau lichide (dizolvanti, apa) ²¹**

- vi) emulgatori – disperseaza omogen monomerul si polimerul in mediul de polimerizare formand o emulsie.**
- vii) coloizi de protectie – stabilizeaza dispersia impiedicand aglomerarea.**

Policondensarea – reactia de unire a monomerilor avand ca rezultat si aparitia unor compusi secundari (apa, metanol, amoniac, etc.), care sunt eliminati ulterior.

Caracteristica esentiala a polimerilor - polidispersitatea
Polimerii (naturali si sintetici) sunt formati din lanturi moleculare cu lungimi diferite → polidispersitatea. Pentru caracterizarea lor se introduc marimi medii: masa moleculara medie, grad mediu de polimerizare.

Istoric

Folosirea biopolimerilor de secole fara a sti ca sunt macromolecule
Ex.: cauciucul natural.

La mijlocul sec. XIX – sintetizarea macromoleculelor fara a sti ca sunt molecule foarte mari.

La inceputul sec. XX – aceste materiale sunt coloizi (clusteri de molecule mici, cu legaturi ne-covalente, misterioase intre ele).

S-a masurat masa moleculara (de ordinul $10^4 - 10^5$ g/mol), dar rezultatele nu au fost acceptate deoarece valorile se schimbau sistematic cu concentratia. Acum intelem aceste schimbari si ca masa moleculara adevarata se obtine prin extrapolare la concentratie zero.

1920 – Staudinger a propus ipoteza macromoleculara; polimerii sunt molecule alcatuite din unitati elementare legate covalent, numite monomeri. Astfel proprietatile coloidale ale polimerilor au fost atribuite acestor molecule mari.

In contrast cu coloizii – macromoleculele au proprietati coloidale in toti solventii in care se dizolva → legaturile covalente mentin lantul polimeric.

Rezistenta mare in acceptarea ipotezei, apoi o acceptare graduala in jurul anului 1920.

1929 – Carothers a sintetizat o varietate mare de polimeri cu structuri bine definite.

1930-1960 – au fost stabilite conceptele principale ale fizicii polimerilor, s-au dezvoltat si rafinat procedeele de sinteza si au fost introduse majoritatea fundamentelor.

Kuhn – statistica lantului polimeric; Flory – expansiunea lantului polimeric intr-un solvent bun; Huggins si Flory – termodinamica; Flory si Stockmayer – solidificarea polimerilor; Kuhn, James si Guth – elasticitatea cauciucului; Rouse si Zimm – dinamica lantului macromolecular.

1960-1980 – principiile principale ale fizicii polimerilor moderne
Edwards – modelul lantului molecular confinat
Cloizeaux si de Gennes – teoria moderna a solutiilor semidiluate
de Gennes – teoria difuziei aplicata lantului polimeric
Doi-Edwards – curgerea topiturilor de polimeri

Cercetare curenta (probleme nerezolvate):

- Polimeri cu grupari asociate legate la catena principala**
- Cristalizarea polimerilor**
- Polimeri cristale lichide**
- Polimeri incarcate electric**
- Studiul biopolimerilor**

Aplicatiile polimerilor

- **elastomeri** : confectionarea pneurilor, foliilor si a peliculelor rezistente la agenti chimici.
- **teflon** : in industria mecanica, informatica, electronica, sistemele radar, industria chimica si nucleara, mecanisme de glisare, segmente de piston, garnituri, confectionarea de tuburi, vane, membrane, filtre, accesorii pentru pompe centrifuge.
- **polimetacrilatul de metil (plexiglas)** – incolor, perfect transparent, incasabil.
- **polimeri semiconductori si fotoconductori** – supraconductibilitatea la temperatura ambianta.

- **materiale polimere compozite mixte cu un component macromolecular - industria electrotehnica: materiale plastice cu tesaturi de rasina (textolitul, asbotextolitul)**
- **cristalele lichide polimere – filme si fibre**
- **medicina – poliizoprenul, polietilena, polipropilena, polimetacrilatul de metil, cauciucul siliconic**

Natura fractala a conformatiilor polimere

Dupa polimerizare – o macromolecula flexibila poate avea multe conformatii diferite.

