

# Amikor a sok felbontja az egészet

Penc Karlo



MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont,  
Szilárdtestfizikai és Optikai Intézet

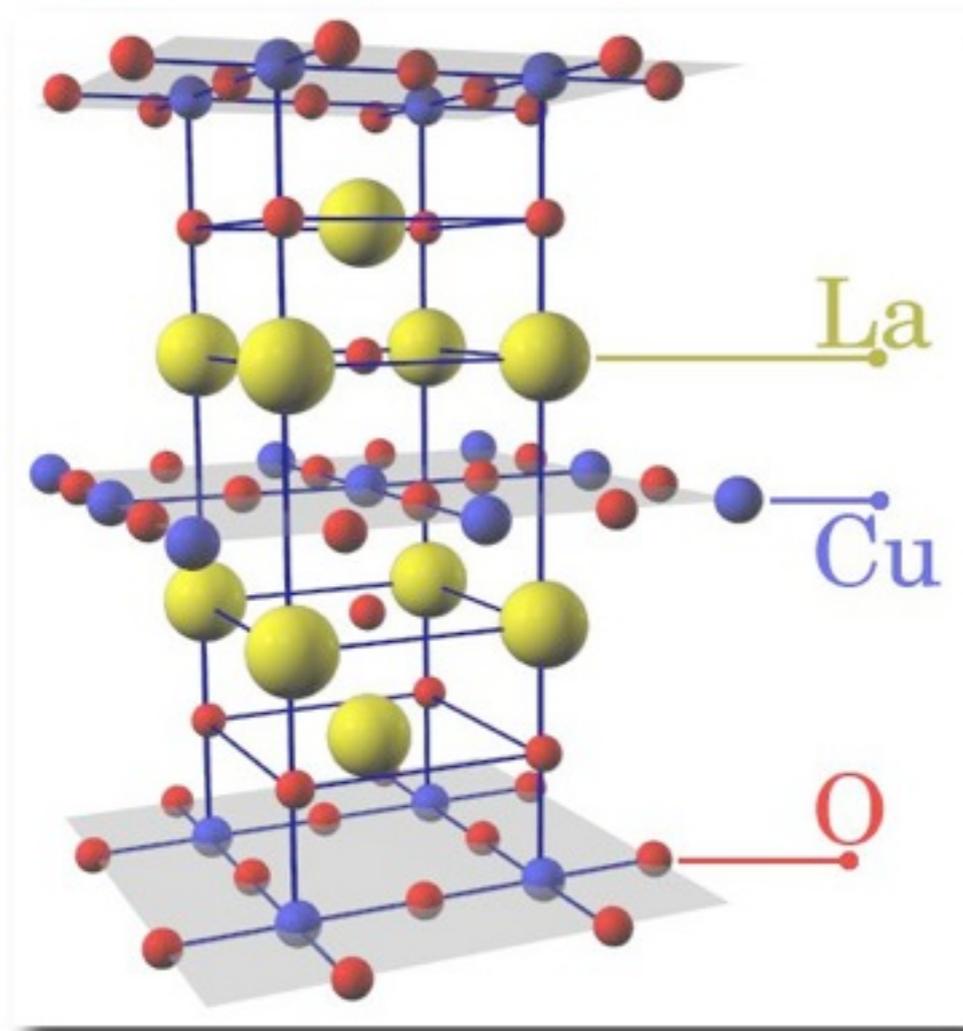
# Elemi részecskék

- elektron : egységnyi negatív töltésű, van mágneses momentuma (spinje)
- proton : egységnyi pozitív töltésű, szintén van mágneses momentuma, de az kisebb mint az elektroné (egy ezrede)
- neutron : semleges, de van mágneses momentuma (kb akkora mint a protonnak)
- és még sok egyéb... kvarkok...

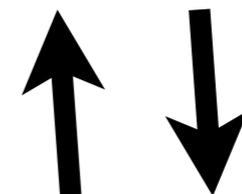
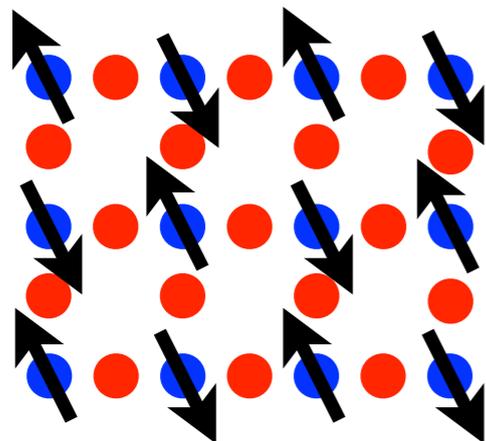
## More is different - A több az más

- P. W. Anderson Nobel díjas fizikus írása 1972-ből [Science 177, 393–396 (1972)]
- Érvel, hogy bonyolultabb rendszerekben új viselkedés és új törvények lépnek fel
- hierarchia: részecskefizika, kondenzált anyagok, kémia, molekuláris biológia, sejtbiológia..
- kondenzált anyagok esetén : szimmetriasértés

# Korrelált rendszerek, Mott szigetelők



- az elektronok között Coulomb (elektrosztatikus) kölcsönhatás
- ha a Coulomb kölcsönhatás elég nagy (pl. átmeneti fém oxidok), akkor az elektronok nem mozognak szabadon, hanem a fém-ionokon lokalizáltak
- mágneses rendszerek : az elektronok spinjei kölcsönhatnak
- ellentétesen szeretnének állni a szomszédok



# Korrelált rendszerek, Mott szigetelők



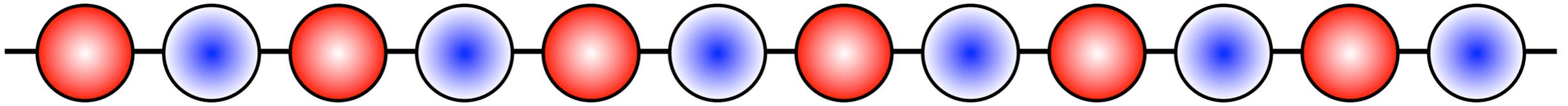
Nem korrelált



Korrelált

# spinonok: feles spinű gerjesztések spin-láncokban

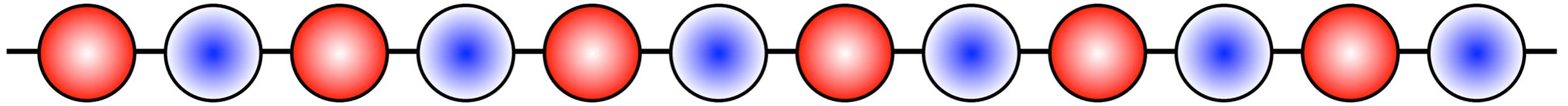
alapállapot (a piros és kék ellentétes beállású spineket jelöl) :



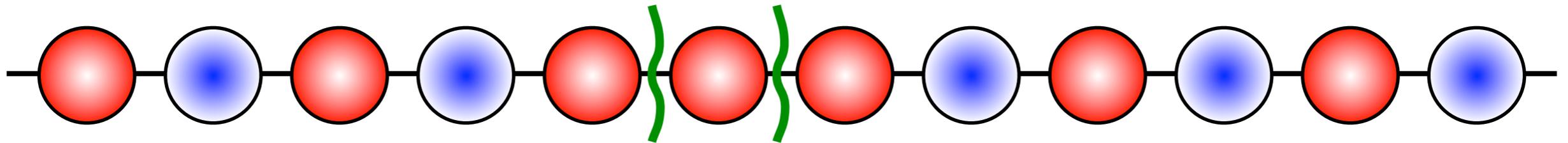
idő  
↓

# spinonok: feles spinű gerjesztések spin-láncokban

alapállapot (a piros és kék ellentétes beállású spineket jelöl) :



gerjesztés (pl. szóródó neutron)

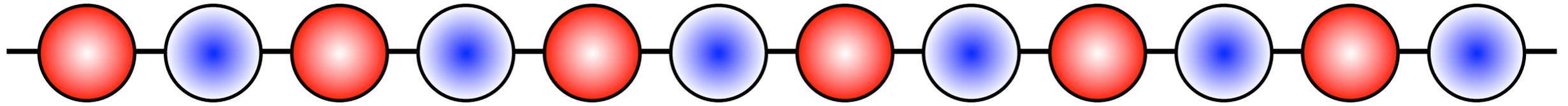


idő

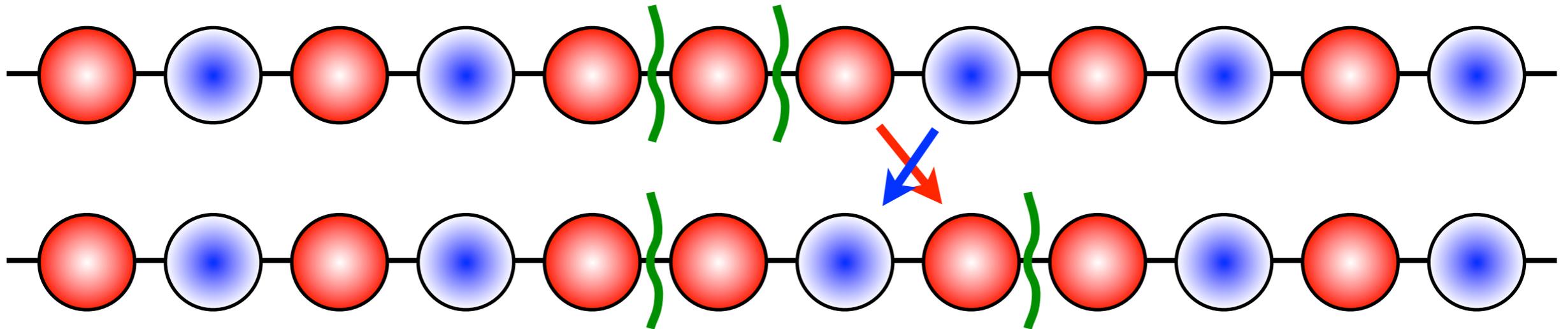


# spinonok: feles spinű gerjesztések spin-láncokban

alapállapot (a piros és kék ellentétes beállású spineket jelöl) :



gerjesztés (pl. szóródó neutron)

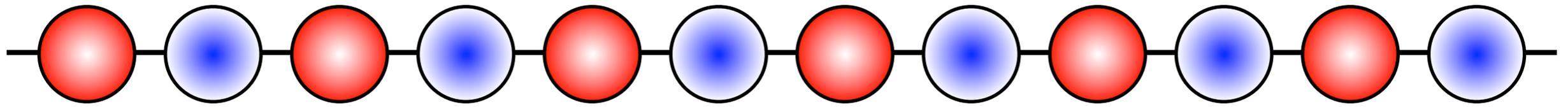


idő

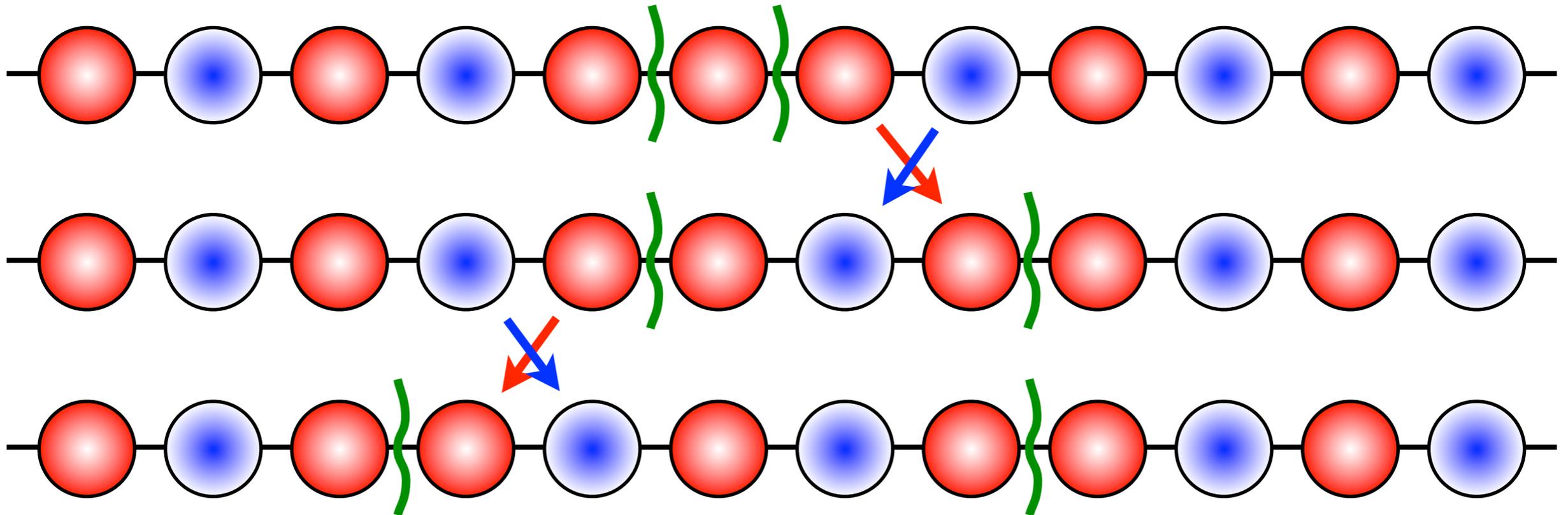


# spinonok: feles spinű gerjesztések spin-láncokban

alapállapot (a piros és kék ellentétes beállású spineket jelöl) :

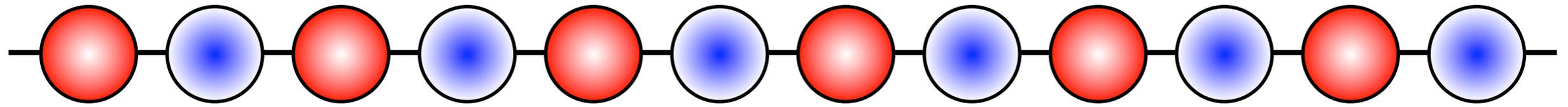


gerjesztés (pl. szóródó neutron)

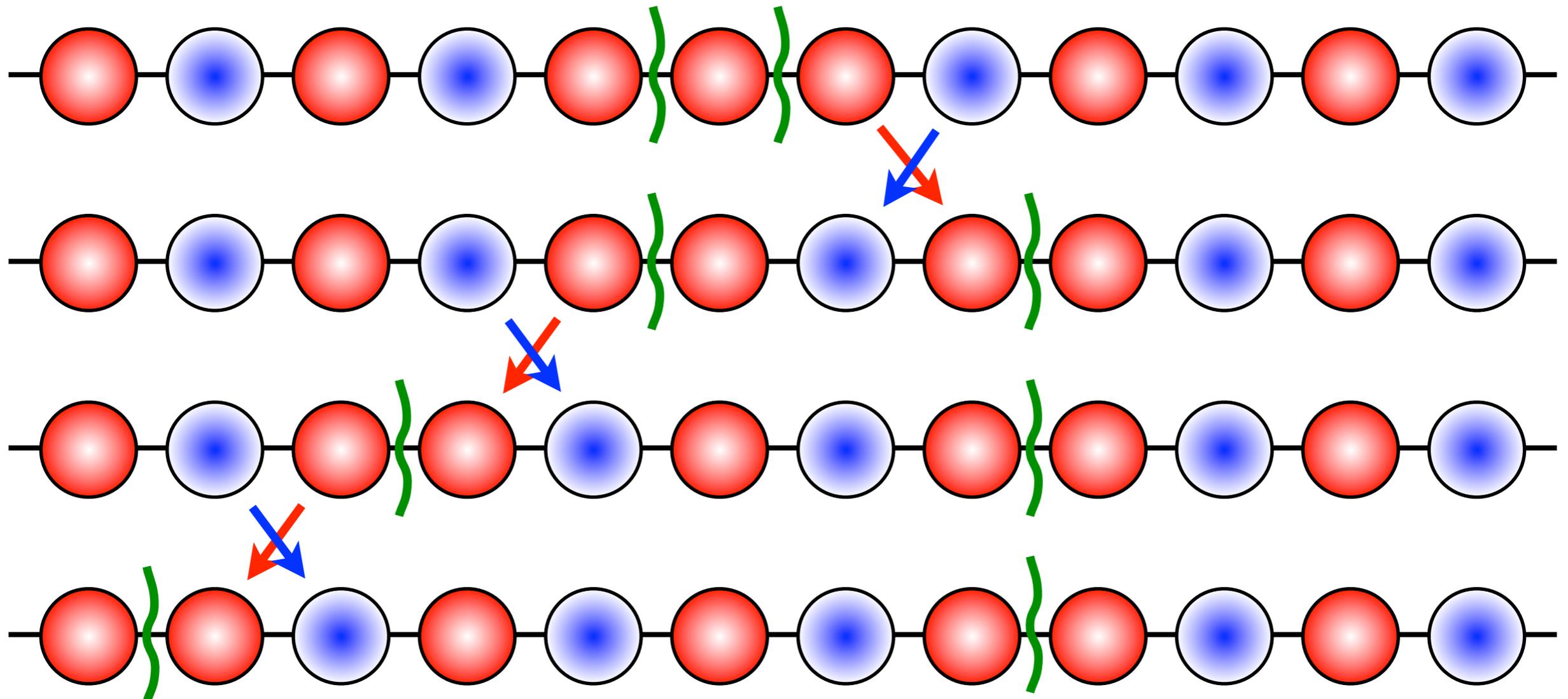


# spinonok: feles spinű gerjesztések spin-láncokban

alapállapot (a piros és kék ellentétes beállású spineket jelöl) :

