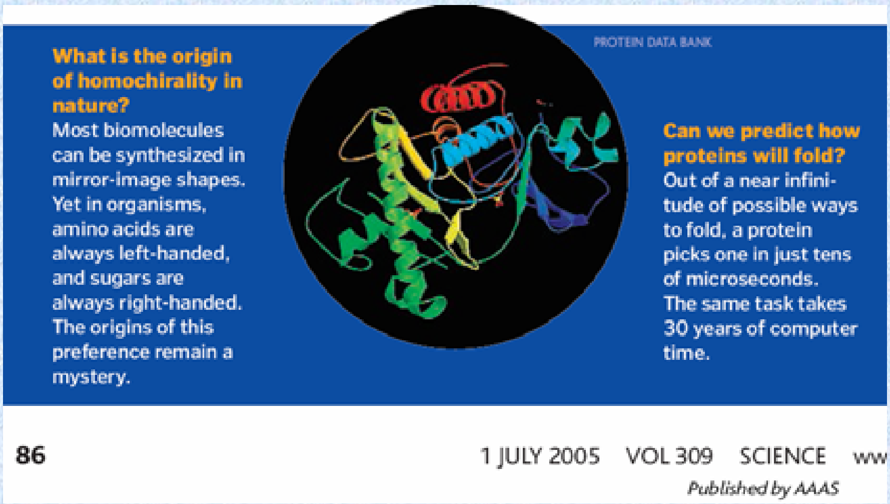
A biológiai kiralitás eredetének sztochasztikus kinetikai modelljei

Lente Gábor

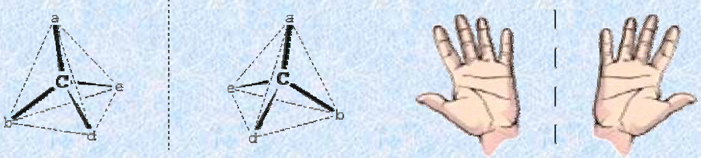
Debreceni Egyetem, Szervetlen és Analitikai Kémiai Tanszék

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Matematikai Modellalkotás Szeminárium, 2010. szeptember 28.



Kiralitás és homokiralitás

Királisnak nevezzük azokat a testeket, térbeli szerkezeteket, amelyek saját tükörképükkel nem hozhatók fedésbe



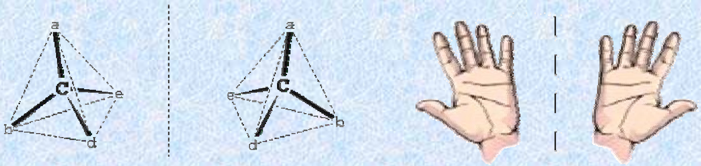
Biológiai kiralitás

aminosavak (**L**-enantiomer) ⇒ fehérjék

cukrok (**D**-enantiomer) ⇒ poliszacharidok és nukleinsavak

Következetesebb jelölésrendszer: **R** és **S**

Kiralitás és homokiralitás

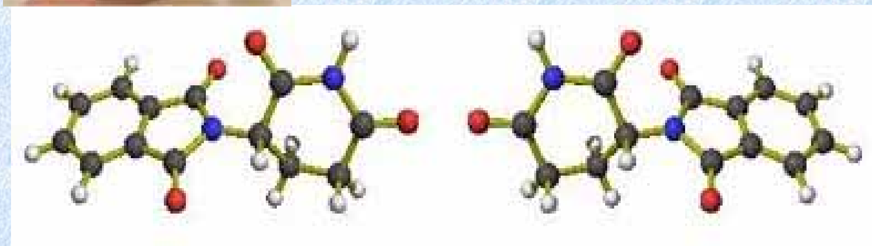


Tükörképi párok ⇔ ENANTIOMEREK

energetikai szempontból pontosan azonosak

A biológiai kiralitás oka csakis kinetikai lehet, vagyis a reakciók sebességi viszonyaival függ össze

Contergan



(R)-enantiomer
teratogén hatású

(S)-enantiomer
hatékony szedatívum

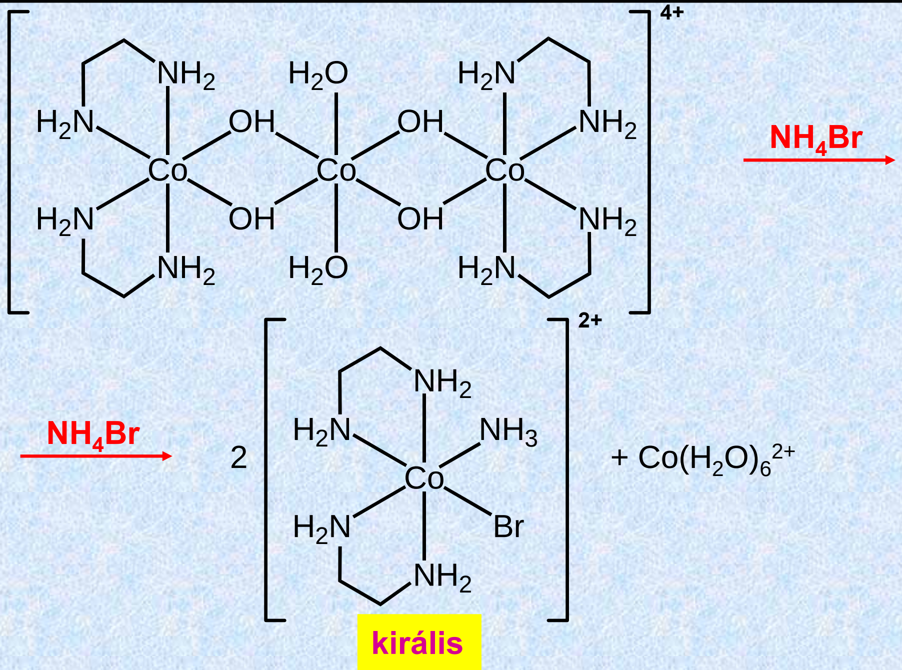
a szervezetben nagyon gyorsan racemizálódik

Abszolút aszimmetrikus reakció:

jelentős enantiomerfelesleg kialakulása akirális reaktánsokból aszimmetrikus külső hatások nélkül

Királis autokatalízis:

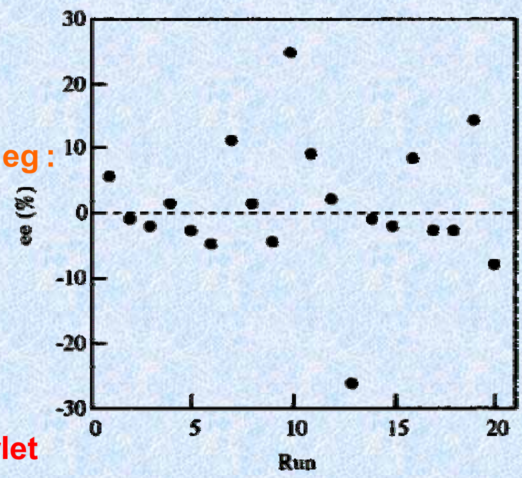
kémiai reakció, amelyben a királis termék egyik enantiomere gyorsítja saját keletkezését (de a másik enantiomerét nem)



K. Asakura et al. *J. Phys. Chem. A* 2000, *104*, 2689.

enantiomerfelesleg :

