

Amikor a sok felbontja az egészet

Penc Karlo



MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont,
Szilárdtestfizikai és Optikai Intézet

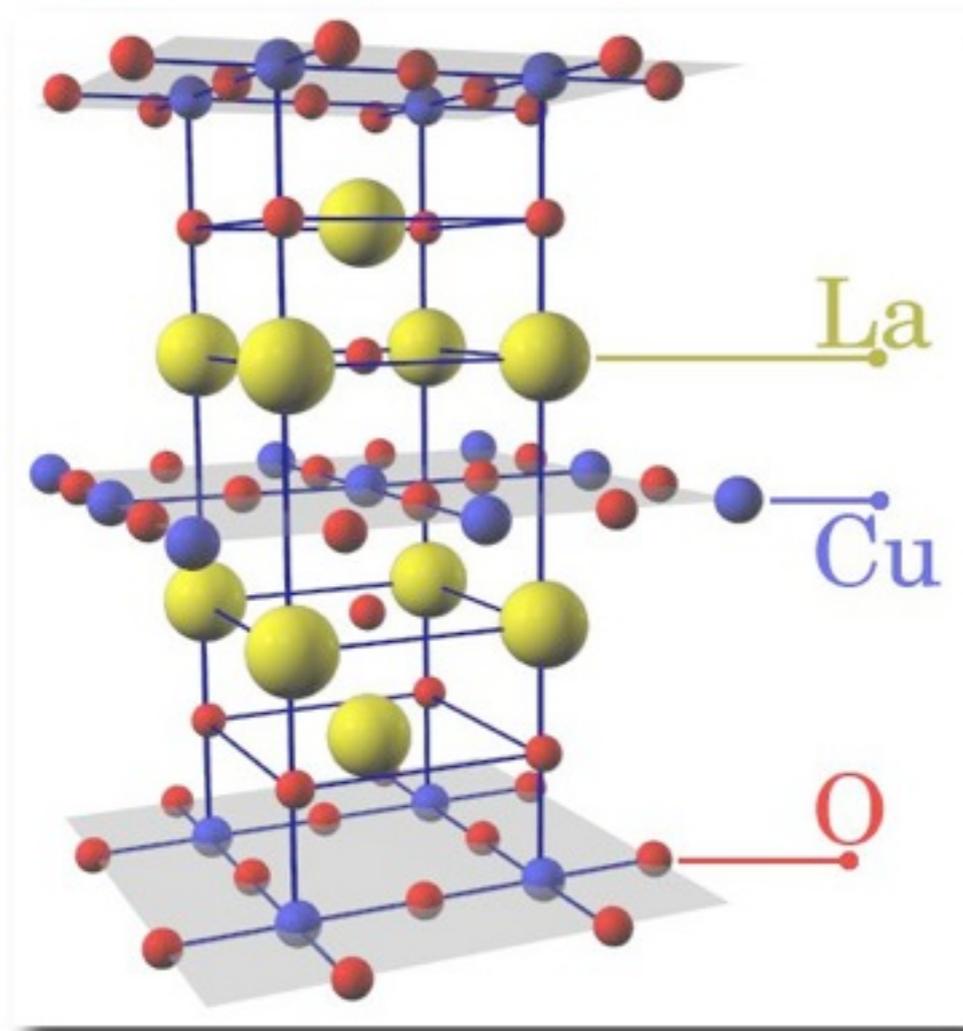
Elemi részecskék

- 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...

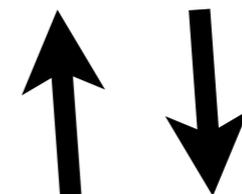
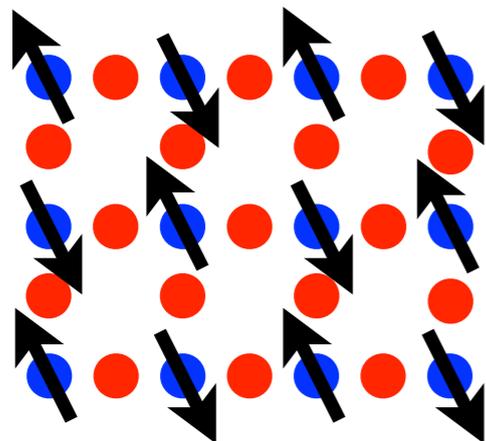
More is different - A több az más

- 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



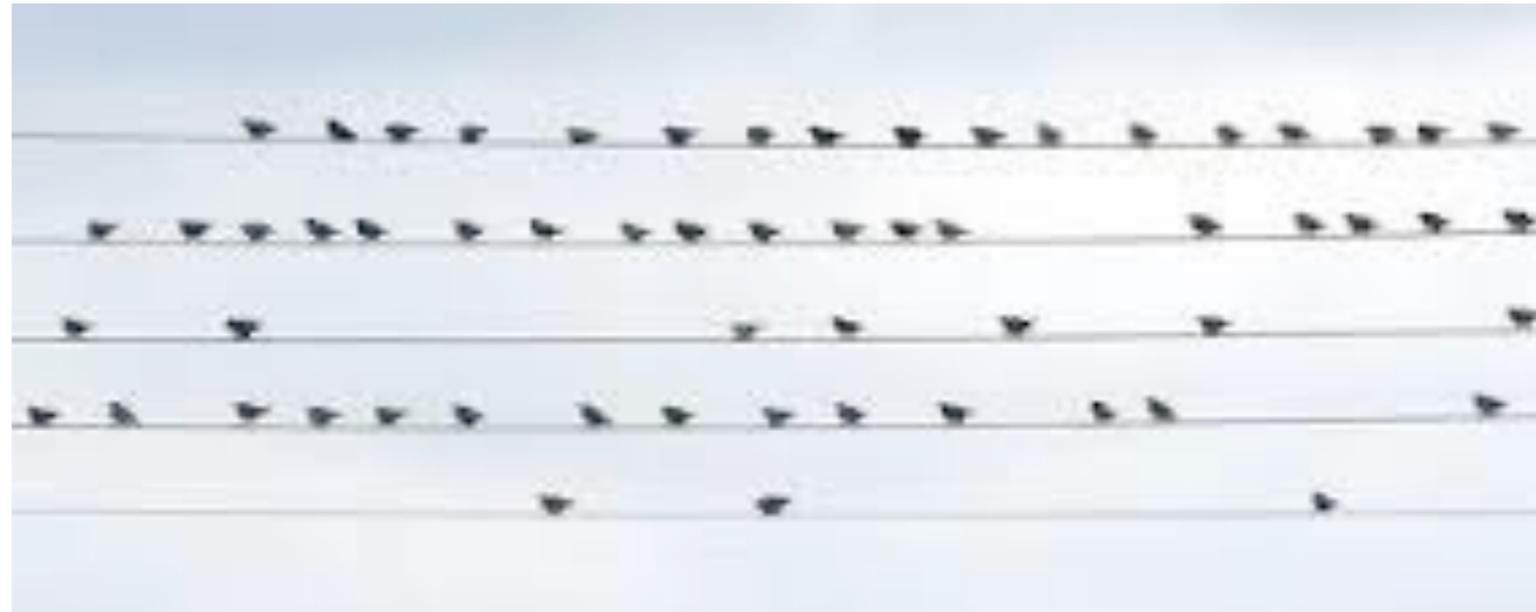
- az elektronok között Coulomb (elektrosztatikus) kölcsönhatás
- ha a Coulomb kölcsönhatás elég nagy (pl. átmeneti fém oxidok), akkor az elektronok nem mozognak szabadon, hanem a fém-ionokon lokalizáltak
- mágneses rendszerek : az elektronok spinjei kölcsönhatnak
- ellentétesen szeretnének állni a szomszédok



Korrelált rendszerek, Mott szigetelők



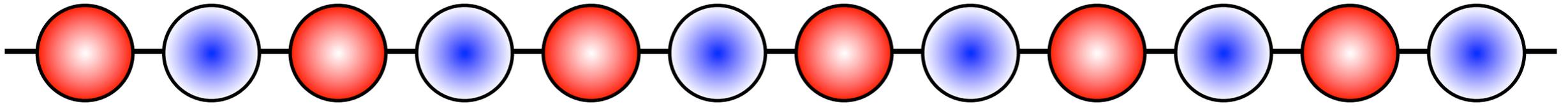
Nem korrelált



Korrelált

spinonok: feles spinű gerjesztések spin-láncokban

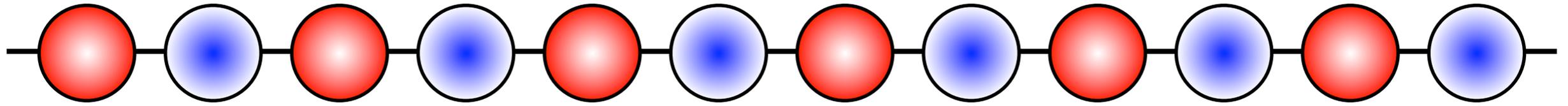
alapállapot (a piros és kék ellentétes beállású spineket jelöl) :



