

Rétegződés, domének és atomi mozgás ultravékony rétegszerkezetekben

Sajti Szilárd

*NAO, Funkcionális Nanostruktúrák Kutatócsoport
MTA Wigner FK*

Simonyi-nap

2014. október 16.

Vékonyréteg rendszerek

Félvezető eszközök

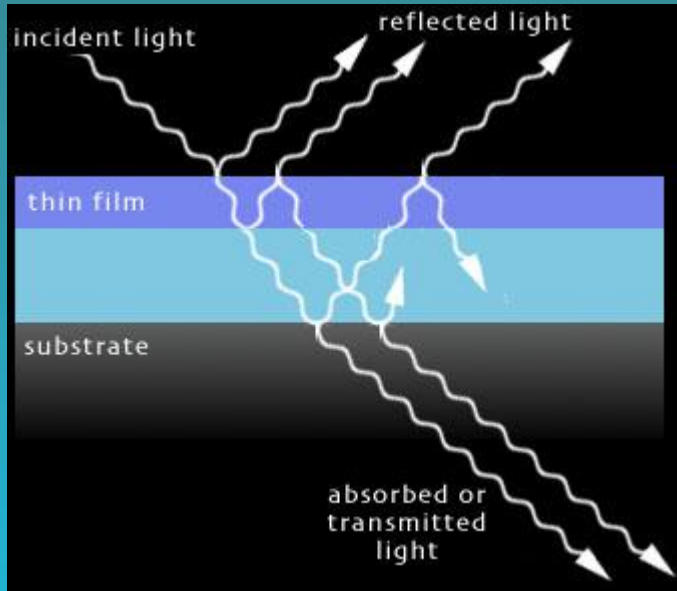
Merevlemezek

Napelemek

Optikai elemek



Reflektometria



Látható fény: ellipszometria

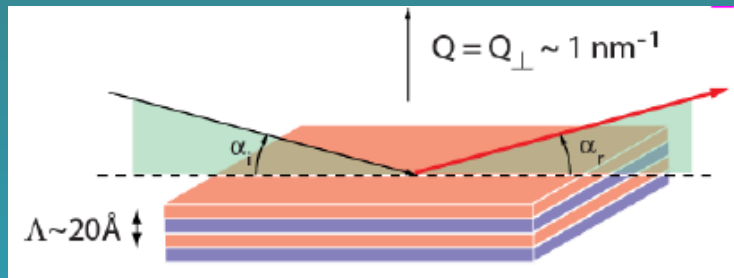
Röntgen, neutron:

- rövidebb hullámhossz → vékonyabb rétegek
- fémes eltemetett rétegek is
- törésmutató kicsi, ezért csak sűrű beesésben mérhető,

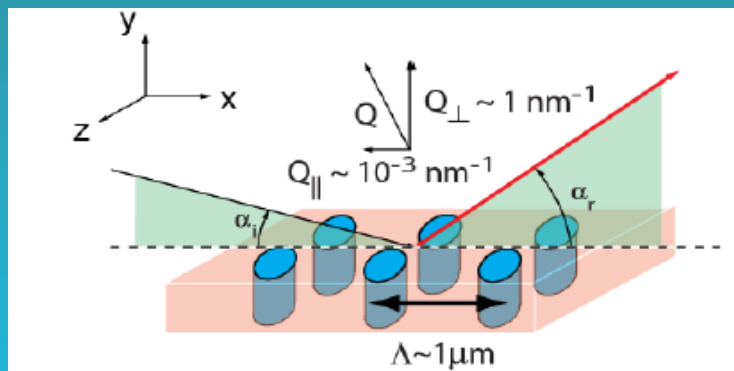
Neutron, és magrezonáns röntgen:

- mágneses rétegek is vizsgálhatóak,
- izotópzérkenység

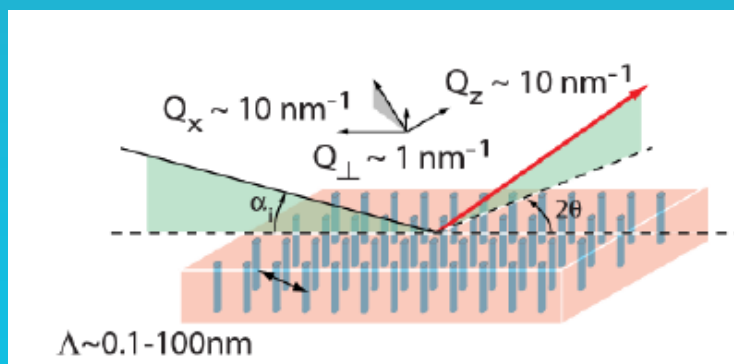
Reflektometria: válfajok



Spekuláris reflektometria:
nukleáris ill. mágneses mélységprofil

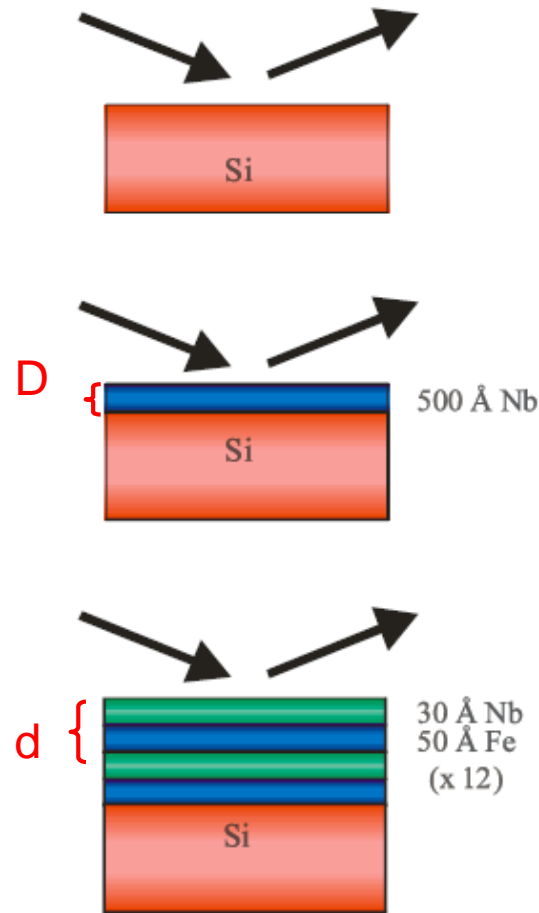
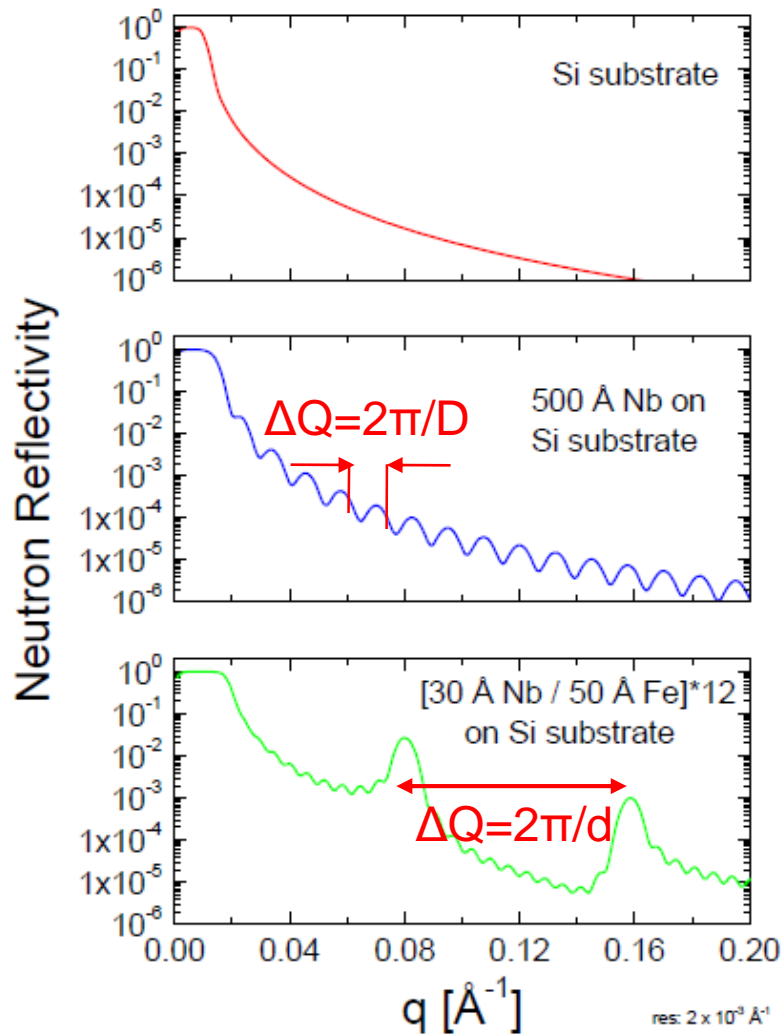


Off-spekuláris szórás:
Laterális inhomogenitások a beesési
síkbán: felületi érdesség, mágneses
és szerkezeti tulajdonságok



Súrlódó beeséses kisszögű szórás:
Laterális inhomogenitások a beesési
síkra merőlegesen, nagyobb
felbontás.

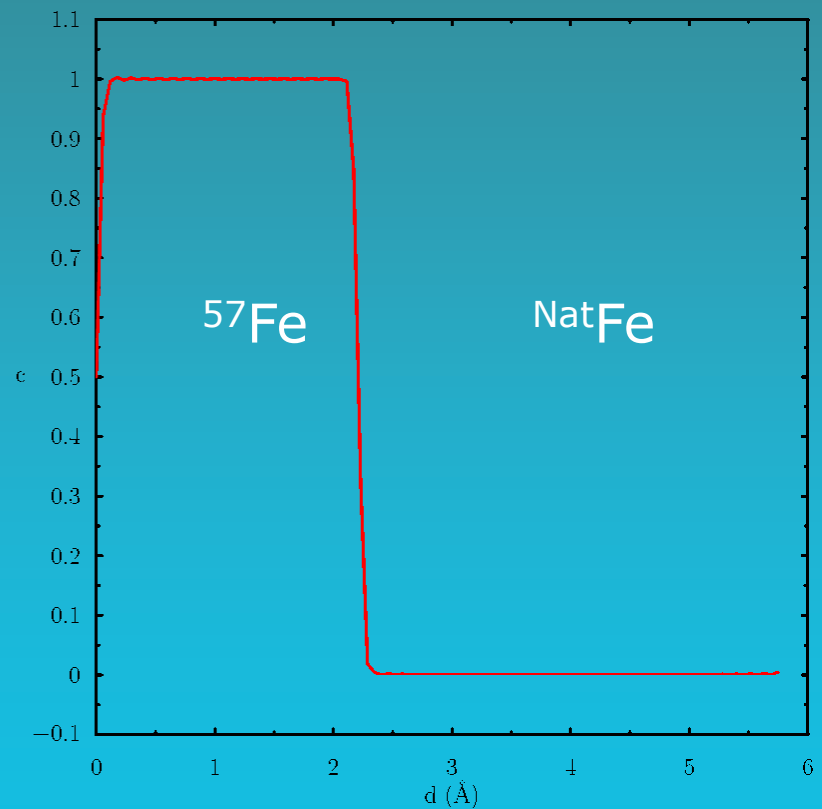
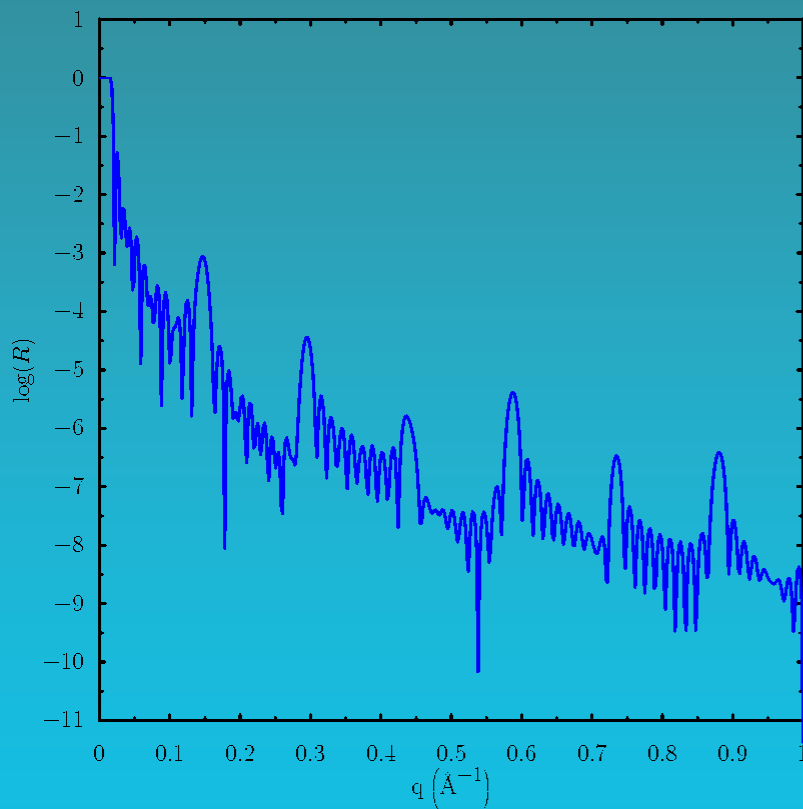
Spekuláris reflektometria



Anyagtudományi alkalmazások

- ❖ Diffúzió – Fe-diffúzió Fe/Pd izotópperiodikus multirétegekben
- ❖ Rétegződés – Szupertükör
- ❖ Mágneses doménkorrelációk

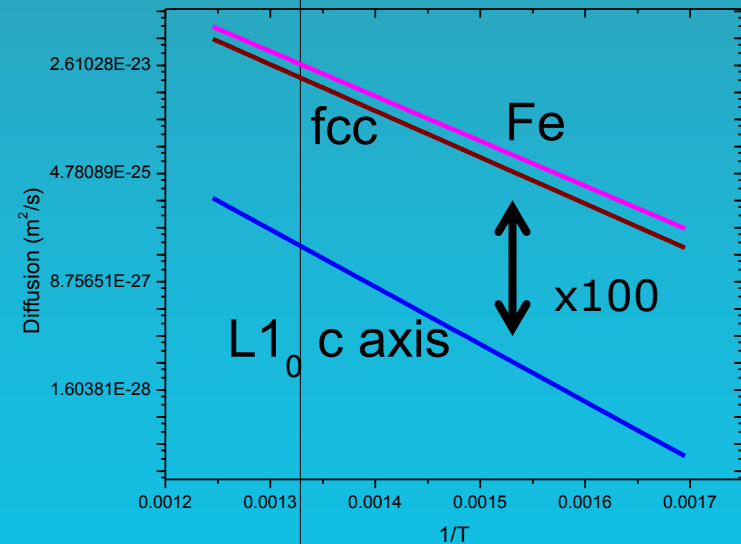
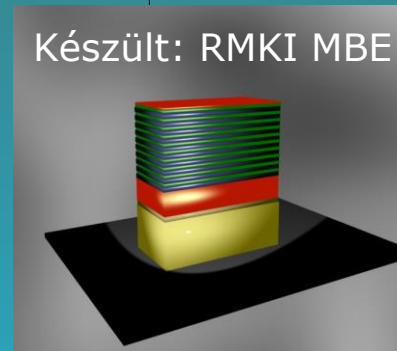
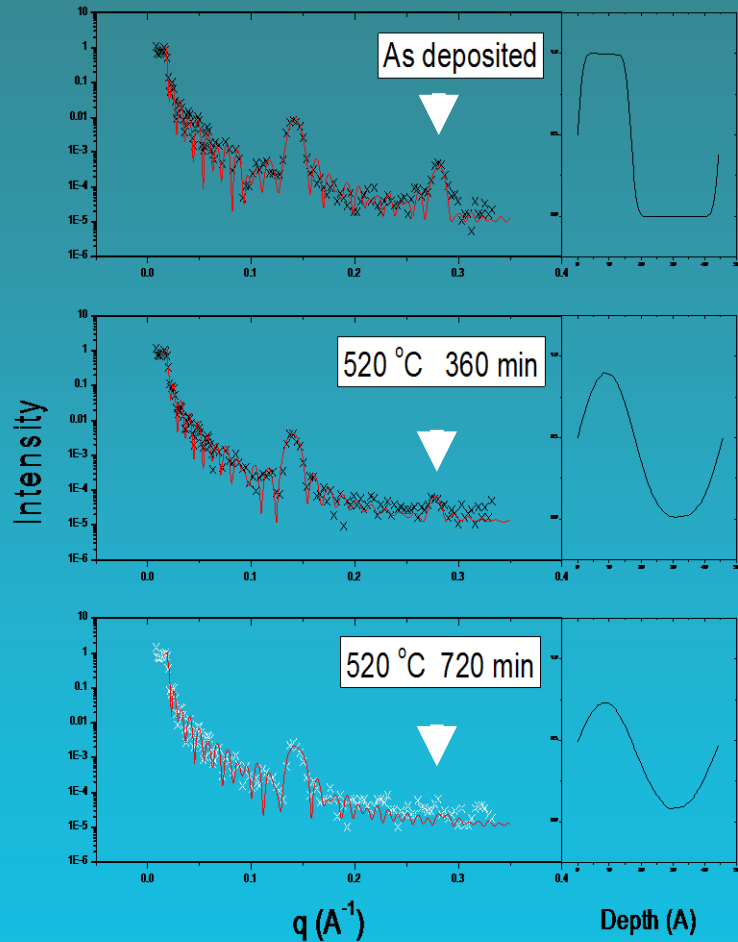
Fe-diffúzió FePd izotópperiodikus multirétegben