$$ee = \frac{|R - S|}{R + S}$$

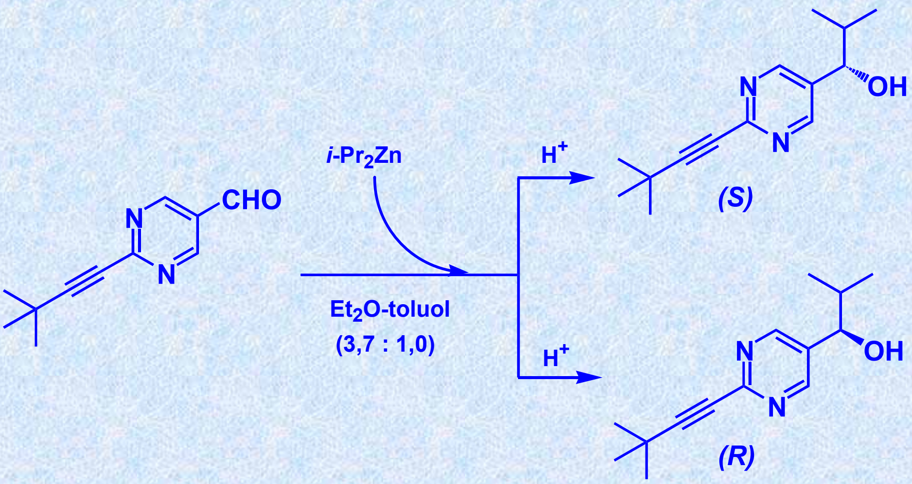


20 kísérlet

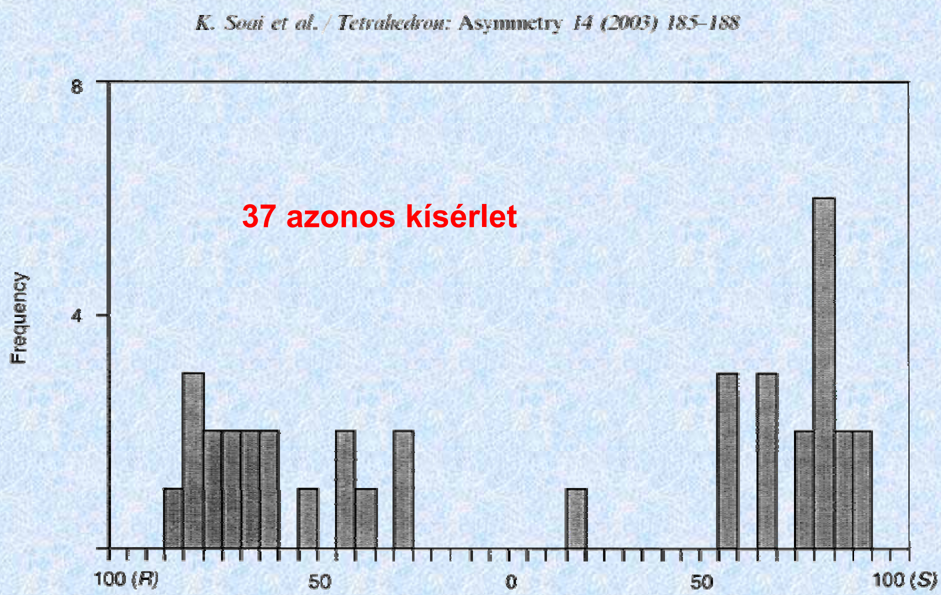
Figure 2. Randomly fluctuated ee of *cis*-[CoBr(NH$_3$)(en)$_2$]Br$_2$ (D) produced in the absence of seed crystals. Negative and positive values of ee respectively indicate the preferential production of levorotatory and dextrorotatory complexes.

K. Asakura et al. *J. Phys. Chem. A* 2000, *104*, 2689.

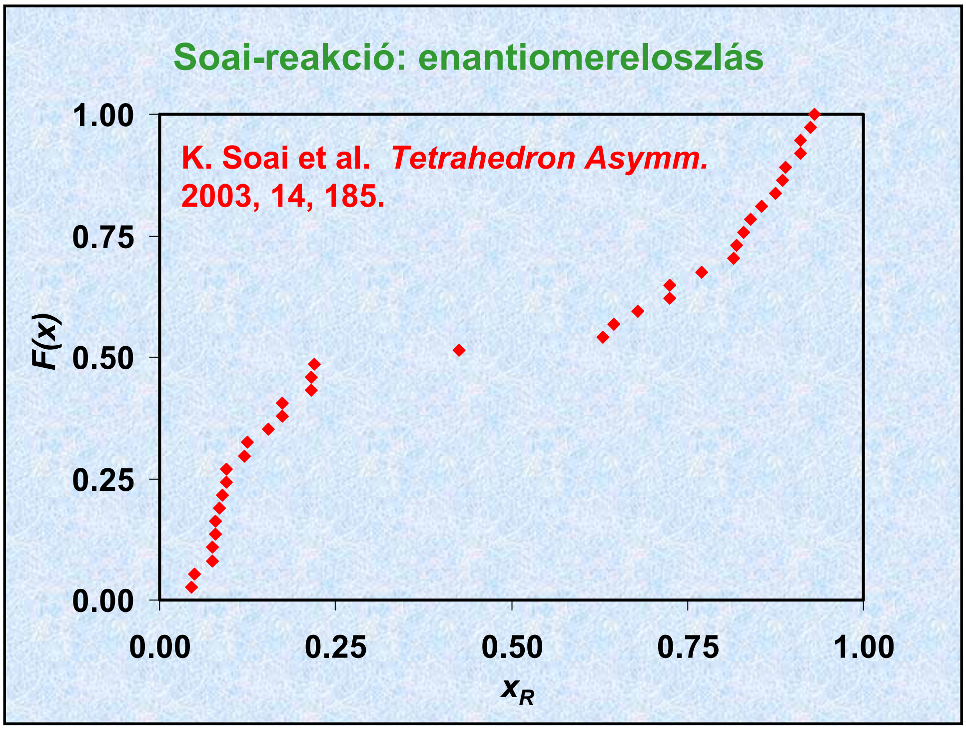
A Soai-reakció

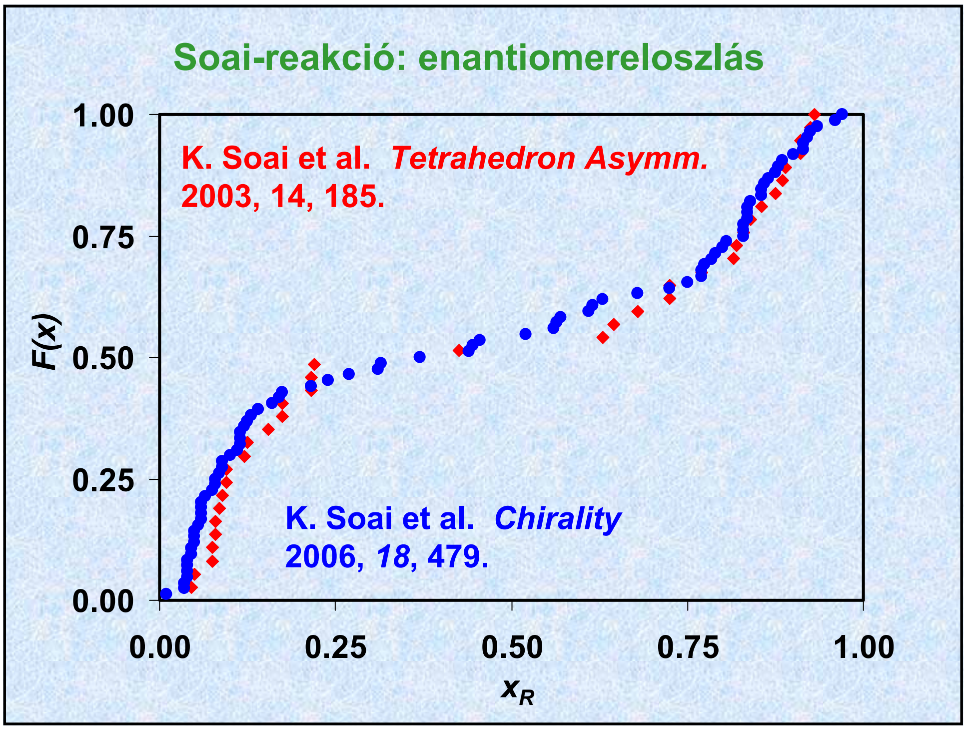


K. Soai et al. *Tetrahedron Asymm.* 2003, 14, 185.



K. Soai et al. *Tetrahedron Asymm.* 2003, 14, 185.


Soai-reakció: enantiomereloszlás
K. Soai et al. Tetrahedron Asymm.
2003, 14, 185.
F(x)
1.00
0.75
0.50
0.25
0.00
0.00
0.25
0.50
0.75
1.00
x_R


Soai-reakció: enantiomereloszlás
K. Soai et al. Tetrahedron Asymm.
2003, 14, 185.
K. Soai et al. Chirality
2006, 18, 479.
F(x)
1.00
0.75
0.50
0.25
0.00
0.00
0.25
0.50
0.75
1.00
x_R

Determinisztikus kinetika

$$\frac{d\underline{c}}{dt} = f(\underline{c})$$

$\underline{c}$: a rendszerben előforduló összes anyagfajta koncentrációját tartalmazó vektor, az idő függvénye

Egyértelműen meghatározott kiindulási állapot

$\Downarrow$

Egyértelműen meghatározott állapot bármely időpillanatban

Reprodukálhatatlanság:

lényeges, de nem kellő mértékben szabályozott külső tényezők ingadozásának hatására, a kísérletező számára *látszólag* azonos körülmények között mért különböző eredmények

Sztochasztikus jelleg:

természeti törvény(ek) következményeként *pontosan* azonos körülmények között különböző eredmények letters to nature

Experimental detection of α-particles from the radioactive decay of natural bismuth

Pierre de Marcillac, Noël Coron, Gérard Dambier, Jacques Leblanc & Jean-Pierre Moalic

Institut d'Astrophysique Spatiale, CNRS & Université Paris Sud, UMR 8617, Bât. 121, 91405 Orsay Cedex, France

^{209}Bi

$t_{1/2}$ = 1,9 × 10^{19} év

λ = 1,2 × 10^{-27} s^{-1}

Nature, 2003, *422*, 876.