- Conformatie – structura spatiala a lantului polimeric**
determinata de aranjarea relativa a monomerilor
- este specificata de n vectori ai legaturilor intre atomii vecini din lantul principal
 - depinde de trei caracteristici:
 - i) flexibilitatea lantului (rol principal)
 - ii) interactia intre monomerii vecini ai lantului (attractive sau repulsive) – dependenta de temperatura
 - iii) interactia monomerului cu mediul exterior (cu alte lanturi sau cu solventul) – dependenta de temperatura

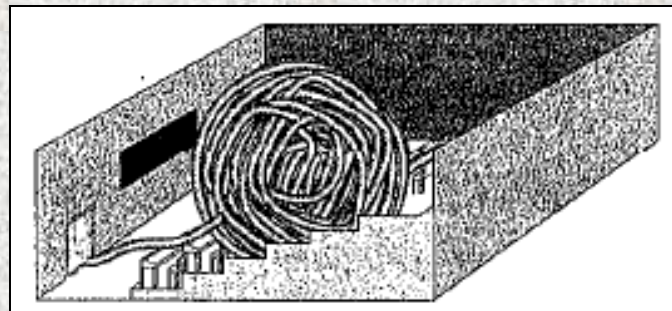
Consideram un lant cu $n = 10^{10}$ legaturi (cea mai mare molecula de acid dezoxiribonucleic).

Lungimea legaturii – de ordinul Angstromilor

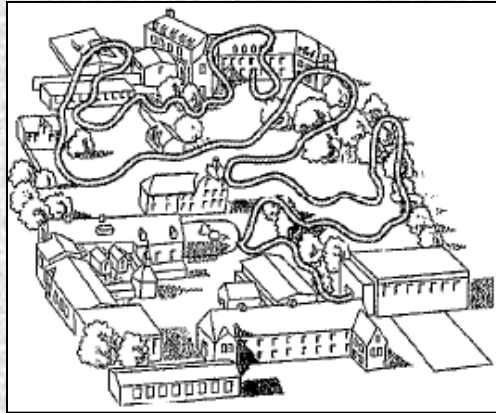
Lungimea conturului unei molecule – de ordinul metrilor

Pentru a intelege domeniul dimensiunilor care apar– marim toate lungimile cu un factor 10^8 . Astfel lungimea unei legaturi individuale este de ordinul $l \approx 1\text{cm}$.

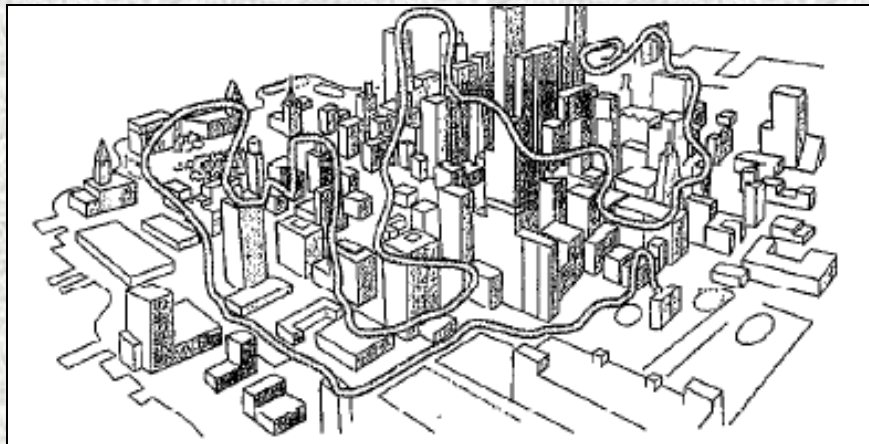
Daca intre monomeri exista atractii puternice – polimerul devine un obiect dens, numit globula colapsata cu volumul $V \approx nl^3 \approx 10^{10}\text{cm}^3 \approx 10^4\text{m}$, care poate umple dens o incapere de dimensiune liniara $R \approx V^{1/3} \approx n^{1/3}l \approx 20\text{m}$.