FitSuite szimulációk

Fe-diffúzió $^{57}\text{FePd}/\text{FePd}$ izotóp multirétegben

$\text{MgO}/\text{Cr}/\text{Pd}[\text{natFe}_{0,47}\text{Pd}_{0,53}/^{57}\text{Fe}_{0,47}\text{Pd}_{0,53}]_{10}/\text{Pd}$



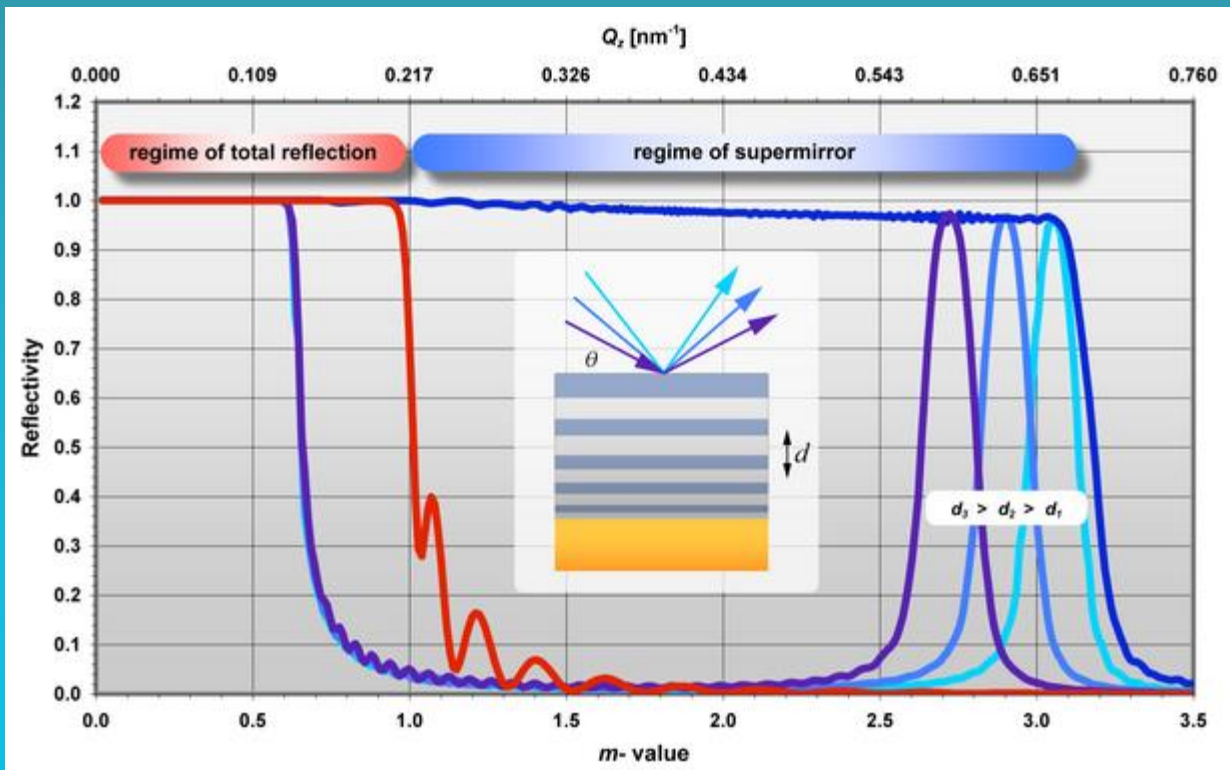
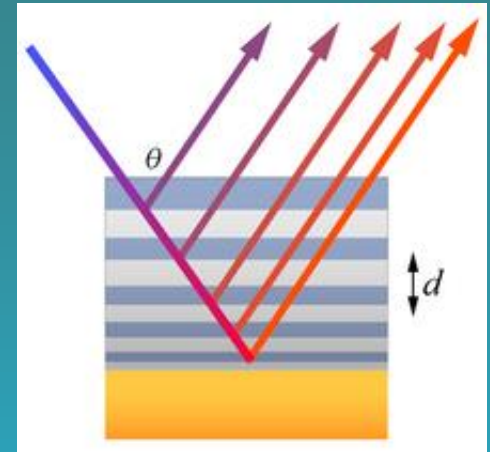
Bragg-csúcs intenzitás \Rightarrow ^{57}Fe -profil

\Rightarrow Diffúziós együttható

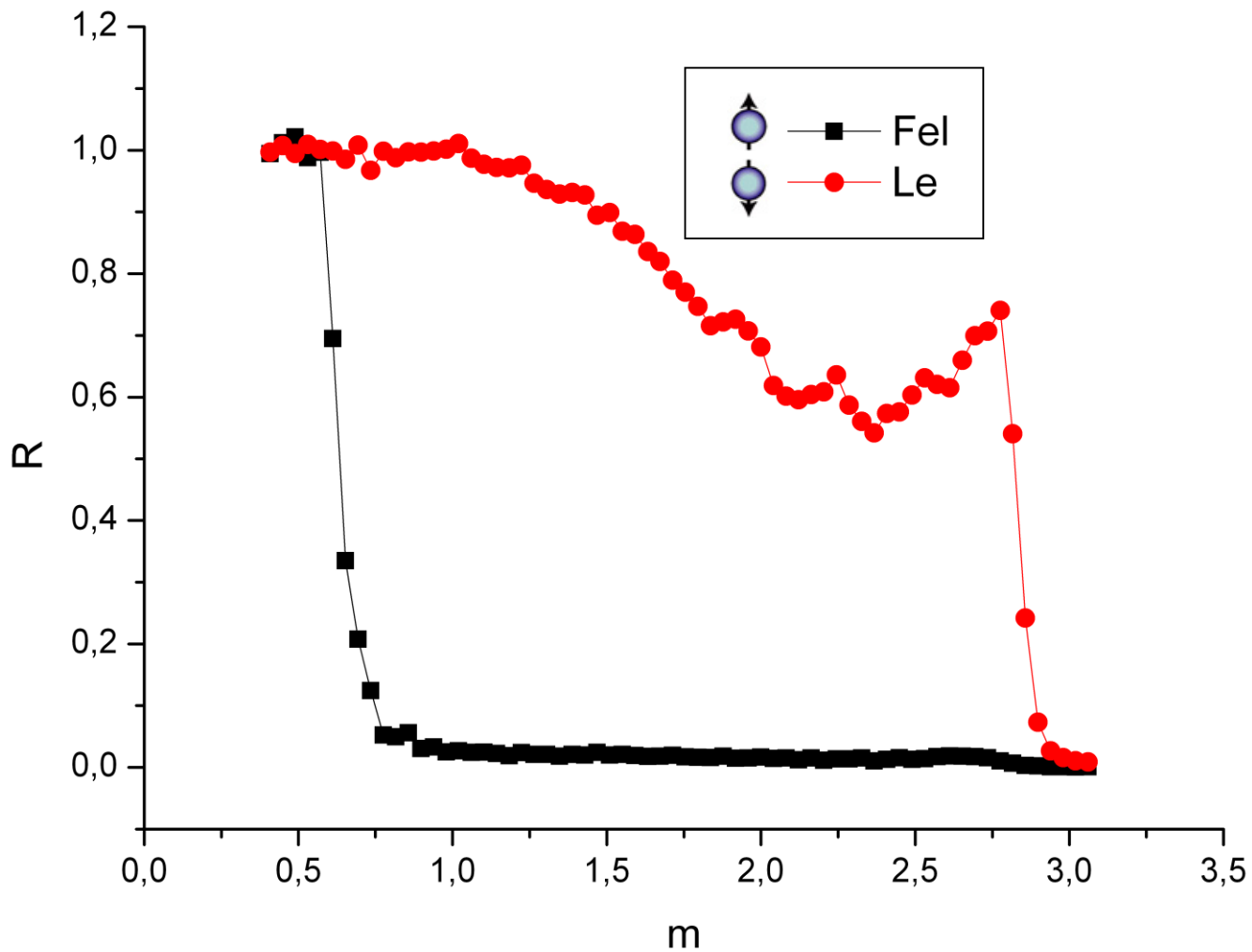
Szupertükör

Neutron szupertükrök: folytonosan változó rétegvastagság – csúcsok helyett plató

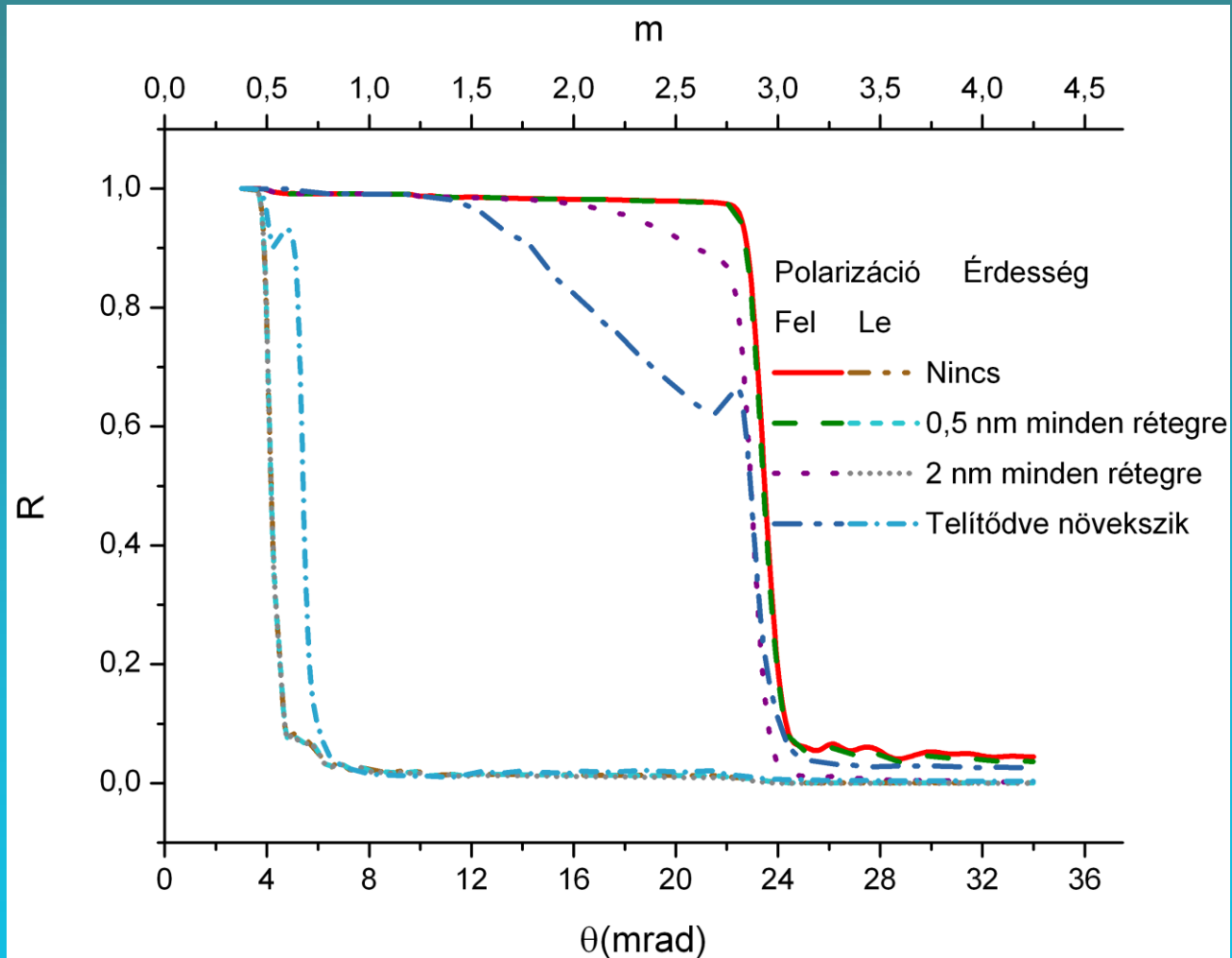
Alkalmazás: neutronvezető optikák, nyalábhajlító, polarizátorok, sávszűrők



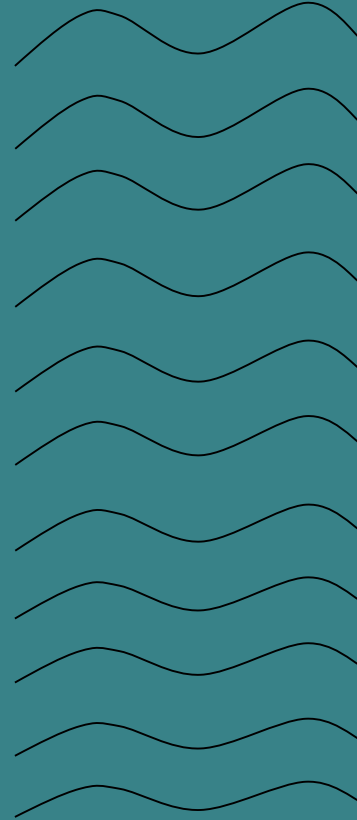
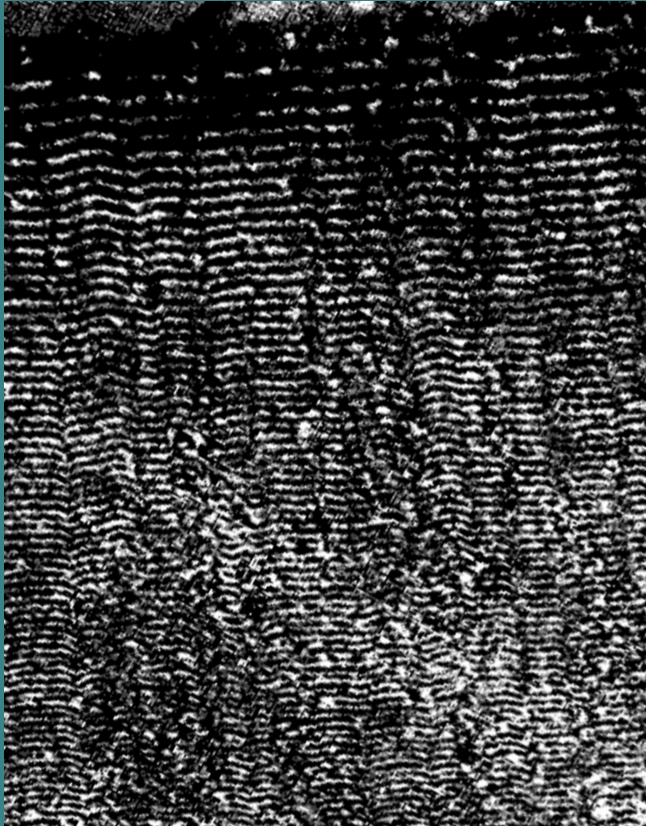
Rétegnövekedés polarizáló neutron szupertükör porlasztásakor (Mirrotron Kft)



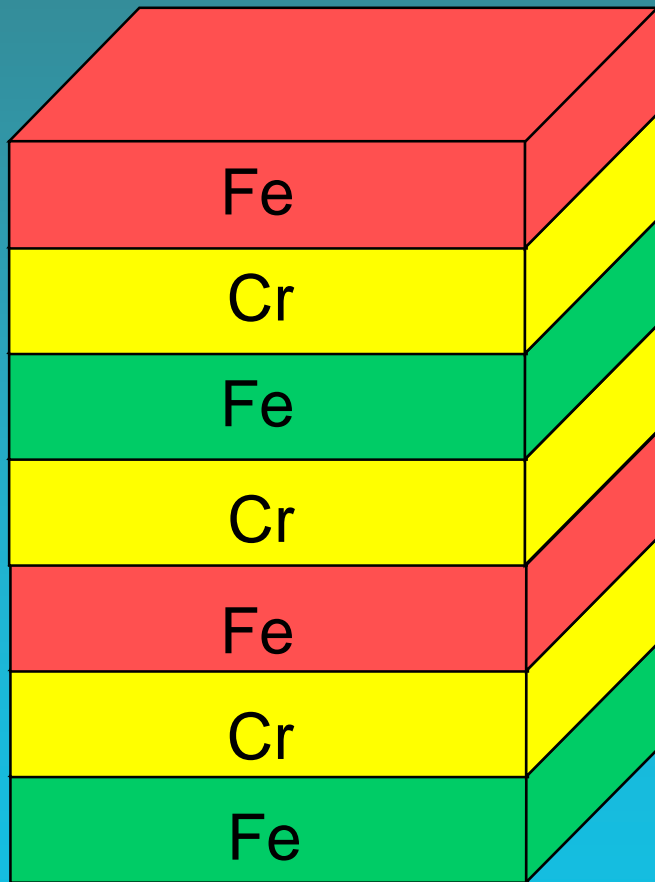
Rétegnövekedés modellezése



Szupertükör TEM



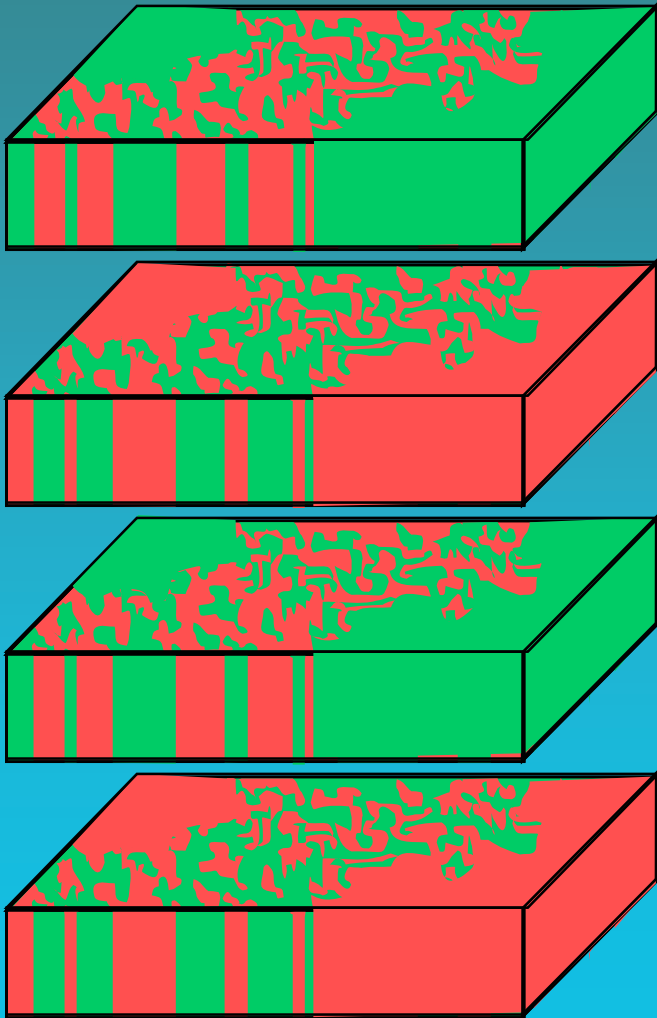
Mágneses doménszerkezet AF-csatolt multirétegekben