Determinisztikus leírás

$$\frac{dn_{\mathrm{Bi}}}{dt} = -\lambda n_{\mathrm{Bi}}$$

Elsőrendű reakció

kezdeti állapot: *N* db bizmutmag

$$n_{\mathrm{Bi}} = Ne^{-\lambda t}$$

Sztochasztikus leírás

1 kiszemelt bizmutmag *t* idő után

még nem bomlott el: $e^{-\lambda t}$

elbomlott: $1-e^{-\lambda t}$ *exponenciális eloszlás*

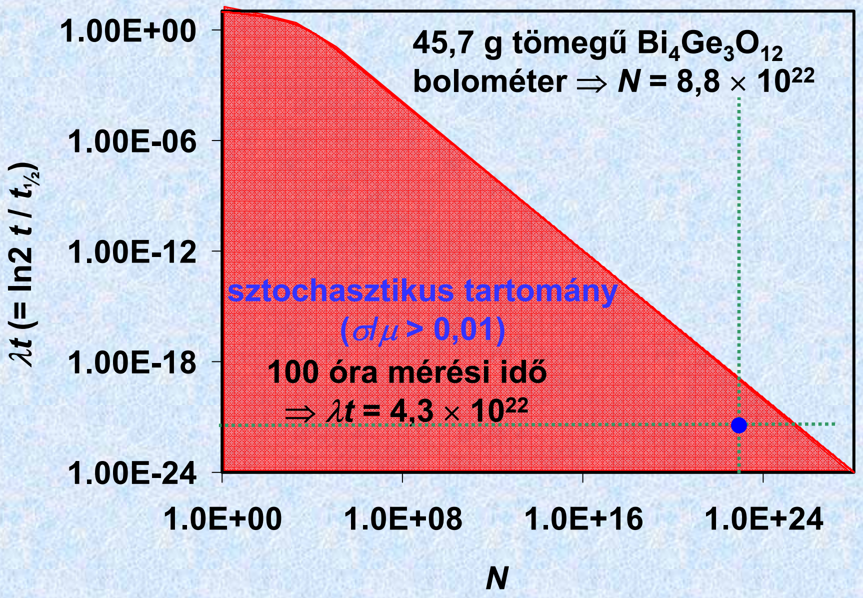
N db bizmutmag közül *t* idő után
pontosan *m* bomlott el: $\binom{N}{m}(1-e^{-\lambda t})^m(e^{-\lambda t})^{N-m}$

binomiális eloszlás

Várható érték: $\mu = N(1-e^{-\lambda t})$

Szórás: $\sigma = \sqrt{N(1-e^{-\lambda t})e^{-\lambda t}}$

Elsőrendű modell sztochasztikus tartománya



Egy egyszerű királis autokatalitikus modell

$A \rightarrow B \quad (B_R \text{ vagy } B_S)$

$v_1 = k_u[A]$

$$\frac{d[A]}{dt} = -k_u[A] - k_c[A]([B_R]+[B_S])$$

$A + B_R \rightarrow 2B_R$

$v_2 = k_c[A][B_R]$

$$\frac{d[B_R]}{dt} = 0{,}5k_u[A] + k_c[A][B_R]$$

$A + B_S \rightarrow 2B_S$

$v_3 = k_c[A][B_S]$

$$\frac{d[B_S]}{dt} = 0{,}5k_u[A] + k_c[A][B_S]$$

analitikusan megoldható

Egy egyszerű királis autokatalitikus modell

$A \rightarrow B \quad (B_R \text{ vagy } B_S)$

$v_1 = k_u[A]$

$A + B_R \rightarrow 2B_R$

$$\lambda = k_u + k_c[A]_0 + k_c[B_R]_0 + k_c[B_S]_0$$

$v_2 = k_c[A][B_R]$

$$[B_R] = \lambda\left(\frac{k_u}{2k_c} + [B_R]_0\right)\frac{1}{\lambda - k_c[A]_0 + k_c[A]_0 e^{-\lambda t}} - \frac{k_u}{2k_c}$$

$A + B_S \rightarrow 2B_S$

$v_3 = k_c[A][B_S]$

$$[B_S] = \lambda\left(\frac{k_u}{2k_c} + [B_S]_0\right)\frac{1}{\lambda - k_c[A]_0 + k_c[A]_0 e^{-\lambda t}} - \frac{k_u}{2k_c}$$

analitikusan megoldható

$k_u = 10^{-15}\ s^{-1}$ $k_c = 10^8\ M^{-1}s^{-1}$ $V = 10\ cm^3$

kezdeti állapot:

$[A]_0 = 0{,}200$ M
$[B_R]_0 = 0$
$[B_S]_0 = 0$

végállapot:

$[B_R]_\infty = 0{,}100$ M
$[B_S]_\infty = 0{,}100$ M

1 molekula átalakulása után:

$[A]_0 = 0{,}200$ M
$[B_R]_0 = 1{,}66 \times 10^{-22}$ M
$[B_S]_0 = 0$

végállapot:

$[B_R]_\infty = 0{,}1943$ M
$[B_S]_\infty = 0{,}0057$ M

Sztochasztikus kinetika

P. Érdi and J. Tóth
Mathematical models of chemical reactions
Theory and applications of deterministic and stochastic models
Manchester University Press, 1989.

Tóth János, Érdi Péter
A formális reakciókinetika modelljei, problémái és alkalmazásai
A kémia legújabb eredményei 227-350. oldal
Akadémiai Kiadó, Budapest, 1978.

Sztochasztikus kinetika

$$A \rightarrow B_R$$
$$A \rightarrow B_S$$

diszkrét állapot - folytonos idő

n: az A molekulák száma reakció előtt

(r,s) állapot: pontosan r darab B_R és s darab B_S molekula van jelen, ($n - r - s$) darab A molekula maradt

$P(r,s,t)$: annak a valószínűsége, hogy a rendszer t időpillanatban éppen az (r,s) állapotban van

$$A \rightarrow B_R$$
$$v_1 = 0{,}5\kappa_u a + \kappa_c a r \qquad \kappa_u = k_u$$

$$A \rightarrow B_S$$
$$v_2 = 0{,}5\kappa_u a + \kappa_c a s \qquad \kappa_c = \frac{k_c}{N_A V}$$

$$\frac{dP(r,s,t)}{dt} = -(\kappa_u + \kappa_c r + \kappa_c s)(n - r - s)P(r,s,t) +$$
$$+\{\kappa_u/2 + \kappa_c(r-1)\}(n - r - s + 1)P(r-1,s,t) +$$
$$+\{\kappa_u/2 + \kappa_c(s-1)\}(n - r - s + 1)P(r,s-1,t)$$

Lineáris, elsőrendű, homogén, állandó együtthatós differenciálegyenlet-rendszer

$$\frac{d\underline{P}(t)}{dt} = \underline{\underline{M}} \times \underline{P}(t) \quad \Rightarrow \quad \underline{P}(t) = \underline{P}(0)\exp(\underline{\underline{M}} \times t)$$

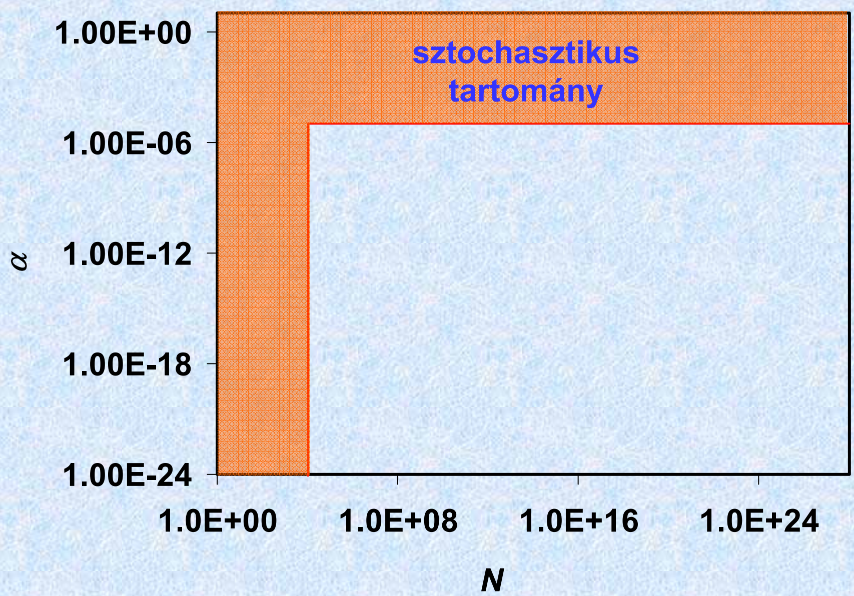
az állapotok száma:

$$M = \frac{(n+1)(n+2)}{2}$$

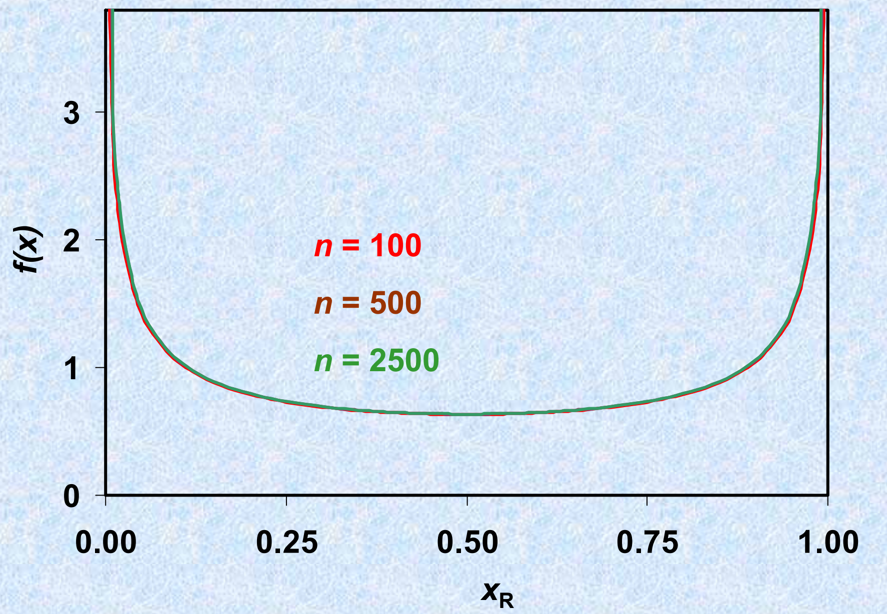
rendezőfüggvény:

$$f(r,s) = \frac{(r+s)(r+s+1)}{2} + r + 1$$

$Q(r,s)$: annak a valószínűsége, hogy a rendszer a reakció során bármikor áthalad az (r,s) állapoton