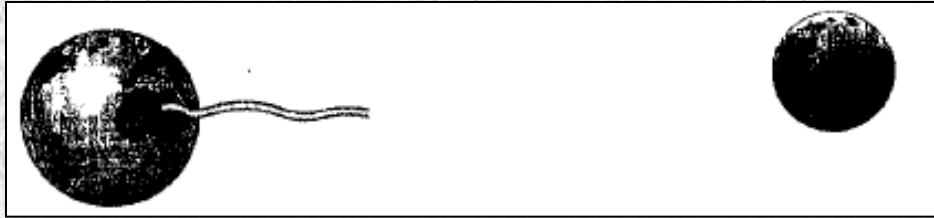
Daca nu exista interactii intre monomeri, conformatia lantului este echivalenta cu problema “mersului aleatoriu” cu dimensiunea $R \approx n^{1/2}l \approx 1\text{Km}$, o dimensiune tipica a unui campus universitar.



Daca intre monomeri exista repulsii short-range (volum exclus), dimensiunea lantului este $R \approx n^{3/5}l \approx 10\text{Km}$, dimensiunea tipica a unui oras.



Daca intre monomeri exista repulsii long-range (electrostatice), lantul are o conformatie extinsa cu dimensiunea $R \approx nl \approx 10^5 \text{Km}$, un sfert din distanta pamant-luna.



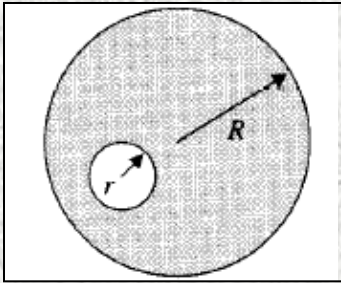
Aceste variatii astronomice ale dimensiunilor lantului – caracter unic al polimerilor.

Cele mai multe conformatii polimere sunt auto-similare (fractale) pe un domeniu larg de lungimi.

Volumul unei sfere solide de raza R este aproximativ egal cu cubul razei si proportional cu masa sa: $V = 4\pi R^3/3 \approx R^3 \approx \text{masa}$ ($R^3 \approx \text{masa}$ pana la o constanta arbitrara; volumul si masa au unitati diferite). Proportionalitate \rightarrow daca raza sferei creste de 2 ori masa sa creste de 2^3 ori. Exponentul 3 este dimensiunea spatiului.

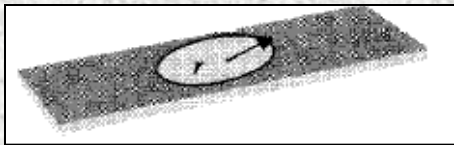
Relatii similare apar nu numai pentru intregul obiect ci si pentru parti mai mici din el.

Ne imaginam ca decupam o sfera mai mica de raza r din sfera initiala. Masa m a sferei mici este proportionala cu cubul razei: $m \approx r^3$.



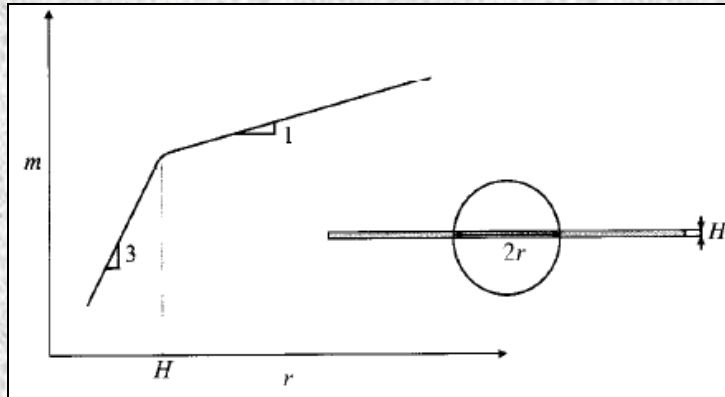
$d=1$ si $d=2$ sunt celelalte dimensiuni familiare.

Ex. de obiect bidimensional: o foaie de hartie cu grosime si densitate uniforme. Masa m a unui cerc taiat din foaie este proportionala cu patraturul razei: $m \approx r^2$.



In cele doua expresii nu am considerat prefactorii (nici cei adimensionali nici cei dimensionali).

Ex. de obiect APROAPE unidimensional: un fir. Masa unei parti de lungime $2r$ din fir este proportionala cu lungimea (daca diametrul si densitatea sunt uniforme): $m \approx r$.



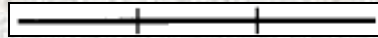
Explicarea lui APROAPE: consideram o sfera de raza r in jurul firului.