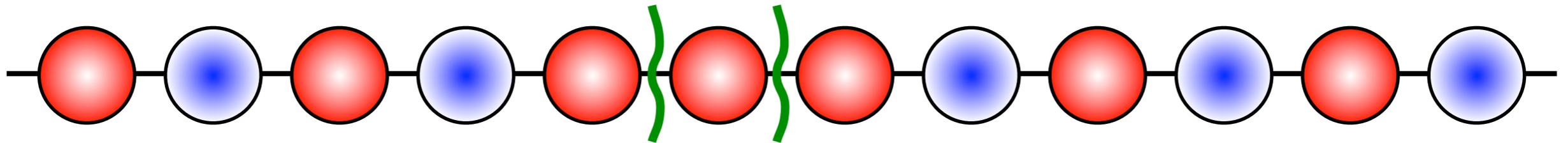
idő
↓

spinonok: feles spinű gerjesztések spin-láncokban

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



gerjesztés (pl. szóródó neutron)

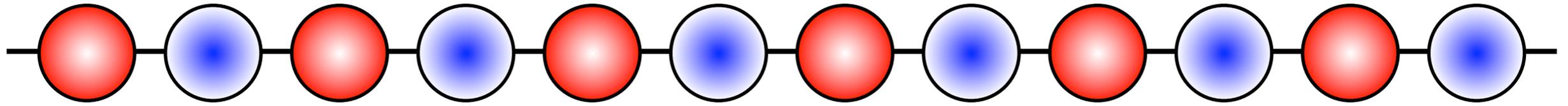


idő

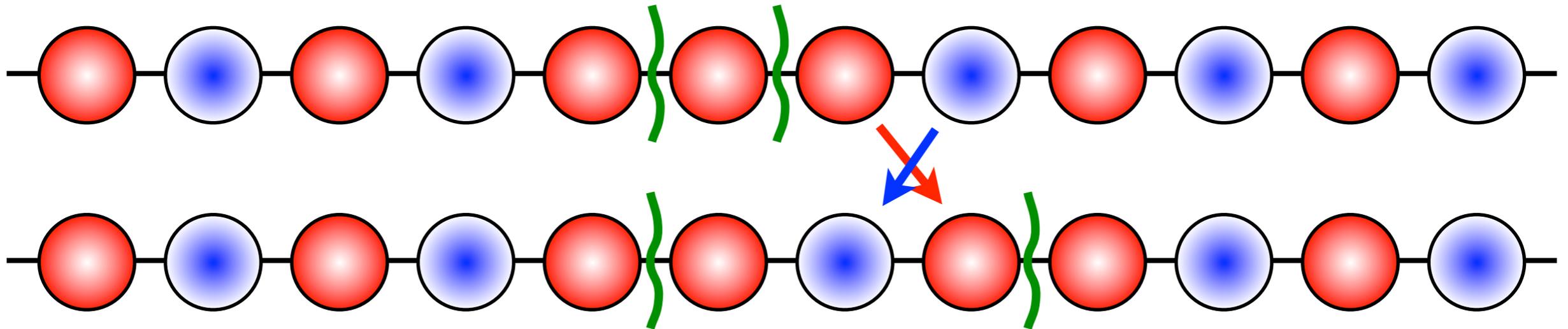


spinonok: feles spinű gerjesztések spin-láncokban

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

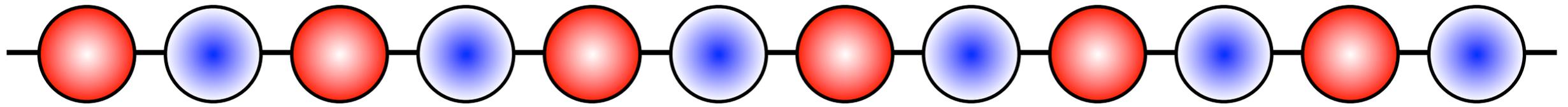


gerjesztés (pl. szóródó neutron)

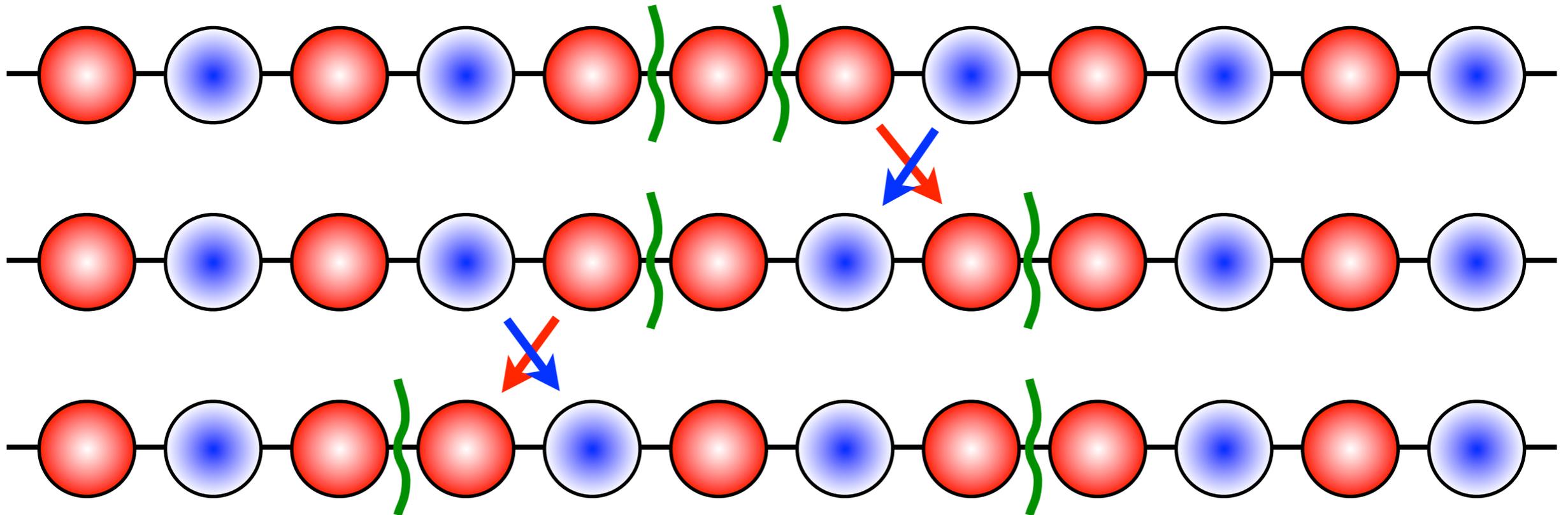


spinonok: feles spinű gerjesztések spin-láncokban

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

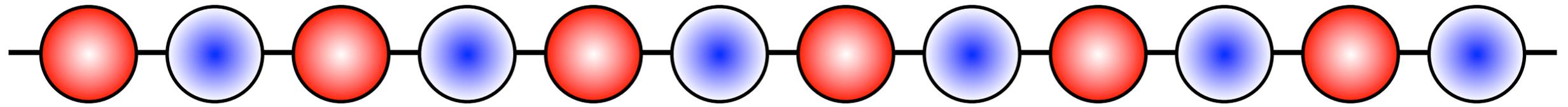


gerjesztés (pl. szóródó neutron)