$\alpha = \kappa_c/\kappa_u = 1$



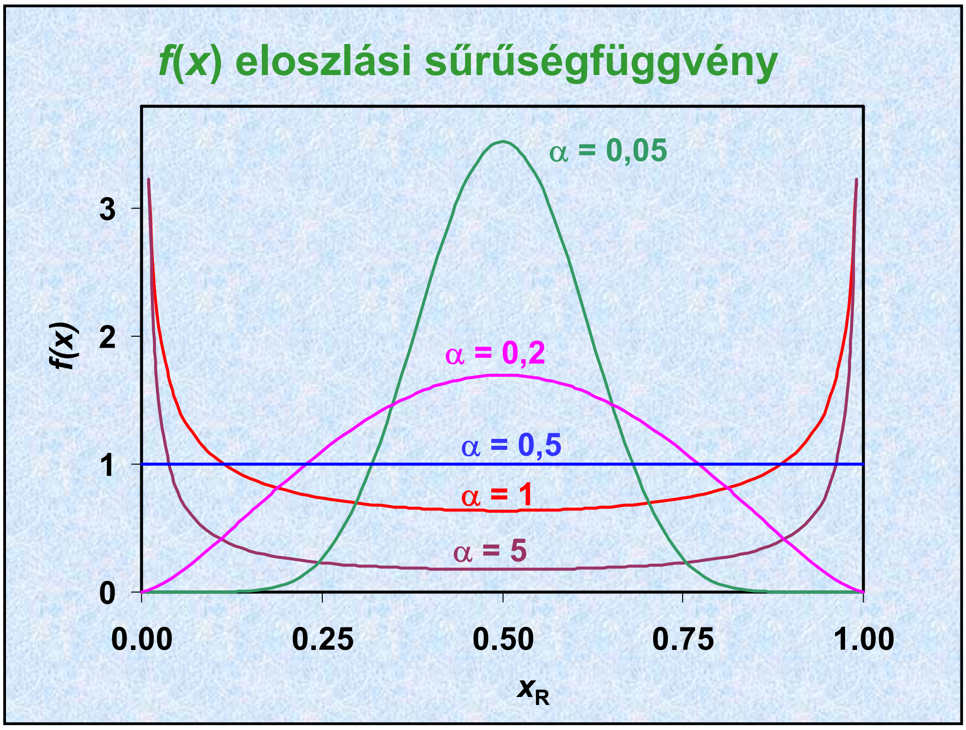
Elsőrendű autokatalízis

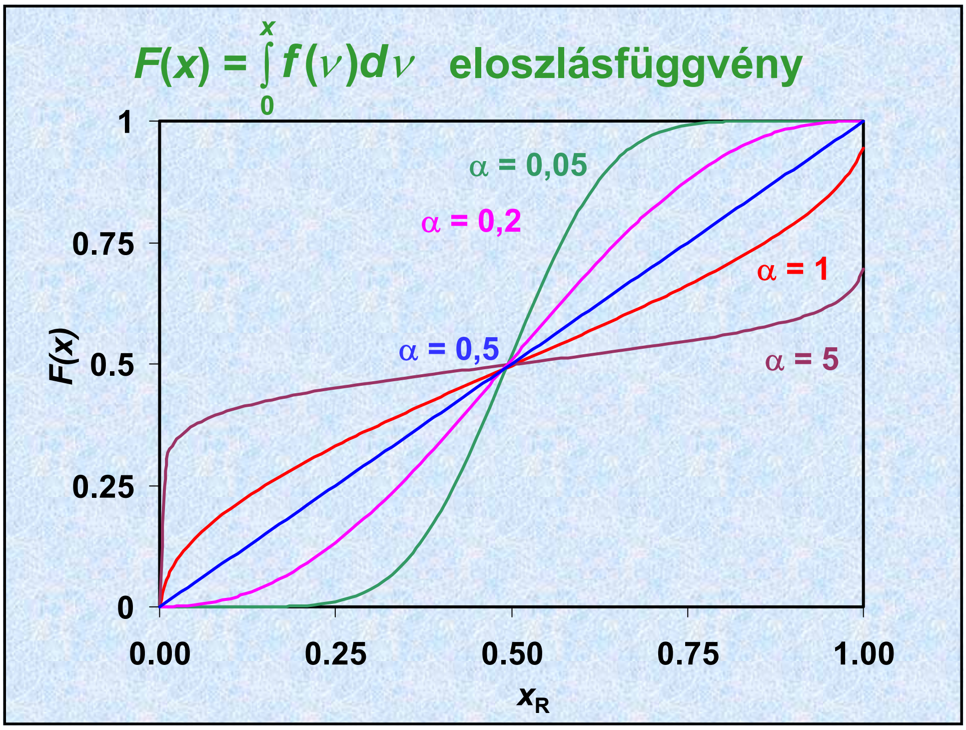
Diszkrét-folytonos átmenet nagyon nagy részecskeszámra:

$$f(x_R) = \lim_{n\to\infty, x_r = r/n} nQ(r,s) = \frac{\Gamma\left(\frac{1}{\alpha}\right)}{\Gamma\left(\frac{1}{2\alpha}\right)\Gamma\left(\frac{1}{2\alpha}\right)} x_R^{(1/2\alpha)-1}(1-x_R)^{(1/2\alpha)-1}$$

Béta-eloszlás

Lente, G. J. Phys. Chem. A, 2004, *108*, 9475.


f(x) eloszlási sűrűségfüggvény
α = 0,05
α = 0,2
α = 0,5
α = 1
α = 5
f(x)
3
2
1
0
0.00
0.25
0.50
0.75
1.00
xR


F(x) = ∫₀ˣ f(ν)dν eloszlásfüggvény
α = 0,05
α = 0,2
α = 1
α = 0,5
α = 5
F(x)
1
0.75
0.5
0.25
0
0.00
0.25
0.50
0.75
1.00
xR

Magasabb rendű autokatalízis

$A \rightarrow B_R$

$v_1 = 0{,}5\kappa_u a + \kappa_c a r^{\xi}$

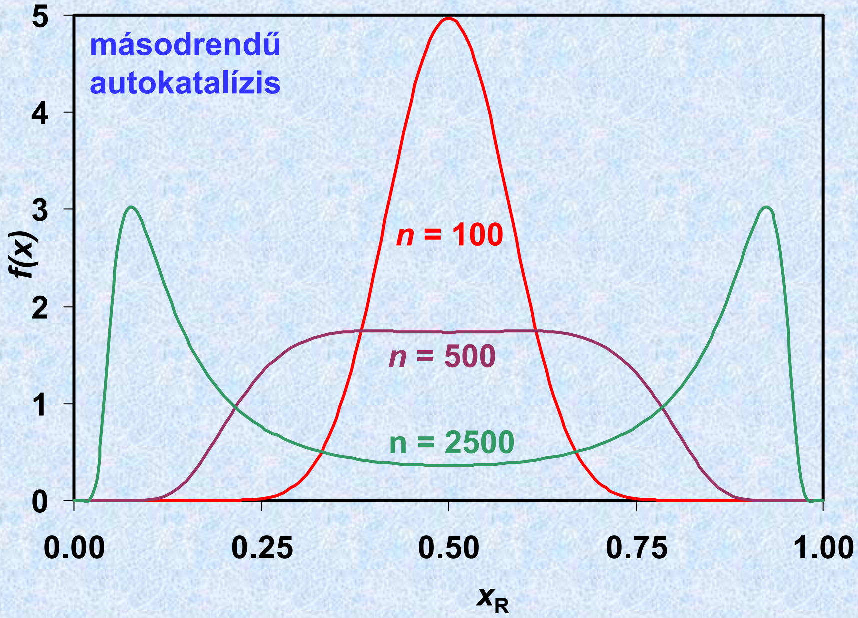
$A \rightarrow B_S$

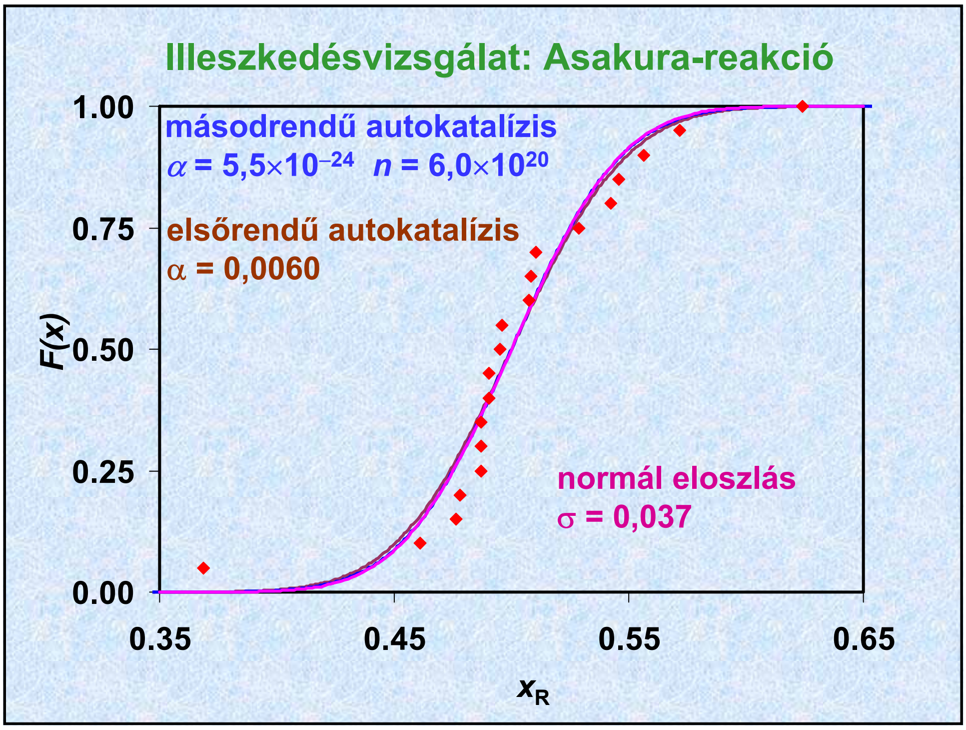
$v_2 = 0{,}5\kappa_u a + \kappa_c a s^{\xi}$