**Daca $r \gg H$ (diametrul firului), masa materialului din sfera $m \approx r$.
Daca $r \ll H$, tridimensionalitatea sferei devine importanta si masa firului din interiorul sferei $m \approx r^3$.**

Dependenta masei firului de diametru H din interiorul sferei de raza r apare schematic in figura. Firul este unidimensional pentru scala de lungime mult mai mare decat diametrul sau $r \gg H$ si tridimensional pentru scale de lungime mult mai mici $r \ll H$.

Curba Koch triadica – obiect autosimilar, fractal

Linie dreapta impartita in trei parti (subsectioni) egale:



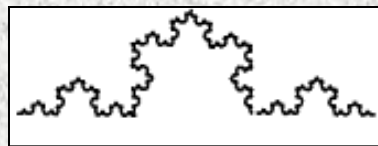
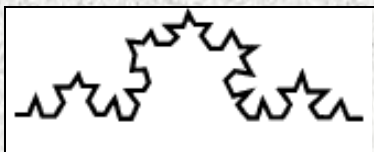
In subsectioniunea din mijloc construim un triunghi echilateral si indepartam latura de jos (obtinem patru segmente de lungime egala in locul celor trei



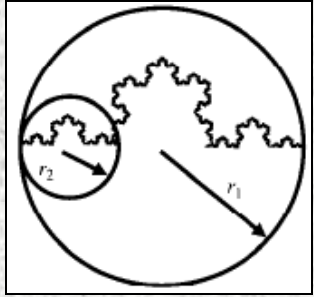
Repetam procedura pentru fiecare din aceste patru segmente



Procesul continua pana la limita rezolutiei ecranului



Pentru a determina dependenta de masa a curbei Koch, desenam cercuri de diametrul $2r$, egale cu lungimile segmentelor din doua generatii consecutive. Razele cercurilor se modifica cu un factor 3 ($r_1 = 3r_2$), iar masa m a curbei din interiorul cercurilor se modifica cu un factor 4



($m_1 = 4m_2$). Cautam un exponent D , numit dimensiunea fractala, definit de relatia: $m \approx r^D$. Dimensiunea fractala poate fi calculata din doua moduri de determinare a lui m_1 in raport cu r_2 :

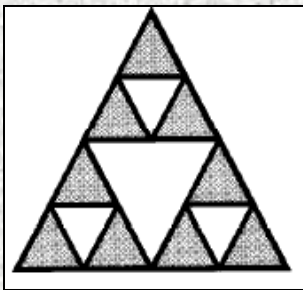
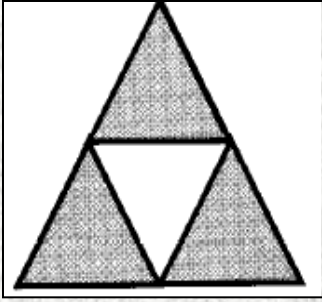
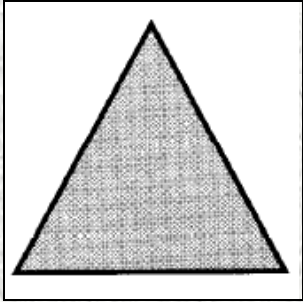
$$\begin{aligned} m_1 &= A r_1^D = A (3 r_2)^D \\ m_1 &= 4 m_2 = 4 A r_2^D \end{aligned}$$

Rezulta:

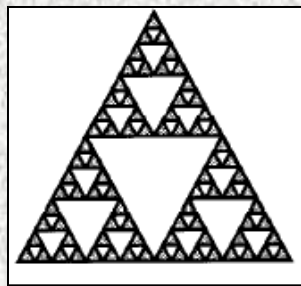
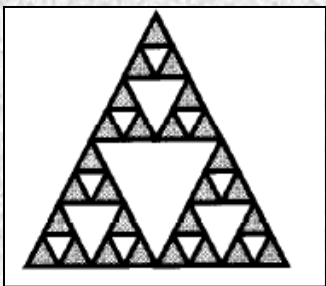
$$(3 r_2)^D = 4 r_2^D \Rightarrow D = \frac{\lg 4}{\lg 3} \cong 1,26$$

Autosimilaritatea curbei Koch; daca o mica parte a curbei este marita, apare exact ca o parte mai mare.