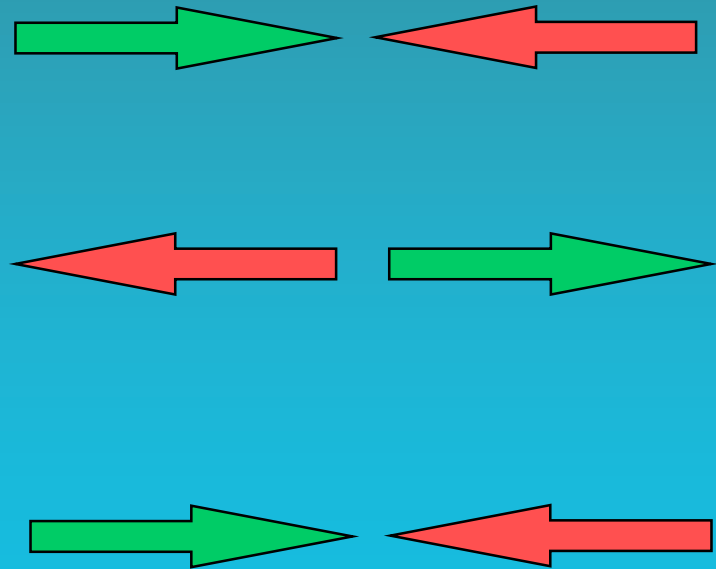
Fe-rétegek mágnesezettsége:



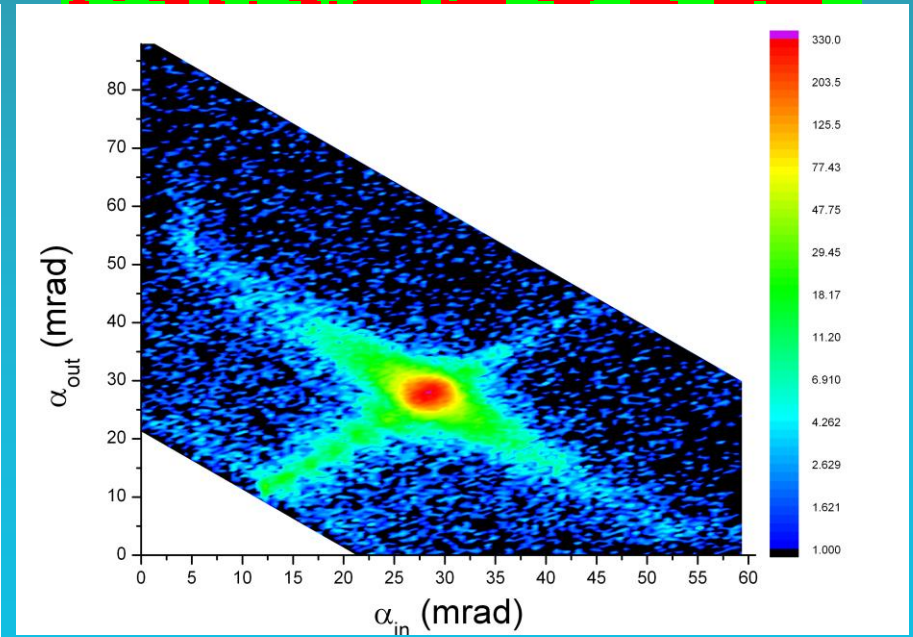
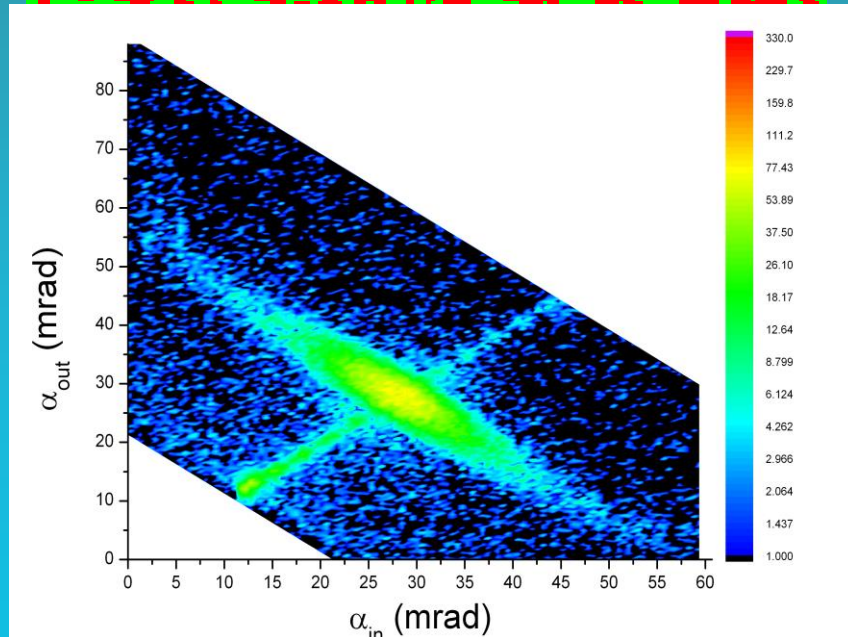
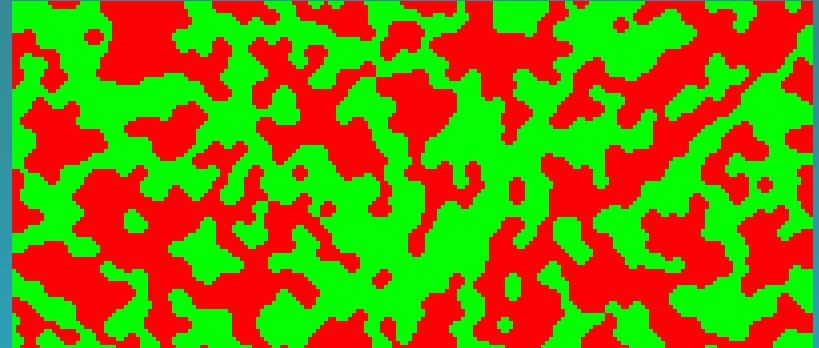
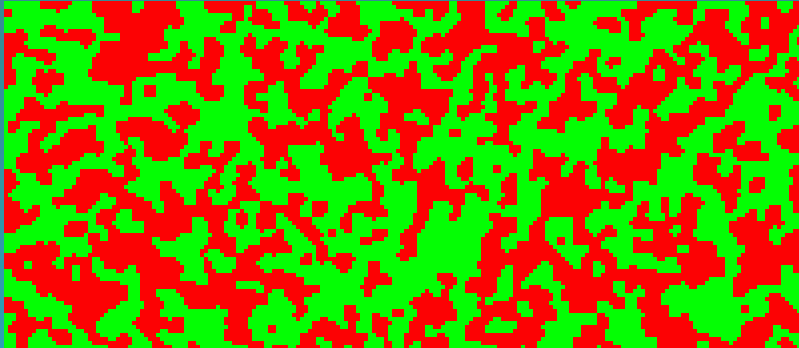
Mágneses doménszerkezet AF-csatolt multirétegekben



Fe-domének mágnesezettsége:



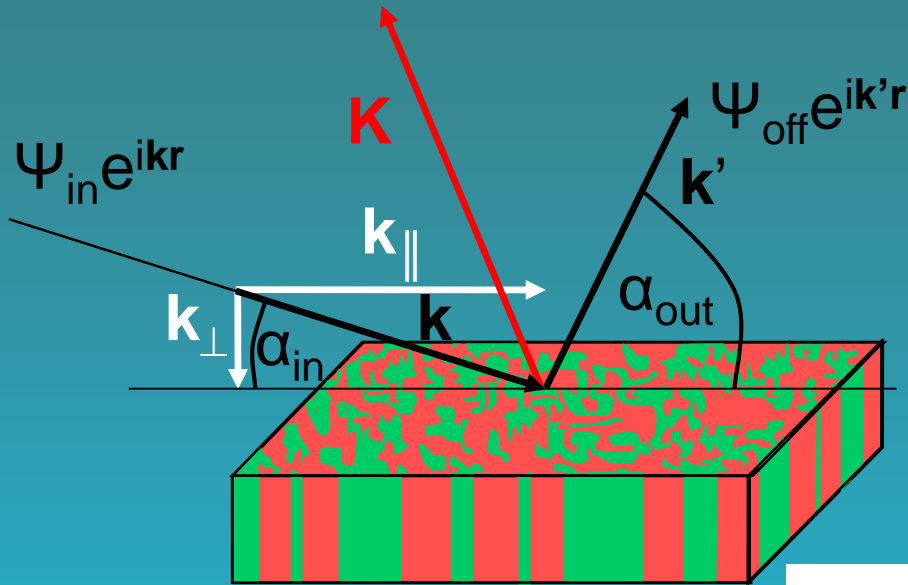
Doménmintázatok és off-spekuláris reflektogramok külső mágneses térben



M. Major et al. FRM-II NREX+

MgO/[Fe/Cr]₂₀

Off-spekuláris reflektometria



Off-spekuláris intenzitás:

$$I_{\text{off}}(\mathbf{k}, \mathbf{k}') \propto \sum_{l' \mu \mu'} \tilde{C}_{l' \mu \mu'}^{\mu \mu'}(\mathbf{K}_{\parallel}) \Phi_{l' \mu \mu'}^{\mu \mu'}(k_{\perp}, k'_{\perp}, \dots)$$

A domén-domén korrelációs függvény Fourier-transzformáltja:

$$\tilde{C}_{l' \mu \mu'}^{\mu \mu'}(\mathbf{K}_{\parallel}) = \frac{1}{2\pi} \int d\mathbf{R}_{\parallel} C_{l' \mu \mu'}^{\mu \mu'}(\mathbf{R}_{\parallel}) e^{-i\mathbf{K}_{\parallel} \mathbf{R}_{\parallel}}$$

Mi a korrelációs függvény?

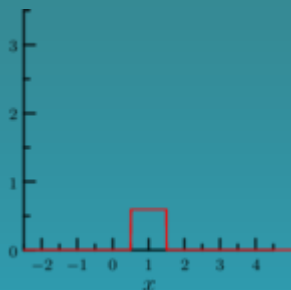
Mi a korreláció?

Korreláció = összefüggés,
viszony két vagy több dolog között

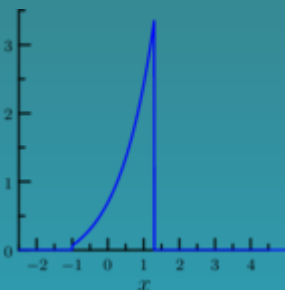
Mi a korreláció?

Korreláció, mint matematikai művelet: $f(x) \star g(x) \Rightarrow h(x)$

$f(x)$

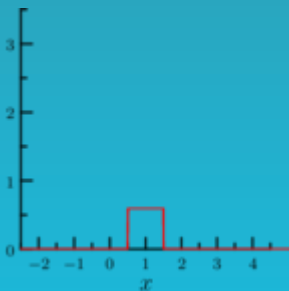


$g(x)$

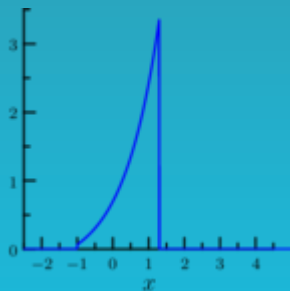


Miként számoljuk h -t az y helyen:

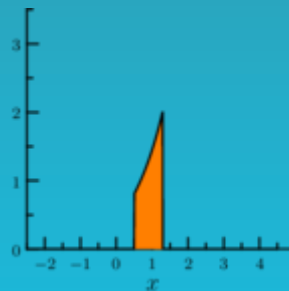
$f(x)$



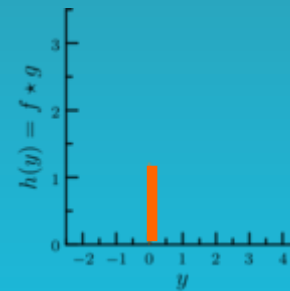
$g(x+y)$



$f(x) g(x+y)$



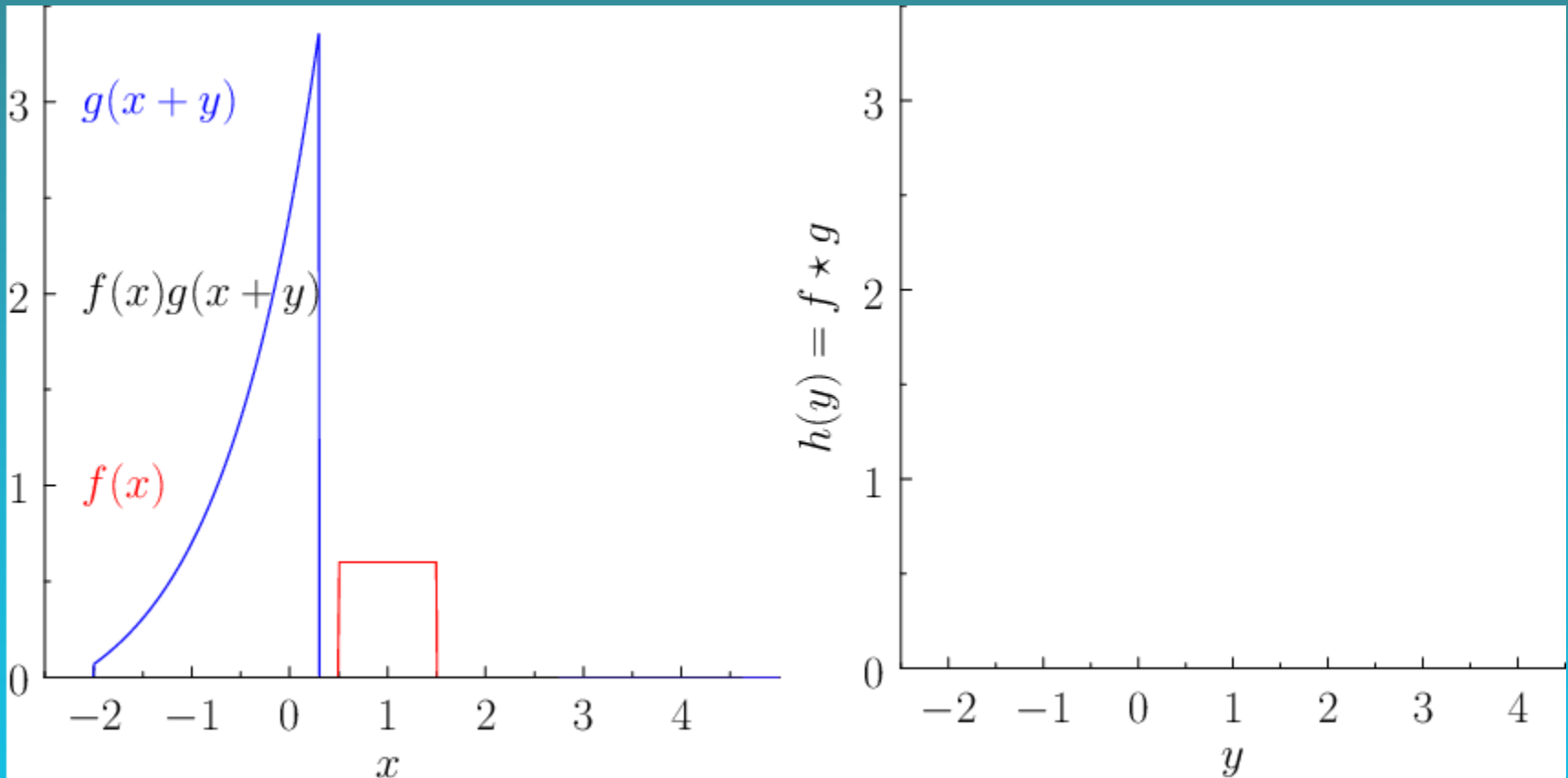
$\int dx f(x) g(x+y)$



Mi a korrelációs függvény?