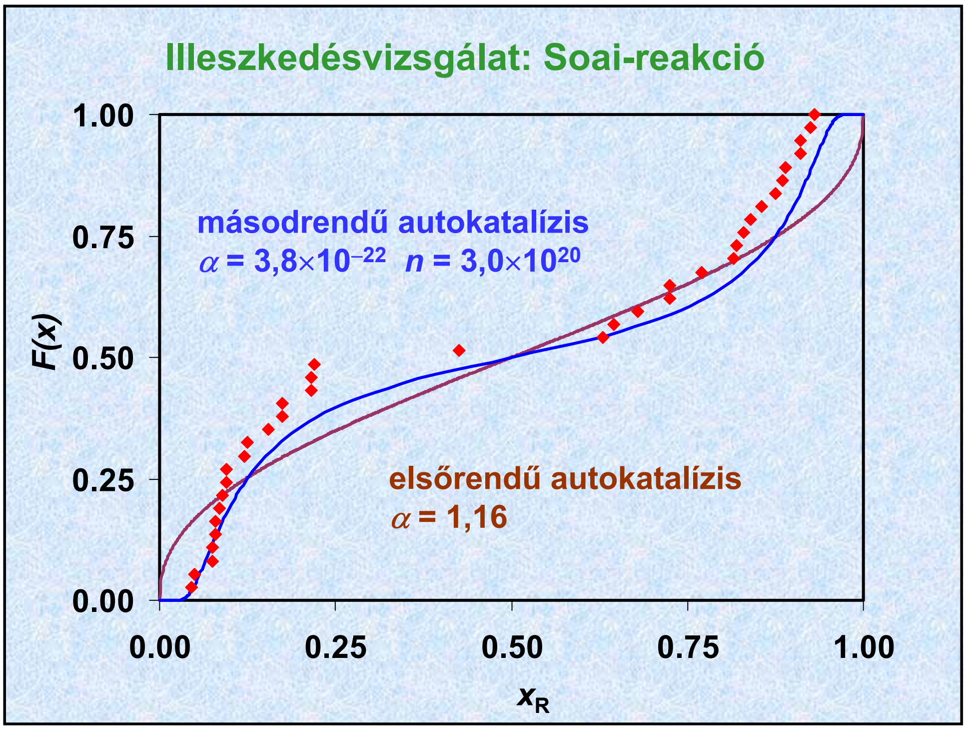
$\alpha = \kappa_c/\kappa_u = 1$

ahol $\xi > 1$

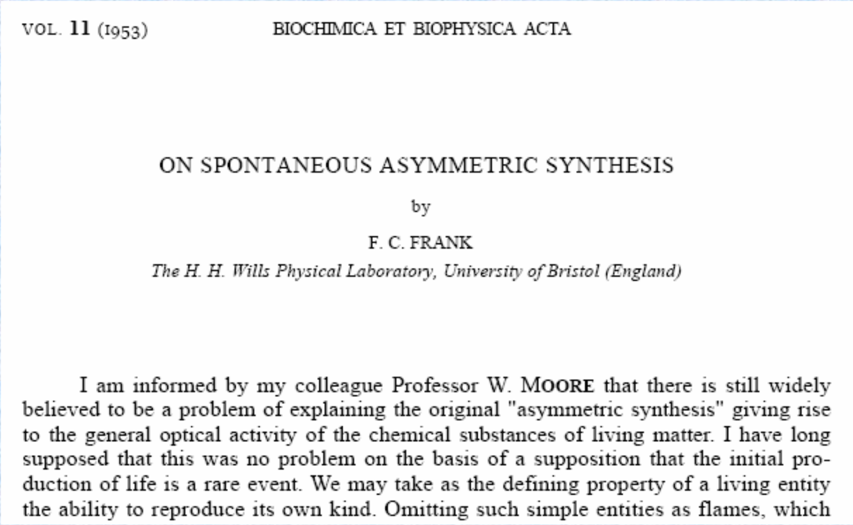
$\alpha = 2\times10^{-4}$




Illeszkedésvizsgálat: Asakura-reakció
1.00
0.75
0.50
0.25
0.00
0.35
0.45
0.55
0.65
F(x)
xR
másodrendű autokatalízis
α = 5,5×10–24 n = 6,0×1020
elsőrendű autokatalízis
α = 0,0060
normál eloszlás
σ = 0,037


Illeszkedésvizsgálat: Soai-reakció
1.00
0.75
0.50
0.25
0.00
0.00
0.25
0.50
0.75
1.00
F(x)
xR
másodrendű autokatalízis
α = 3,8×10–22 n = 3,0×1020
elsőrendű autokatalízis
α = 1,16

A Frank-modell



VOL. 11 (1953) BIOCHIMICA ET BIOPHYSICA ACTA

ON SPONTANEOUS ASYMMETRIC SYNTHESIS

by

F. C. FRANK

The H. H. Wills Physical Laboratory, University of Bristol (England)

I am informed by my colleague Professor W. MOORE that there is still widely believed to be a problem of explaining the original "asymmetric synthesis" giving rise to the general optical activity of the chemical substances of living matter. I have long supposed that this was no problem on the basis of a supposition that the initial production of life is a rare event. We may take as the defining property of a living entity the ability to reproduce its own kind. Omitting such simple entities as flames, which

F. C. Frank, *Biochim. Biophys. Acta* 1953, 11, 459.

A Frank-modell

A: nem királis molekula

B_R és B_S: királis tükörképi molekulapár

C: nem királis bomlástermék

reakcióindítás:

$A \rightarrow B_R \qquad v = k_u[A]$

$A \rightarrow B_S \qquad v = k_u[A]$

királis autokatalízis:

$A + B_R \rightarrow 2B_R \qquad v = k_c[A][B_R]$

$A + B_S \rightarrow 2B_S \qquad v = k_c[A][B_S]$

kölcsönös antagonizmus:

$B_R + B_S \rightarrow 2C \qquad v = k_d[B_R][B_S]$

Az enantiomerfelesleg definíciója

	hagyományos	módosított
determinisztikus	$ee = \frac{\lvert [B_R] - [B_S] \rvert}{[B_R] + [B_S]}$	$E = \frac{\lvert [B_R] - [B_S] \rvert}{[A]_0}$
sztochasztikus (várható érték)	$ee = \sum_{i=1}^{n} ee_i P_i$	$E = \sum_{i=1}^{n} E_i P_i$

Zárt rendszer – számolás

differenciálegyenlet-rendszer

$$\frac{dP(a,r,s,t)}{dt} =$$

$$= -\{2a\kappa_u + ar\kappa_c + as\kappa_c + rs\kappa_d\}P(a,r,s,t) +$$

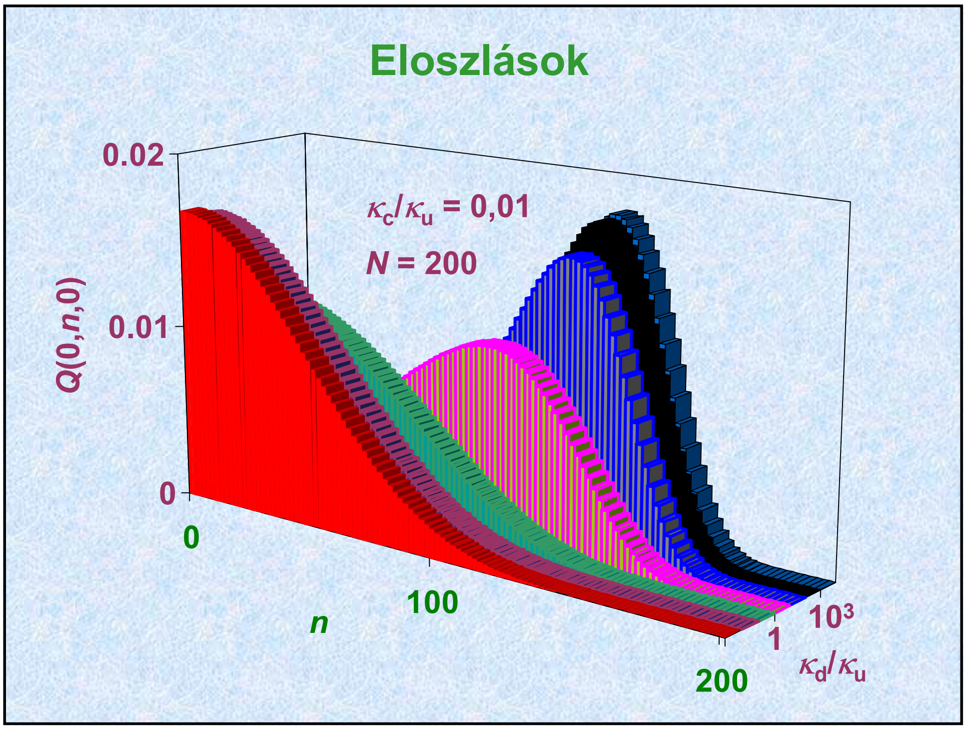
$$+ \{(a+1)\kappa_u + (a+1)(r-1)\kappa_c\}P(a+1,r-1,s,t) +$$