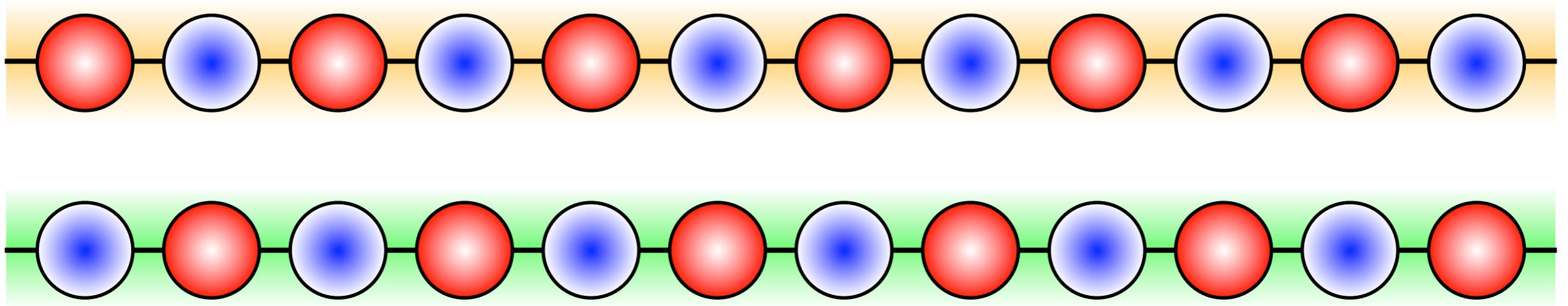


gerjesztés (pl. szóródó neutron)

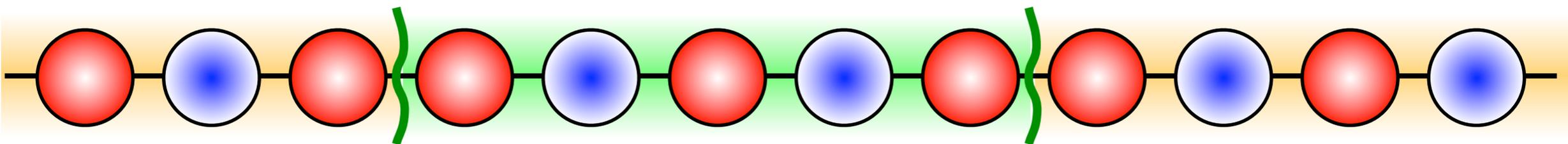


# spinonok: feles spinű gerjesztések spin-láncokban

Legalább két alapállapot szükséges :

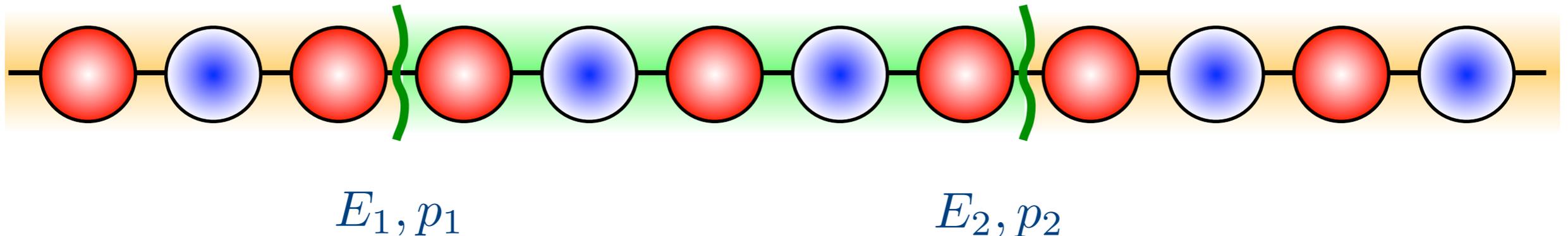


spinonok: alapállapotokat szétválasztó falak,  
egymástól függetlenül mozognak



# spinonok: feles spinű gerjesztések spin-láncokban

spinon: alapállapotokat szétválasztó fal,  
egymástól függetlenül mozognak



energiamegmaradás:

$$\Delta E_{\text{neutron}} = E_1 + E_2$$

impulzusmegmaradás:

$$\Delta p_{\text{neutron}} = p_1 + p_2$$

energia függ az impulzustól  
(diszperziós reláció):

$$E_1 = f(p_1)$$

$$E_2 = f(p_2)$$

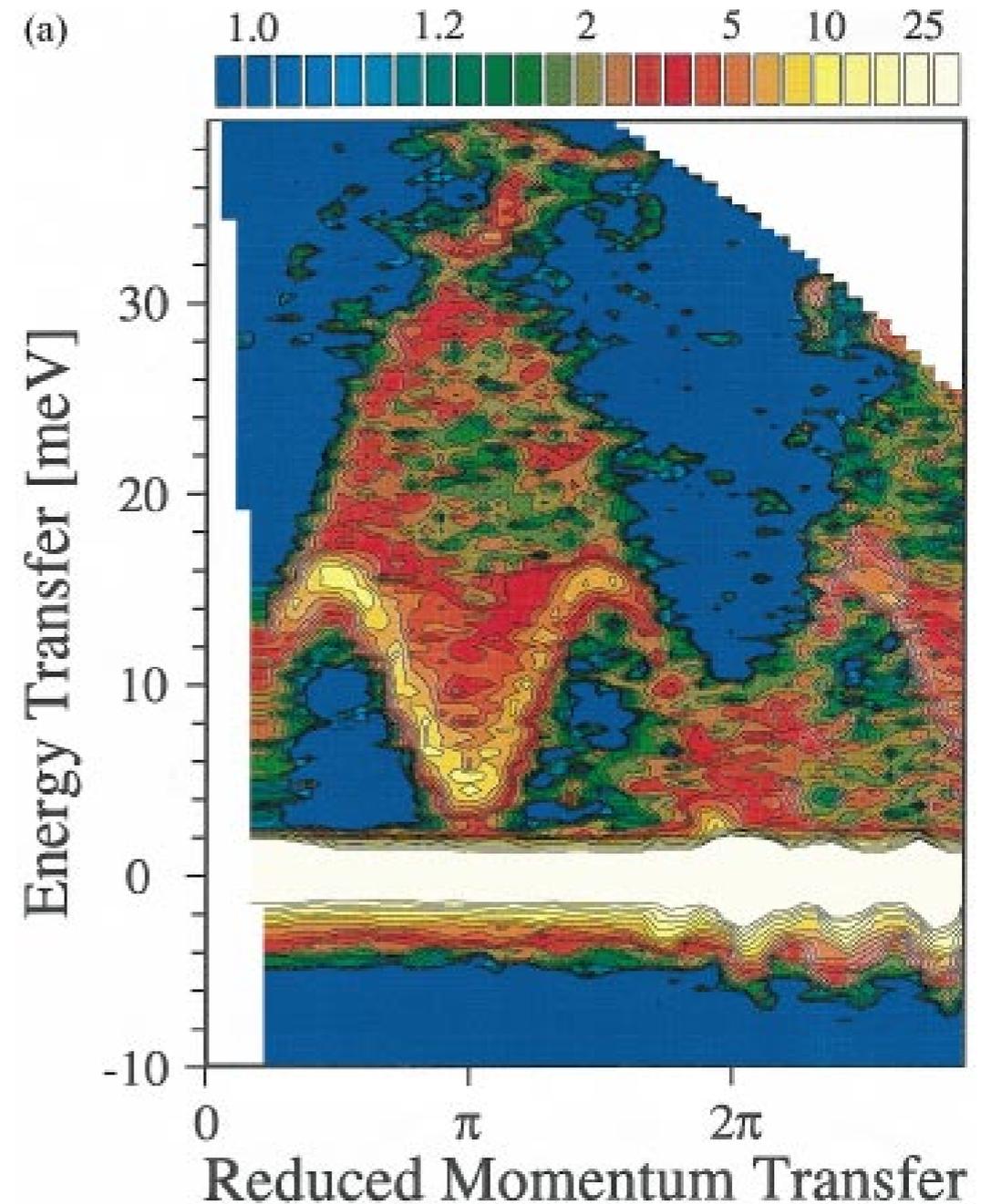
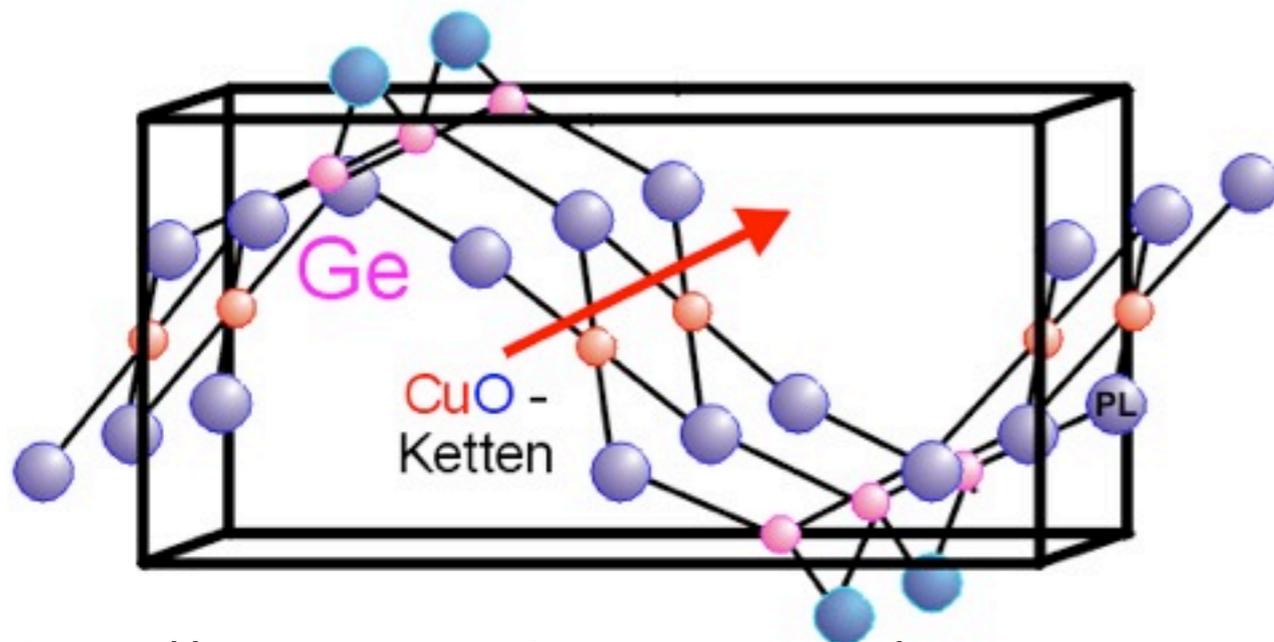
pl. klasszikus test:  $E = \frac{p^2}{2m}$

4 egyenlet, 6 ismeretlen:

$\Delta E_{\text{neutron}}$  és  $\Delta p_{\text{neutron}}$  között  
nem egyértelmű a kapcsolat

## Quantum Spin Excitations in the Spin-Peierls System $\text{CuGeO}_3$

M. Arai,<sup>1,2,\*</sup> M. Fujita,<sup>1</sup> M. Motokawa,<sup>3</sup> J. Akimitsu,<sup>4</sup> and S.M. Bennington<sup>5</sup>

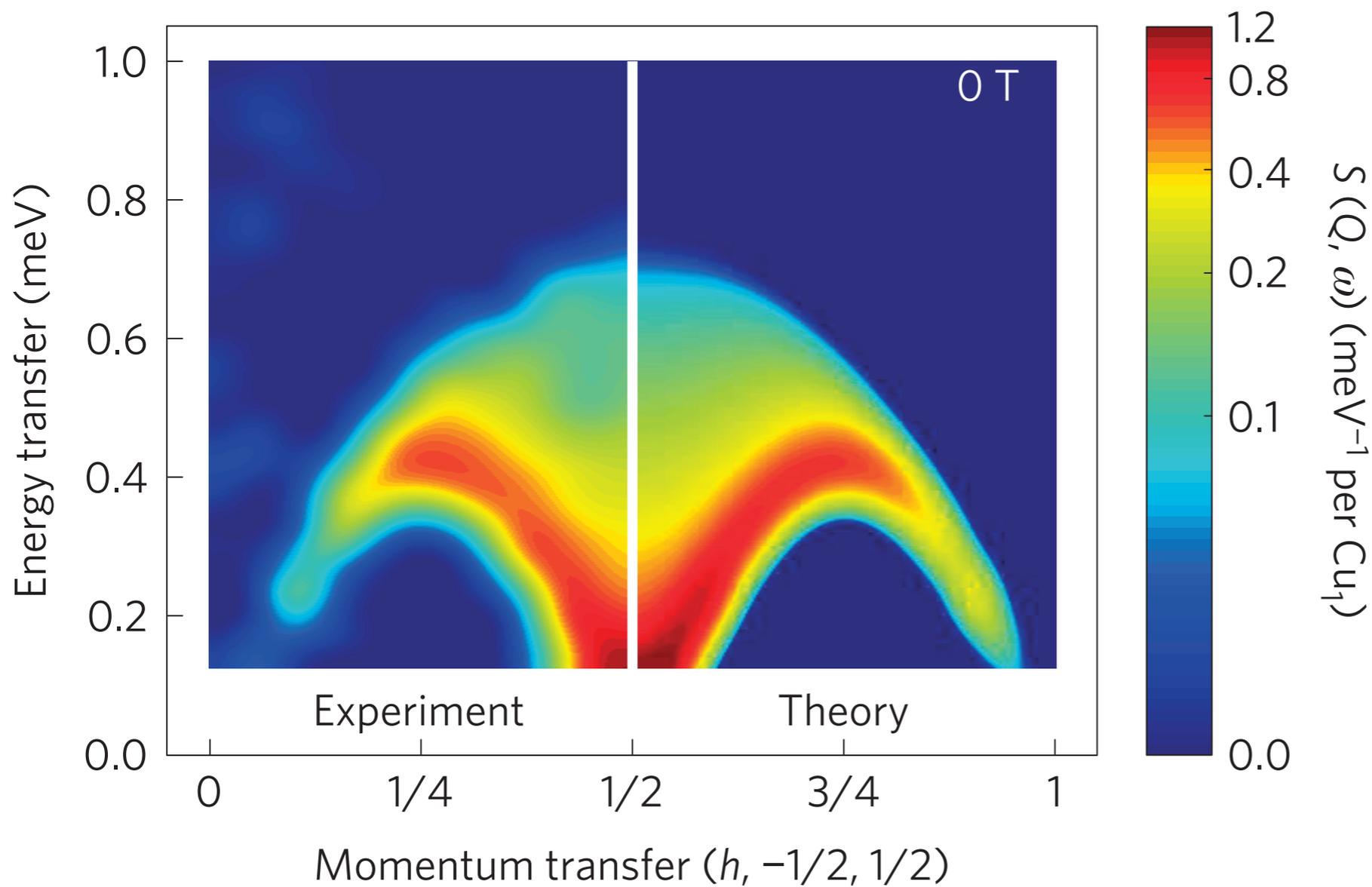


<http://www.peter-lemmens.de/cugeo.htm>

# Fractional spinon excitations in the quantum Heisenberg antiferromagnetic chain

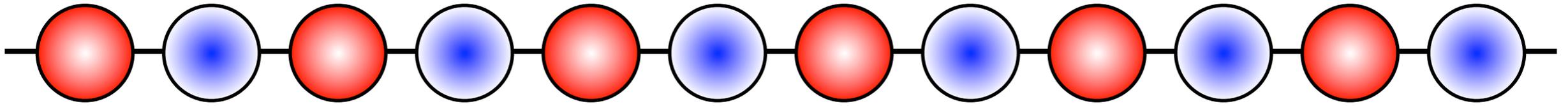
Martin Mourigal<sup>1,2,3\*</sup>, Mechthild Enderle<sup>1</sup>, Axel Klöpperpieper<sup>4</sup>, Jean-Sébastien Caux<sup>5</sup>, Anne Stunault<sup>1</sup> and Henrik M. Rønnow<sup>2</sup>

CuSO<sub>4</sub>·5D<sub>2</sub>O



# spinonok és holonok : az elektron spinje és töltése szétválik

alapállapot:

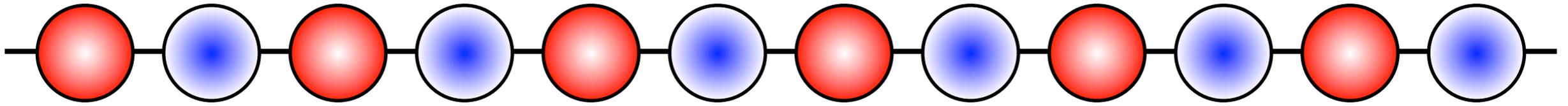


idő

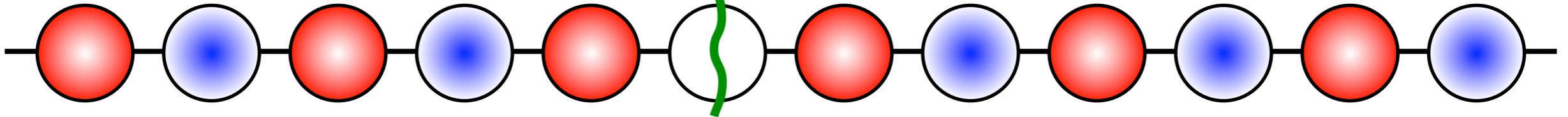
A vertical blue arrow pointing downwards, starting from the top of the diagram and extending towards the bottom of the slide. The word 'idő' is written vertically in blue text to the left of the arrow's shaft.