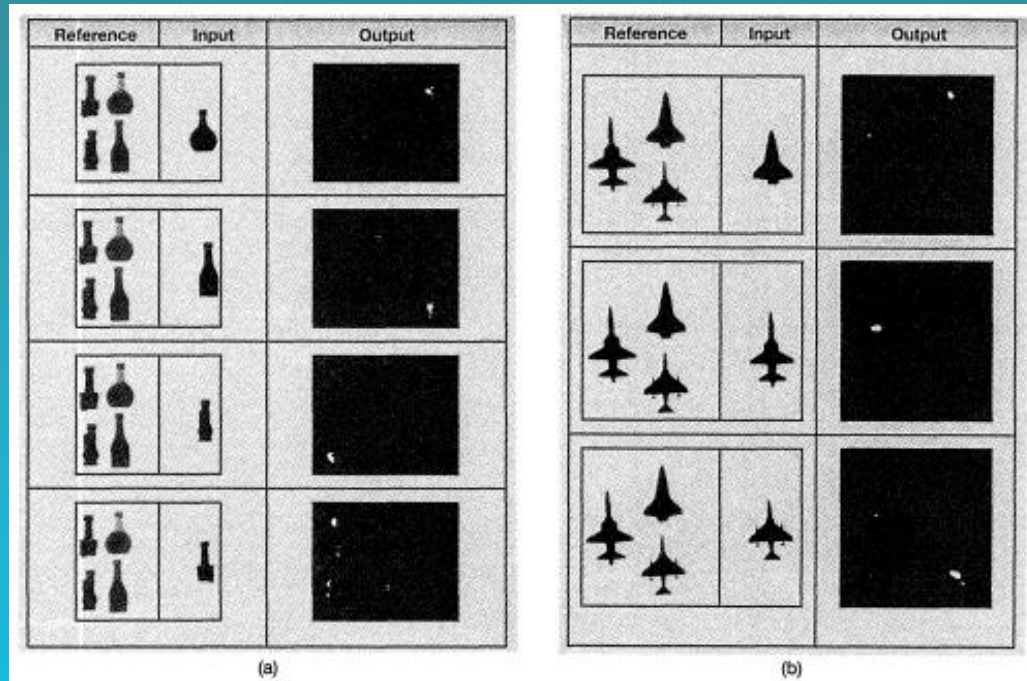
Korreláció, mint matematikai művelet eredményét nevezzük korrelációs függvénynek

$$f(x) \star g(x) \Rightarrow h(x)$$



Mi a korrelációs függvény?

$$\begin{matrix} \text{A} & \text{B} \\ \star & \\ \text{A} & \\ = & \end{matrix} \begin{matrix} \text{A} & \text{B} \\ \star & \\ \text{A} & \\ = & \end{matrix}$$

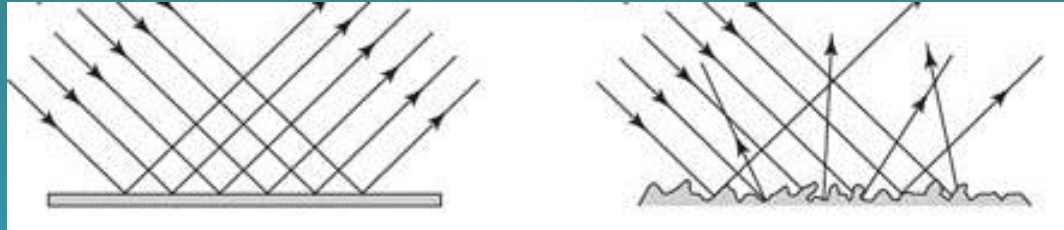


A korreláció „összeveti” az összekorreláltatott függvényeket

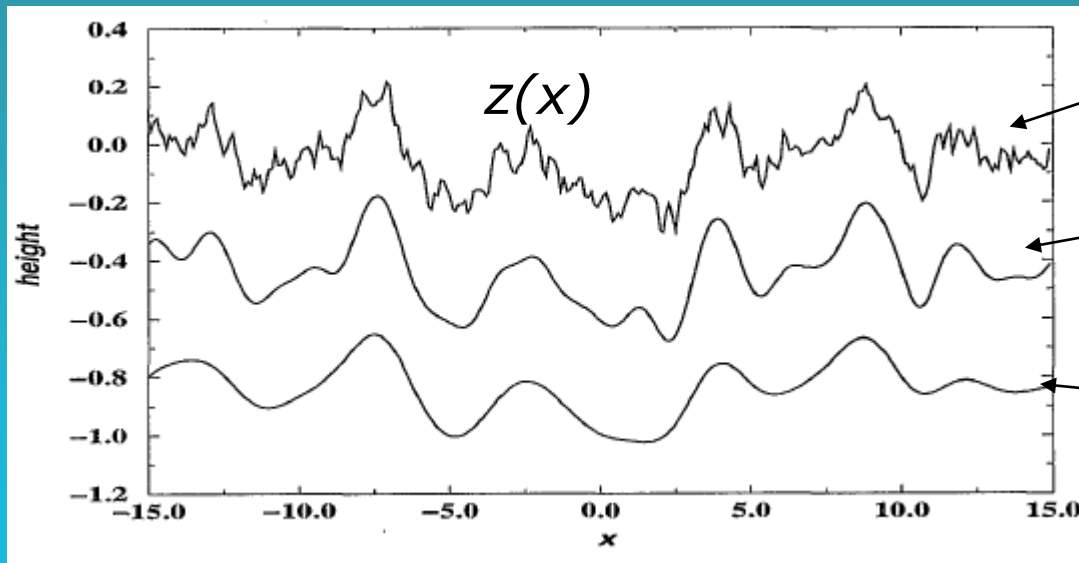
Korreláció és off-spekuláris szórás

spekuláris

off-spekuláris



Magasság-magasság (auto-)korrelációs függvény: $C_{zz}(R) = z(x) \star z(x)$



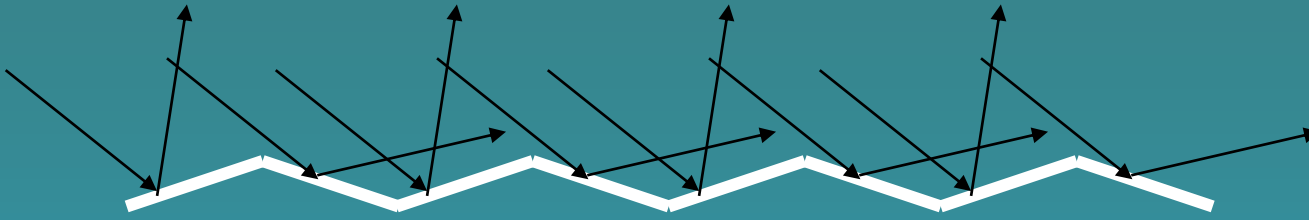
$$C_{zz}(R) = \frac{\xi^4}{(\xi^2 + R^2)^2}$$

$$C_{zz}(R) = e^{-\left(\frac{R}{\xi}\right)^2}$$

$$C_{zz}(R) = e^{-\frac{R}{\xi}}$$

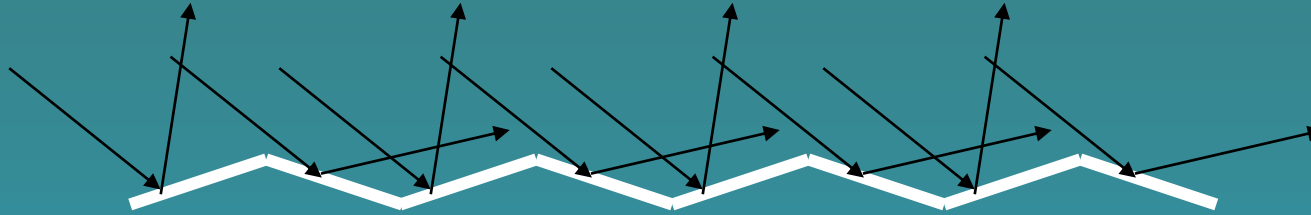
Korrelációs hossz (ξ): amely méret felett a magasság véletlenszerű

A korrelációs függvény, és paramétereinek meghatározása a cél



A visszavert hullámok terjedési irányeloszlását a határfelület meredekségeloszlása határozza meg.

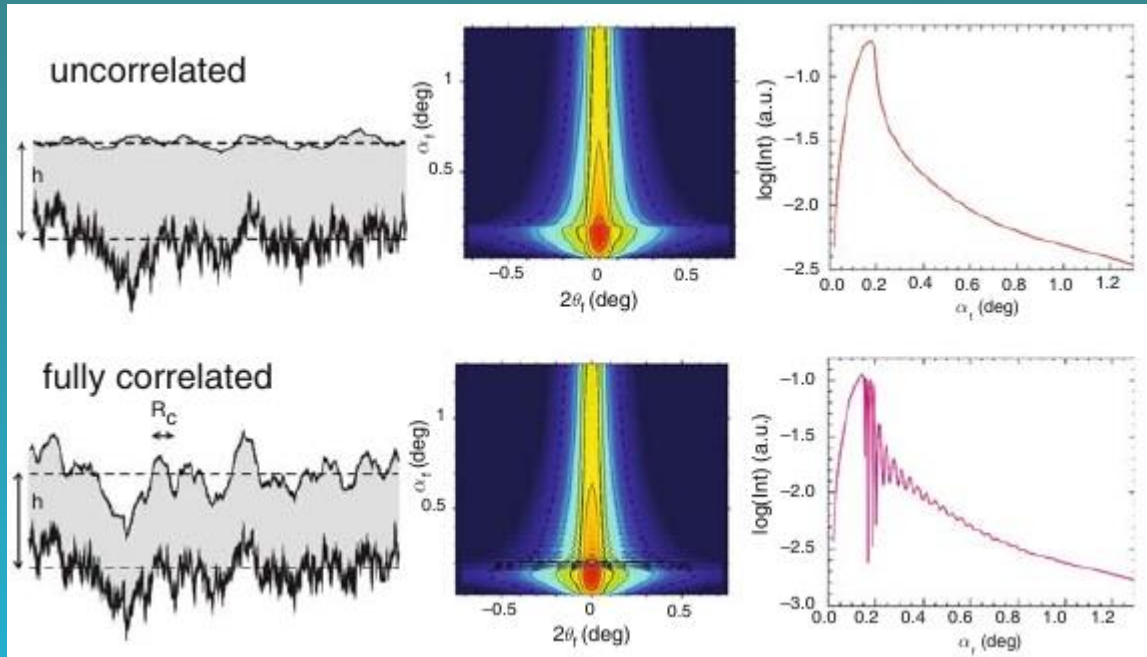
A korrelációs függvény, és paraméterei meghatározása a cél



A visszavert hullámok terjedési irányeloszlását a határfelület meredekségeloszlása határozza meg.

A határfelület meredekségeloszlását a magasság-magasság auto-korrelációs függvény Fourier-transzformáltja határozza meg, ezt mérjük az off-spekuláris szórással. (Wiener-Hincsin tétel)

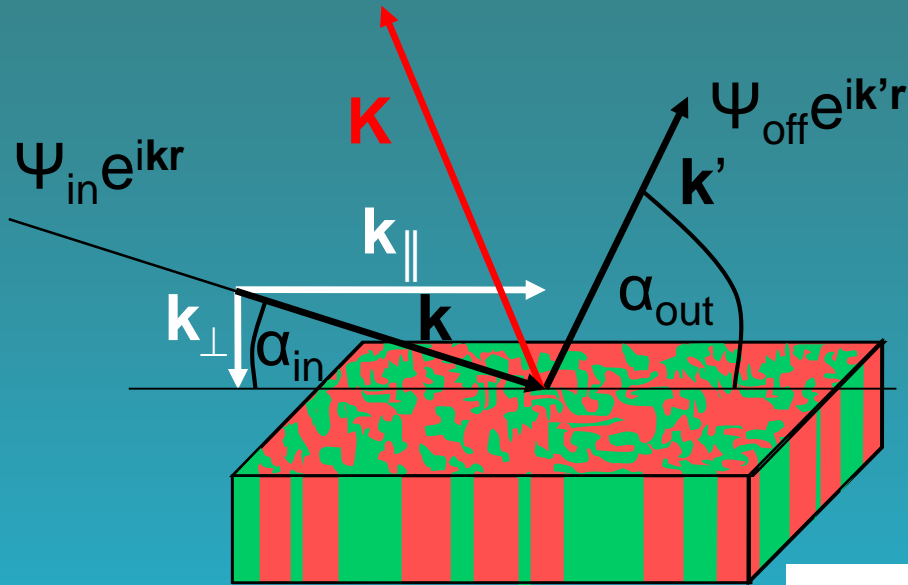
Különböző rétegek közötti (kereszt-)korrelációk



P. Müller-Buschbaum
Lect. Not. Phys. **776**,
61-89 (2009)

A különböző határfelületekről visszaverődött hullámok interferenciáját befolyásolja.

Off-spekuláris reflektometria leírása



Off-spekuláris intenzitás:

$$I_{\text{off}}(\mathbf{k}, \mathbf{k}') \propto \sum_{\mu\mu'} \tilde{C}_{\mu\mu'}^{\mu\mu'}(\mathbf{K}_{\parallel}) \Phi_{\mu\mu'}^{\mu\mu'}(k_{\perp}, k'_{\perp}, \dots)$$

A domén-domén korrelációs függvény Fourier-transzformáltja:

$$\tilde{C}_{\mu\mu'}^{\mu\mu'}(\mathbf{K}_{\parallel}) = \frac{1}{2\pi} \int d\mathbf{R}_{\parallel} C_{\mu\mu'}^{\mu\mu'}(\mathbf{R}_{\parallel}) e^{-i\mathbf{K}_{\parallel}\mathbf{R}_{\parallel}}$$

A domén típus a szórás hosszúság mátrixszal (mágnesezettség is benne van) jellemezhető

Domén-domén korrelációs függvények

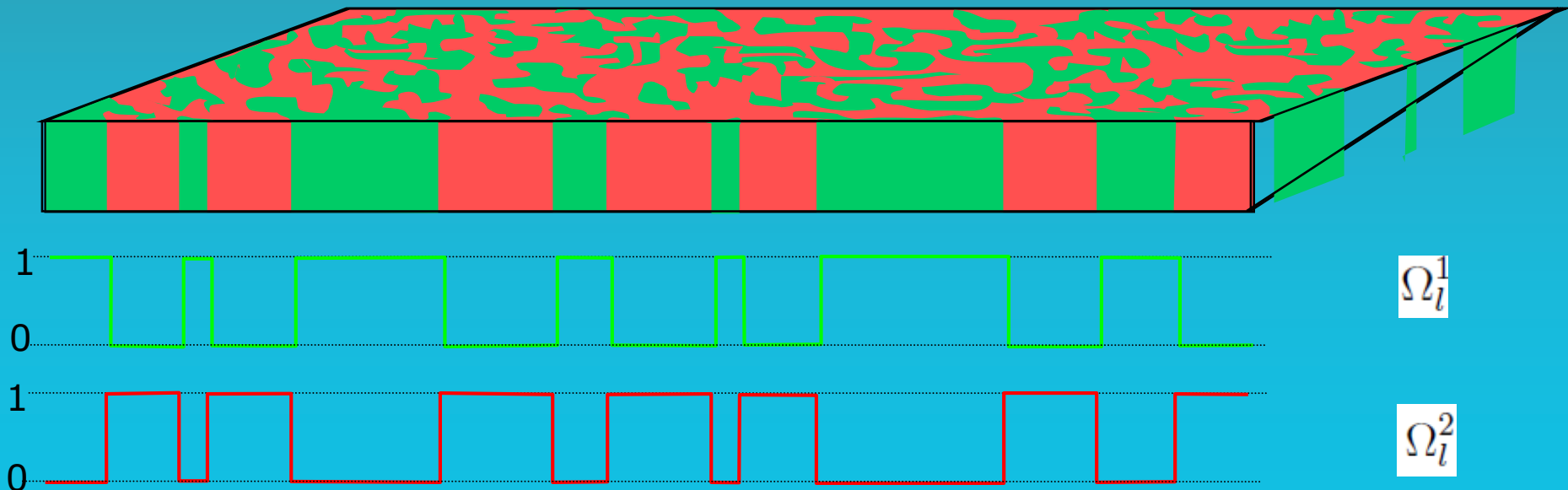
$$C_{ll'}^{\mu\mu'}(\mathbf{R}_{\parallel}) = \frac{1}{A_{\text{sample}}} \int_{\text{sample surface}} (\Omega_l^{\mu}(\mathbf{R}_{\parallel} + \mathbf{r}_{\parallel}) - \eta_l^{\mu}) (\Omega_{l'}^{\mu'}(\mathbf{r}_{\parallel}) - \eta_{l'}^{\mu'}) dA$$

Szórási hosszúsűrűség az l -edik rétegben:

$$\chi_l(\mathbf{r}_{\parallel}) = \sum_{\mu} \Omega_l^{\mu}(\mathbf{r}_{\parallel}) \chi_l^{\mu}$$

Annak a valószínűsége, hogy 1 pont az l -edik a μ -edik doméntípushoz tartozik:

$$\eta_l^{\mu} = \frac{1}{A_{\text{sample}}} \int \Omega_l^{\mu}(\mathbf{r}_{\parallel}) dA$$