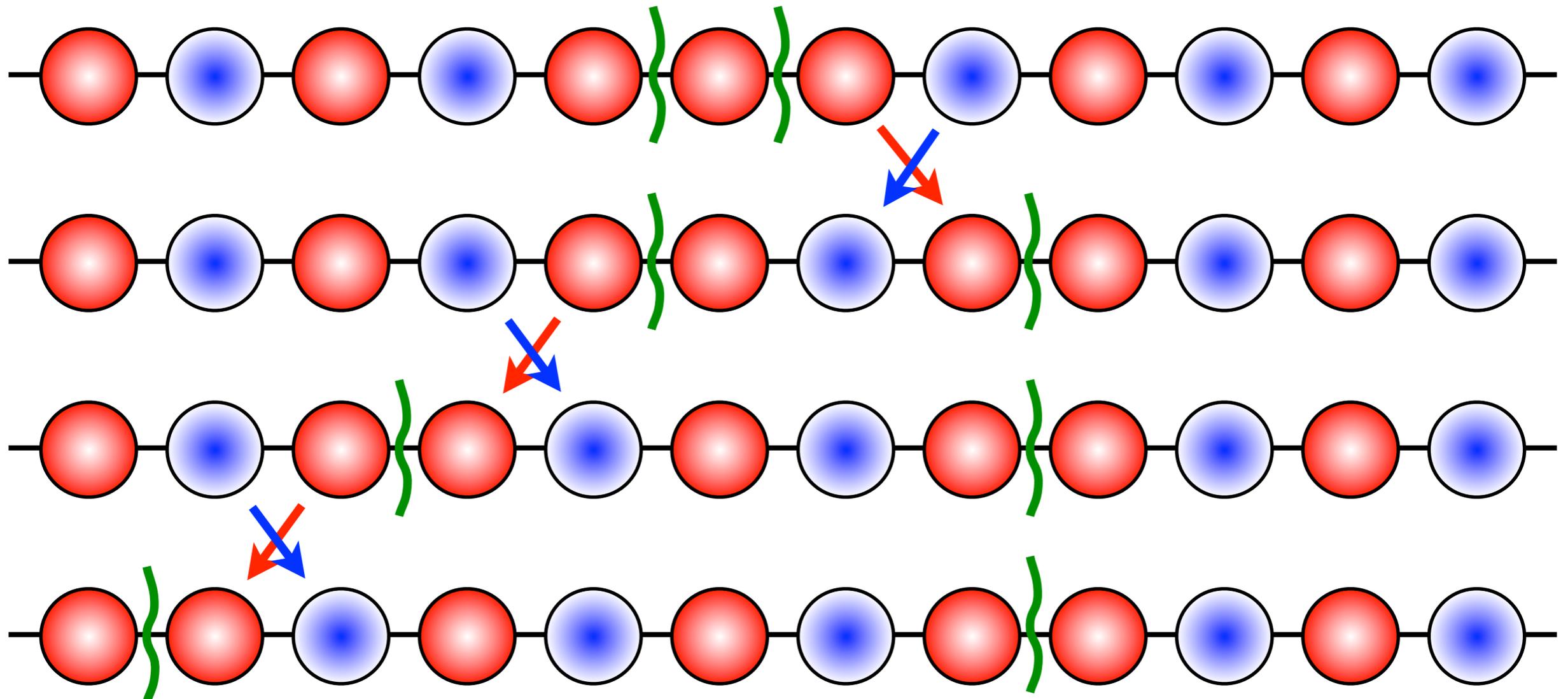


spinonok: feles spinű gerjesztések spin-láncokban

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

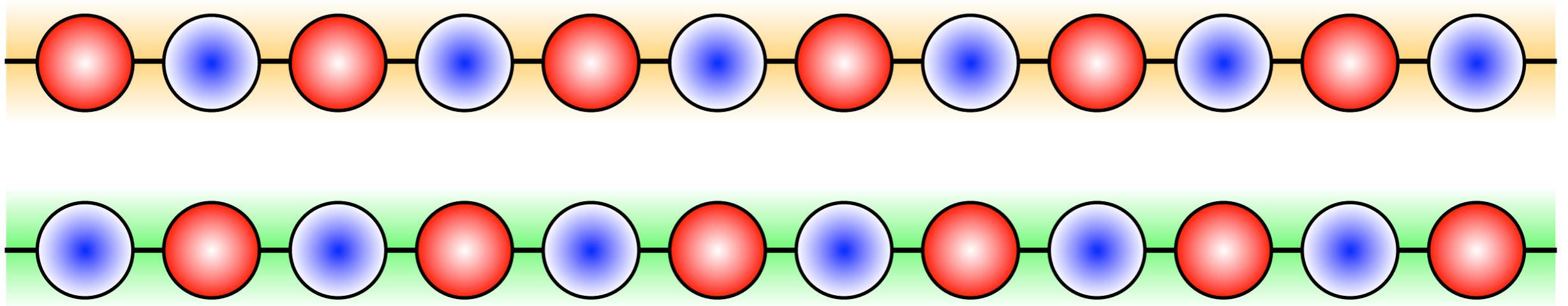


gerjesztés (pl. szóródó neutron)

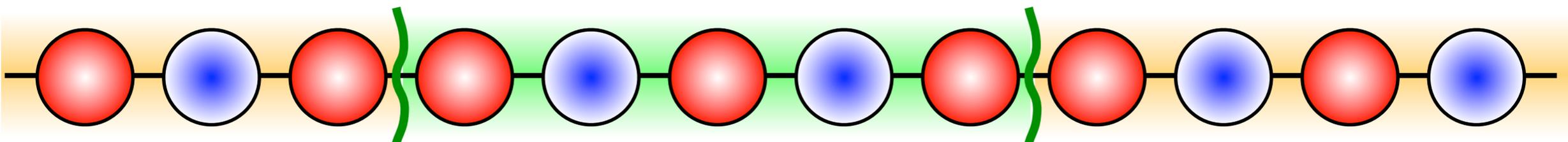


spinonok: feles spinű gerjesztések spin-láncokban

Legalább két alapállapot szükséges :

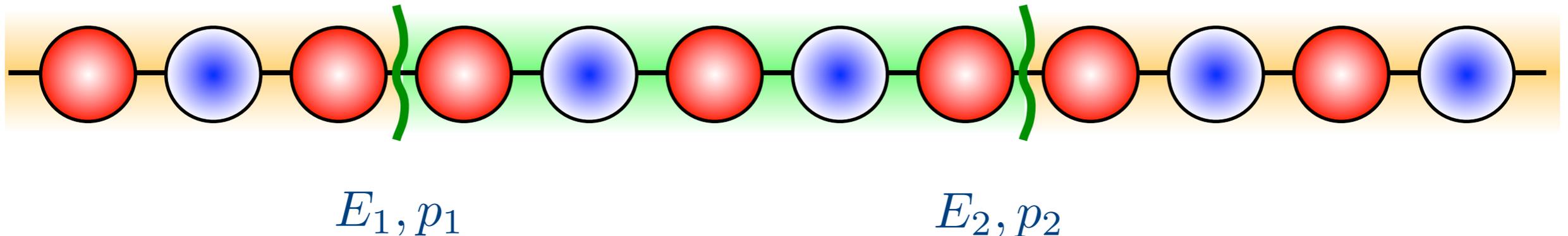


spinonok: alapállapotokat szétválasztó falak,
egymástól függetlenül mozognak



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):

$$E_1 = f(p_1)$$

$$E_2 = f(p_2)$$

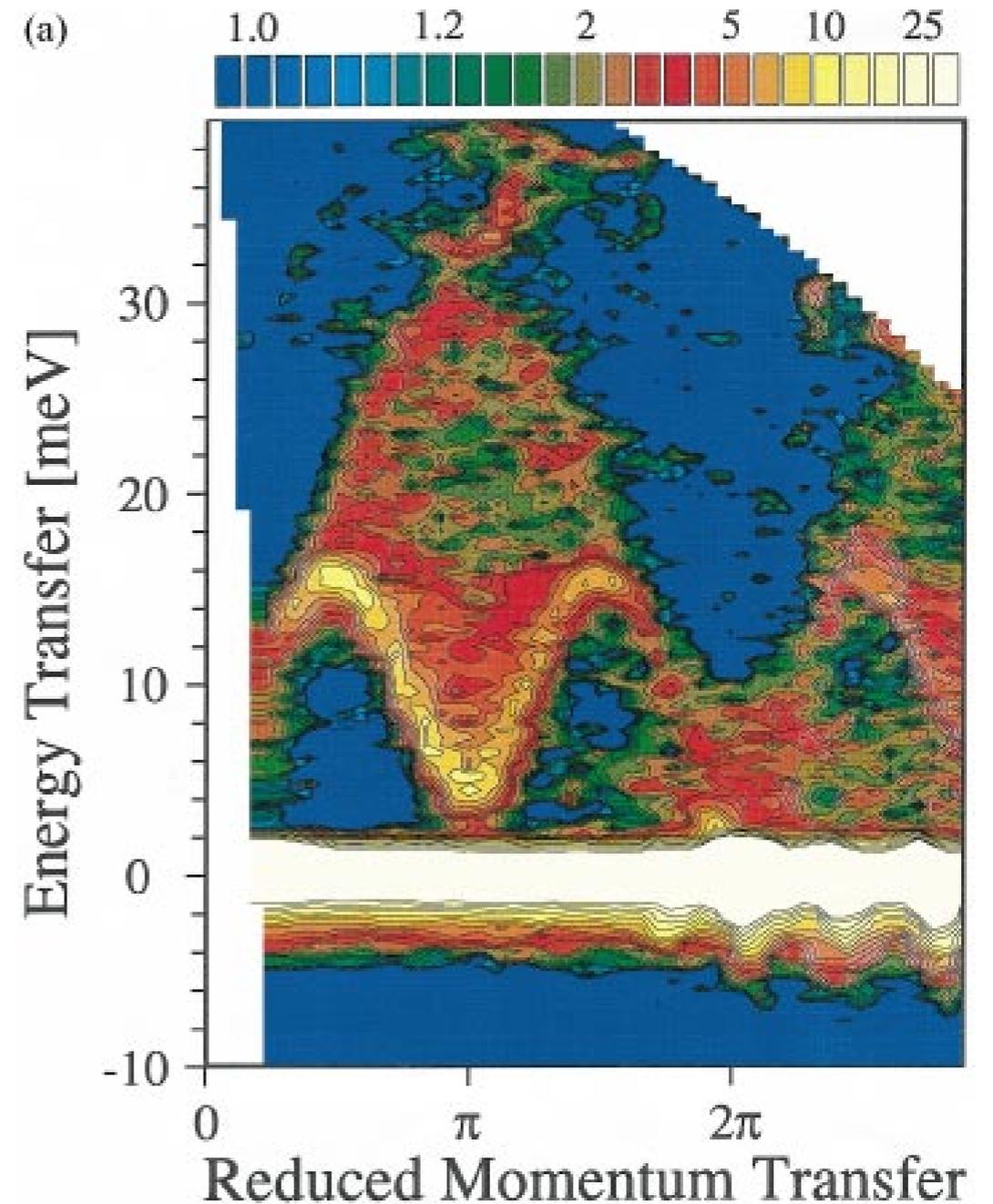
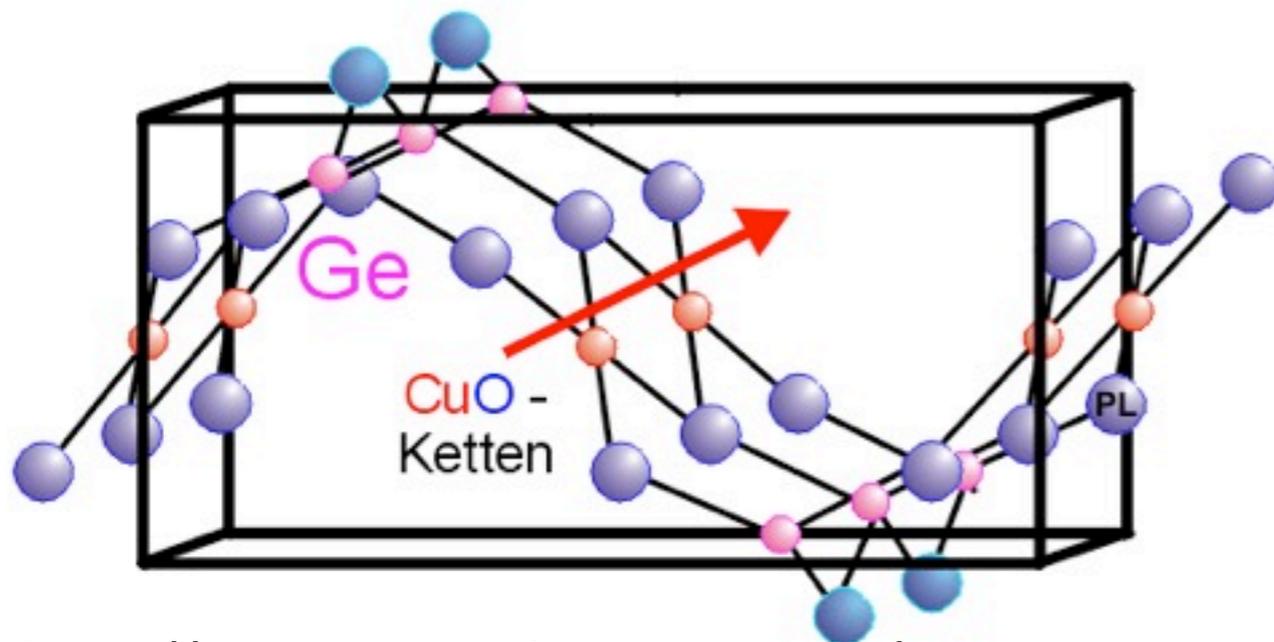
pl. klasszikus test: $E = \frac{p^2}{2m}$