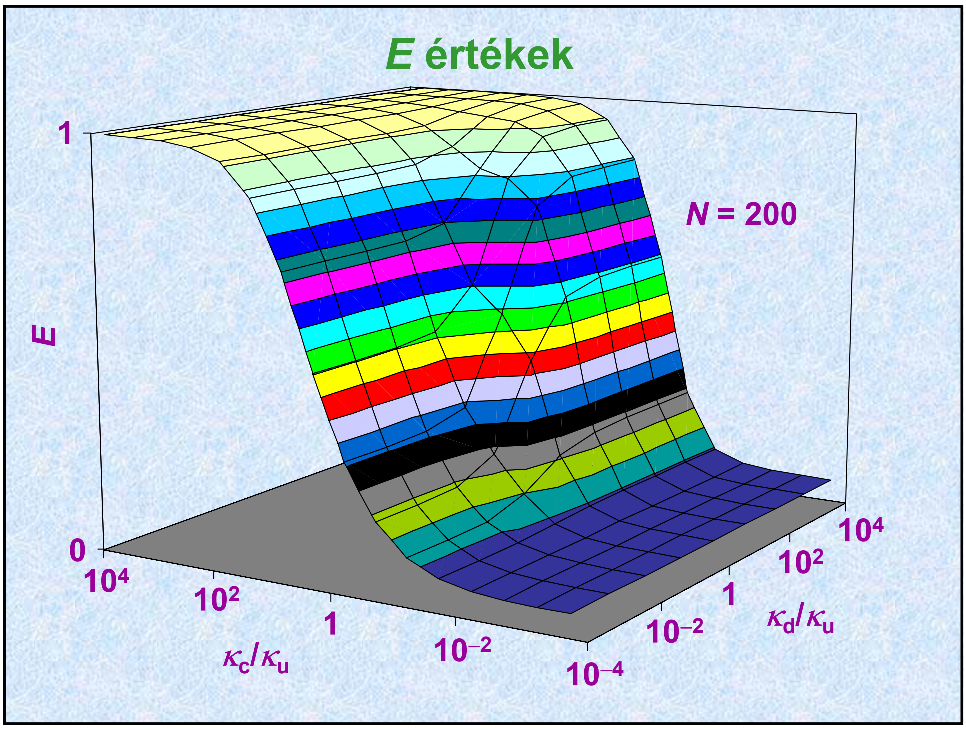
$$+ \{(a+1)\kappa_u + (a+1)(s-1)\kappa_c\}P(a,r,s-1,t) +$$

$$+ \{(r+1)(s-1)\kappa_d\}P(a,r+1,s+1,t)$$

$ee(t = \infty) = 1$ $\qquad$ $E(t = \infty) \leq 1$

Végállapot: csak C és B_R vagy B_S


Eloszlások
0.02
0.01
0
$Q(0,n,0)$
κ_c/κ_u = 0,01
N = 200
0
100
n
200
1
10^3
κ_d/κ_u


E értékek
1
0
E
N = 200
10^4
10^2
1
10^{-2}
10^{-4}
κ_c/κ_u
10^{-2}
1
10^2
10^4
κ_d/κ_u

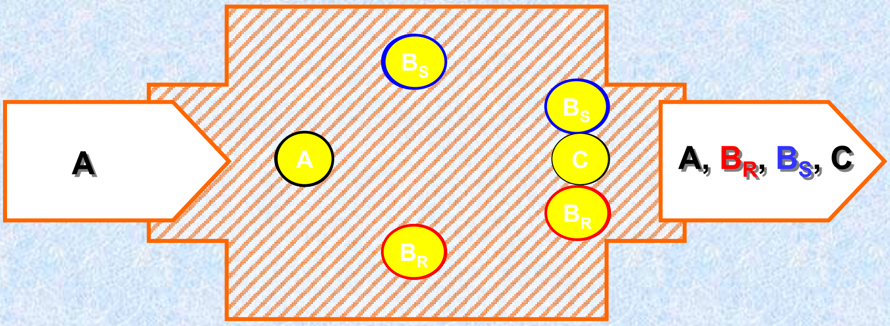
Átfolyásos rendszer (CSTR)

A-t betápláljuk, A, B, C keverékét elvezetjük

$$E \le ee \le 1$$

Állandó részecskeszám

Átfolyási reakció: B_R, B_S vagy C cseréje A-ra (κ_f)



Átfolyásos rendszer – *stacionárius állapot*

az egyes állapotok valószínűsége független az időtől,
a *stacionárius állapot* független a kezdeti feltételektől

Algebrai egyenletrendszer: *nn* lineáris egyenlet

$$0 = -\{2a\kappa_u + ar\kappa_c + as\kappa_c + rs\kappa_d + (N-a)\kappa_f\}P(a,r,s) +$$
$$+\{(a+1)\kappa_u + (a+1)(r-1)\kappa_c\}P(a+1,r-1,s) +$$
$$+\{(a+1)\kappa_u + (a+1)(s-1)\kappa_c\}P(a,r,s-1) +$$
$$+\{(r+1)(s-1)\kappa_d\}P(a,r+1,s+1,t) +$$
$$+(r+1)\kappa_f P(a-1,r+1,s) +$$
$$+(s+1)\kappa_f P(a-1,r,s+1) +$$
$$+(N-a-r-a+1)\kappa_f P(a-1,r,s)$$

$$0 = \underline{\underline{M}} \times \underline{P}_\infty$$

Állapotok száma:

$$nn = \binom{N+3}{3} = \frac{(N+3)(N+2)(N+1)}{6}$$

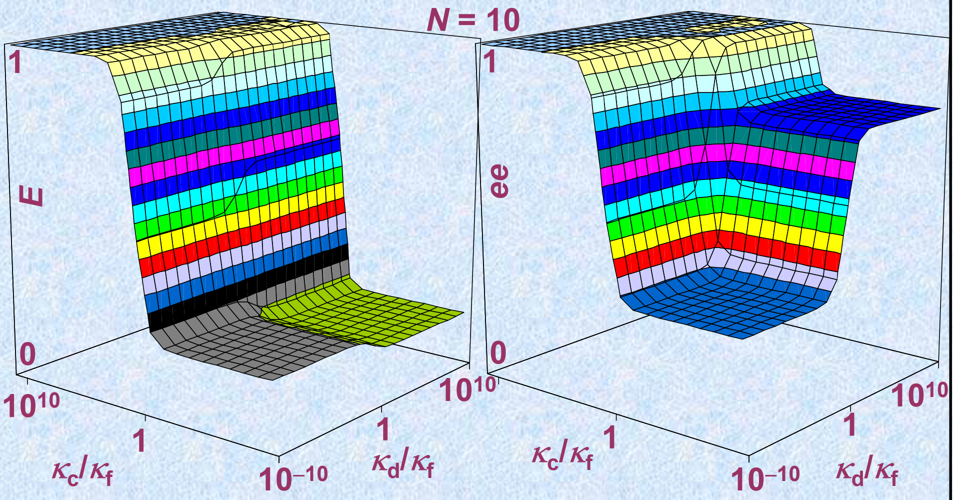
Rendezőfüggvény:

$$f(a,r,s) = \frac{a^3}{6} + \frac{aN(a+N)}{2} - a^2 + 2aN + \frac{11a}{6} +$$
$$+\frac{r^2}{2} + r(N-a) + \frac{3r}{2} + s + 1$$

E és *ee* értékek

$\kappa_u/\kappa_f = 1$

$N = 10$

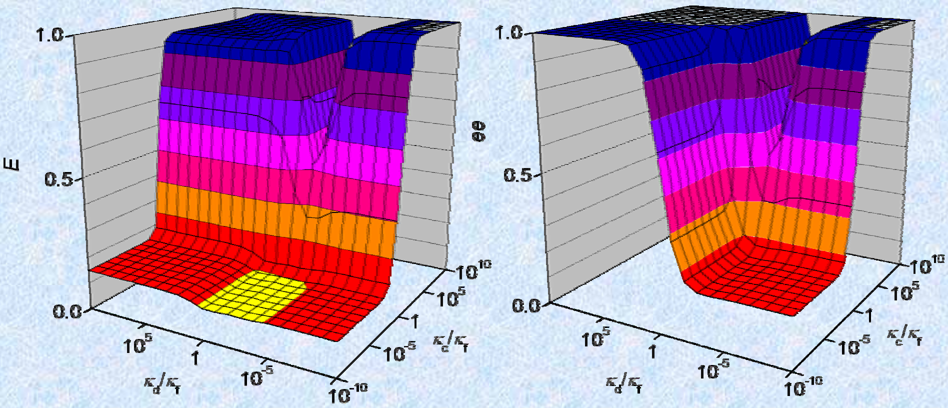


Lente, G.; Ditrói, T. *J. Phys. Chem. B*, 2009, *113*, 7237.