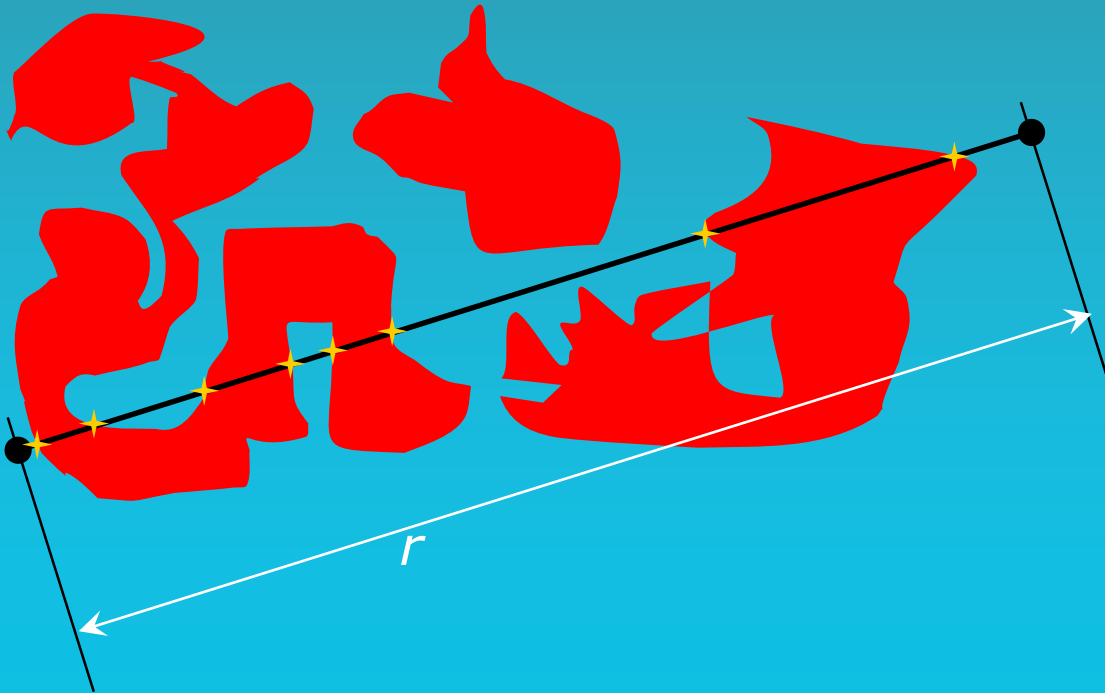


Egy rétegen belüli domén-domén korrelációs függvények

$$C_{ii}^{\mu\mu}(r) = \eta_i^\mu (1 - \eta_i^\mu) \sum_{n=0}^{\infty} (p(2n, r) - p(2n + 1, r)) = \eta_i^\mu (1 - \eta_i^\mu) f_i(r)$$

$$C_{ii}^{\mu\neq\mu'}(r) = -\eta_i^\mu \eta_i^{\mu'} \sum_{n=0}^{\infty} (p(2n, r) - p(2n + 1, r)) = -\eta_i^\mu \eta_i^{\mu'} f_i(r)$$

$p(n, r)$ annak a valószínűsége, hogy n adott típusú doménhez tartozó falat metszünk egy r hosszúságú szakasszal az l -edik rétegben.



Egy rétegen belüli domén-domén korrelációs függvények

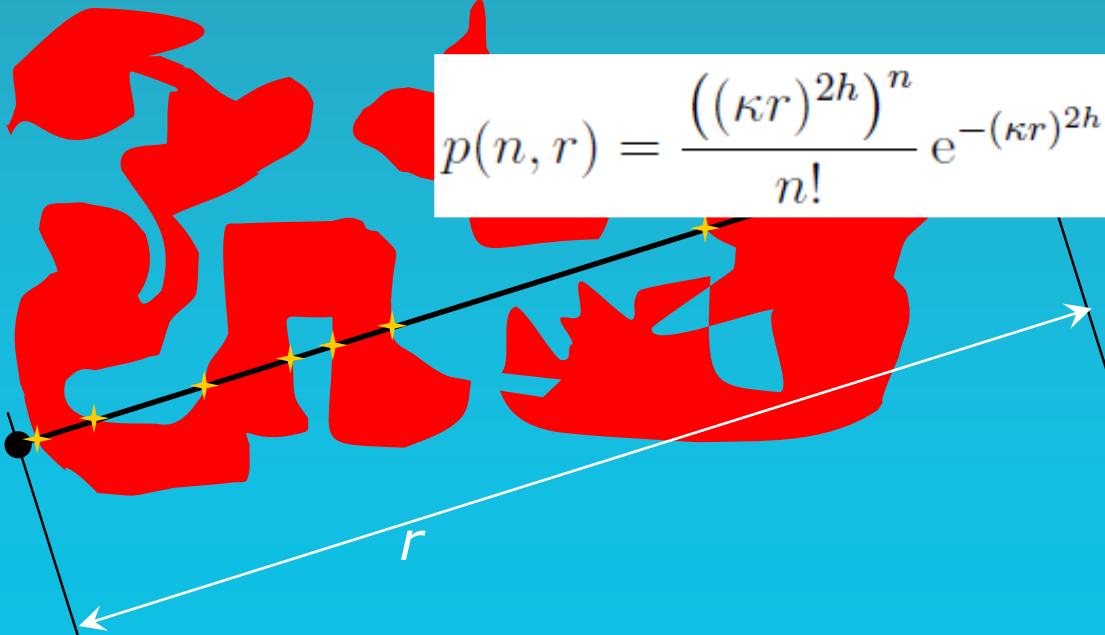
$$C_{ii}^{\mu\mu}(r) = \eta_i^\mu (1 - \eta_i^\mu) \sum_{n=0}^{\infty} (p(2n, r) - p(2n + 1, r)) = \eta_i^\mu (1 - \eta_i^\mu) f_i(r)$$

$$C_{ii}^{\mu\neq\mu'}(r) = -\eta_i^\mu \eta_i^{\mu'} \sum_{n=0}^{\infty} (p(2n, r) - p(2n + 1, r)) = -\eta_i^\mu \eta_i^{\mu'} f_i(r)$$

$p(n, r)$ annak a valószínűsége, hogy n adott típusú doménhez tartozó falat metszünk egy r hosszúságú szakasszal az l -edik rétegben.

Pl.: Feltételezve, hogy $p(n, r)$ Poisson eloszlású és $\langle n \rangle = (\kappa r)^{2h}$

$$p(n, r) = \frac{((\kappa r)^{2h})^n}{n!} e^{-(\kappa r)^{2h}}$$



Egy rétegen belüli domén-domén korrelációs függvények

$$C_{ll}^{\mu\mu}(r) = \eta_l^\mu (1 - \eta_l^\mu) \sum_{n=0}^{\infty} (p(2n, r) - p(2n + 1, r)) = \eta_l^\mu (1 - \eta_l^\mu) f_l(r)$$

$$C_{ll}^{\mu\neq\mu'}(r) = -\eta_l^\mu \eta_l^{\mu'} \sum_{n=0}^{\infty} (p(2n, r) - p(2n + 1, r)) = -\eta_l^\mu \eta_l^{\mu'} f_l(r)$$

$p(n, r)$ annak a valószínűsége, hogy n adott típusú doménhez tartozó falat metszünk egy r hosszúságú szakasszal az l -edik rétegben.

Pl.: Feltételezve, hogy $p(n, r)$ Poisson eloszlású és $\langle n \rangle = (\kappa r)^{2h}$

$$p(n, r) = \frac{((\kappa r)^{2h})^n}{n!} e^{-(\kappa r)^{2h}}$$

$$C_{ll}^{\mu\mu}(r) = \eta_l^\mu (1 - \eta_l^\mu) e^{-2(\kappa r)^{2h}} \quad \text{and} \quad C_{ll}^{\mu\neq\mu'}(r) = -\eta_l^\mu \eta_l^{\mu'} e^{-2(\kappa r)^{2h}}$$

Egy rétegen belüli domén-domén korrelációs függvények

$$C_{ll}^{\mu\mu}(r) = \eta_l^\mu (1 - \eta_l^\mu) \sum_{n=0}^{\infty} (p(2n, r) - p(2n + 1, r)) = \eta_l^\mu (1 - \eta_l^\mu) f_l(r)$$

$$C_{ll}^{\mu\neq\mu'}(r) = -\eta_l^\mu \eta_l^{\mu'} \sum_{n=0}^{\infty} (p(2n, r) - p(2n + 1, r)) = -\eta_l^\mu \eta_l^{\mu'} f_l(r)$$

$p(n, r)$ annak a valószínűsége, hogy n adott típusú doménhez tartozó falat metszünk egy r hosszúságú szakasszal az l -edik rétegben.

Pl.: Feltételezve, hogy $p(n, r)$ Poisson eloszlású és $\langle n \rangle = (\kappa r)^{2h}$

$$p(n, r) = \frac{((\kappa r)^{2h})^n}{n!} e^{-(\kappa r)^{2h}}$$

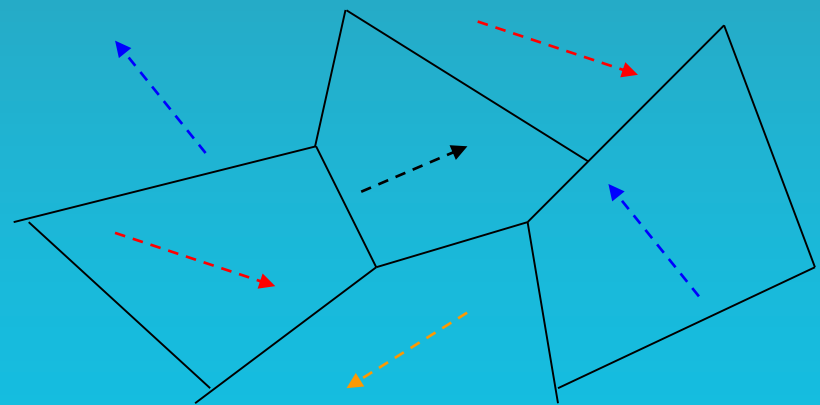
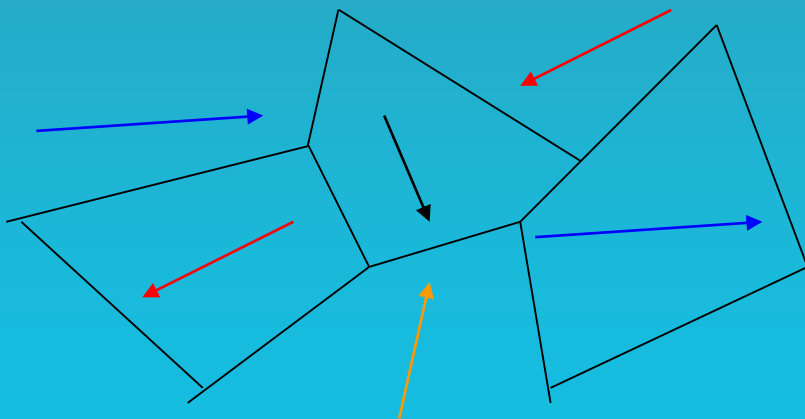
$$C_{ll}^{\mu\mu}(r) = \eta_l^\mu (1 - \eta_l^\mu) e^{-2(\kappa r)^{2h}} \quad \text{and} \quad C_{ll}^{\mu\neq\mu'}(r) = -\eta_l^\mu \eta_l^{\mu'} e^{-2(\kappa r)^{2h}}$$

A ponteloszlások közül a Poisson ponteloszlás a legvéletlenszerűbb

Mágnesesen erősen csatolt multirétegek

Ha $P_{l,l'}(\mu)$ adja meg az l' -edik rétegben annak a doménnek az indexét, amely az l -edik rétegben a μ -edik típusú doménnek felel meg, akkor

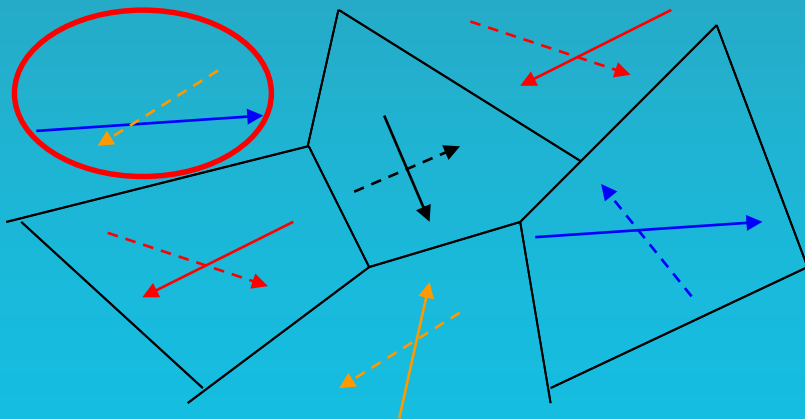
$$C_{ll'}^{\mu\mu'}(r) = \left(\eta_l^\mu \delta_{\mu' P_{l,l'}(\mu)} - \eta_l^\mu \eta_{l'}^{\mu'} \right) f(r)$$



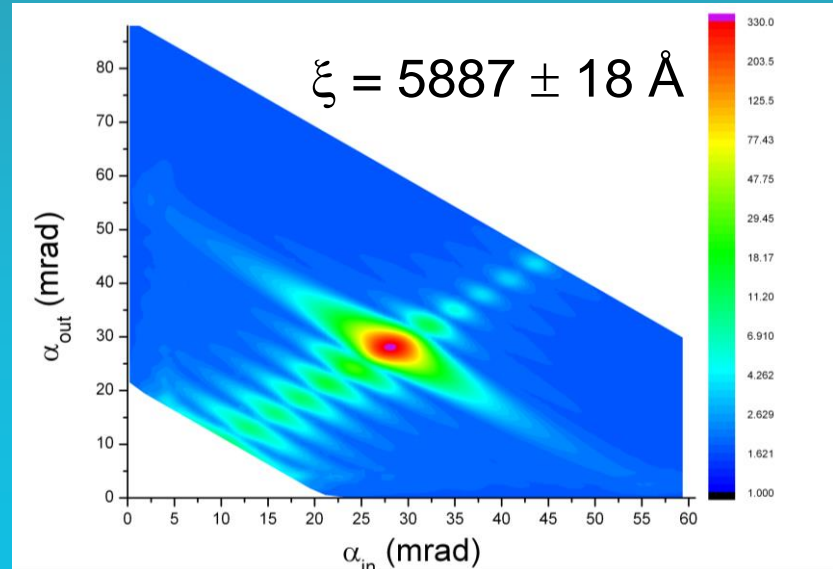
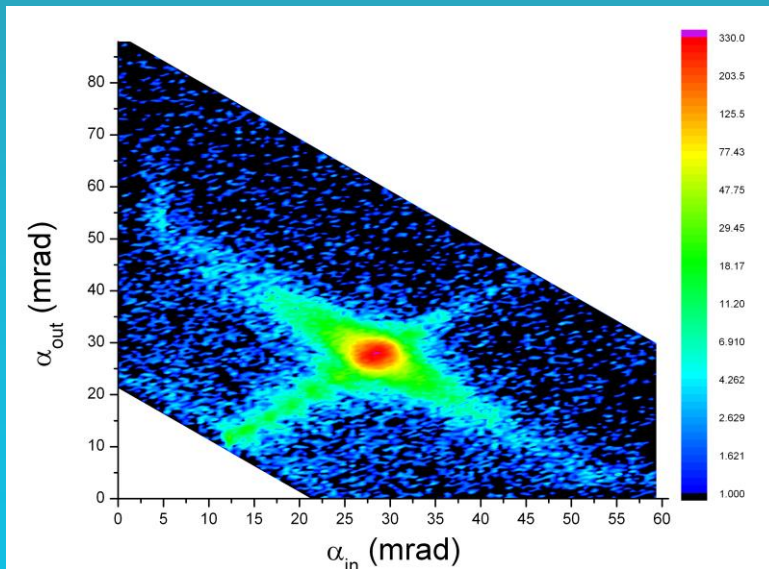
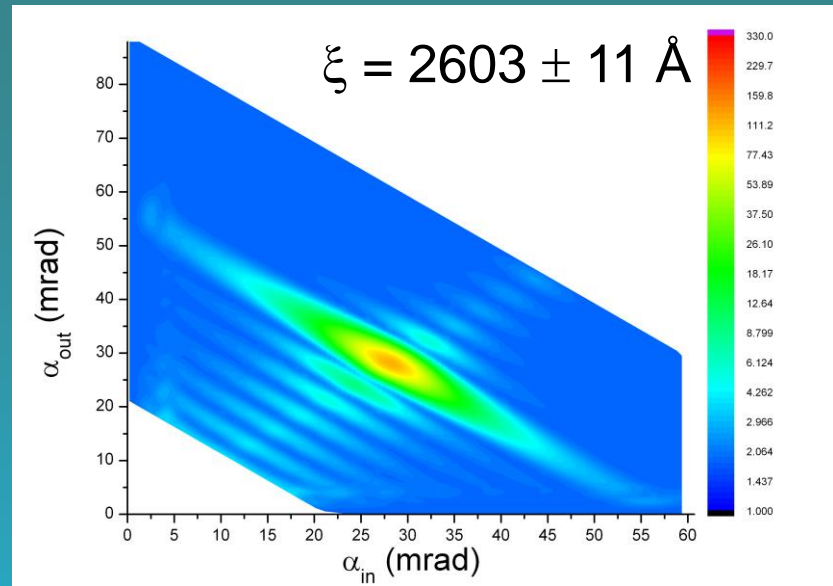
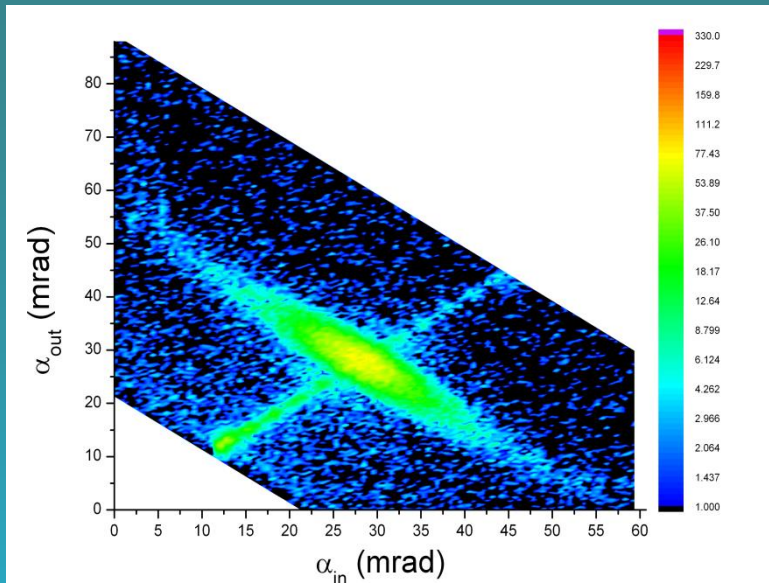
Mágnesesen erősen csatolt multirétegek