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 CuGeO_3

M. Arai,^{1,2,*} M. Fujita,¹ M. Motokawa,³ J. Akimitsu,⁴ and S.M. Bennington⁵

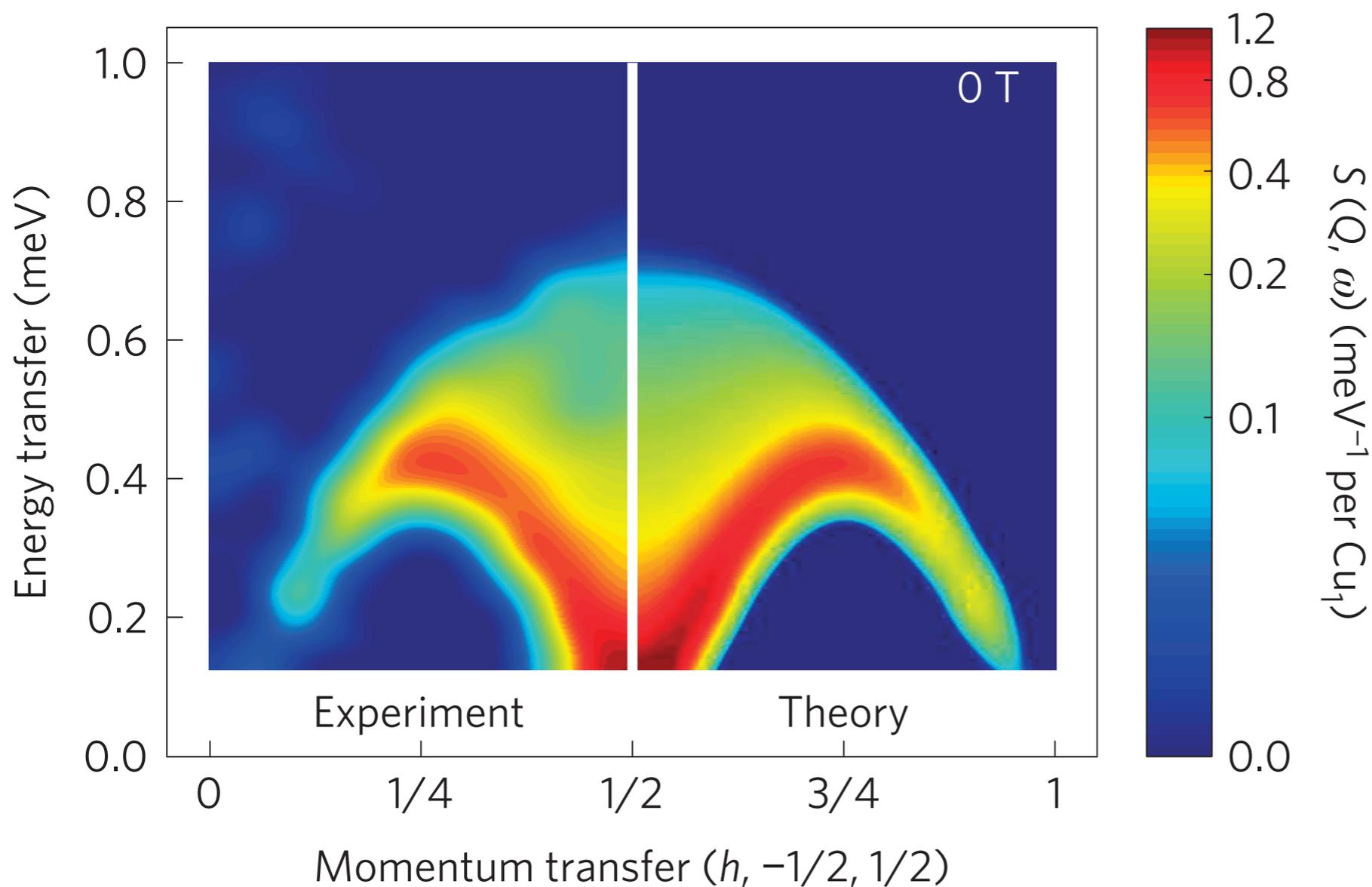


<http://www.peter-lemmens.de/cugeo.htm>

Fractional spinon excitations in the quantum Heisenberg antiferromagnetic chain

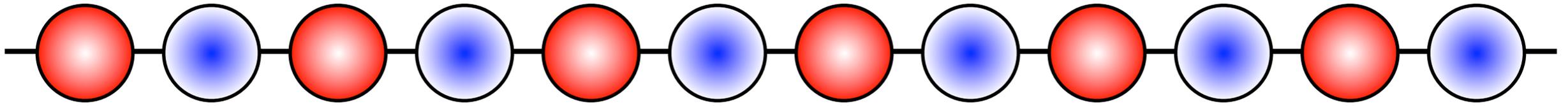
Martin Mourigal^{1,2,3*}, Mechthild Enderle¹, Axel Klöpperpieper⁴, Jean-Sébastien Caux⁵, Anne Stunault¹ and Henrik M. Rønnow²

CuSO₄·5D₂O



spinonok és holonok : az elektron spinje és töltése szétválik

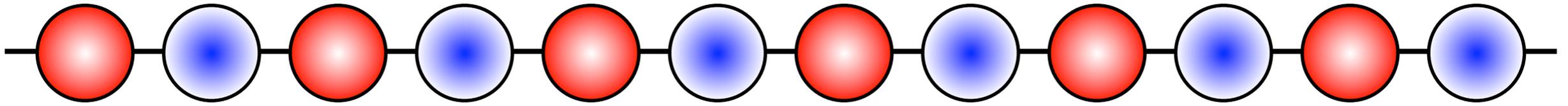
alapállapot:



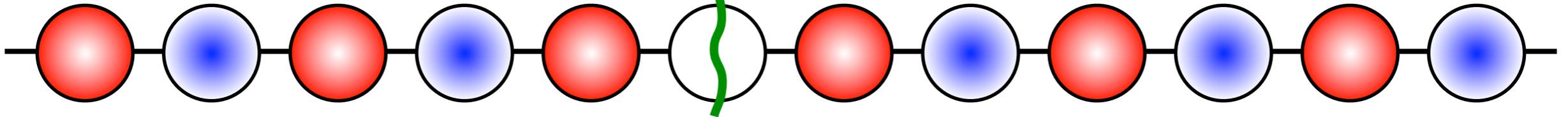
idő
↓

spinonok és holonok : az elektron spinje és töltése szétválílik

alapállapot:

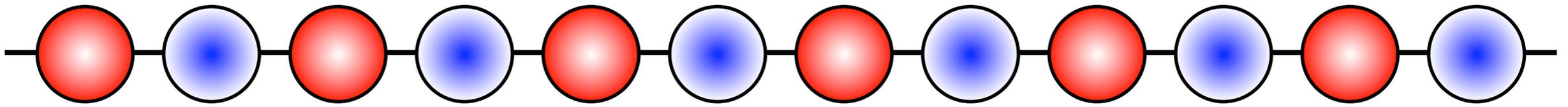


gerjesztés (pl. szóródó foton)

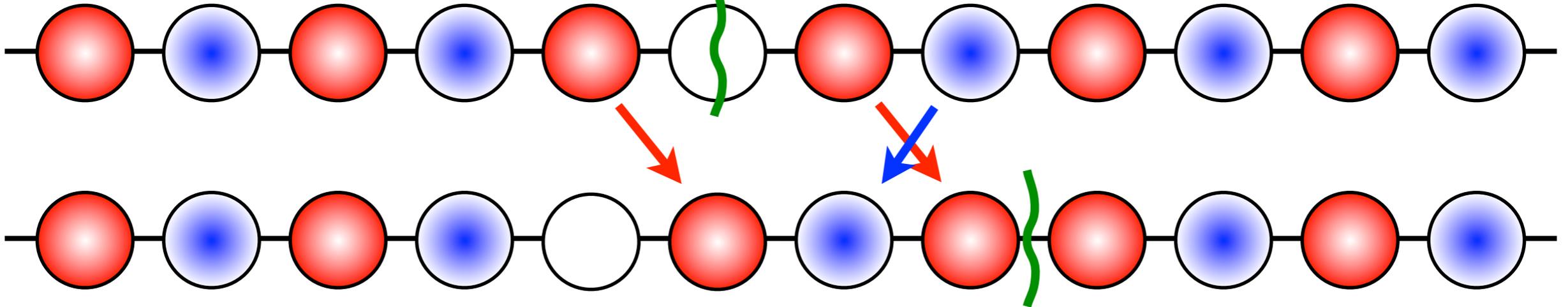


spinonok és holonok : az elektron spinje és töltése szétválílik

alapállapot:

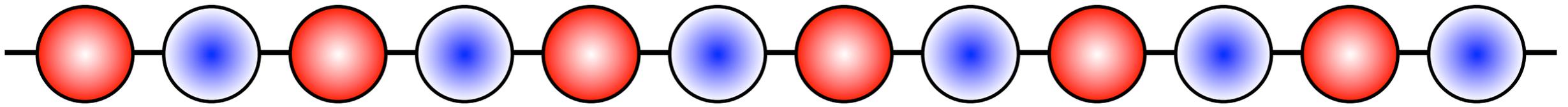


gerjesztés (pl. szóródó foton)

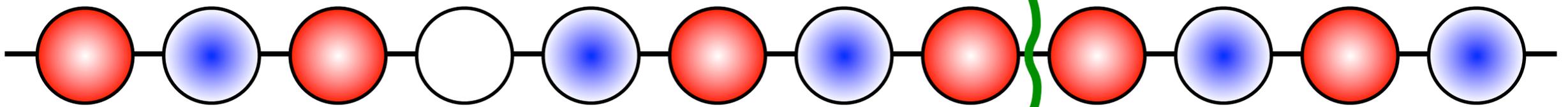
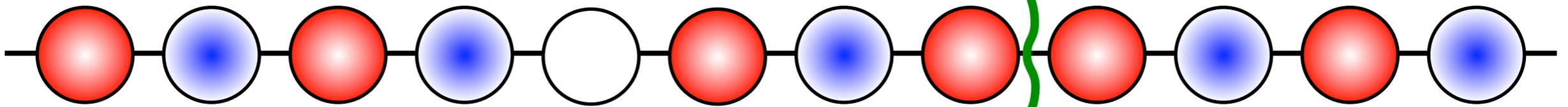
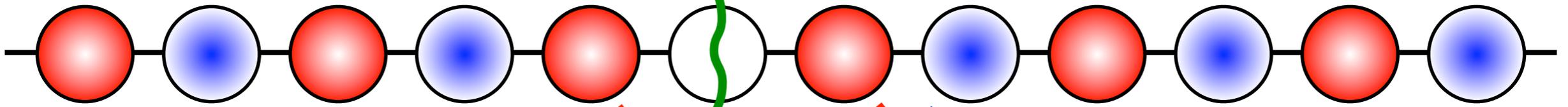


spinonok és holonok : az elektron spinje és töltése szétválik

alapállapot:



gerjesztés (pl. szóródó foton)



holon
(töltés)

spinon (1/2 spin)