# spinonok és holonok : az elektron spinje és töltése szétválílik

alapállapot:

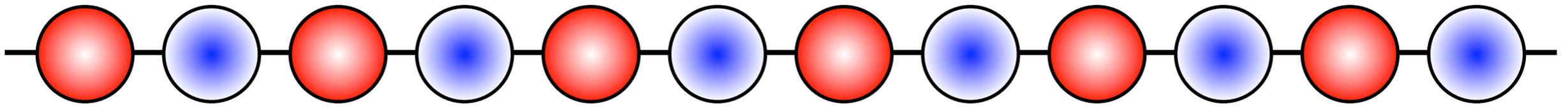


gerjesztés (pl. szóródó foton)

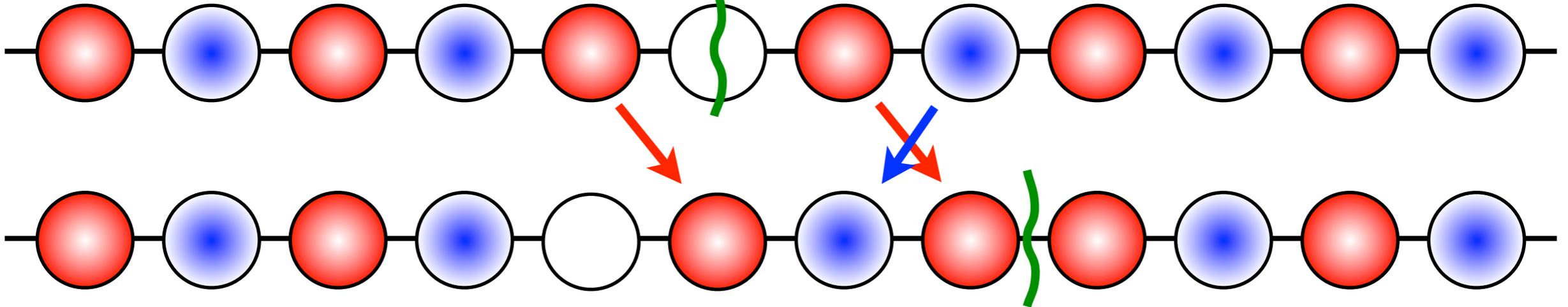
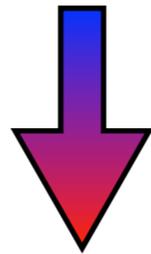


# spinonok és holonok : az elektron spinje és töltése szétválík

alapállapot:

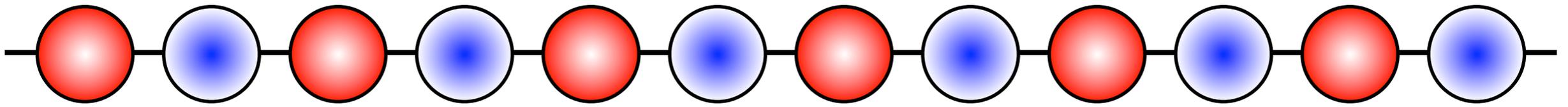


gerjesztés (pl. szóródó foton)

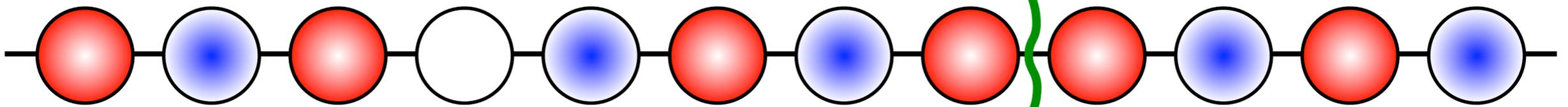
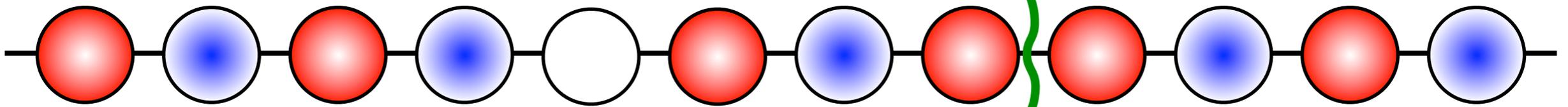
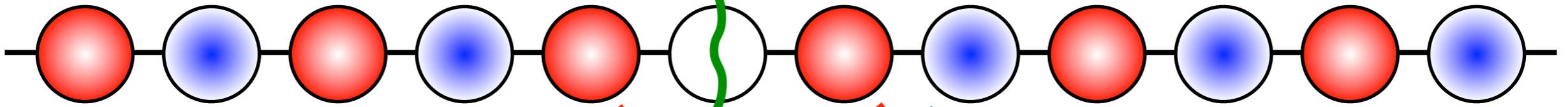
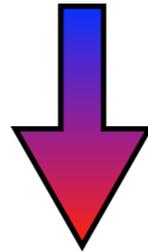


# spinonok és holonok : az elektron spinje és töltése szétválik

alapállapot:



gerjesztés (pl. szóródó foton)



holon  
(töltés)

spinon (1/2 spin)

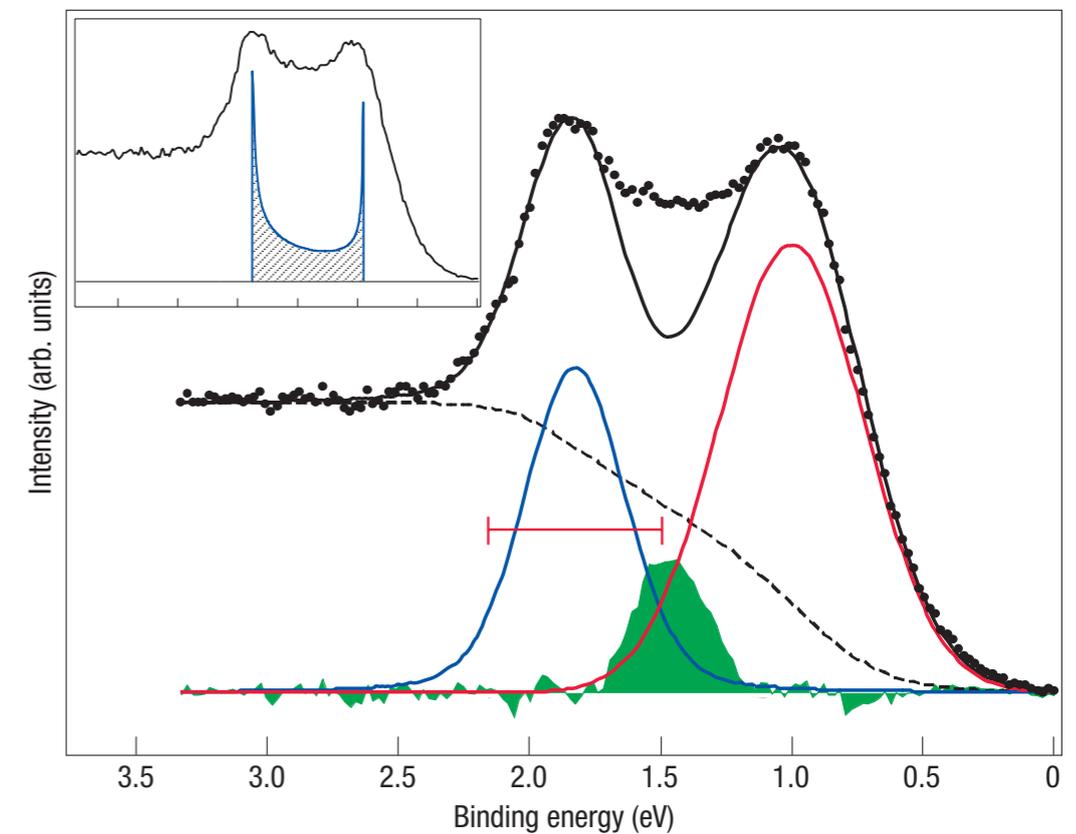
idő

# spin-töltés szétválás SrCuO<sub>2</sub> -ban

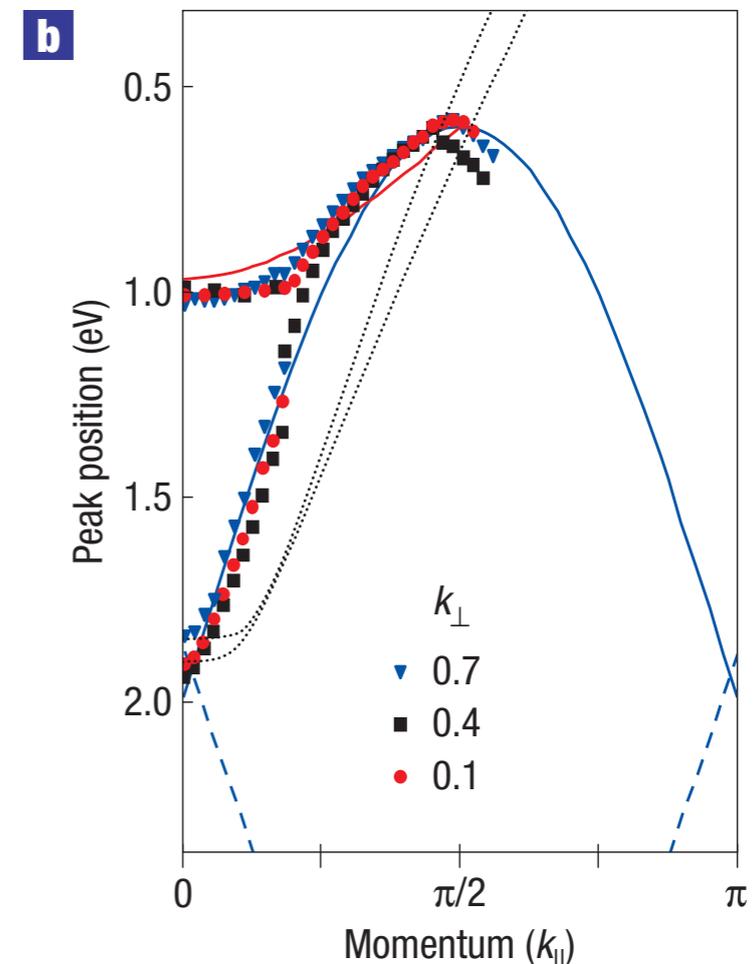
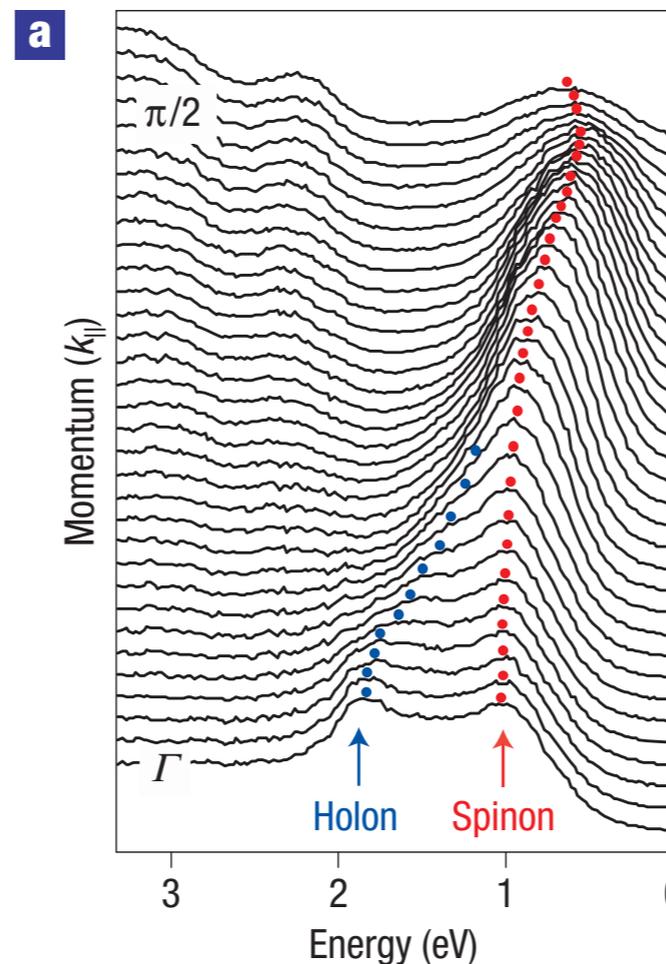
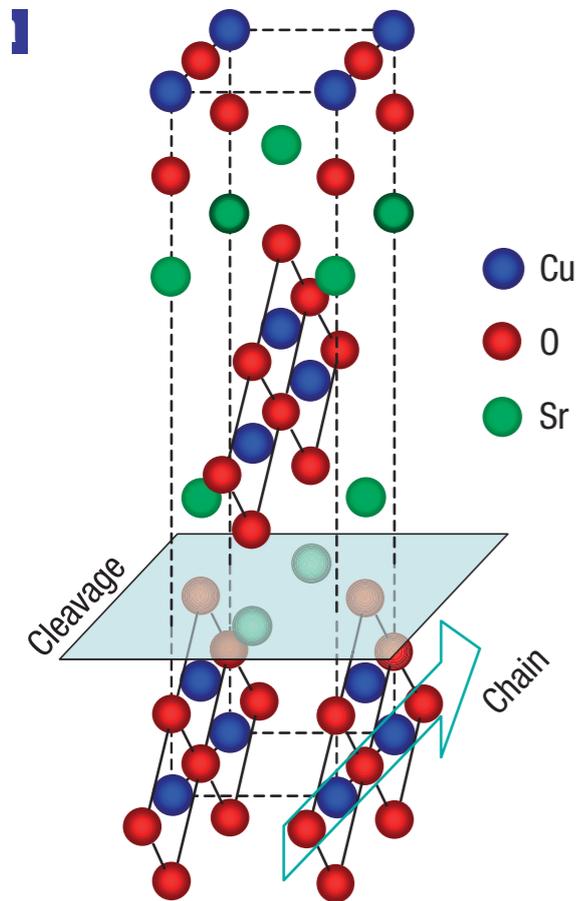
Distinct spinon and holon dispersions in photoemission spectral functions from one-dimensional SrCuO<sub>2</sub>

B. J. KIM<sup>1\*</sup>, H. KOH<sup>2</sup>, E. ROTENBERG<sup>2</sup>, S.-J. OH<sup>1</sup>, H. EISAKI<sup>3</sup>, N. MOTOYAMA<sup>4</sup>, S. UCHIDA<sup>4</sup>, T. TOHYAMA<sup>5</sup>, S. MAEKAWA<sup>5,6</sup>, Z.-X. SHEN<sup>7</sup> AND C. KIM<sup>8\*</sup>