Ha $P_{l,l'}(\mu)$ adja meg az l' -edik rétegben annak a doménnek az indexét, amely az l -edik rétegben a μ -edik típusú doménnek felel meg, akkor

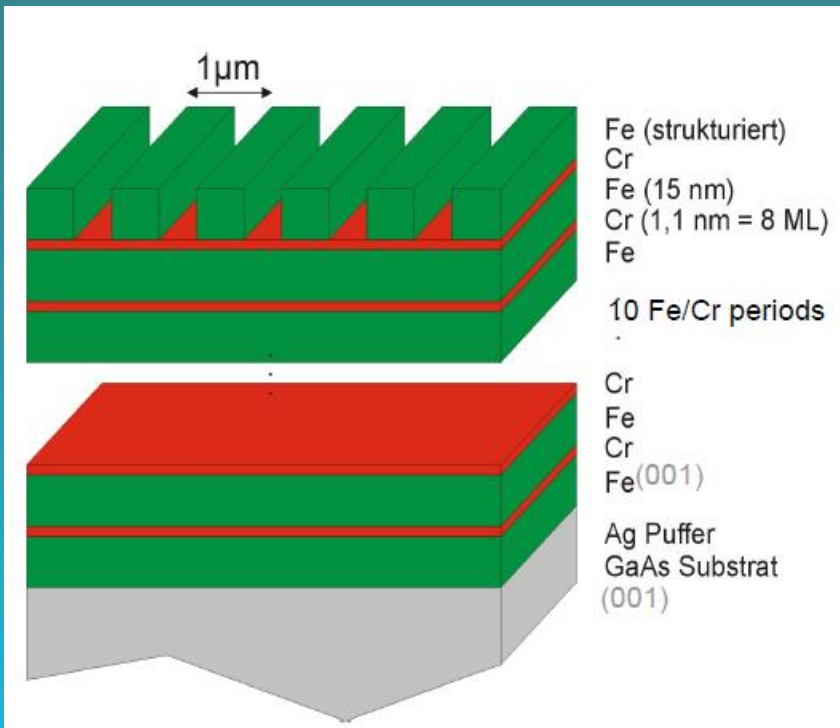
$$C_{ll'}^{\mu\mu'}(r) = \left(\eta_l^\mu \delta_{\mu' P_{l,l'}(\mu)} - \eta_l^\mu \eta_{l'}^{\mu'} \right) f(r)$$



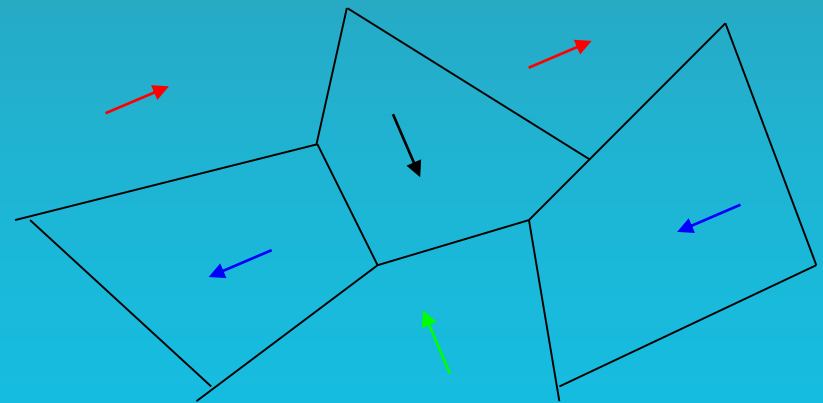
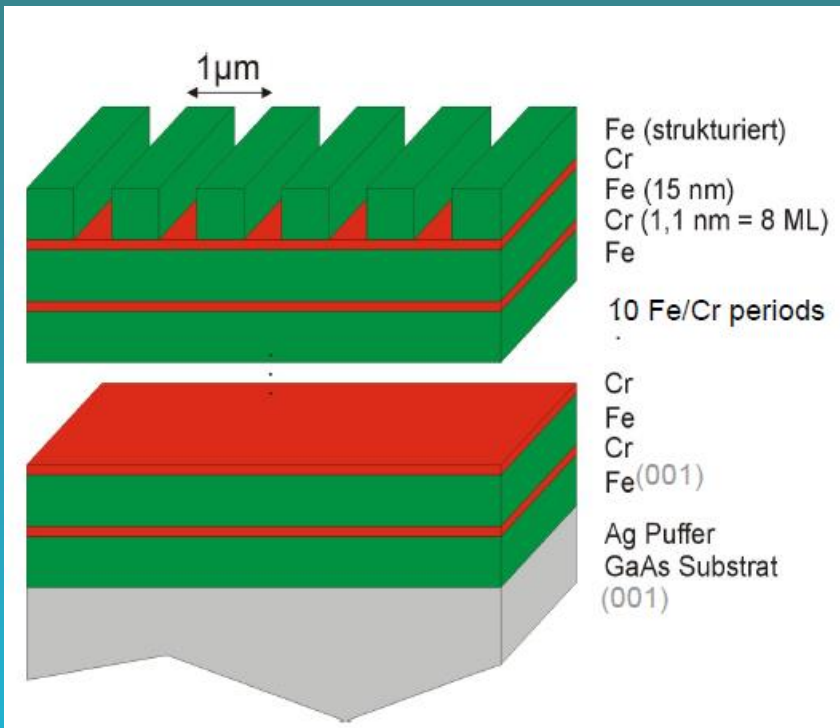
Antiferromagnesen csatolt MgO/ [Fe/Cr]₂₀ multiréteg rendszer illesztése egyszerű exponenciális korrelációs függvénnyel



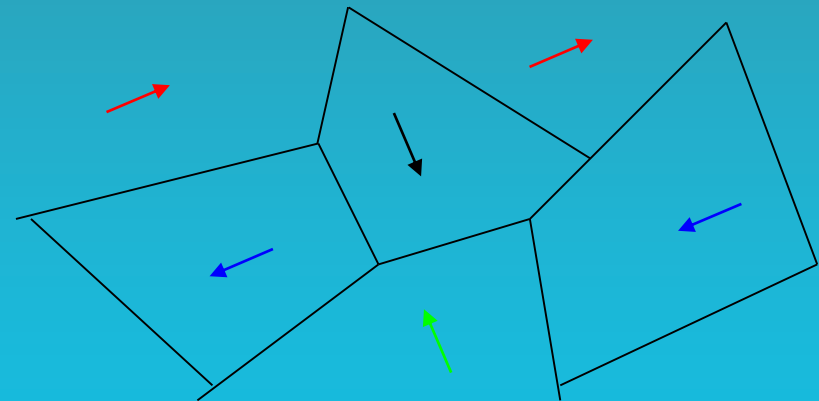
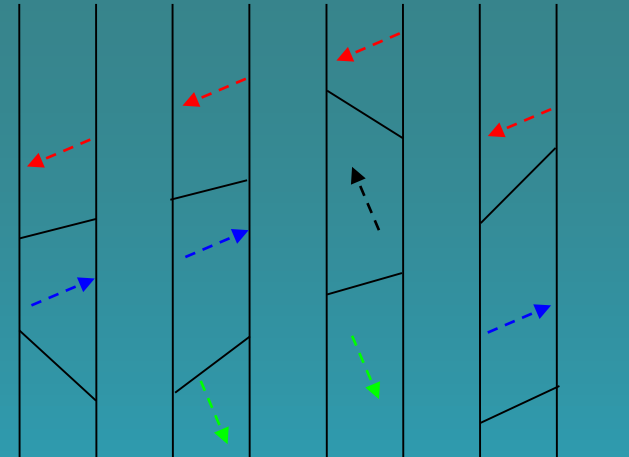
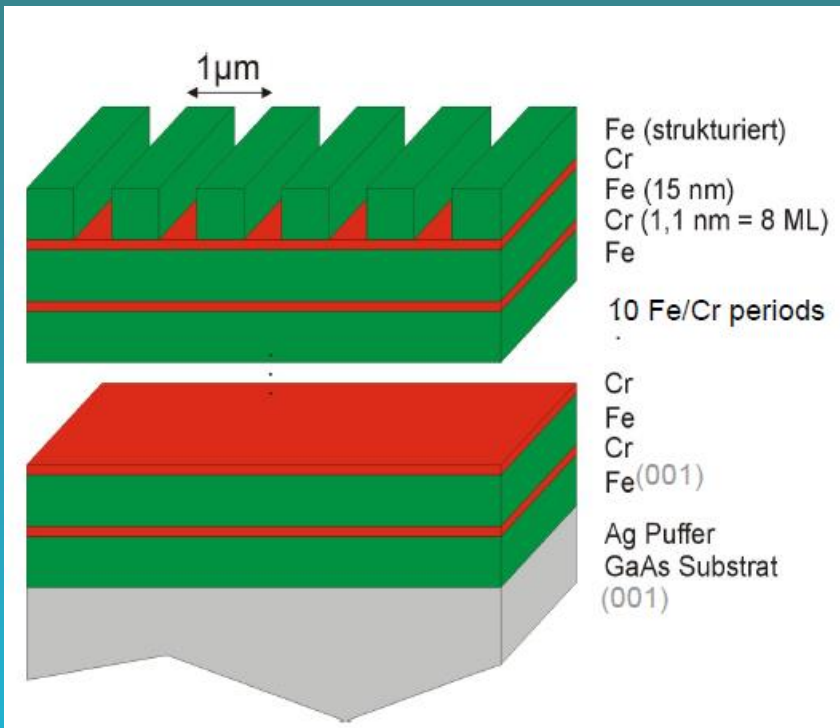
Antiferromágnesesen csatolt strukturált multiréteg rendszer (A. Ioffe)



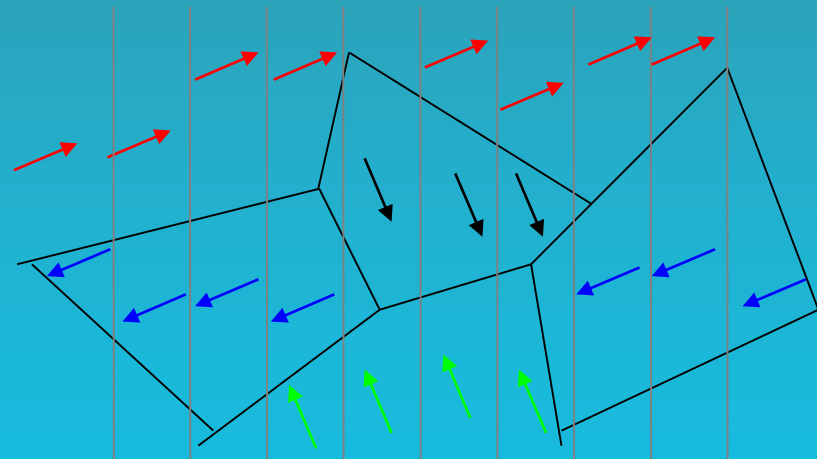
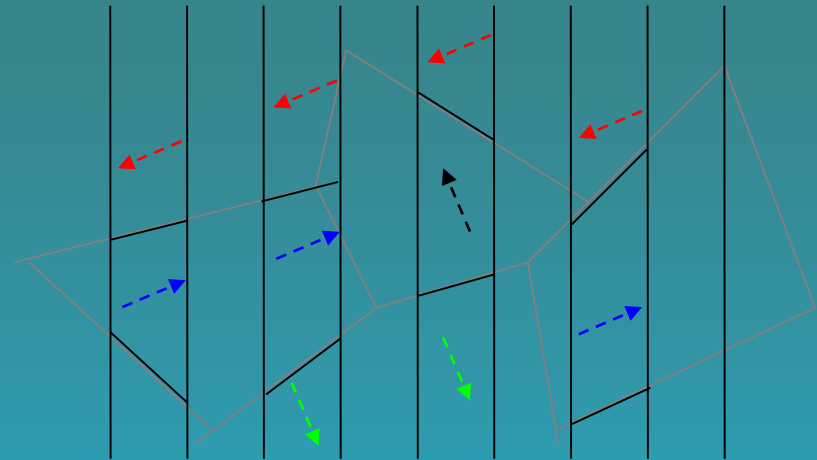
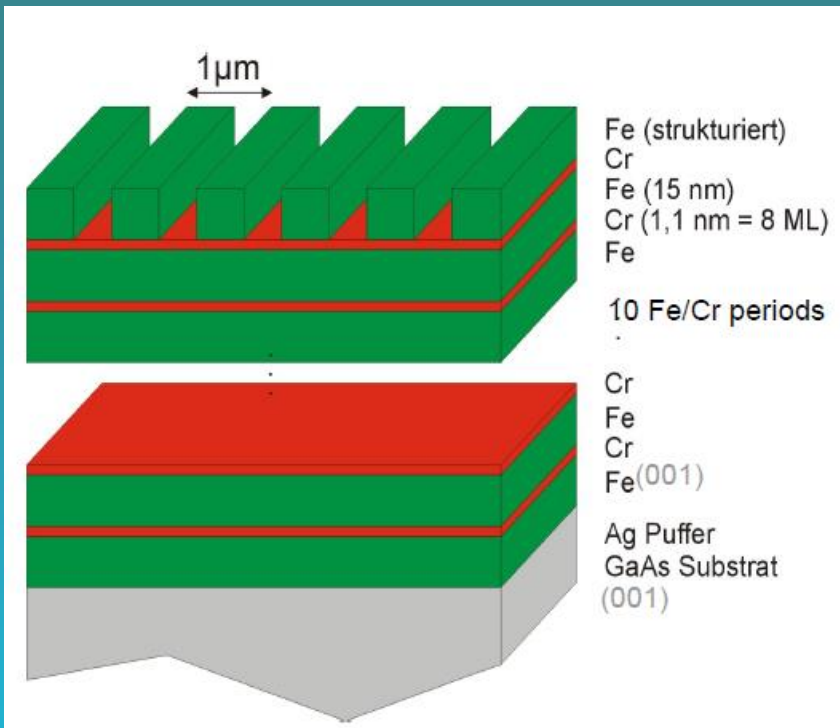
Antiferromagnetically coupled structured multilayer system (A. Ioffe)



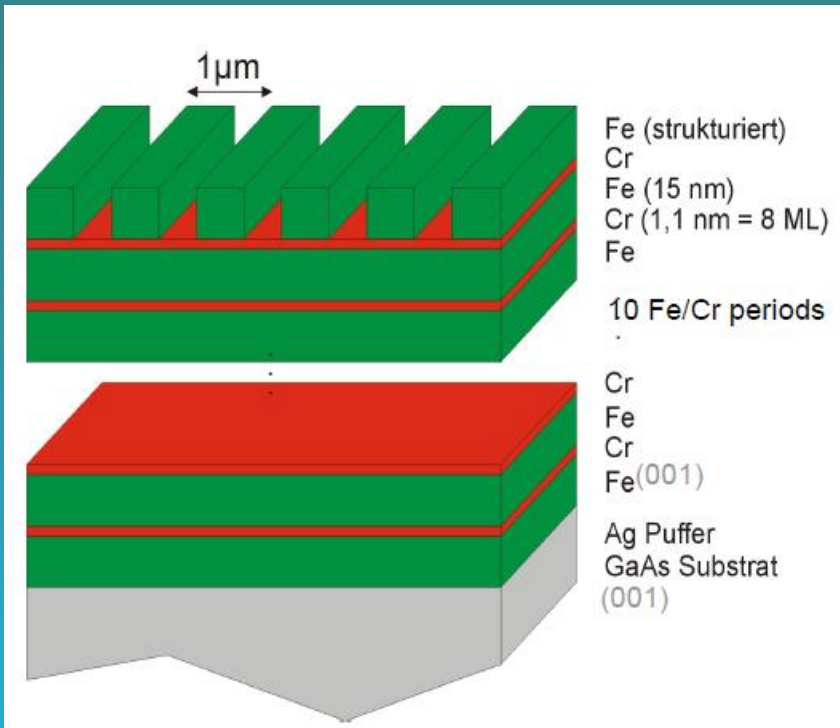
Antiferromagnesen csatolt strukturált multiréteg rendszer (A. Ioffe)



Antiferromágnesesen csatolt strukturált multiréteg rendszer (A. Ioffe)