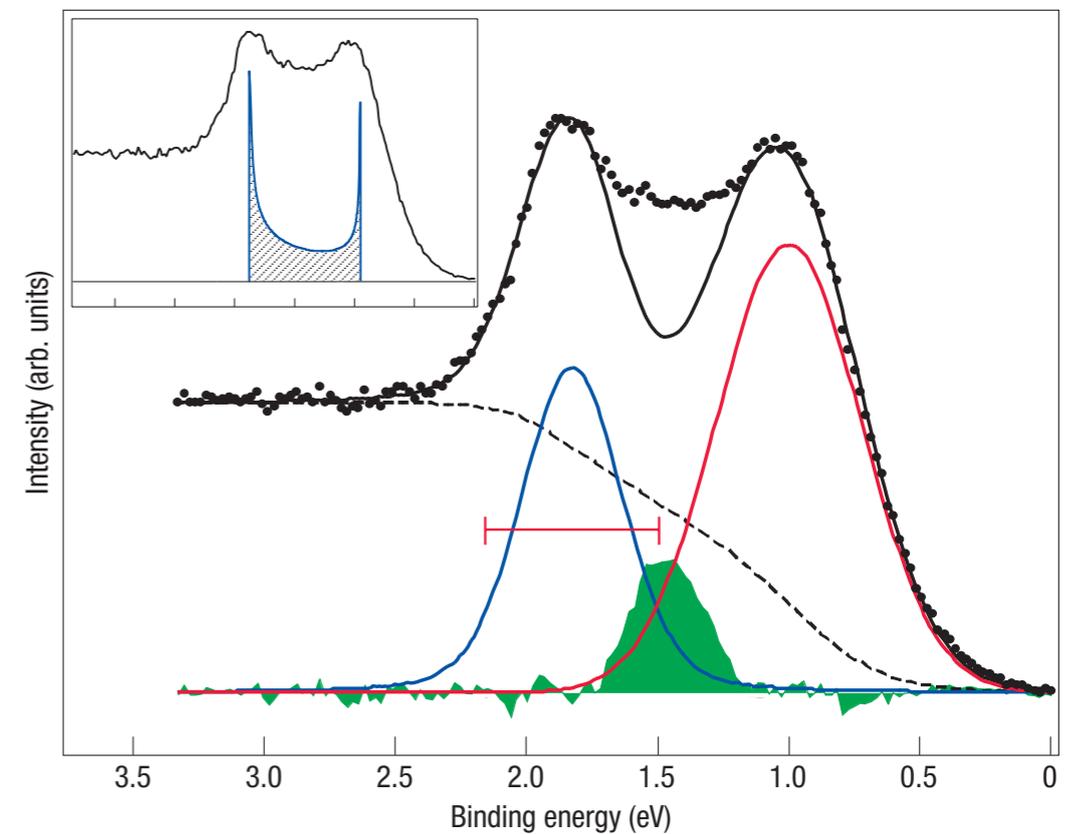
idő

spin-töltés szétválás SrCuO₂ -ban

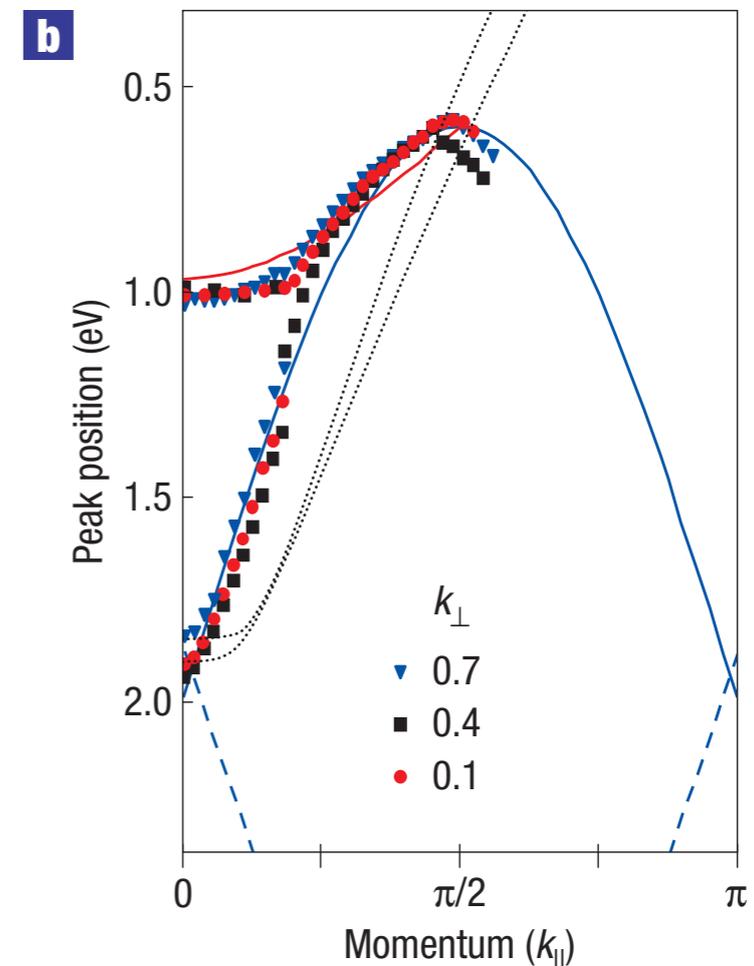
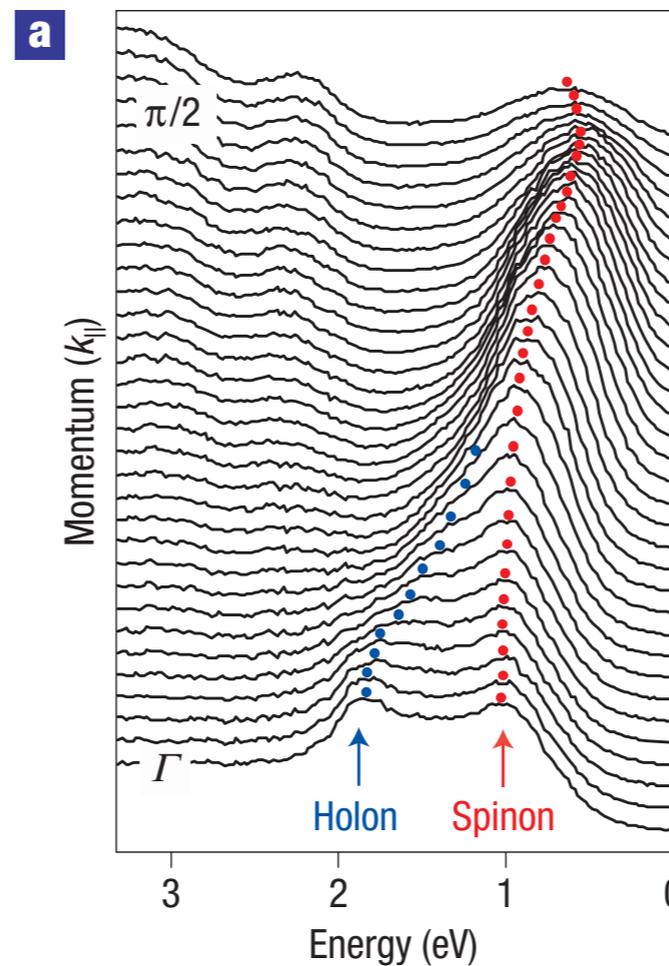
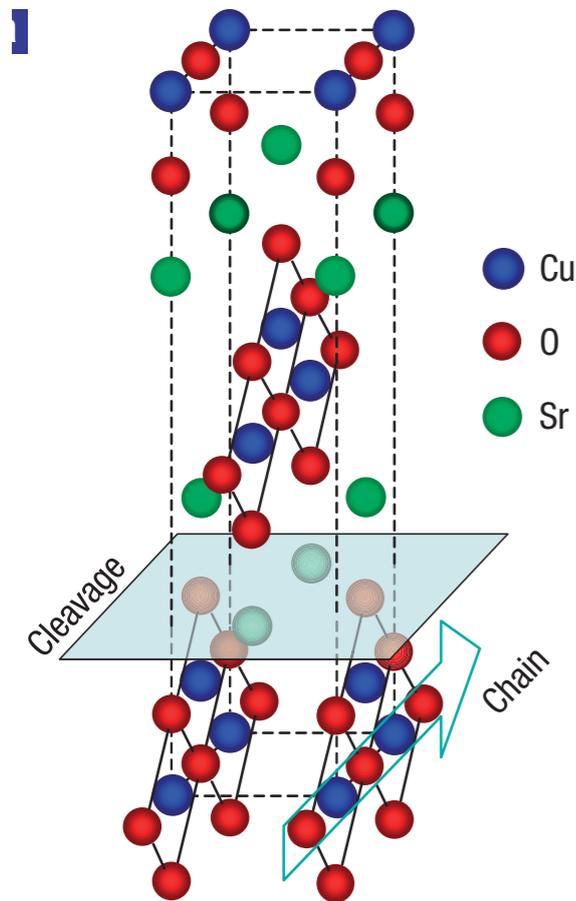
Distinct spinon and holon dispersions in photoemission spectral functions from one-dimensional SrCuO₂

B. J. KIM^{1*}, H. KOH², E. ROTENBERG², S.-J. OH¹, H. EISAKI³, N. MOTOYAMA⁴, S. UCHIDA⁴, T. TOHYAMA⁵, S. MAEKAWA^{5,6}, Z.-X. SHEN⁷ AND C. KIM^{8*}