Published online: 21 May 2006; doi:10.1038/nphys316



fotoemissziós spektrum

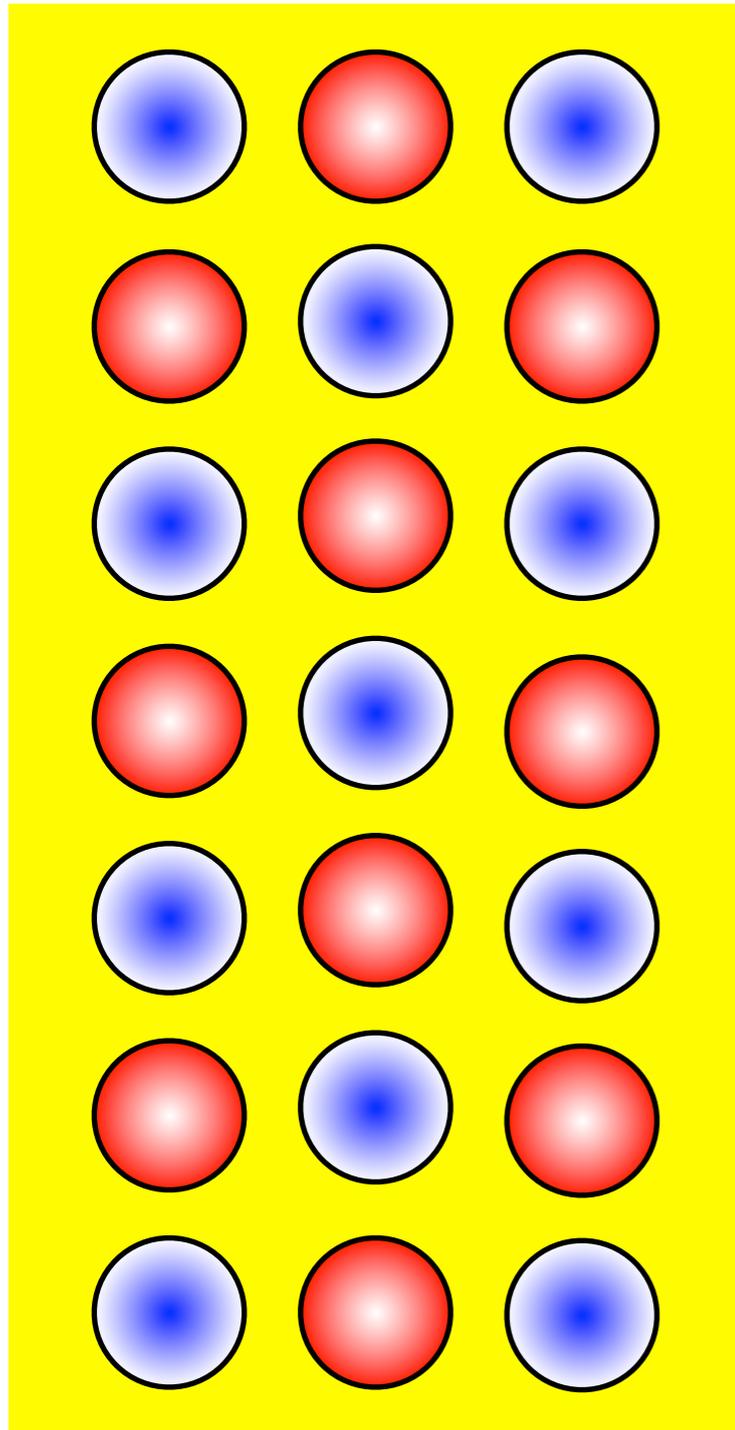


# spinonok bezárása magasabb dimenzióban: magnonok

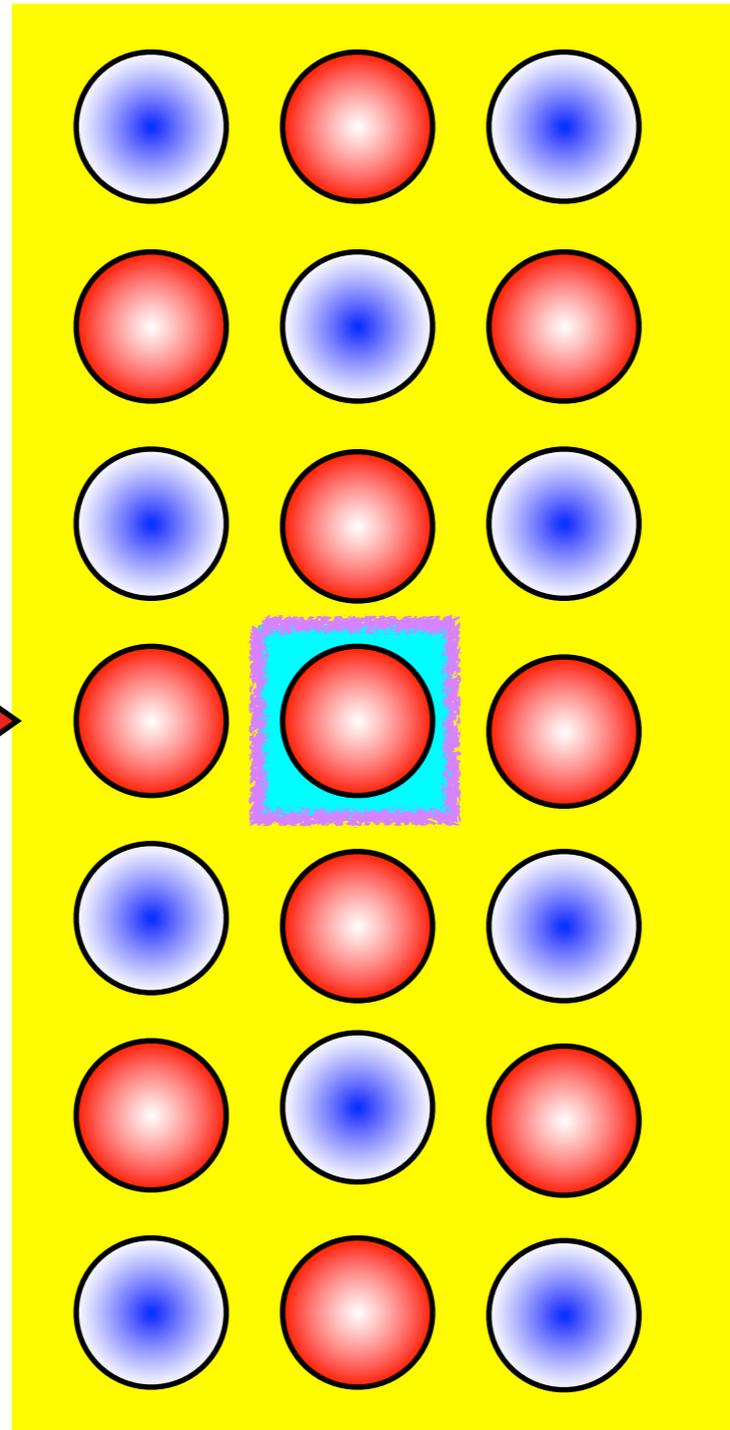
alapállapot:

egy spin megfordult:

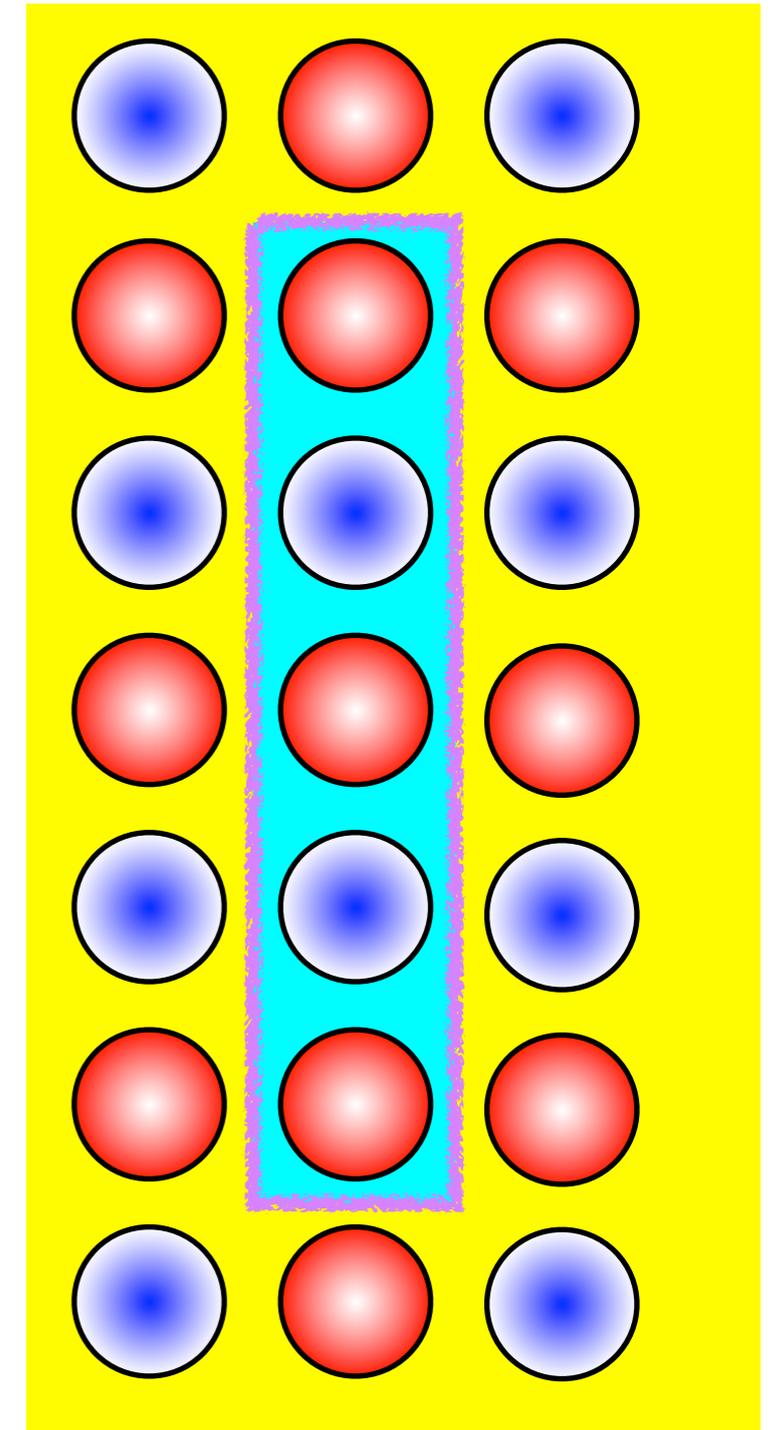
a rossz kötések száma  
nő a mérettel : bezárás



gerjesztés



spinonok mozognak



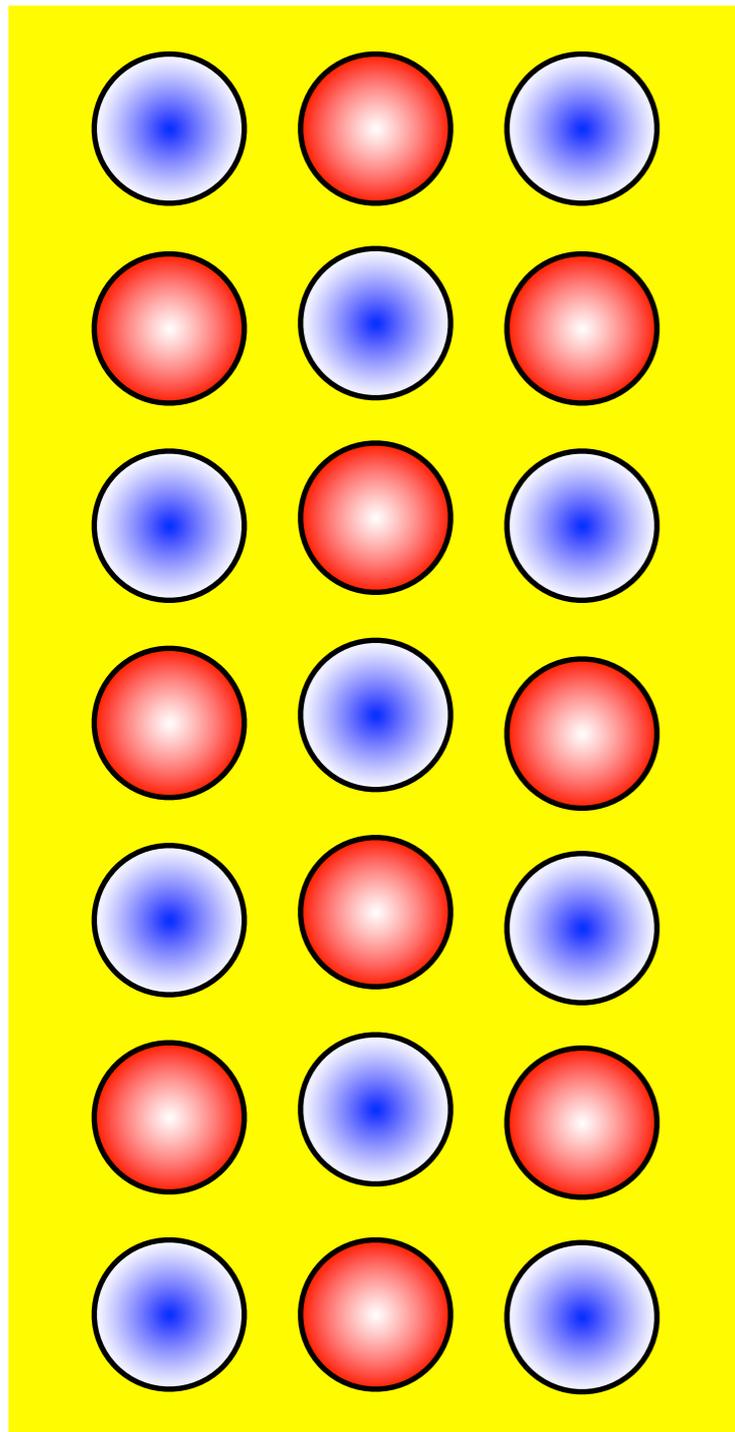
idő →

# spinonok bezárása magasabb dimenzióban: magnonok

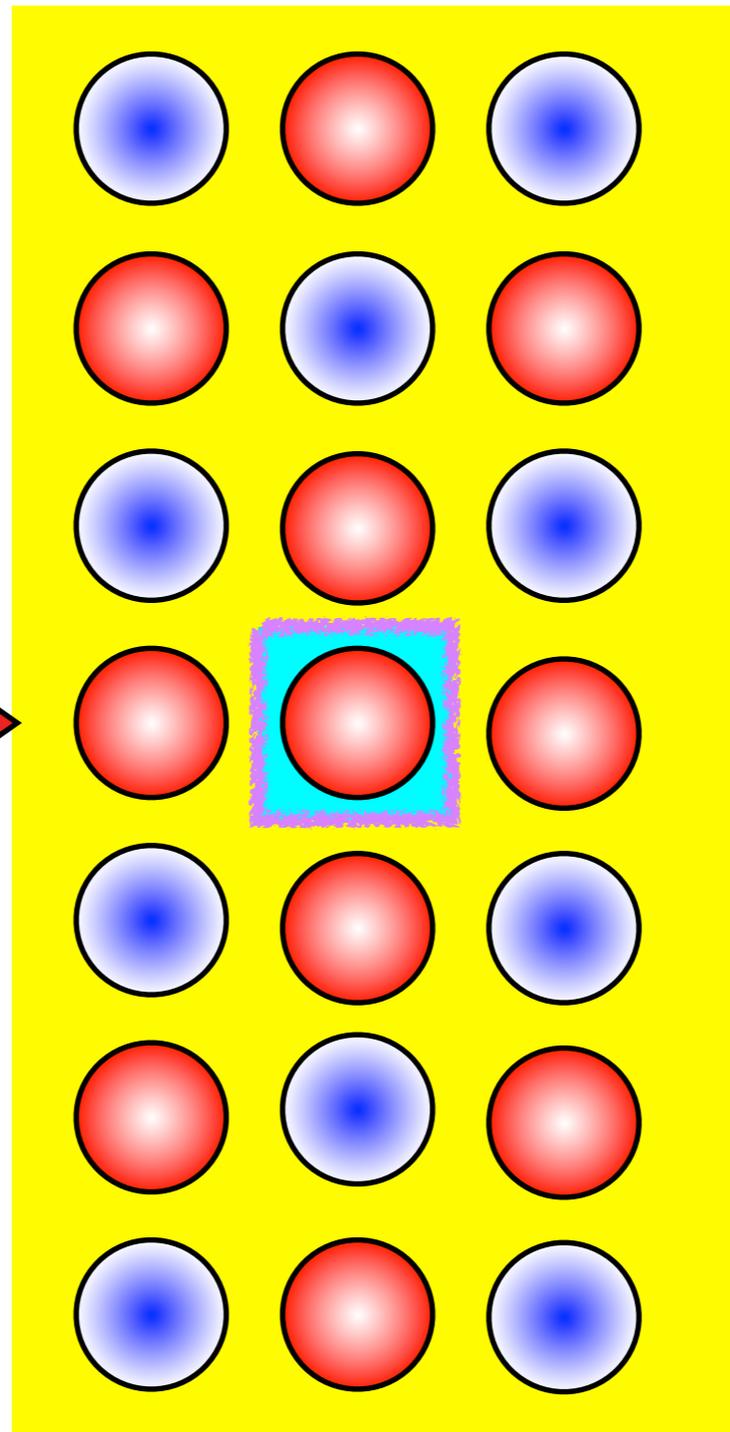
alapállapot:

egy spin megfordult:

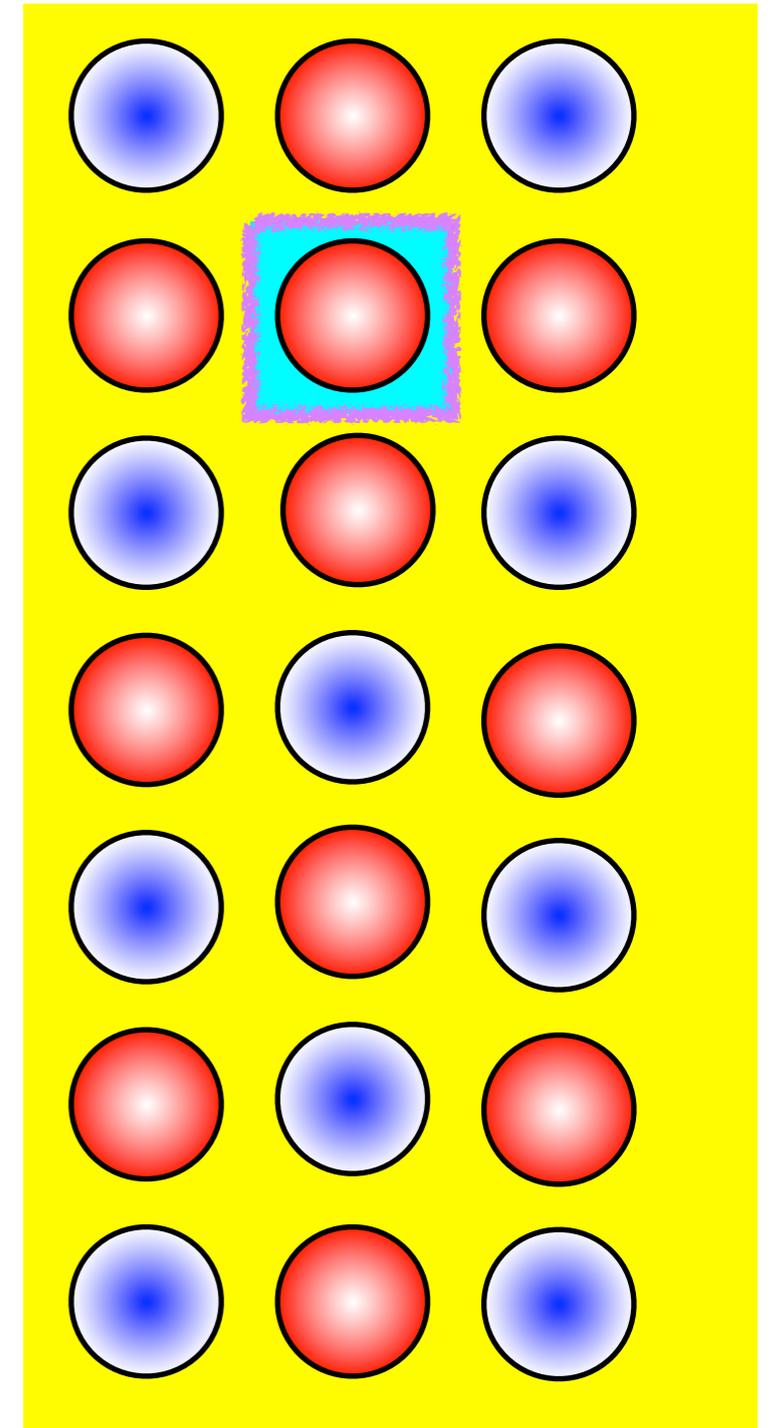
a rossz kötések száma  
állandó marad: magnon



gerjesztés



a magnon mozog

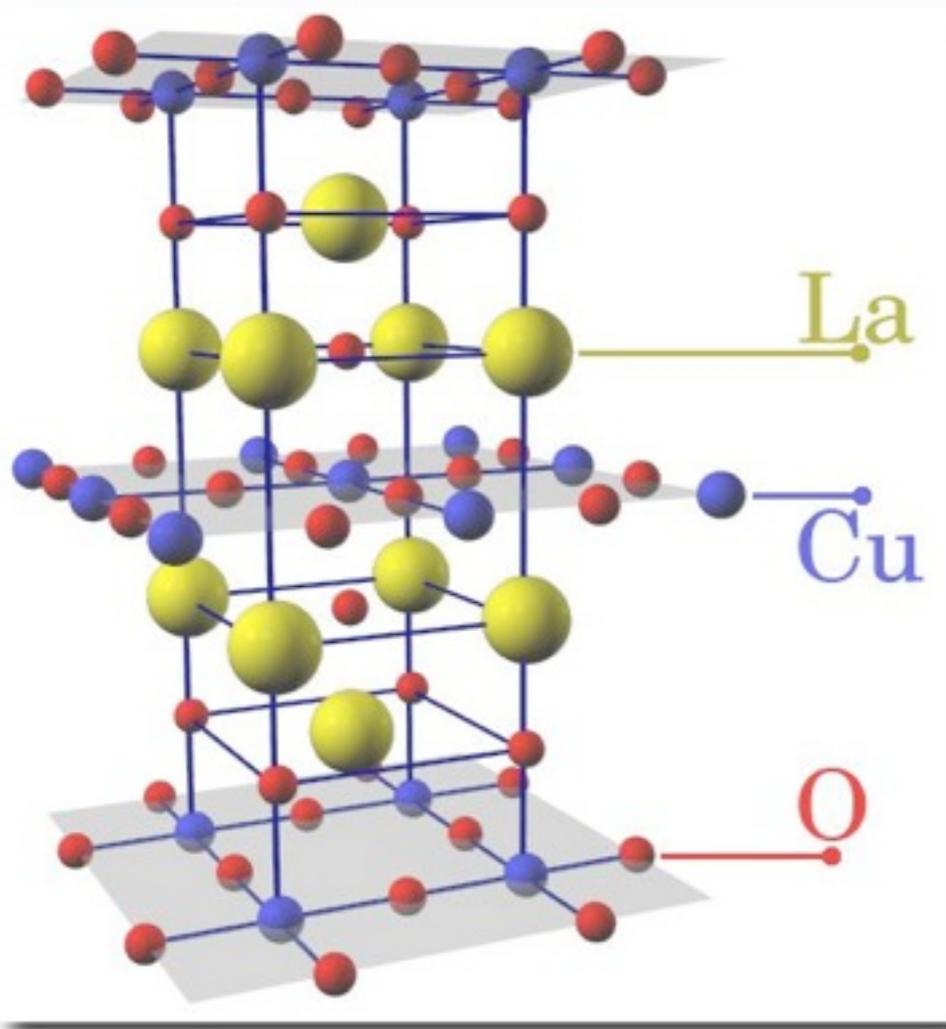


idő

# Anomalous High-Energy Spin Excitations in the High- $T_c$ Superconductor-Parent Antiferromagnet $\text{La}_2\text{CuO}_4$

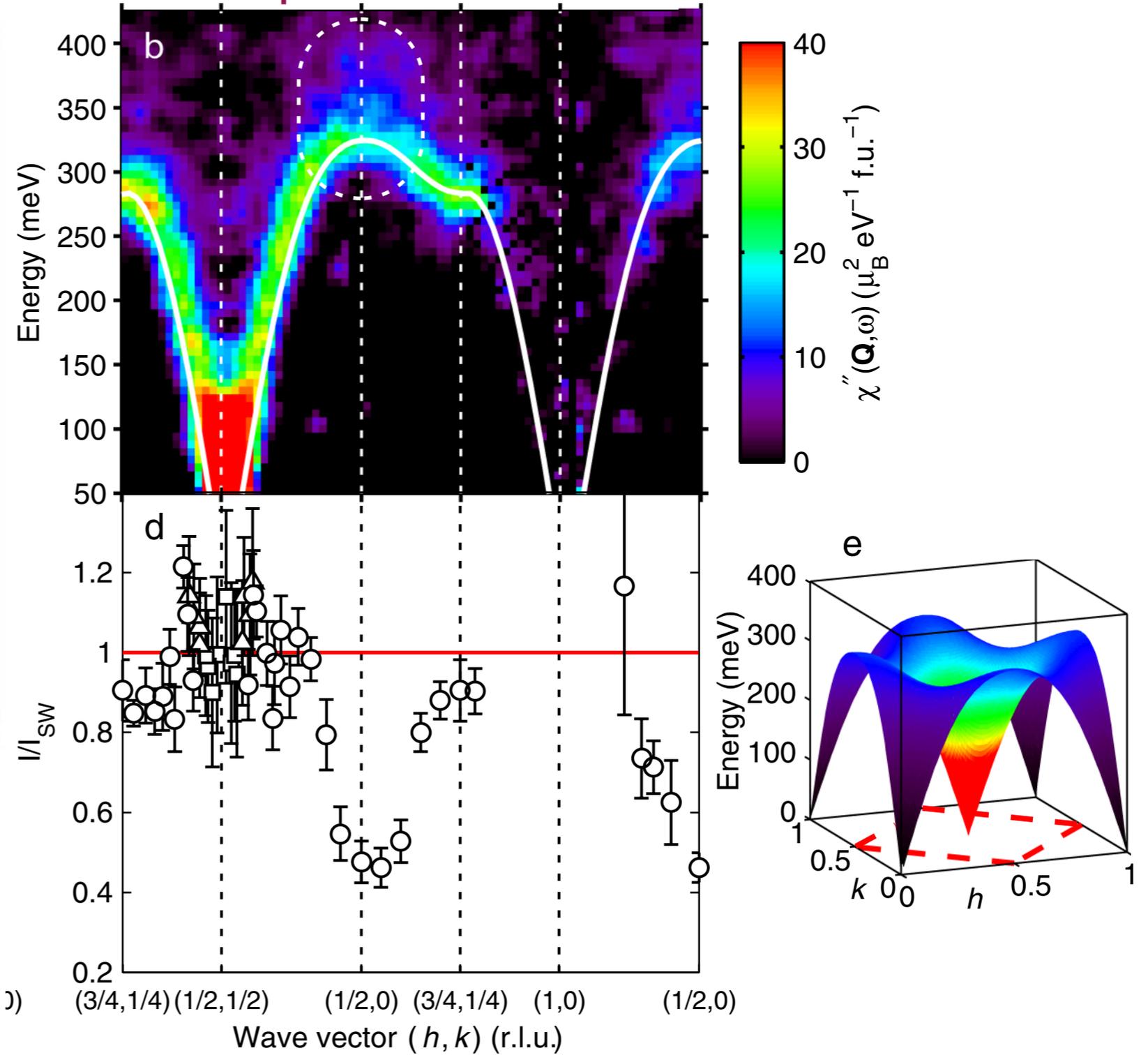
N. S. Headings,<sup>1</sup> S. M. Hayden,<sup>1,\*</sup> R. Coldea,<sup>1,2</sup> and T. G. Perring<sup>3</sup>

impulzus



<http://www.phas.ubc.ca/~berciu/RESEARCH/LaCuO.jpg>

magnon neutronszórás  
spektruma: keskeny ág,  
nincs kontinuum



Tört gerjesztések magasabb dimenziókban ?

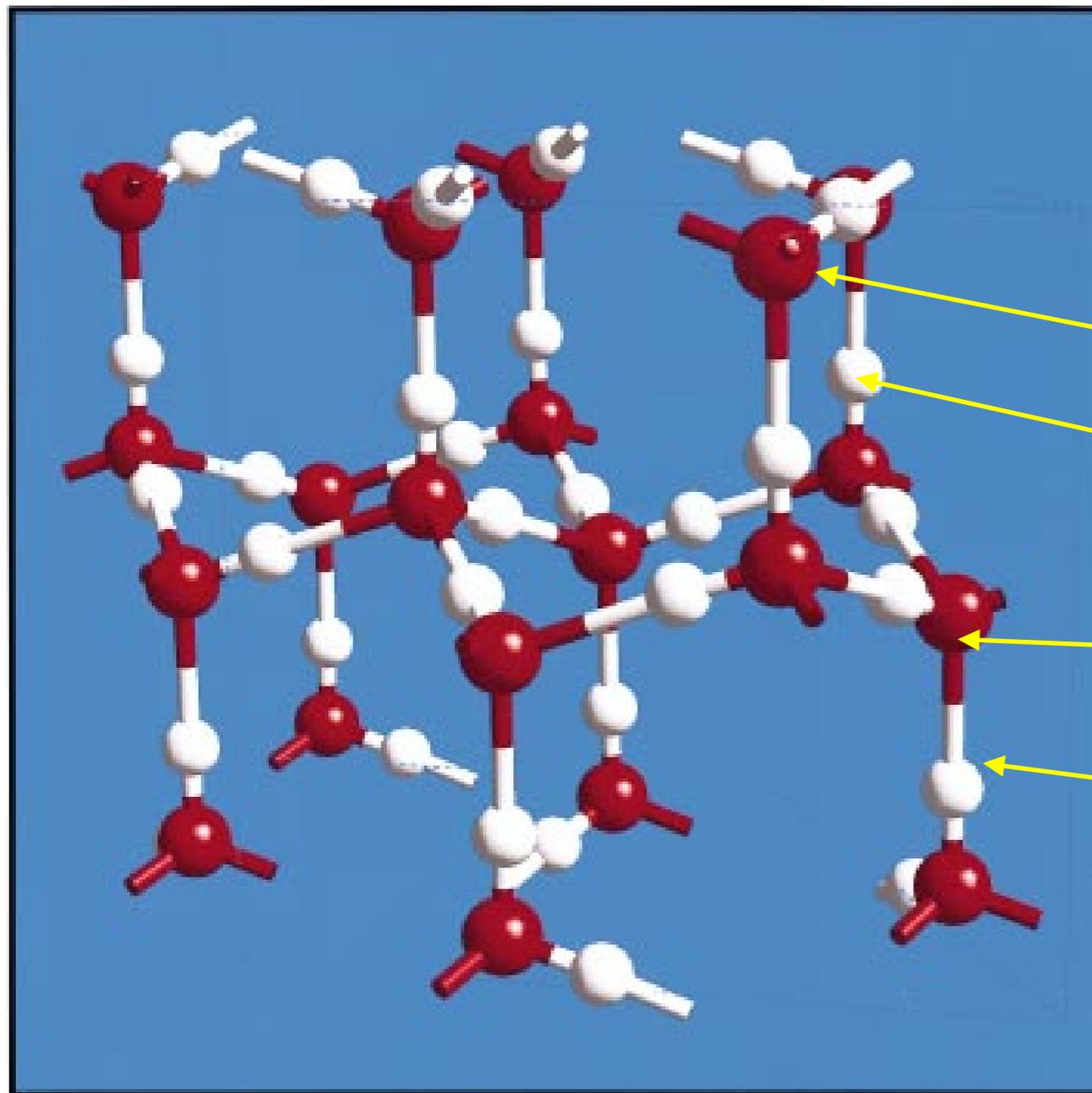
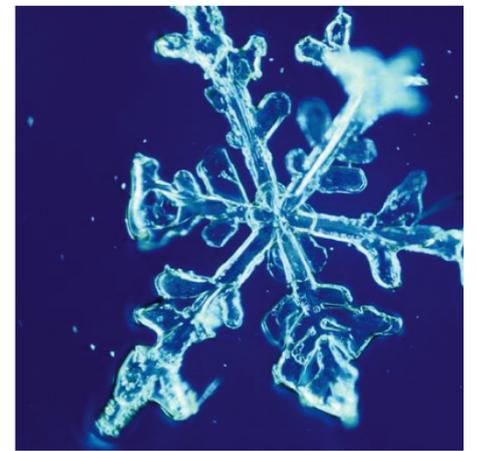
Bezárás problémája: rendezett háttéren a távolsággal (határfelülettel) nő az energia.

Mi történik rendezetlen háttéren ?

Létezhet-e rendezetlen háttér ?

## Covalency of the Hydrogen Bond in Ice: A Direct X-Ray Measurement

E. D. Isaacs,<sup>1</sup> A. Shukla,<sup>2</sup> P. M. Platzman,<sup>1</sup> D. R. Hamann,<sup>1</sup> B. Barbiellini,<sup>1</sup> and C. A. Tulk<sup>3</sup>



lokális töltéssemlegesség  $\Rightarrow$   
a négyből csak két  $H^+$  ion van közel  
az  $O^{2-}$  -hoz.