E és *ee* értékek

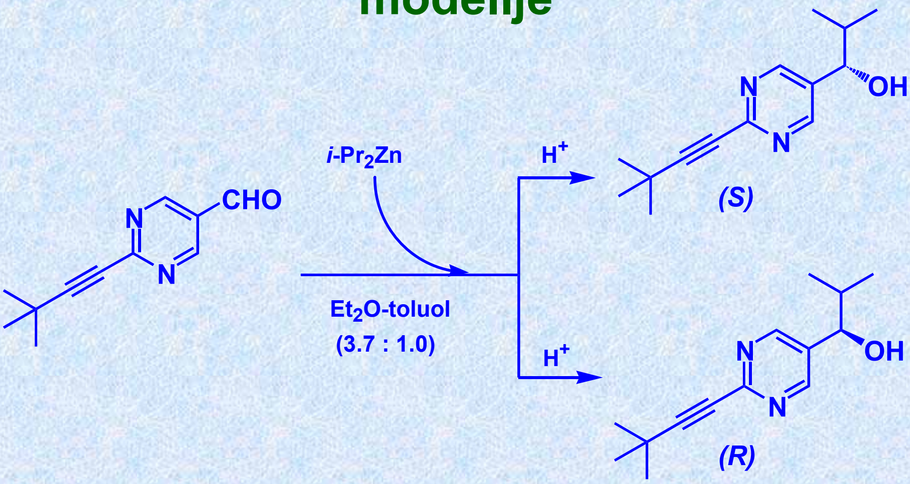
$\kappa_u/\kappa_f = 1$

$N = 100$



Lente, G. *Symmetry*, 2010, 2, 767.

A Soai-reakció sztochasztikus modellje



A Soai-reakció kinetikai modellje

	Reaction				Reaction	
1	c + z → czr	$k_1 \cdot c \cdot z$		9	dr2 + c → tr2	$k_3 \cdot dr2 \cdot c$
2	c + z → czs	$k_1 \cdot c \cdot z$		10	tr2 → dr2 + c	$k_{3b} \cdot tr2$
3	czr + czr → dr2	$2k_2 \cdot (czr)^2$		11	ds2 + c → ts2	$k_3 \cdot ds2 \cdot c$
4	dr2 → 2 czr	$k_{2b} \cdot dr2$		12	ts2 → ds2 + c	$k_{3b} \cdot ts2$
5	czs + czs → ds2	$2k_2 \cdot (czs)^2$		13	drs + c → trs	$k_3 \cdot drs \cdot c$
6	ds2 → 2 czs	$k_{2b} \cdot ds2$		14	trs → drs + c	$k_{3b} \cdot trs$
7	czr + czs → drs	$\alpha \cdot k_2 \cdot czs \cdot czr$		15	tr2 + z → dr2 + czr	$k_4 \cdot tr2 \cdot z$
8	drs → czr + czs	$k_{2b} \cdot drs$		16	ts2 + z → ds2 + czs	$k_4 \cdot ts2 \cdot z$
				17	trs + z → drs + czr	$k_4 \cdot trs \cdot z$
				18	trs + z → drs + czs	$k_4 \cdot trs \cdot z$

T. Buhse *Tetrahedron Asymm.* 2003, *14*, 1055.

Az állapotok száma

Anyagmegmaradás:

$$c_0 = c + czr + czs + 2\cdot(dr2 + ds2 + drs) + 3\cdot(tr2 + ts2 + trs)$$

$$z_0 = z + czr + czs + 2\cdot(dr2 + ds2 + drs + tr2 + ts2 + trs)$$

Az állapotok száma:

Ezen egyenletrendszer megoldásainak száma (minden ismeretlen nemnegatív egész szám)

Az állapotok száma

$n = c_0 = z_0$	M		$n = c_0 = z_0$	M
8	555		100	2269076292
9	915		200	~ $4{,}17\times10^{11}$
10	1461		1000	~ $1{,}23\times10^{17}$

Ha n osztható 6-tal:

$$M(n) = \frac{1}{216\cdot 8!}n^8 + \frac{1}{3\cdot 8!}n^7 + \frac{1085}{108\cdot 8!}n^6 + \frac{329}{2\cdot 8!}n^5 + \frac{42868}{27\cdot 8!}n^4 + \frac{27454}{3\cdot 8!}n^3 + \frac{91220}{3\cdot 8!}n^2 + \frac{53328}{8!}n + 1$$

Az állapotok száma

$n = c_0 = z_0$	M		$n = c_0 = z_0$	M
0	1		11	2268
1	3		12	3439
2	9		13	5097
3	22		14	7413
4	48		15	10592
5	96		20	50967
6	182		25	188082
7	324		50	16388559
8	555		100	2269076292
9	915		200	~ $4{,}17\times10^{11}$
10	1461		1000	~ $1{,}23\times10^{17}$

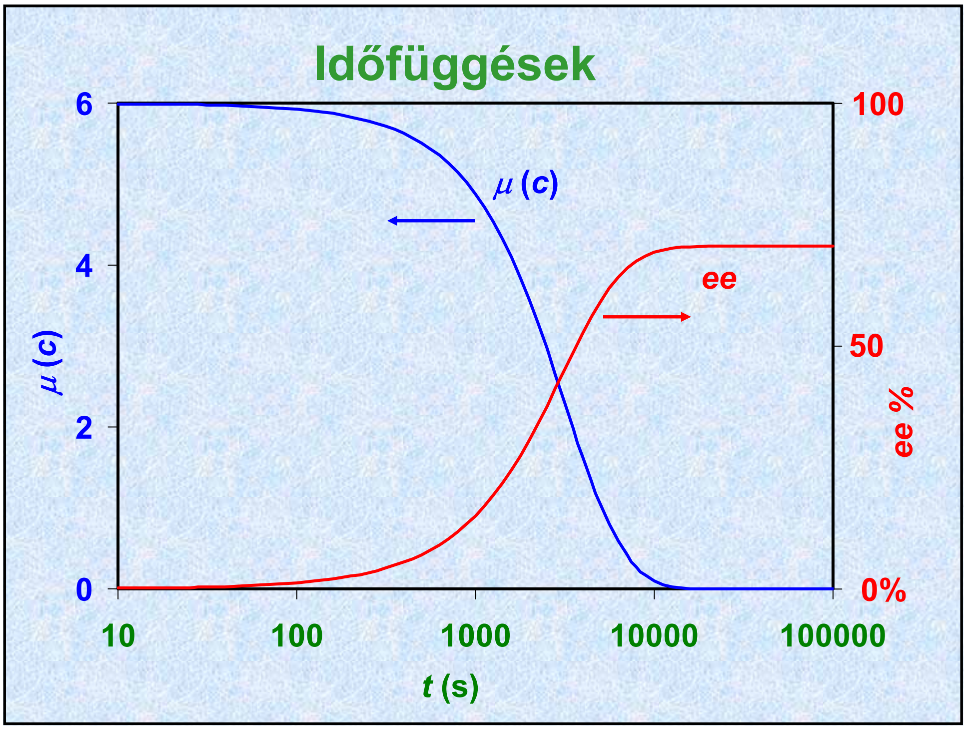
Rendezőfüggvény

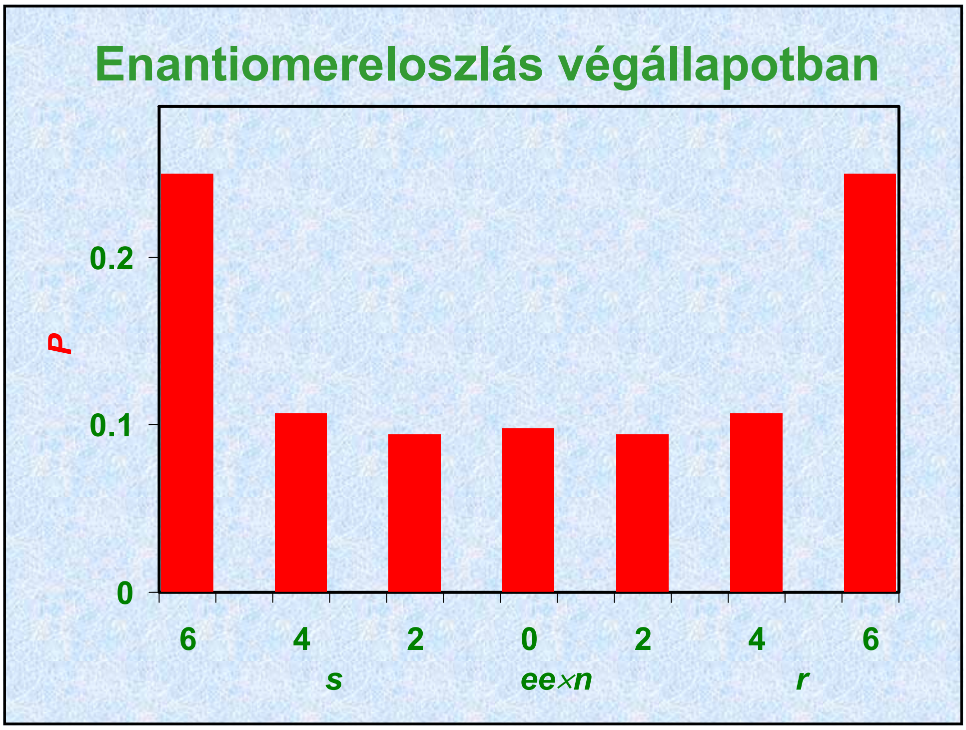
„Nyers erő”:

az értelmezési tartomány és az értékkészlet teljes felsorolása (182 állapot)

Mátrixformalizmus:

teljes megoldás mátrixexponenciális függvénnyel


Időfüggések
6
4
2
0
μ (c)
100
50
0%
ee %
ee
10
100
1000
10000
100000
t (s)


Enantiomereloszlás végállapotban
0.2
0.1
0
P
6
4
2
0
2
4
6
s
ee×n
r

Monte Carlo (MC) szimuláció

- Eloszlások közelítése nagy számú egyedi szimulációval
- A Természet nem old meg differenciálegyenleteket, hanem MC szimulációt végez

MC szimuláció a Soai-reakcióban

Nagyon lassúúúúúúúúúúúúúúúúúúúú............