“Garnitura” Sierpinski: se divide un triunghi echilateral in patru triunghiuri echilaterale mai mici si se taie cel din mijloc.

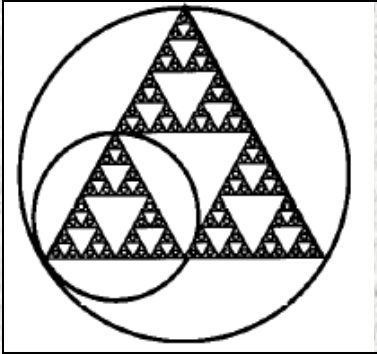


Pasul doi: se repeta procedura cu fiecare din cele trei triunghiuri echilaterale ramase. Se obtin noua triunghiuri echilaterale mai mici.



si asa mai departe.

Dimensiunea fractala: cand raza cercului circumscris unei sectiuni se dubleaza, numarul de triunghiuri (masa garniturii din interiorul cercului) se tripleaza.



Astfel:

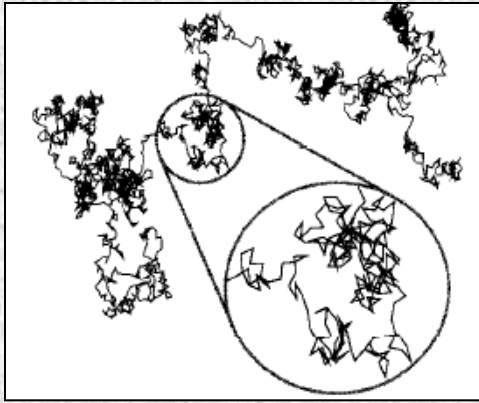
$$D = \frac{\lg 3}{\lg 2} \cong 1,58$$

Procedeu aplicabil oricarui fractal. Daca raza sferei se schimba printr-un factor C_r ($r_1 = C_r r_2$), iar masa sa printr-un factor C_m ($m_1 = C_m m_2$), dimensiunea fractala este raportul logaritmlor acestor factori:

$$D = \frac{\lg C_m}{\lg C_r}$$

Curba Koch si garnitura Sierpinski – fractali normali (regulati).

Polimerii – fractali aleatorii



Conformatia unui lant ideal (simulare numerica)
Abaterea patratica medie a distantei cap-coada
a unui lant ideal este proportionala cu gradul de
polimerizare N

$$N \propto \langle R^2 \rangle$$

Paranteza – medie peste toate conformatiile posibile ale lantului
ideal. Relatie similara pentru orice subsectiune a lantului ideal de
dimensiune r si care contine g monomeri:

$$g \propto \langle r^2 \rangle$$

Dimensiunea fractala a lantului ideal este $D=2$. Lantul ideal este
un obiect auto-similar, deoarece daca sectiunile mai mici sunt
marite, arata ca intreg lantul. Spre deosebire de fractalii regulati,
in fractalii aleatorii sectiunile marite arata ca intreg lantul numai in
medie (au aceleasi proprietati statistice).

Alta distinctie intre fractalii regulati si cei aleatorii polimerici: fractalii regulati sunt auto-similari pe toate scalele de lungime, fractalii aleatorii polimerici sunt auto-similari pe un domeniu finit (chiar daca mare) al scalelor de lungime. Exista un cut-off natural al auto-similaritatii la scale mici de lungime (lungimea l a unei legaturi) si unul la scale mari – dimensiunea R a polimerului.

Astfel ecuatia

$$g \propto \langle r^2 \rangle$$

este adevarata pentru $l < r < R$.

Dimensiunea fractala a unui polimer este definita prin relatia intre numarul de monomeri g din orice sectiune a polimerului si radacina patrata din abaterea patratica medie a dimensiunii sectiunii

$$g \propto \left(\sqrt{\langle r^2 \rangle} \right)^D$$

Dimensiunile fractale ale polimerilor

Arhitectura	Interactii	Dimensiune spatiului d	Dimensiune fractala D
Lineara	Nu	Oricare	2
Lineara	Repulsii short-range	d=2	4/3
Lineara	Repulsii short-range	d=3	1.7
Ramuri aleatorii	Nu	Oricare	4
Ramuri aleatorii	Repulsii short-range	d=2	8/5
Ramuri aleatorii	Repulsii short range	d=3	2.5