$O^{2-}$

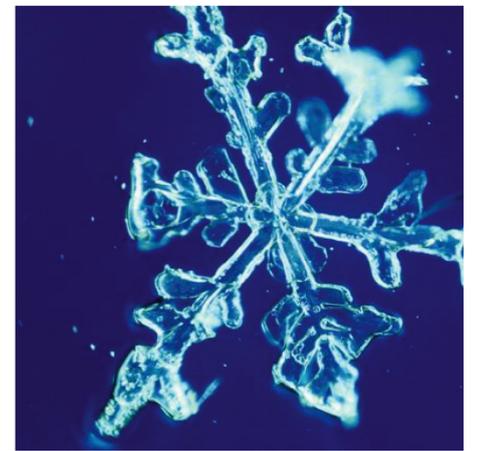
$H^+$

hosszú O-H H-kötés

rövid O-H kovalens kötés

FIG. 1(color). Crystal structure of Bernal-Fowler ice *Ih*. Red (white) balls give the positions of the oxygen (hydrogen). The crystallographic *c*-axis is in the vertical direction.

# A jég szabály és az állapotok száma



Bernal-Fowler szabály (1933):

a lokális töltéssemlegesség miatt  
a négyből csak két  $H^+$  ion van közel az  $O^{2-}$  ionhoz.

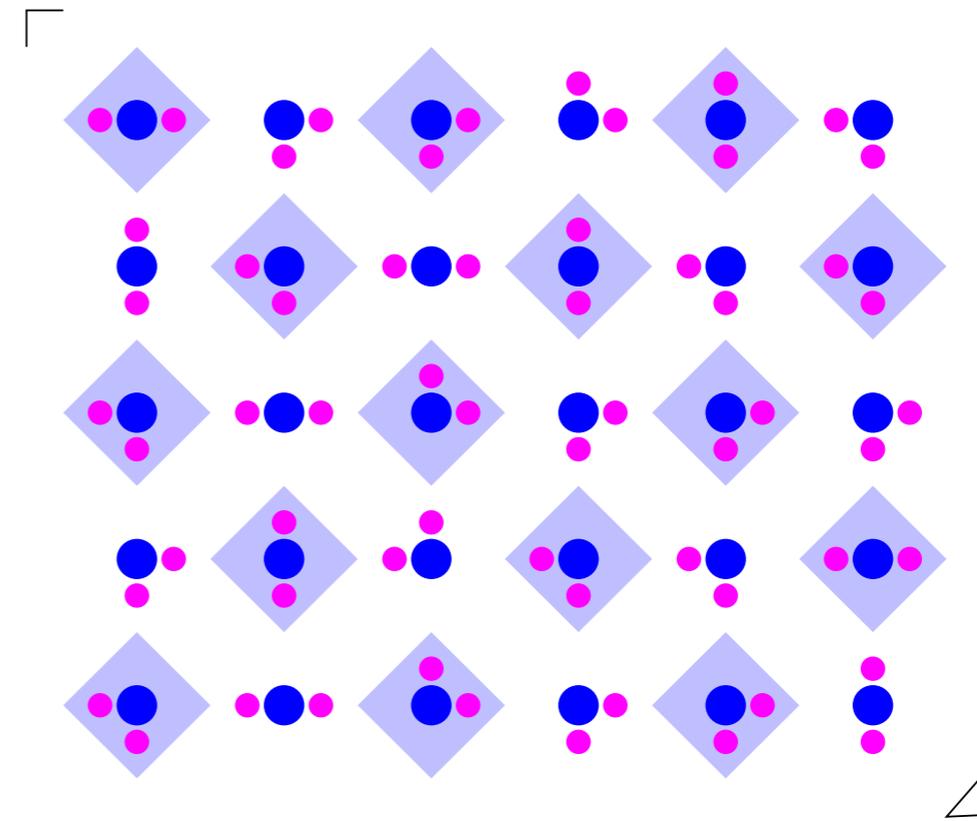
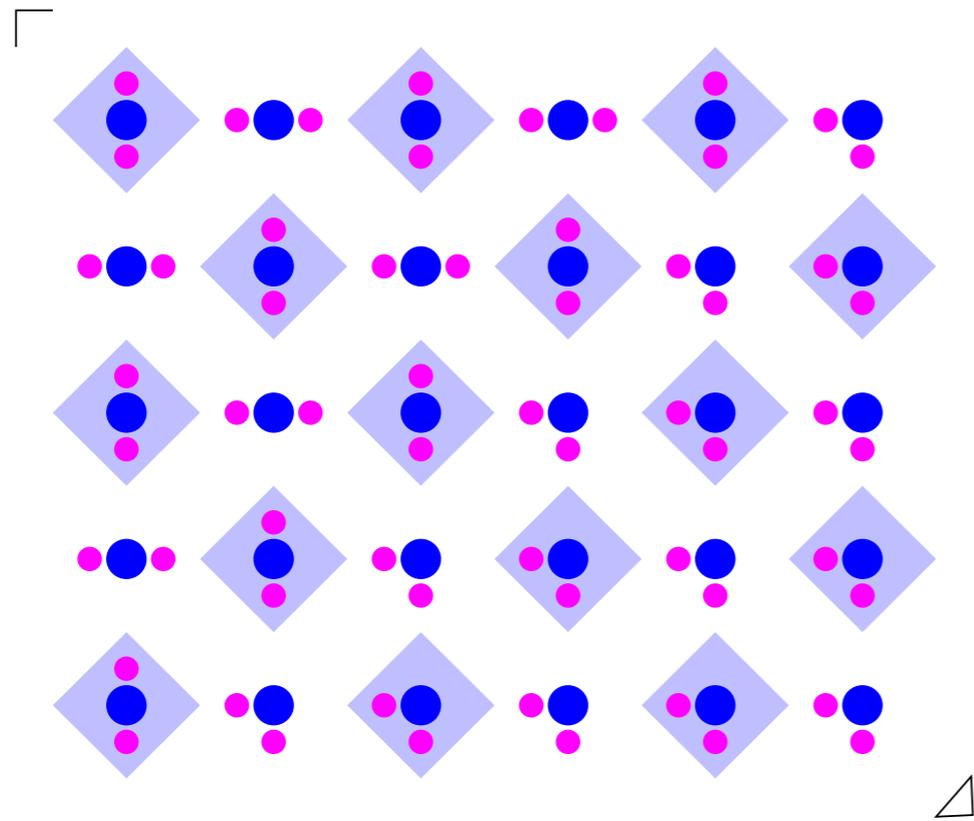
Pauling becslés (1935):

A lehetséges állapotok száma  
exponenciálisan nő az oxigén ionok  
számával

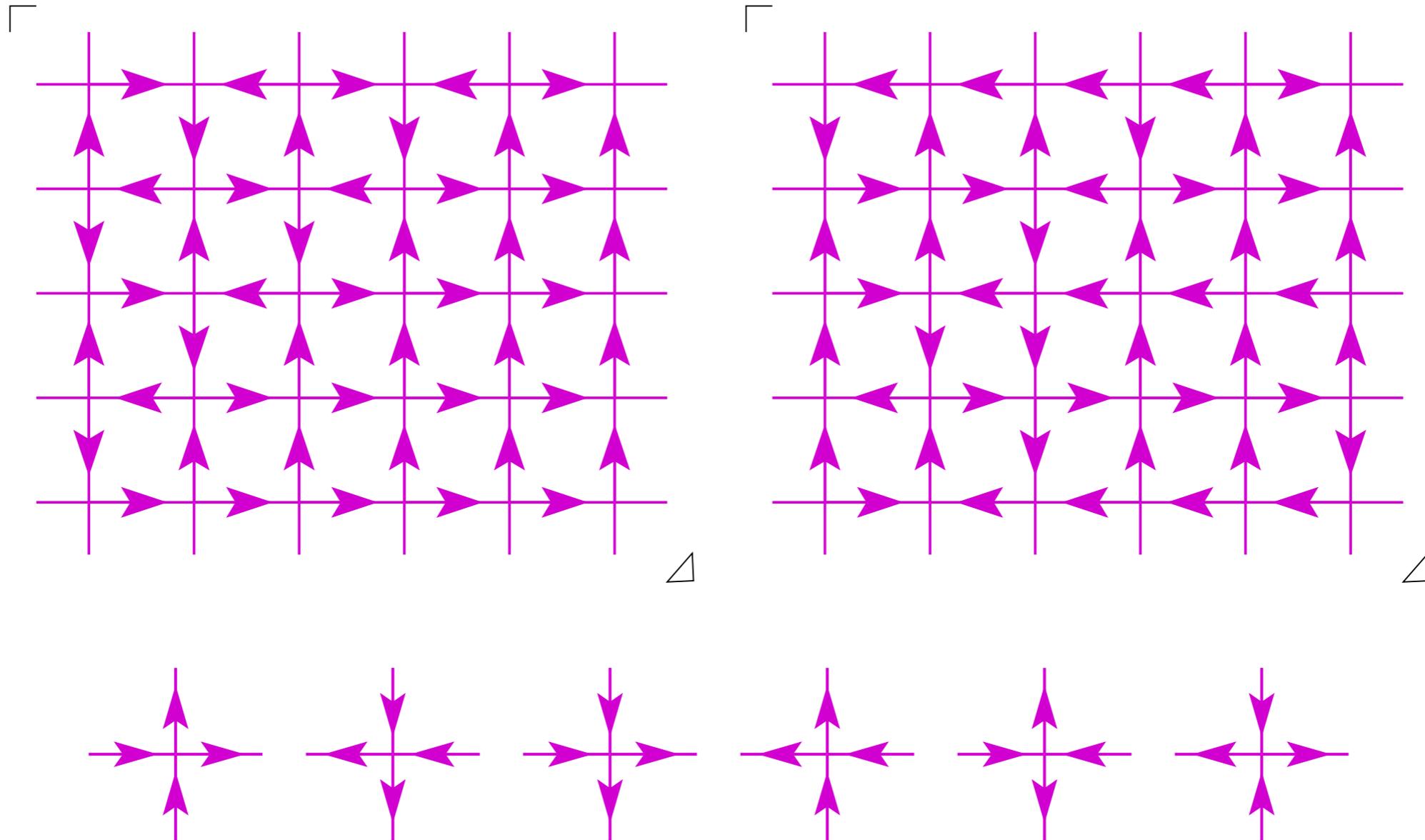
$$Z \approx 1.5^{N_{\text{Oxygen}}}$$

10,	57.665
20,	3325.26
30,	191751.
40,	$1.10573 \times 10^7$
50,	$6.37622 \times 10^8$
100,	$4.06561 \times 10^{17}$

# két dimenzióban - jég és 6 vertex modell



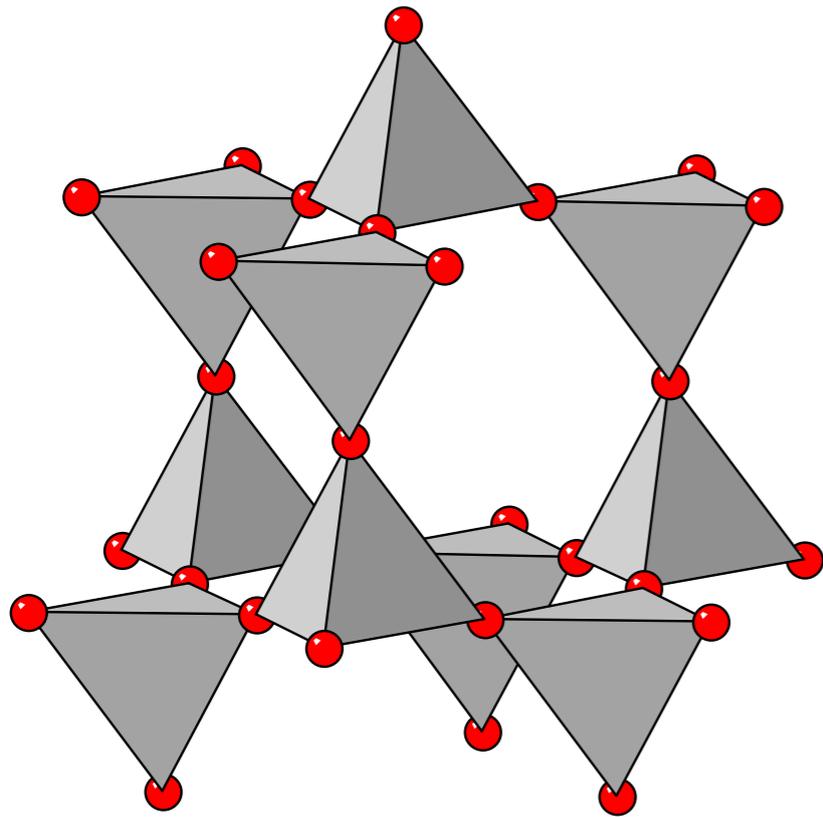
# két dimenzióban - jég és 6 vertex modell



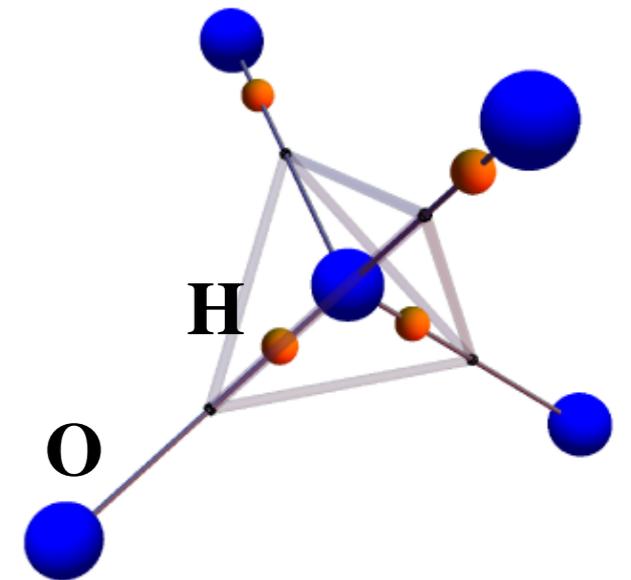
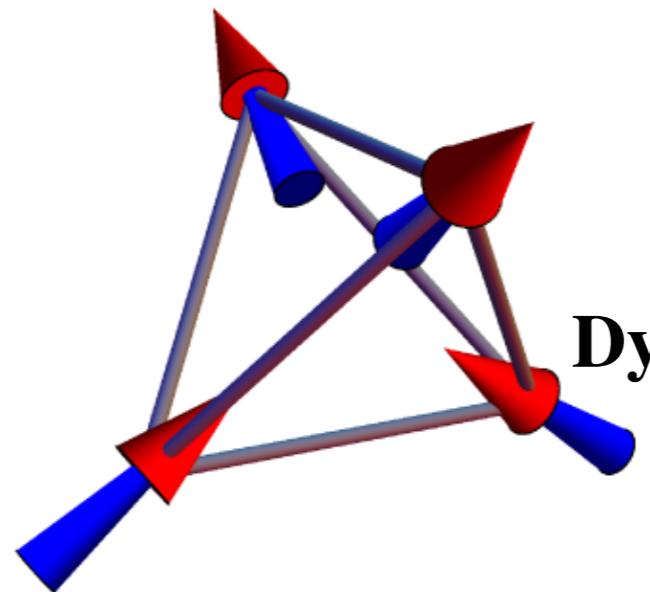
6-vertex model : a jég kétdimenziós hasonmása, egzaktul megoldható (Baxter, Lieb)

Lieb Bethe-Ansatz megoldása : 
$$Z = \left(\frac{4}{3}\right)^{3N/2} \approx 1.5396^N$$

# Spin jég: $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ , $\text{Ho}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$