Reaction	v =			Reaction	v =	
c + z → czr	$k_1 \cdot c \cdot z$	1		dr2 + c → tr2	$k_3 \cdot dr2 \cdot c$	271
c + z → czs	$k_1 \cdot c \cdot z$	1		tr2 → dr2 + c	$k_{3b} \cdot tr2$	178
czr + czr → dr2	$2k_2 \cdot (czr)^2$	123570		ds2 + c → ts2	$k_3 \cdot ds2 \cdot c$	1
dr2 → 2 czr	$k_{2b} \cdot dr2$	123551		ts2 → ds2 + c	$k_{3b} \cdot ts2$	1
czs + czs → ds2	$2k_2 \cdot (czs)^2$	62		drs + c → trs	$k_3 \cdot drs \cdot c$	7
ds2 → 2 czs	$k_{2b} \cdot ds2$	62		trs → drs + c	$k_{3b} \cdot trs$	2
czr + czs → drs	$\alpha \cdot k_2 \cdot czs \cdot czr$	1031		tr2 + z → dr2 + czr	$k_4 \cdot tr2 \cdot z$	92
drs → czr + czs	$k_{2b} \cdot drs$	1031		ts2 + z → ds2 + czs	$k_4 \cdot ts2 \cdot z$	0
				trs + z → drs + czr	$k_4 \cdot trs \cdot z$	1
				trs + z → drs + czs	$k_4 \cdot trs \cdot z$	4

$c_0 = 6 \times 10^{19}$; $z_0 = 1{,}2 \times 10^{20}$; $V = 0{,}9$ cm^3

Gyorsító trükk

Új változó:

mr = czr + 2dr2 (hasonlóan ms = czs + 2ds2)

$$dr2 = \frac{\sum_{i=1}^{[m_r/2]} i \left(\frac{k_2 N_A V}{k_{2b}}\right)^i \frac{m_r!}{i!(m_r-2i)!2^i}}{1 + \sum_{i=1}^{[m_r/2]} \left(\frac{k_2 N_A V}{k_{2b}}\right)^i \frac{m_r!}{i!(m_r-2i)!2^i}}$$

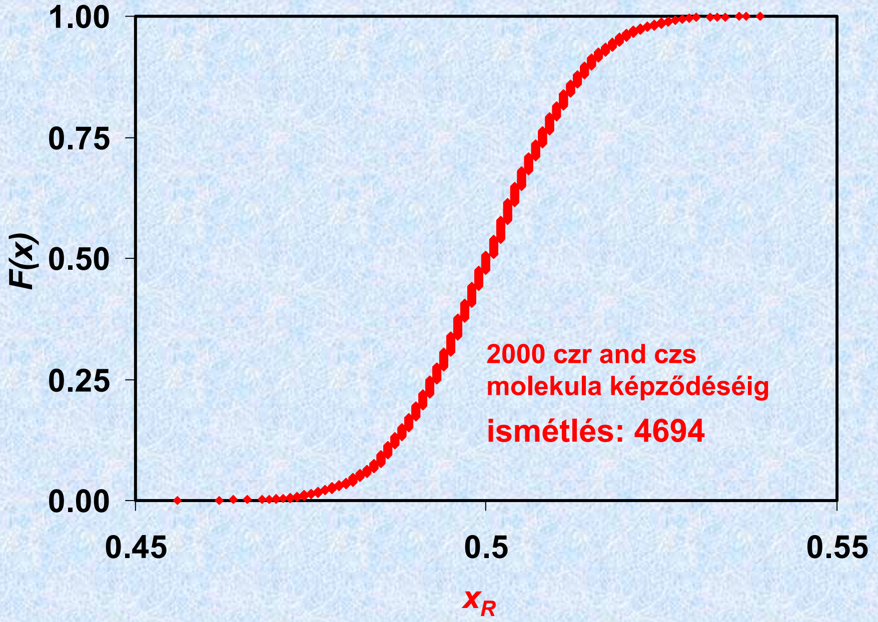
czr = mr – 2dr2

Stochastic Approach to Chemical Kinetics
Author(s): Donald A. McQuarrie
Source: *Journal of Applied Probability*, Vol. 4, No. 3 (Dec., 1967), pp. 413-478
Published by: Applied Probability Trust
Stable URL: http://www.jstor.org/stable/3212214

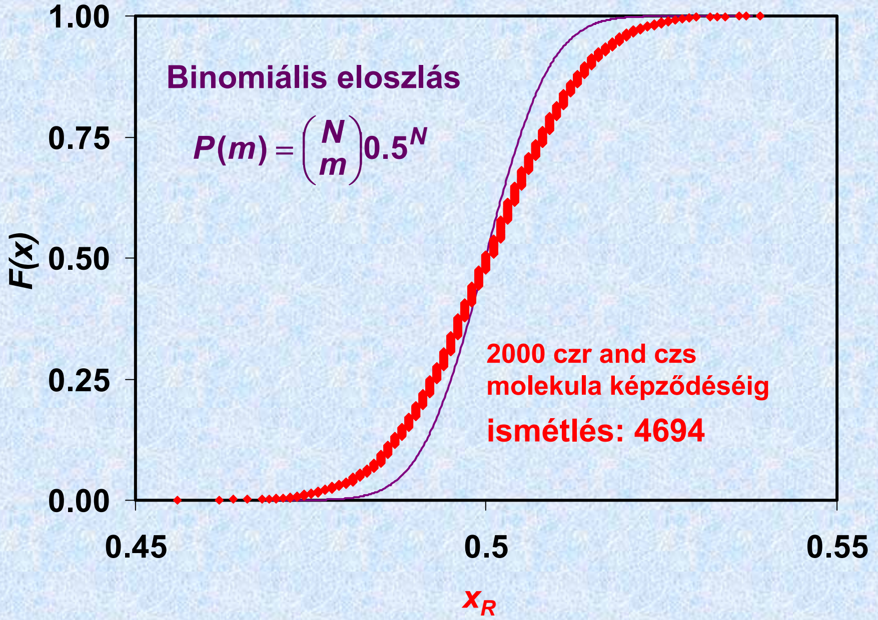
$$K(\alpha - 2\gamma)\frac{{}_1F_1(-\frac{1}{2}\alpha - \gamma + 1; \frac{3}{2}; -\frac{1}{2}K)}{{}_1F_1(-\frac{1}{2}\alpha - \gamma; \frac{1}{2}; -\frac{1}{2}K)}, \quad \alpha \text{ even}$$

$$\tfrac{1}{2}K(\alpha - 1 + 2\gamma)\frac{{}_1F_1[-\frac{1}{2}(\alpha - 1) - \gamma + 1; \frac{5}{2}; -\frac{1}{2}K]}{{}_1F_1[-\frac{1}{2}(\alpha - 1) - \gamma; \frac{3}{2}; -\frac{1}{2}K]}, \quad \alpha \text{ odd}$$

A Soai-reakció MC szimulációja



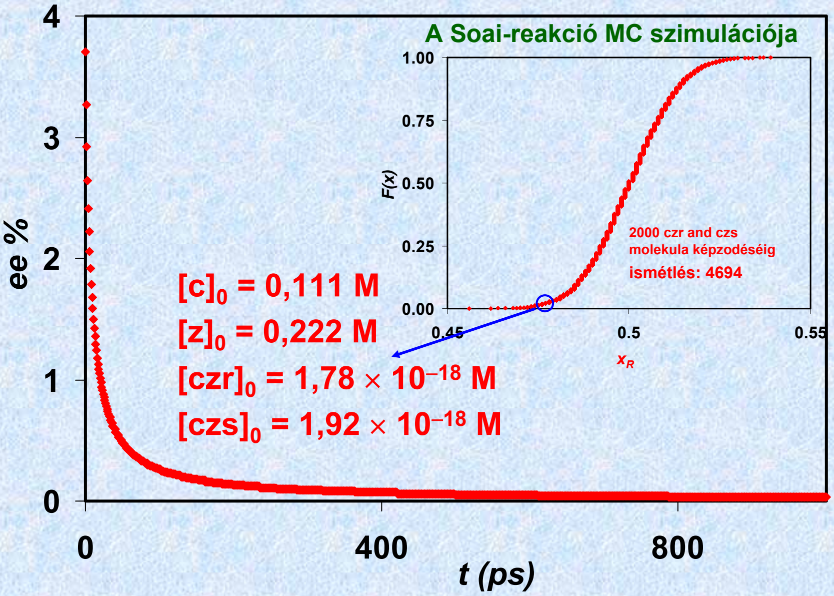
A Soai-reakció MC szimulációja



Determinisztikus folytatás

- Determinisztikus differenciálegyenlet-rendszer
- A kezdeti érték az MC szimuláció végeredménye
- Nem jósol kimutatható enantiomerfelesleget makroszkopikus nagyságú anyagmennyiségekre!!!
- Ez a következtetés nem változik, ha bármely paraméter 2-3 nagyságrenddel változik

Determinisztikus folytatás



Összefoglalás

- Sztochasztikus kinetika: ritka, de esetenként feltétlenül szükséges a kémiában
- A biológiai kiralitás kialakulásában a királis autoktalízis szerepe
- Kísérletileg mért és elméletileg levezetett eloszlások összehasonlításának jelentősége