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



fotoemissziós spektrum

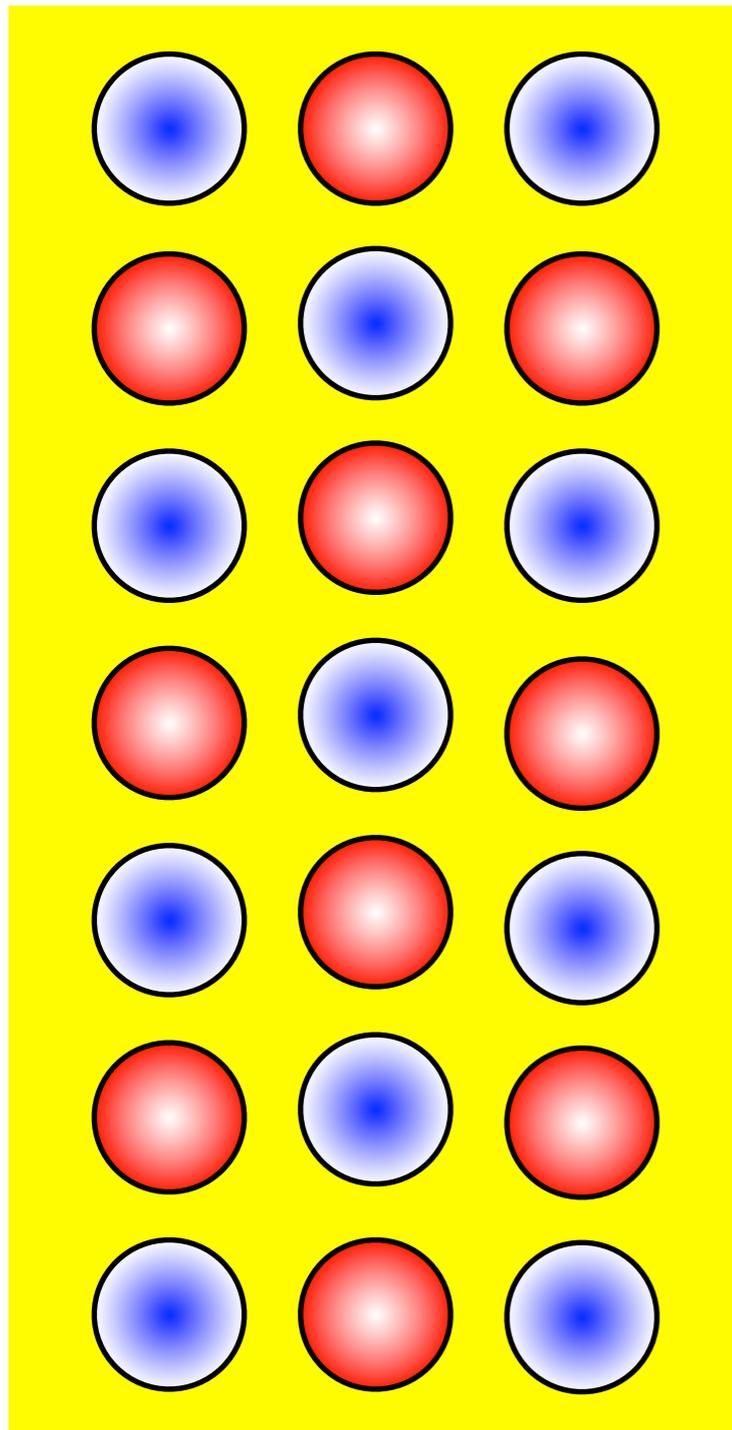


spinonok bezárása magasabb dimenzióban: magnonok

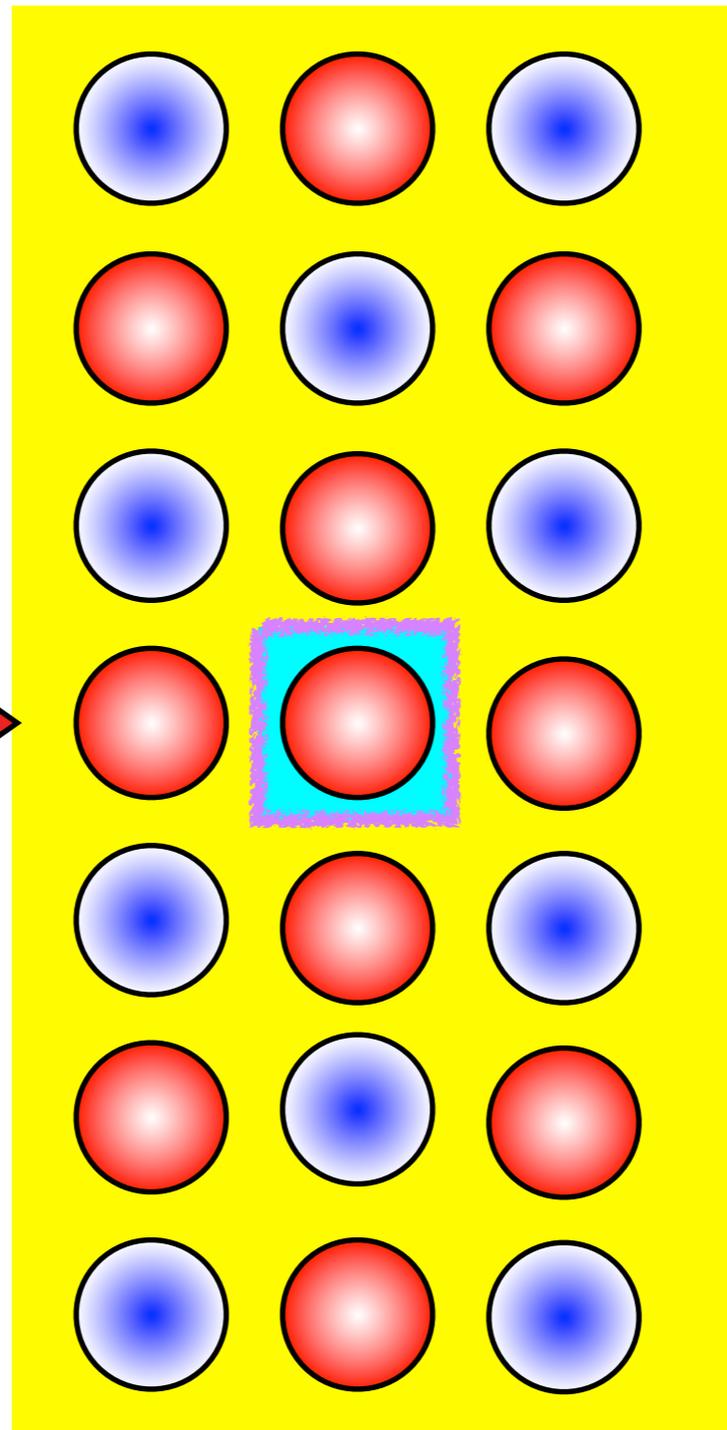
alapállapot:

egy spin megfordult:

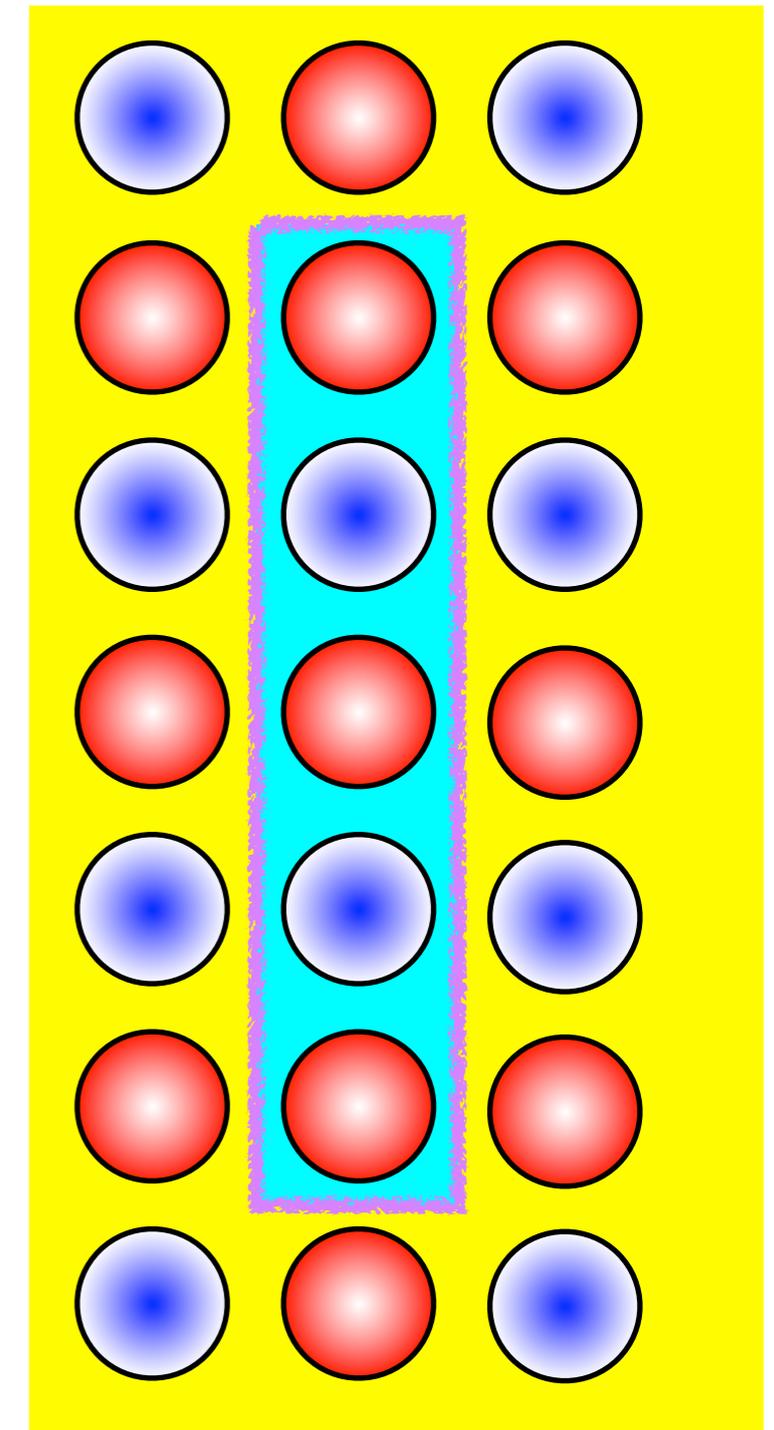
a rossz kötések száma
nő a mérettel : bezárás