**Dy, Ho** : ritkaföldfém  
piroklór rácst alkot



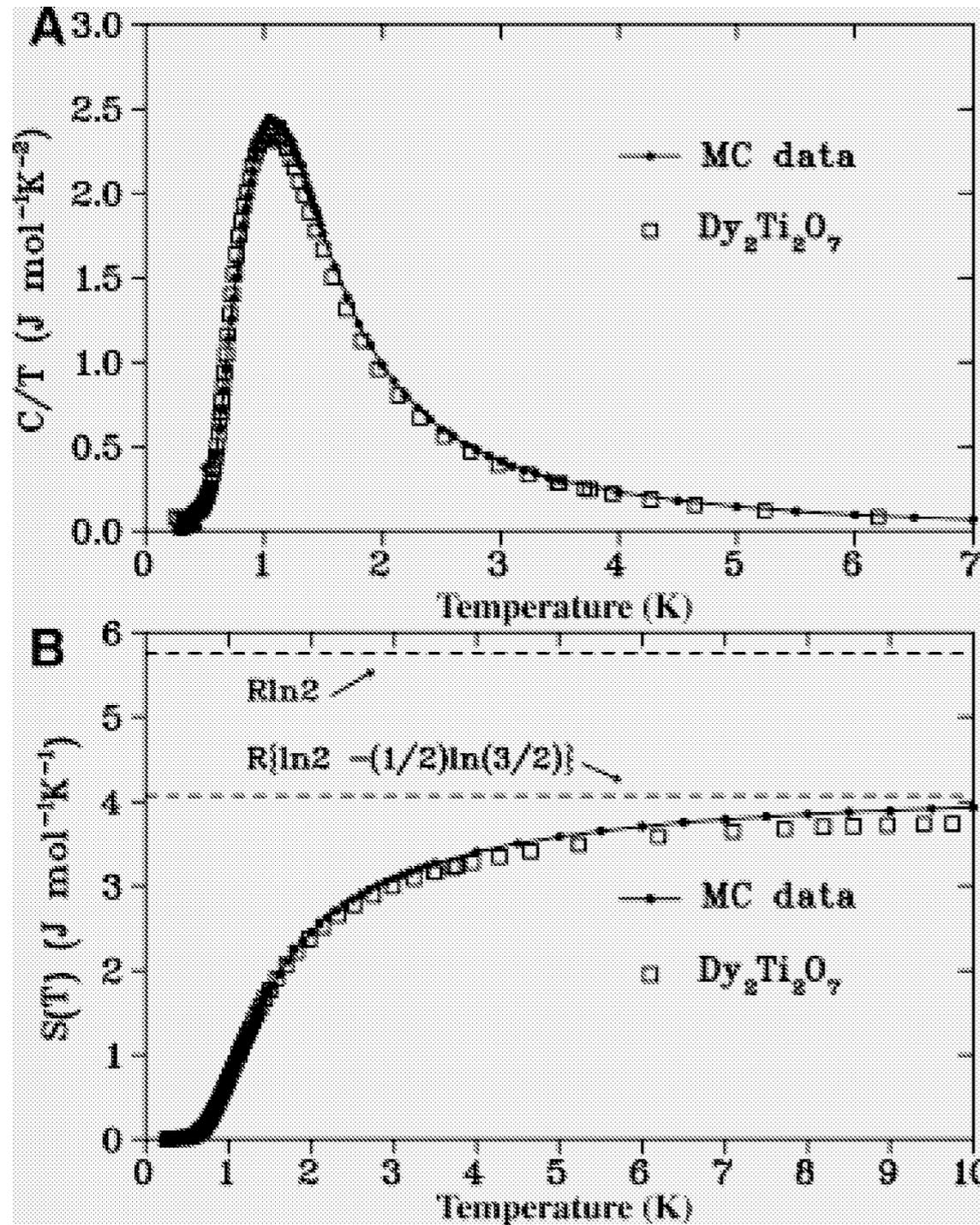
anizotróp “ferromágnes”  
a spinek a kifelé mutató tengellyel  
párhuzamosak

# Spin jég entrópia

$\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ : anizotróp “ferromágnes”  
a spinek a kifelé mutató tengellyel  
párhuzamosak



2 ki-2 be spin  
konfiguráció



**Fig. 3.** (A) Specific-heat and (B) entropy data for  $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$  (29) compared with Monte Carlo simulation results for the dipolar spin ice model (34), with  $J_{\text{nn}} = -1.24$  K,  $D_{\text{nn}} = 2.35$  K and system size of 1024 spins.

$2^N$  állapot

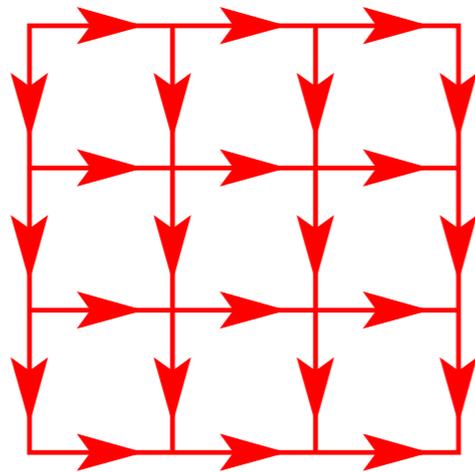
spin entrópia

hiányzó (jég) entropia

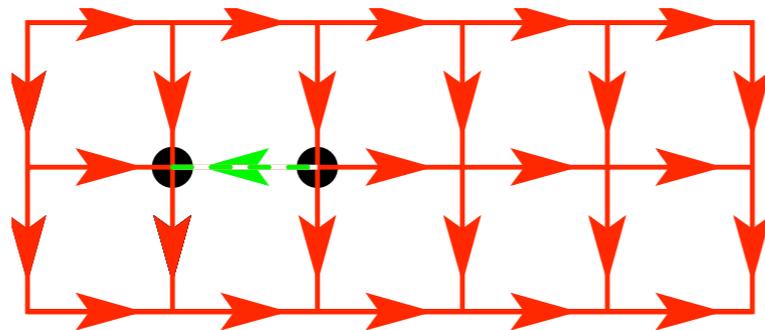
$S=0$

Bramwell & Gingras, Science **294**, 1495 (2001)

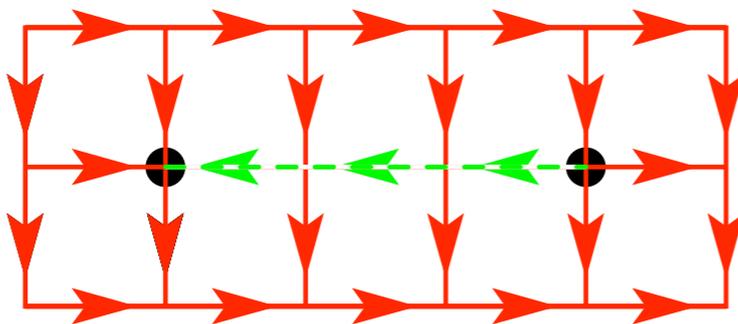
# Mágneses monopólus gerjesztések



jégállapot: 2-be 2-ki



megfordítunk egy nyilat (spint):  
két rácshelyen sérül a jég szabály

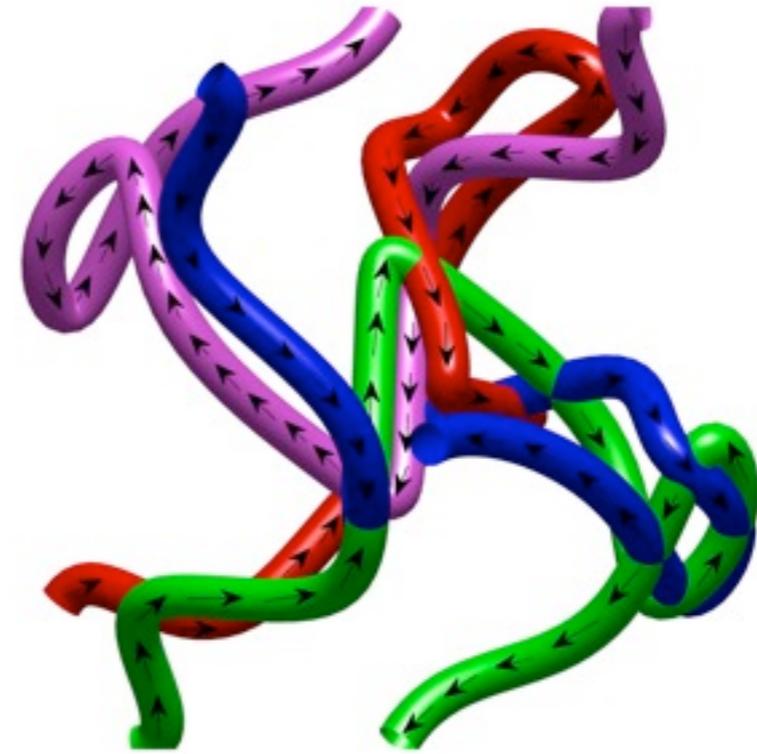
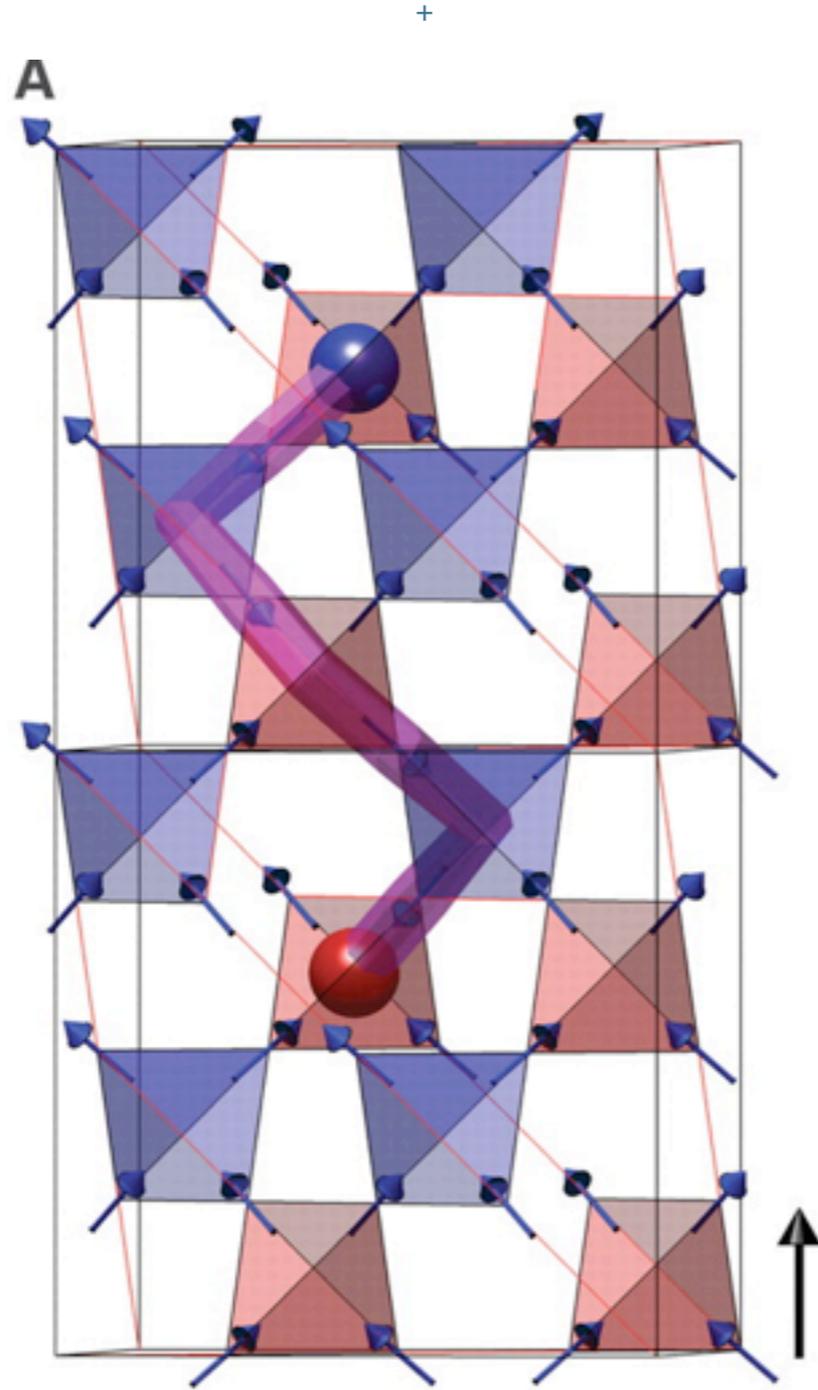


további spineket forgatva :  
továbbra is csak két rácshelyen sérül  
a jég szabály

nem zártuk be a monopólusokat,  
szabadon mozoghatnak !

## Dirac Strings and Magnetic Monopoles in the Spin Ice $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$

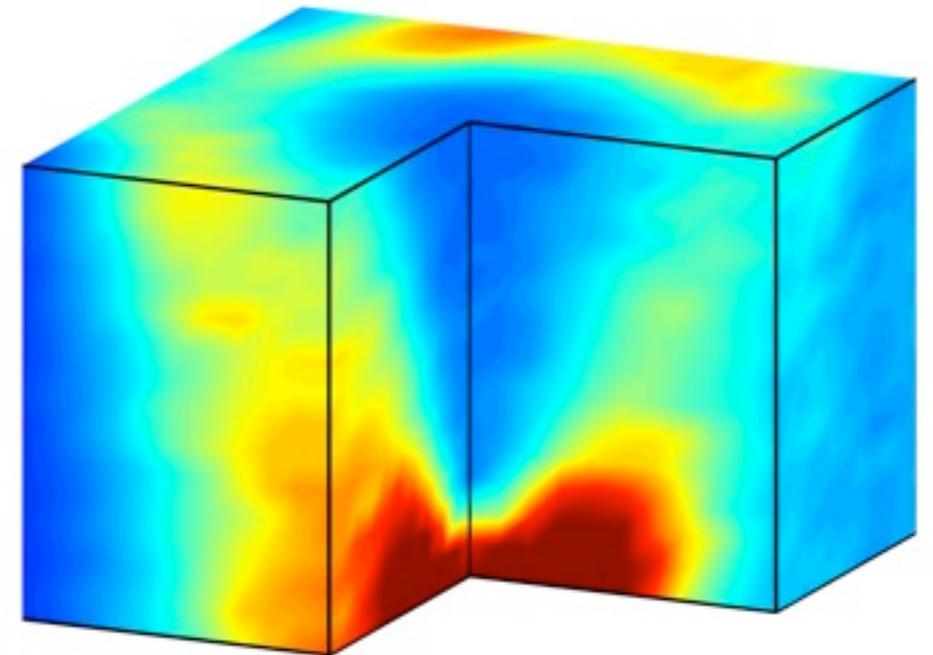
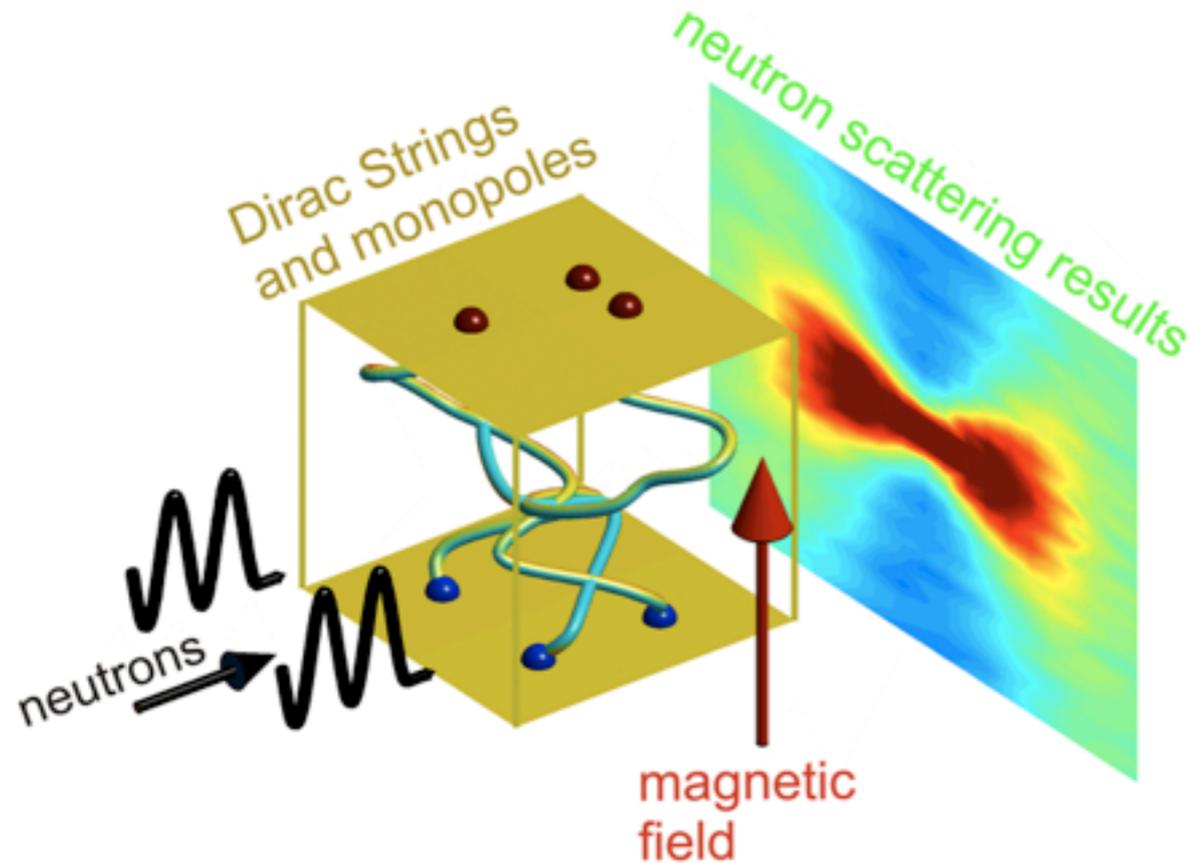
D. J. P. Morris, D. A. Tennant, S. A. Grigera, B. Klemke, C. Castelnovo, R. Moessner, C. Czternasty, M. Meissner, K. C. Rule, J.-U. Hoffmann, K. Kiefer, S. Gerischer, D. Slobinsky, R. S. Perry



## Dirac Strings and Magnetic Monopoles in the Spin Ice $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$

D. J. P. Morris, D. A. Tennant, S. A. Grigera, B. Klemke, C. Castelnovo, R. Moessner, C. Czternasty, M. Meissner, K. C. Rule, J.-U. Hoffmann, K. Kiefer, S. Gerischer, D. Slobinsky, R. S. Perry

Sources of magnetic fields—magnetic monopoles—have so far proven elusive as elementary particles. Condensed-matter physicists have recently proposed several scenarios of emergent quasiparticles resembling monopoles. A particularly simple proposition pertains to spin ice on the highly frustrated pyrochlore lattice. The spin-ice state is argued to be well described by networks of aligned dipoles resembling solenoidal tubes—classical, and observable, versions of a Dirac string. Where these tubes end, the resulting defects look like magnetic monopoles. We demonstrated, by diffuse neutron scattering, the presence of such strings in the spin ice dysprosium titanate ( $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ ). This is achieved by applying a symmetry-breaking magnetic field with which we can manipulate the density and orientation of the strings. In turn, heat capacity is described by a gas of magnetic monopoles interacting via a magnetic Coulomb interaction.