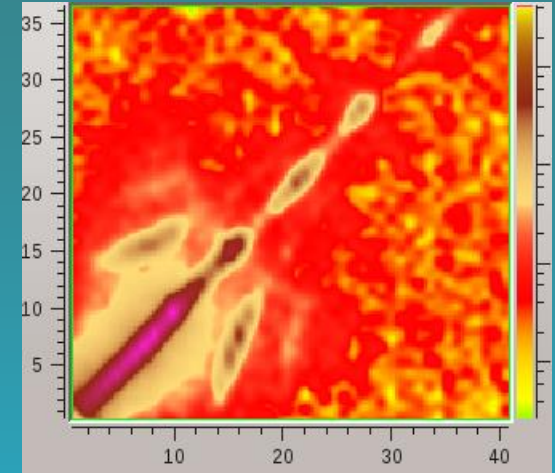
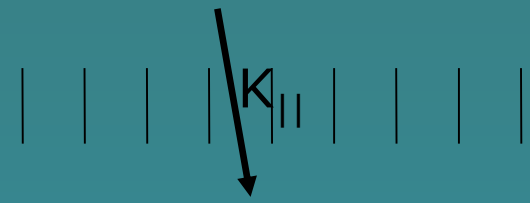
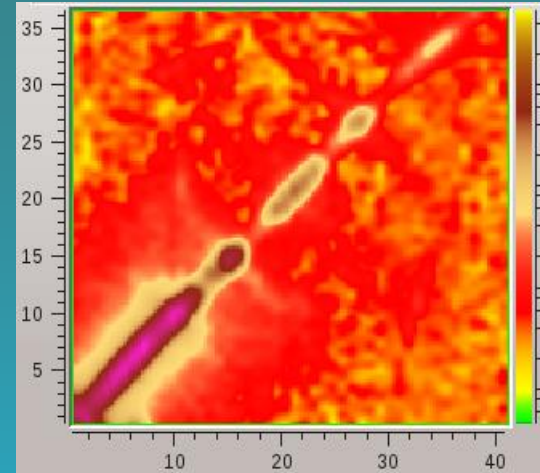
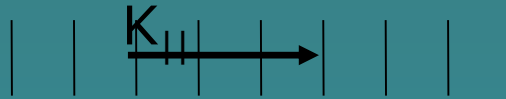
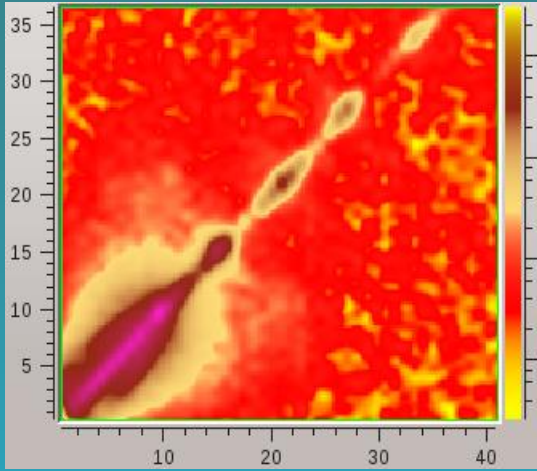
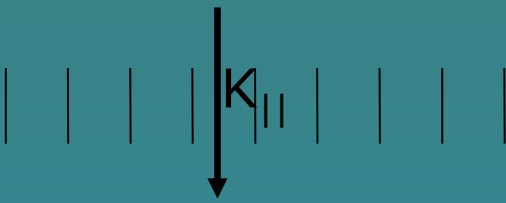
Antiferromágnesesen csatolt strukturált multiréteg rendszer (A. Ioffe)



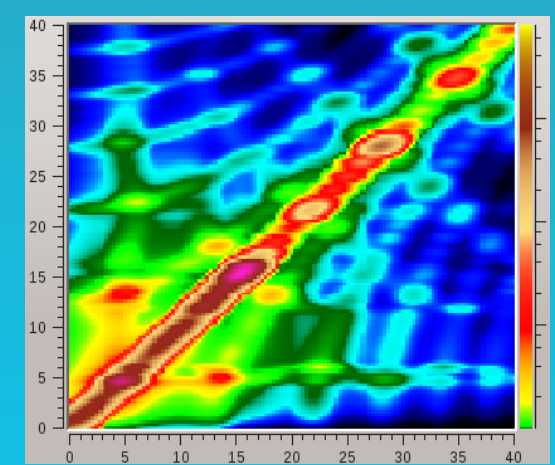
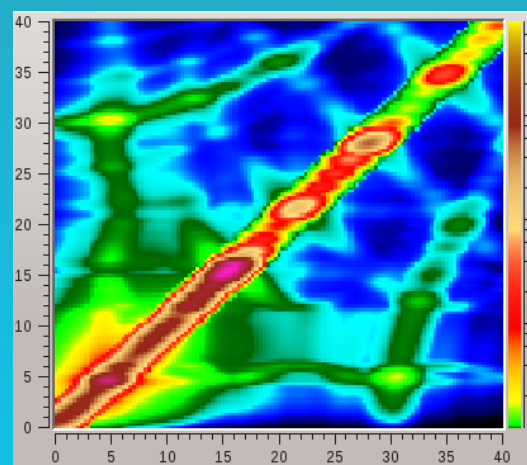
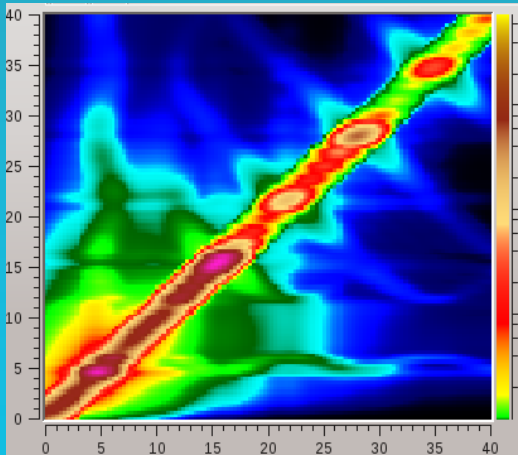
8 mágneses doméntípus
+ 4 a „légrés” miatt

$$\tilde{C}_{ll'}^{(\mu i)(\mu' j)}(\mathbf{K}_{\parallel}) = \tilde{C}_{ll'}^{\mu\mu'}(\mathbf{K}_{\parallel}) * (\tilde{g}_i^*(\mathbf{K}_{\parallel})\tilde{g}_j(\mathbf{K}_{\parallel}))$$

$$\tilde{g}_1(\mathbf{K}_{\parallel}) \propto \frac{a_1}{2\pi} \frac{\sin \frac{\mathbf{K}_{\parallel} N a_1}{2}}{\frac{\mathbf{K}_{\parallel} N a_1}{2}} \frac{\sin \mathbf{K}_{\parallel} N (n-1) \frac{a_1+a_2}{2}}{\sin \mathbf{K}_{\parallel} N \frac{a_1+a_2}{2}}, \quad \text{where } n = \frac{L_c}{a_1 + a_2}$$



Mérés: N. Ziegenhagen et al. Phys. B 335 (2003) 50, Jülich HADAS

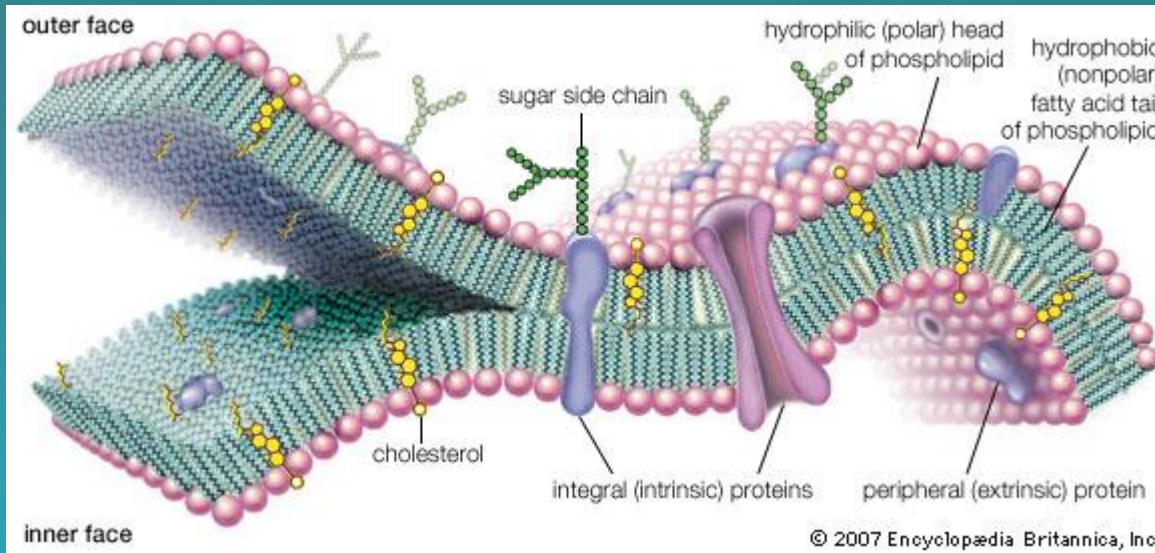


Szimuláció: Sajti, FitSuite

Összefoglalás

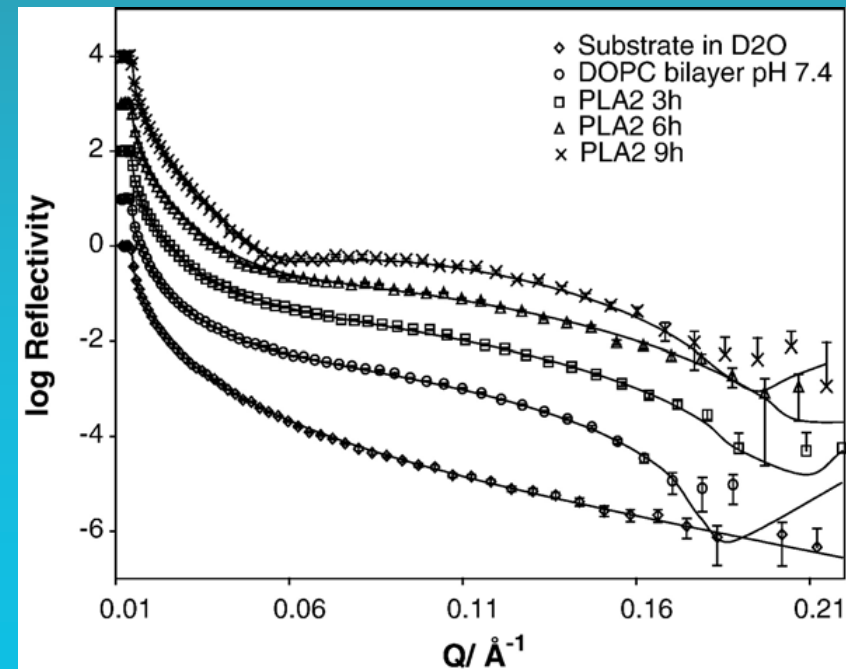
- ❖ A napjainkban egyre nagyobb jelentőségűek a nanotechnológia termékei. A funkcionális nanostruktúrák, ezen belül a vékonyrétegek tanulmányozásában kiemelkedő szerepe van az általunk művelt neutron, röntgen-, és rezonáns röntgenreflektometriának.
- ❖ Kutatócsoportunk elmúlt öt évének vizsgálatai közül három példát említettem, a diffúziót, a rétegnövekedést és a mágneses doménkorrelációt, ahol a jelenség megértésében a reflektometriai módszereknek és
- ❖ az általam az elmúlt 10 év során kifejlesztett FitSuite kiértékelő programrendszer szerepe lényeges volt.

Lipid membránok vizsgálata

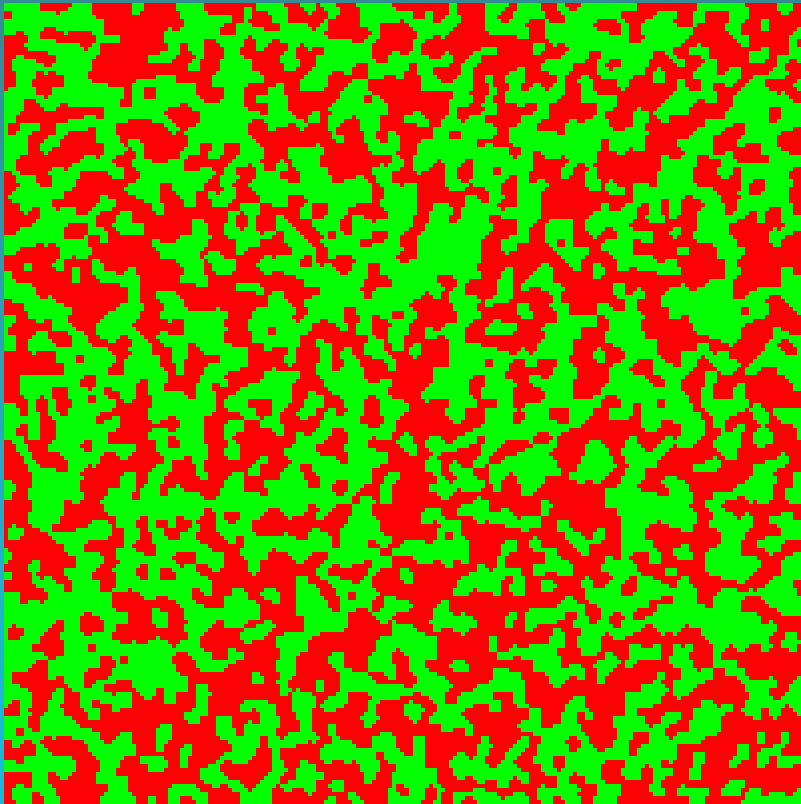


Phospholipase A2 (PLA2) hatása egy kettős lipid rétegre

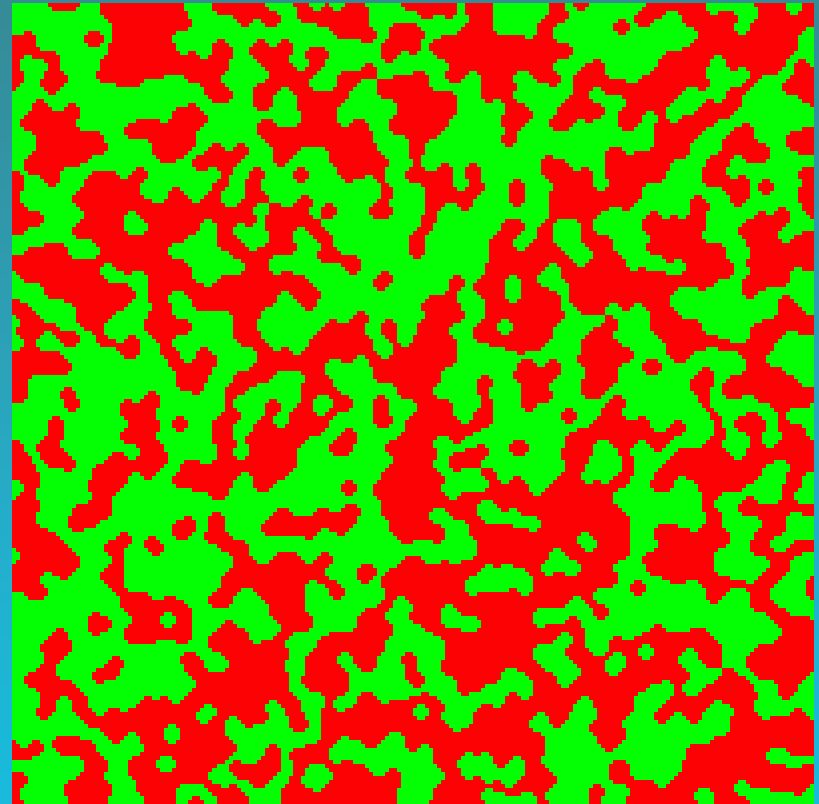
H.P. Wacklin et al. / Biochimica et Biophysica Acta 1768 (2007) 1036-1049



Doménmintázatok külső térben:



B_1



$B_2 < B_1$

Domén-domén korrelációs függvények

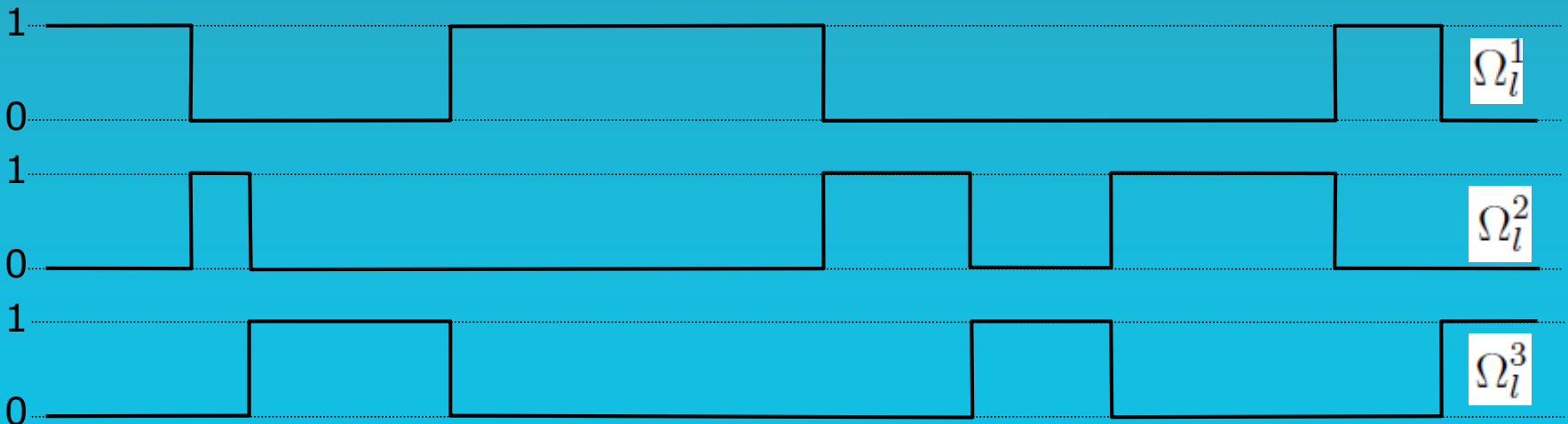
$$C_{ll'}^{\mu\mu'}(\mathbf{R}_{\parallel}) = \frac{1}{A_{\text{sample}}} \int_{\text{sample surface}} (\Omega_l^{\mu}(\mathbf{R}_{\parallel} + \mathbf{r}_{\parallel}) - \eta_l^{\mu}) (\Omega_{l'}^{\mu'}(\mathbf{r}_{\parallel}) - \eta_{l'}^{\mu'}) dA$$

$$\eta_l^{\mu} = \frac{1}{A_{\text{sample}}} \int \Omega_l^{\mu}(\mathbf{r}_{\parallel}) dA$$

$$\sum_{\mu} \eta_l^{\mu} = 1$$

$$\chi_l(\mathbf{r}_{\parallel}) = \sum_{\mu} \Omega_l^{\mu}(\mathbf{r}_{\parallel}) \chi_l^{\mu}$$

$$\langle \chi_l \rangle = \sum_{\mu} \eta_l^{\mu} \chi_l^{\mu}$$



Domén-domén korrelációs függvények

$$C_{ll'}^{\mu\mu'}(\mathbf{R}_{\parallel}) = \frac{1}{A_{\text{sample}}} \int_{\text{sample surface}} (\Omega_l^{\mu}(\mathbf{R}_{\parallel} + \mathbf{r}_{\parallel}) - \eta_l^{\mu}) (\Omega_{l'}^{\mu'}(\mathbf{r}_{\parallel}) - \eta_{l'}^{\mu'}) dA$$

$$C_{ll'}^{\mu\mu'}(\mathbf{R}_{\parallel}) = C_{l'l}^{\mu'\mu}(\mathbf{R}_{\parallel})$$

$$\sum_{\mu} C_{ll'}^{\mu\mu'}(\mathbf{R}_{\parallel}) = \sum_{\mu'} C_{ll'}^{\mu\mu'}(\mathbf{R}_{\parallel}) = 0$$

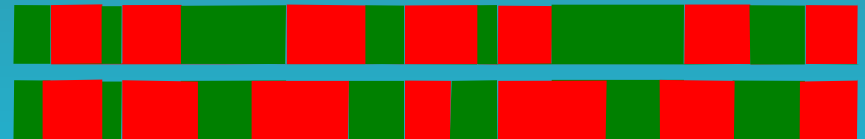
Domén-domén korrelációs függvények

$$C_{ll'}^{\mu\mu'}(\mathbf{R}_{\parallel}) = \frac{1}{A_{\text{sample}}} \int_{\text{sample surface}} (\Omega_l^{\mu}(\mathbf{R}_{\parallel} + \mathbf{r}_{\parallel}) - \eta_l^{\mu}) (\Omega_{l'}^{\mu'}(\mathbf{r}_{\parallel}) - \eta_{l'}^{\mu'}) dA$$

$$C_{ll'}^{\mu\mu'}(\mathbf{R}_{\parallel}) = C_{l'l}^{\mu'\mu}(\mathbf{R}_{\parallel})$$

$$\sum_{\mu} C_{ll'}^{\mu\mu'}(\mathbf{R}_{\parallel}) = \sum_{\mu'} C_{ll'}^{\mu\mu'}(\mathbf{R}_{\parallel}) = 0$$

2 réteg, 2 domén típus:



$\begin{matrix} \mu \\ l \end{matrix} \setminus \begin{matrix} \mu' \\ l' \end{matrix}$	$\begin{matrix} + \\ 1 \end{matrix}$	$\begin{matrix} - \\ 1 \end{matrix}$	$\begin{matrix} + \\ 2 \end{matrix}$	$\begin{matrix} - \\ 2 \end{matrix}$
$\begin{matrix} + \\ 1 \end{matrix}$	$A = C_{11}^{++}$	$-A$	B	$-B$
$\begin{matrix} - \\ 1 \end{matrix}$	$-A$	A	$-B$	B
$\begin{matrix} + \\ 2 \end{matrix}$	$B = C_{21}^{++}$	$-B$	$C = C_{22}^{++}$	$-C$
$\begin{matrix} - \\ 2 \end{matrix}$	$-B$	B	$-C$	C

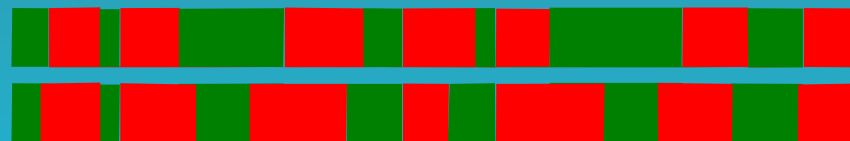
Domén-domén korrelációs függvények

$$C_{ll'}^{\mu\mu'}(\mathbf{R}_{\parallel}) = \frac{1}{A_{\text{sample}}} \int_{\text{sample surface}} (\Omega_l^{\mu}(\mathbf{R}_{\parallel} + \mathbf{r}_{\parallel}) - \eta_l^{\mu}) (\Omega_{l'}^{\mu'}(\mathbf{r}_{\parallel}) - \eta_{l'}^{\mu'}) dA$$

$$C_{ll'}^{\mu\mu'}(\mathbf{R}_{\parallel}) = C_{l'l}^{\mu'\mu}(\mathbf{R}_{\parallel})$$

$$\sum_{\mu} C_{ll'}^{\mu\mu'}(\mathbf{R}_{\parallel}) = \sum_{\mu'} C_{ll'}^{\mu\mu'}(\mathbf{R}_{\parallel}) = 0$$

2 réteg, 2 domén típus:



$\begin{matrix} \mu \\ l \end{matrix} \setminus \begin{matrix} \mu' \\ l' \end{matrix}$	$\begin{matrix} + \\ 1 \end{matrix}$	$\begin{matrix} - \\ 1 \end{matrix}$	$\begin{matrix} + \\ 2 \end{matrix}$	$\begin{matrix} - \\ 2 \end{matrix}$
$\begin{matrix} + \\ 1 \end{matrix}$	$A = C_{11}^{++}$	$-A$	B	$-B$
$\begin{matrix} - \\ 1 \end{matrix}$	$-A$	A	$-B$	B
$\begin{matrix} + \\ 2 \end{matrix}$	$B = C_{21}^{++}$	$-B$	$C = C_{22}^{++}$	$-C$
$\begin{matrix} - \\ 2 \end{matrix}$	$-B$	B	$-C$	C

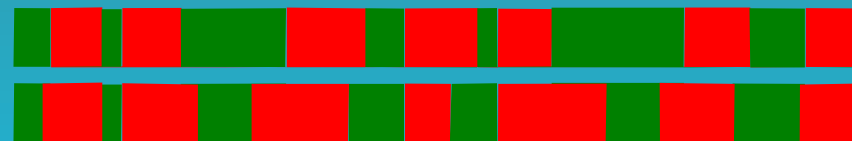
Domén-domén korrelációs függvények

$$C_{ll'}^{\mu\mu'}(\mathbf{R}_{\parallel}) = \frac{1}{A_{\text{sample}}} \int_{\text{sample surface}} (\Omega_l^{\mu}(\mathbf{R}_{\parallel} + \mathbf{r}_{\parallel}) - \eta_l^{\mu}) (\Omega_{l'}^{\mu'}(\mathbf{r}_{\parallel}) - \eta_{l'}^{\mu'}) dA$$

$$C_{ll'}^{\mu\mu'}(\mathbf{R}_{\parallel}) = C_{l'l}^{\mu'\mu}(\mathbf{R}_{\parallel})$$

$$\sum_{\mu} C_{ll'}^{\mu\mu'}(\mathbf{R}_{\parallel}) = \sum_{\mu'} C_{ll'}^{\mu\mu'}(\mathbf{R}_{\parallel}) = 0$$

2 réteg, 2 domén típus:



$\begin{matrix} \mu \\ l \end{matrix} \setminus \begin{matrix} \mu' \\ l' \end{matrix}$	$\begin{matrix} + \\ 1 \end{matrix}$	$\begin{matrix} - \\ 1 \end{matrix}$	$\begin{matrix} + \\ 2 \end{matrix}$	$\begin{matrix} - \\ 2 \end{matrix}$
$\begin{matrix} + \\ 1 \end{matrix}$	$A = C_{11}^{++}$	$-A$	B	$-B$
$\begin{matrix} - \\ 1 \end{matrix}$	$-A$	A	$-B$	B
$\begin{matrix} + \\ 2 \end{matrix}$	$B = C_{21}^{++}$	$-B$	$C = C_{22}^{++}$	$-C$
$\begin{matrix} - \\ 2 \end{matrix}$	$-B$	B	$-C$	C

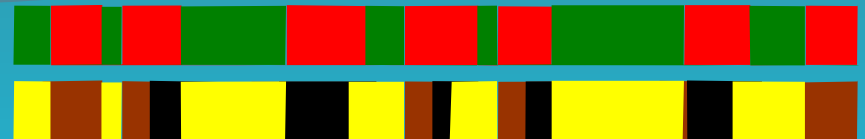
Domén-domén korrelációs függvények

$$C_{ll'}^{\mu\mu'}(\mathbf{R}_{\parallel}) = \frac{1}{A_{\text{sample}}} \int_{\text{sample surface}} (\Omega_l^{\mu}(\mathbf{R}_{\parallel} + \mathbf{r}_{\parallel}) - \eta_l^{\mu}) (\Omega_{l'}^{\mu'}(\mathbf{r}_{\parallel}) - \eta_{l'}^{\mu'}) dA$$

$$C_{ll'}^{\mu\mu'}(\mathbf{R}_{\parallel}) = C_{l'l}^{\mu'\mu}(\mathbf{R}_{\parallel})$$

$$\sum_{\mu} C_{ll'}^{\mu\mu'}(\mathbf{R}_{\parallel}) = \sum_{\mu'} C_{ll'}^{\mu\mu'}(\mathbf{R}_{\parallel}) = 0$$

2 réteg, 5 domén típus:



$\mu \setminus \mu'$ $l \setminus l'$	1 1	2 1	3 2	4 2	5 2
1 1	$A = C_{11}^{11}$	$-A$	B	C	$-(B + C)$
2 1	$-A$	A	$-B$	$-C$	$(C + B)$
3 2	$B = C_{21}^{31}$	$-B$	$D = C_{22}^{33}$	E	$-(D + E)$
4 2	$C = C_{21}^{41}$	$-C$	$E = C_{22}^{34}$	$F = C_{22}^{44}$	$-(E + F)$
5 2	$-(B + C)$	$B + C$	$-(D + E)$	$-(E + F)$	$D + F + 2E$

Domén-domén korrelációs függvények

$\begin{matrix} \mu \\ l \end{matrix} \setminus \begin{matrix} \mu' \\ l' \end{matrix}$	$\begin{matrix} 1 \\ 1 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 2 \\ 1 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 3 \\ 2 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 4 \\ 2 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 5 \\ 2 \end{matrix}$
$\begin{matrix} 1 \\ 1 \end{matrix}$	$A = C_{11}^{11}$	$-A$	B	C	$-(B + C)$
$\begin{matrix} 2 \\ 1 \end{matrix}$	$-A$	A	$-B$	$-C$	$(C + B)$
$\begin{matrix} 3 \\ 2 \end{matrix}$	$B = C_{21}^{31}$	$-B$	$D = C_{22}^{33}$	E	$-(D + E)$
$\begin{matrix} 4 \\ 2 \end{matrix}$	$C = C_{21}^{41}$	$-C$	$E = C_{22}^{34}$	$F = C_{22}^{44}$	$-(E + F)$
$\begin{matrix} 5 \\ 2 \end{matrix}$	$-(B + C)$	$B + C$	$-(D + E)$	$-(E + F)$	$D + F + 2E$

$$C_{ll}^{\mu\mu}(r) = \eta_l^\mu (1 - \eta_l^\mu) f_l(r)$$

$$C_{ll}^{\mu\neq\mu'}(r) = -\eta_l^\mu \eta_l^{\mu'} f_l(r)$$

Domén-domén korrelációs függvények

$\mu \setminus \mu'$ $l \setminus l'$	1 1	2 1	3 2	4 2	5 2
1 1	$A = C_{11}^{11}$	$-A$	B	C	$-(B + C)$
2 1	$-A$	A	$-B$	$-C$	$(C + B)$
3 2	$B = C_{21}^{31}$	$-B$	$D = C_{22}^{33}$	E	$-(D + E)$
4 2	$C = C_{21}^{41}$	$-C$	$E = C_{22}^{34}$	$F = C_{22}^{44}$	$-(E + F)$
5 2	$-(B + C)$	$B + C$	$-(D + E)$	$-(E + F)$	$D + F + 2E$

$$C_{ll}^{\mu\mu}(r) = \eta_l^\mu (1 - \eta_l^\mu) f_l(r)$$

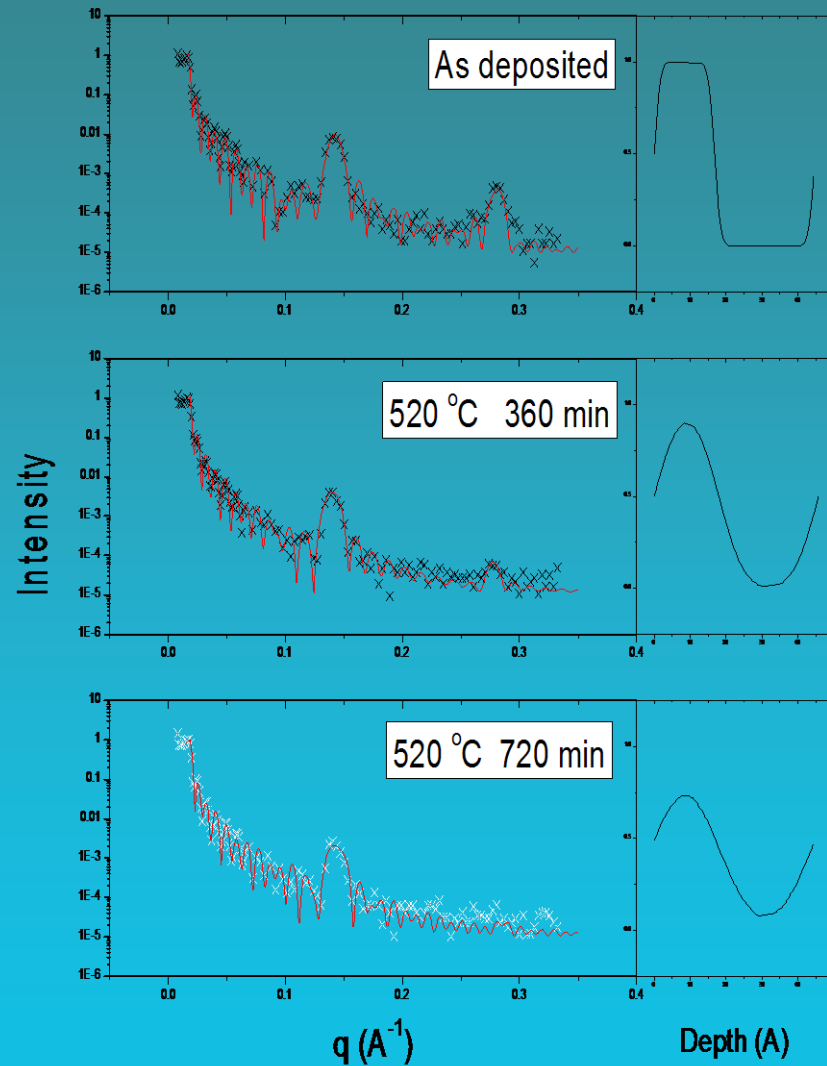


$$C_{ll}^{\mu\neq\mu'}(r) = -\eta_l^\mu \eta_l^{\mu'} f_l(r)$$

$\mu \setminus \mu'$ $l \setminus l'$	1 1	2 1	3 2	4 2	5 2
1 1	$\eta_1^1(1 - \eta_1^1) f_1$	$-\eta_1^1 \eta_1^2 f_1$	B	C	$-(B + C)$
2 1	$-\eta_1^1 \eta_1^2 f_1$	$\eta_1^2(1 - \eta_1^2) f_1$	$-B$	$-C$	$(C + B)$
3 2	$B = C_{21}^{31}$	$-B$	$\eta_2^3(1 - \eta_2^3) f_2$	$-\eta_2^3 \eta_2^4 f_2$	$-\eta_2^3 \eta_2^5 f_2$
4 2	$C = C_{21}^{41}$	$-C$	$-\eta_2^4 \eta_2^3 f_2$	$\eta_2^4(1 - \eta_2^4) f_2$	$-\eta_2^4 \eta_2^5 f_2$
5 2	$-(B + C)$	$B + C$	$-\eta_2^5 \eta_2^3 f_2$	$-\eta_2^5 \eta_2^4 f_2$	$\eta_2^5(1 - \eta_2^5) f_2$

A rétegek közti korrelációs függvények száma nem változott.

n-reflektometria FePd multirétegben



FitSuite illesztett
mérési eredmények