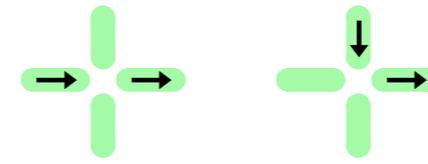
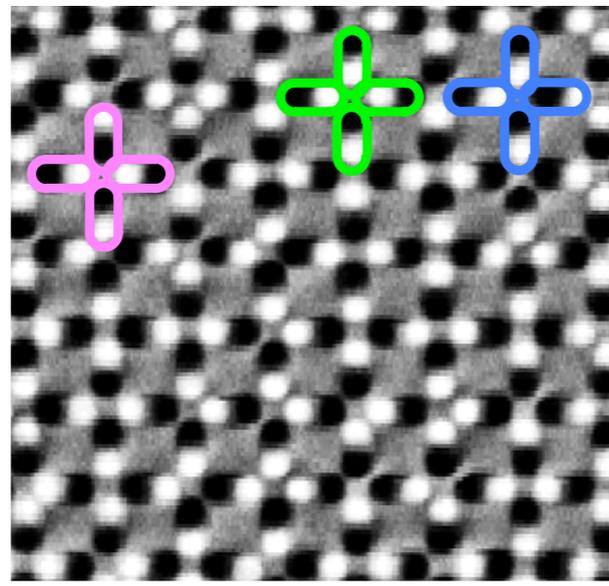
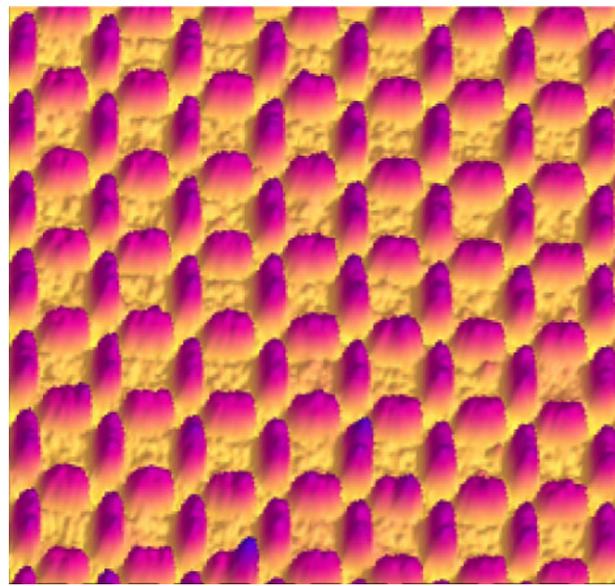
# Mesterséges spin jég



*Nature* **439**, 303-306 (19 January 2006) | doi:10.1038/nature04447; Received 16 August 2005; Accepted 16 November 2005

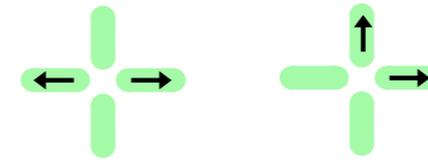
Artificial 'spin ice' in a geometrically frustrated lattice of nanoscale ferromagnetic islands

R. F. Wang<sup>1</sup>, C. Nisoli<sup>1</sup>, R. S. Freitas<sup>1</sup>, J. Li<sup>1</sup>, W. McConville<sup>1</sup>, B. J. Cooley<sup>1</sup>, M. S. Lund<sup>2</sup>, N. Samarth<sup>1</sup>, C. Leighton<sup>2</sup>, V. H. Crespi<sup>1</sup> & P. Schiffer<sup>1</sup>



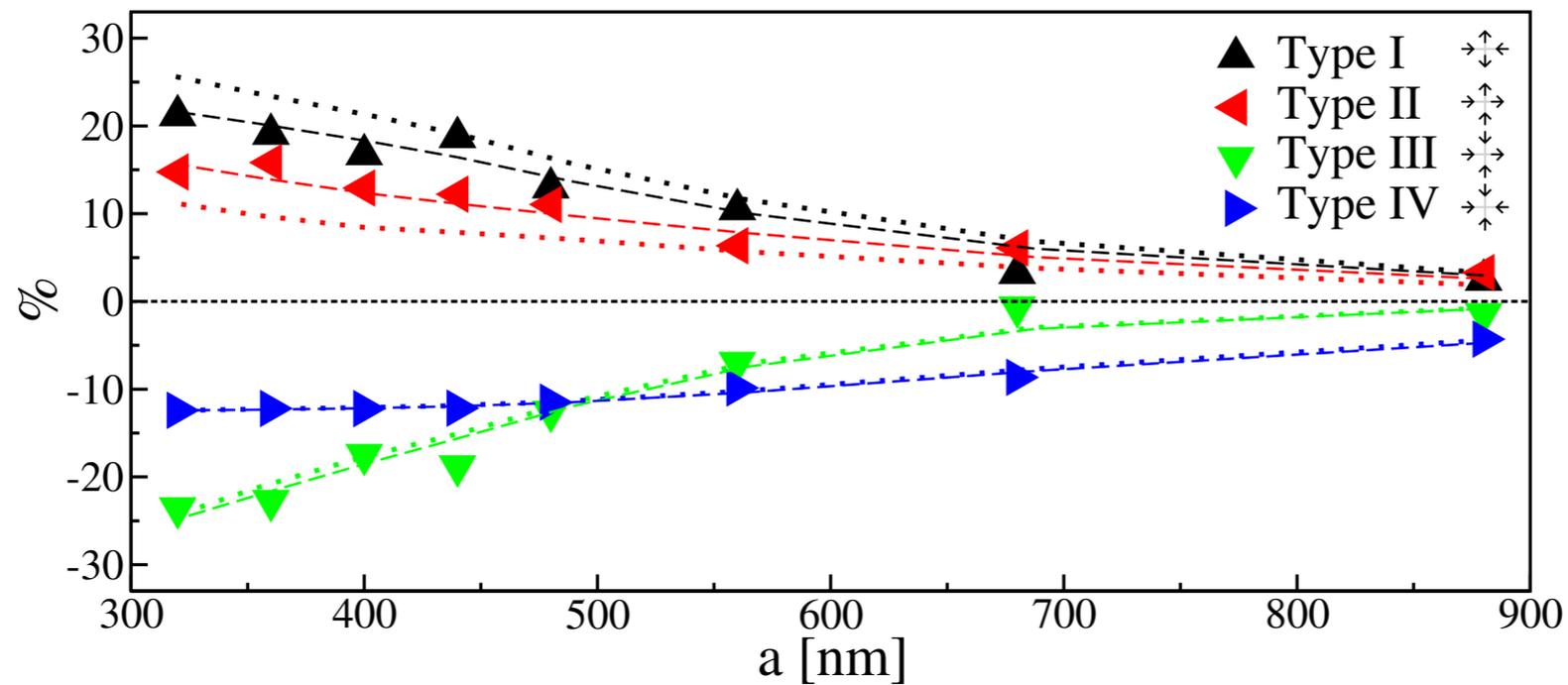
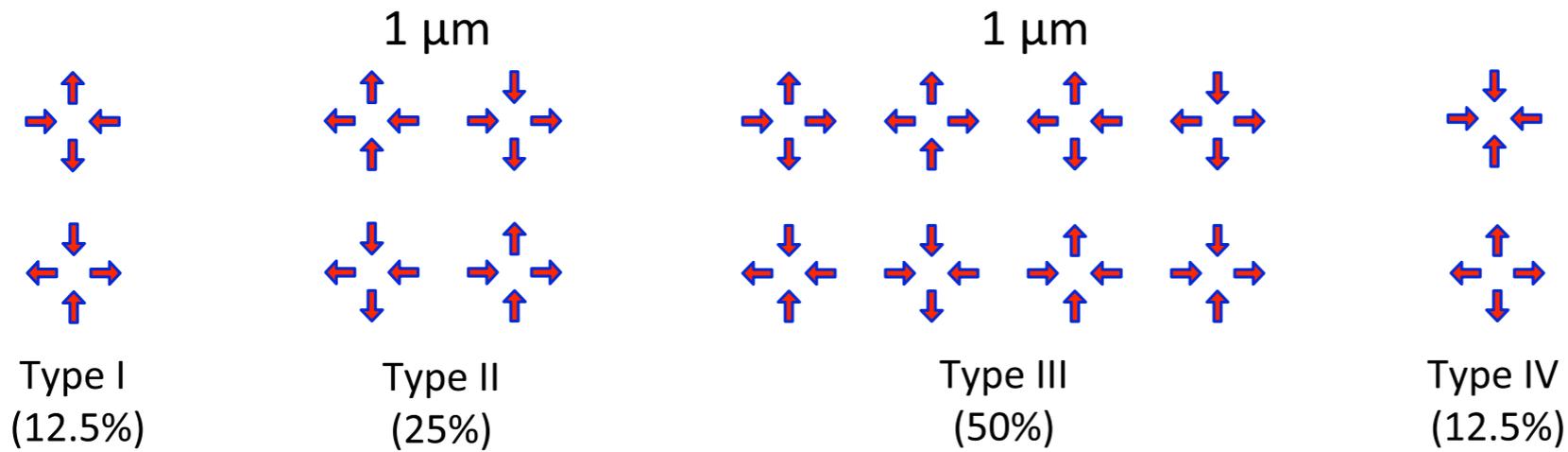
Favorable Pair Alignments

kedvező beállítás

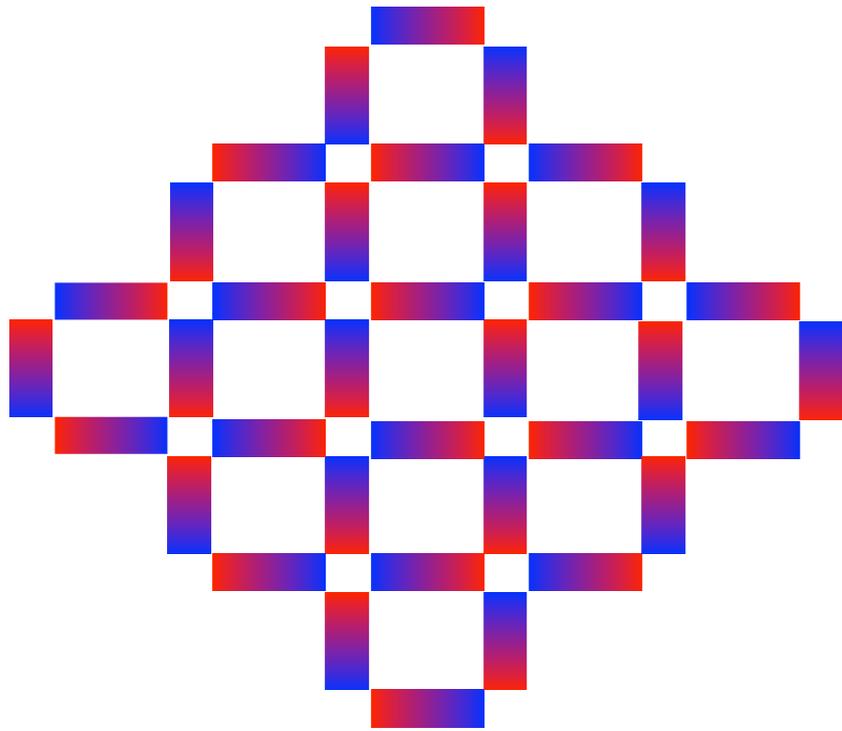


Unfavorable Pair Alignments

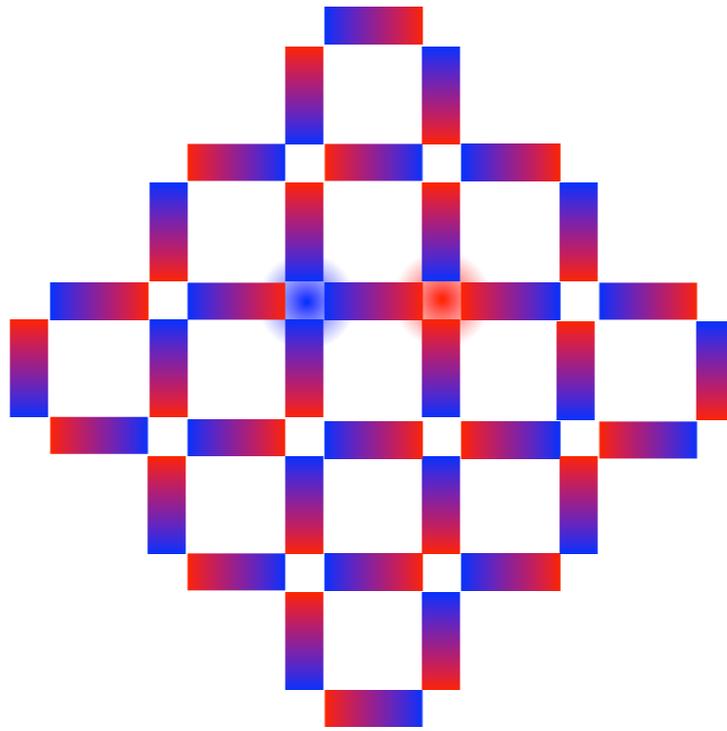
kedvezőtlen beállítás



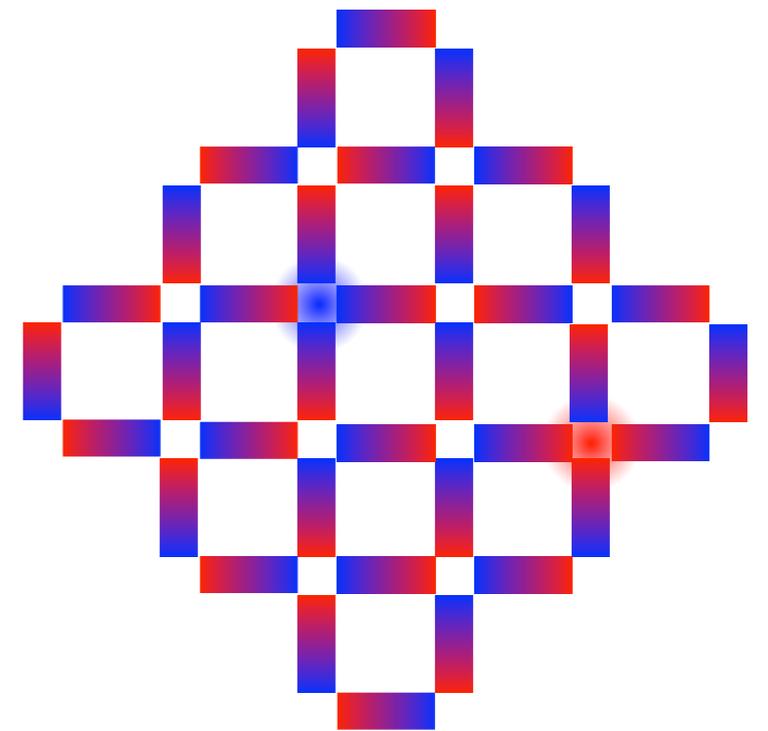
# Mesterséges spinjég - bemutatott kísérlet



jégállapot: 2-be 2-ki



két monopólust kapunk,  
ha megforgatunk egy  
mágnest



A monopólusok  
eltávolódnak egymástól,  
ha további mágneseket  
forgatunk meg.

**Köszönöm a figyelmet !**