gerjesztés



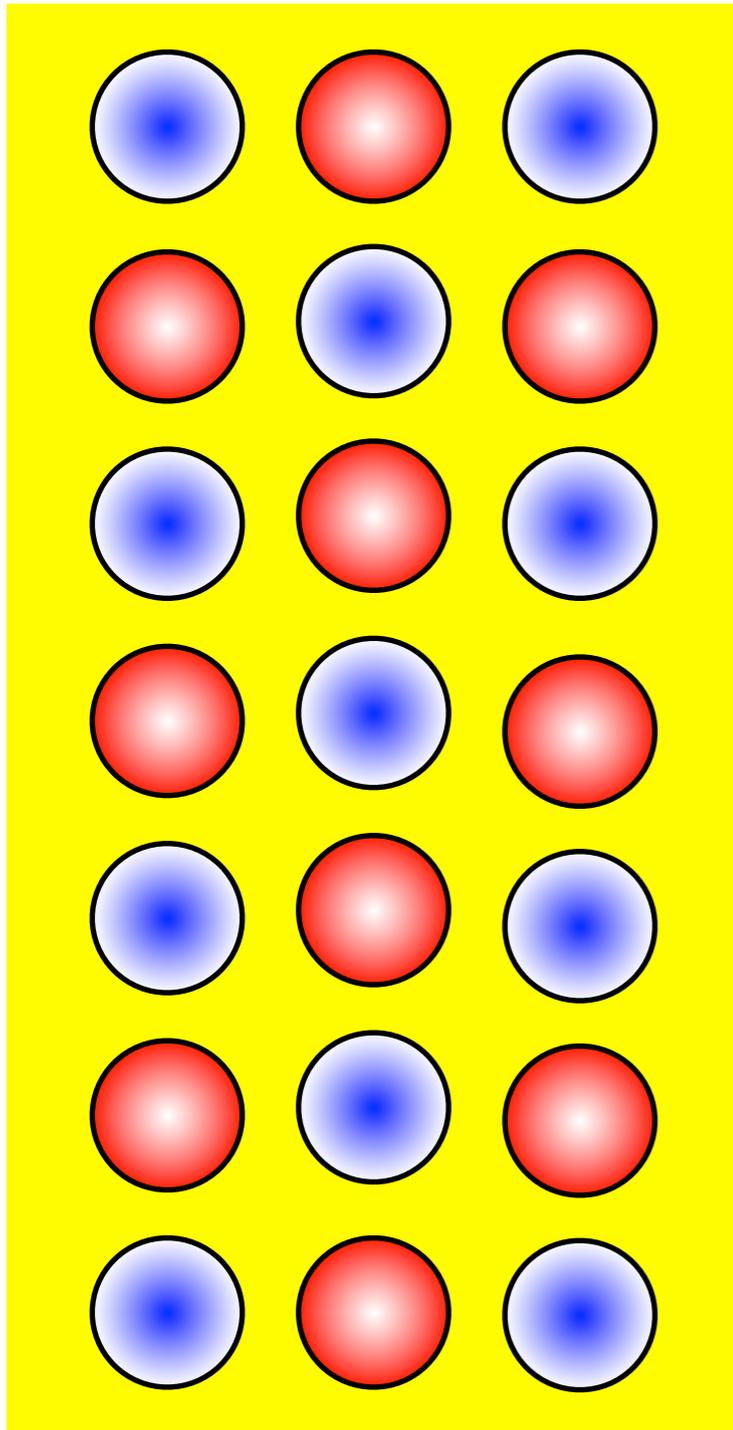
spinonok mozognak



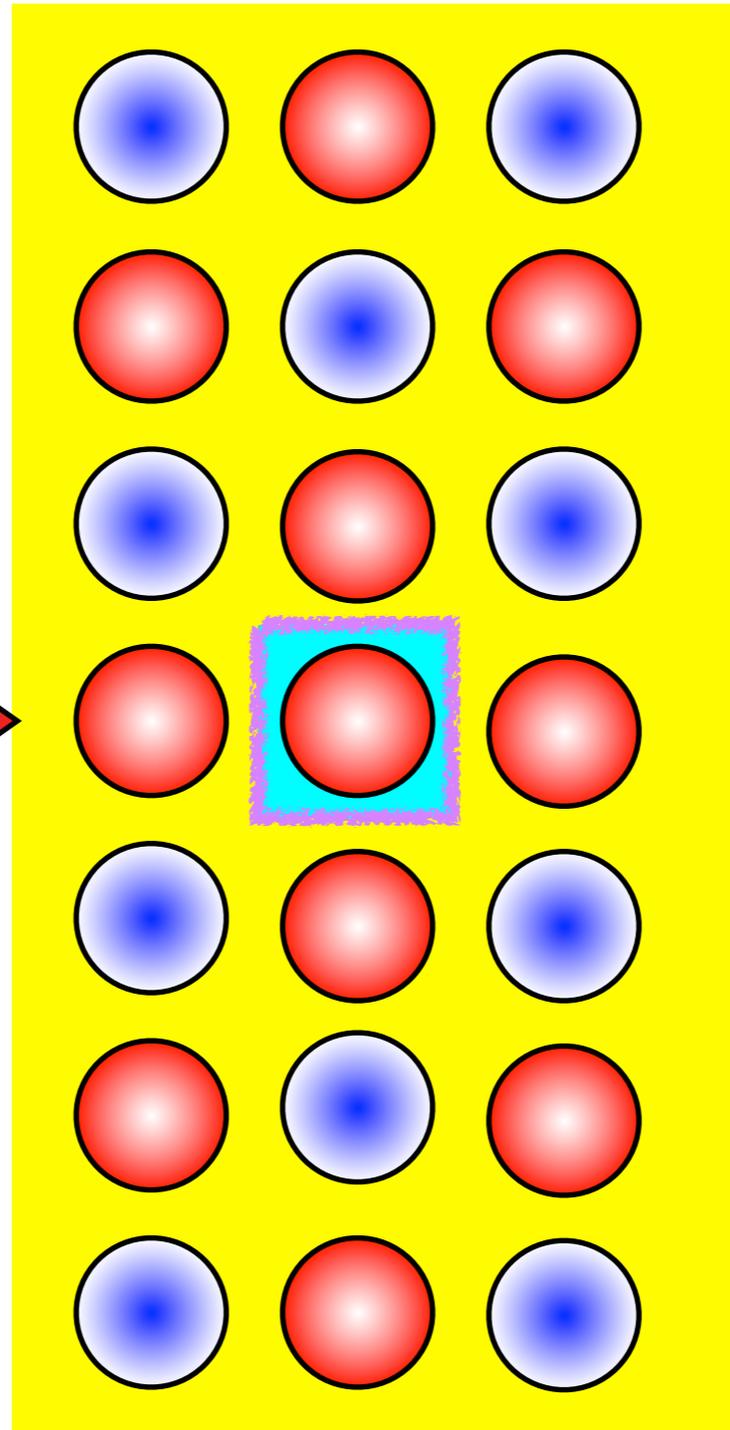
idő

spinonok bezárása magasabb dimenzióban: magnonok

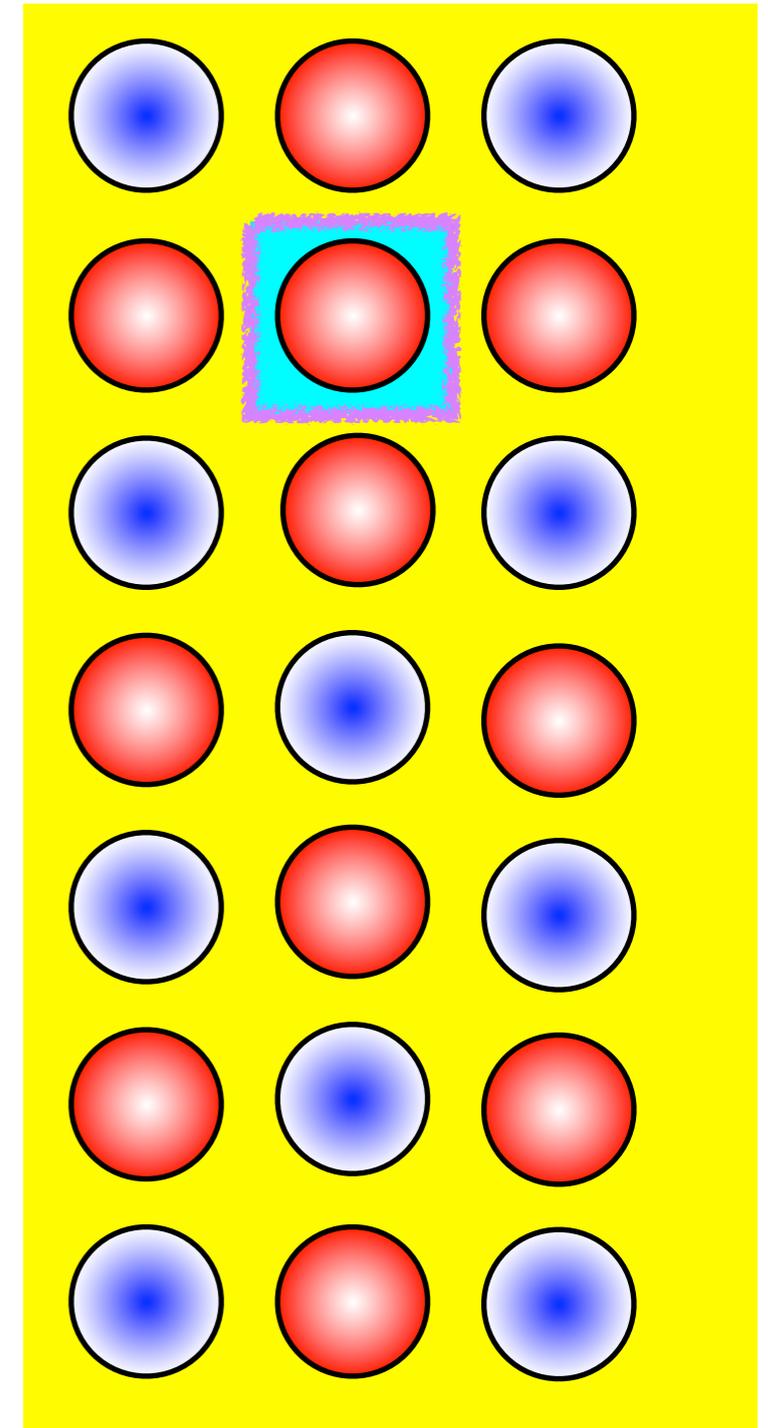
alapállapot:



egy spin megfordult:



a rossz kötések száma
állandó marad: magnon



gerjesztés

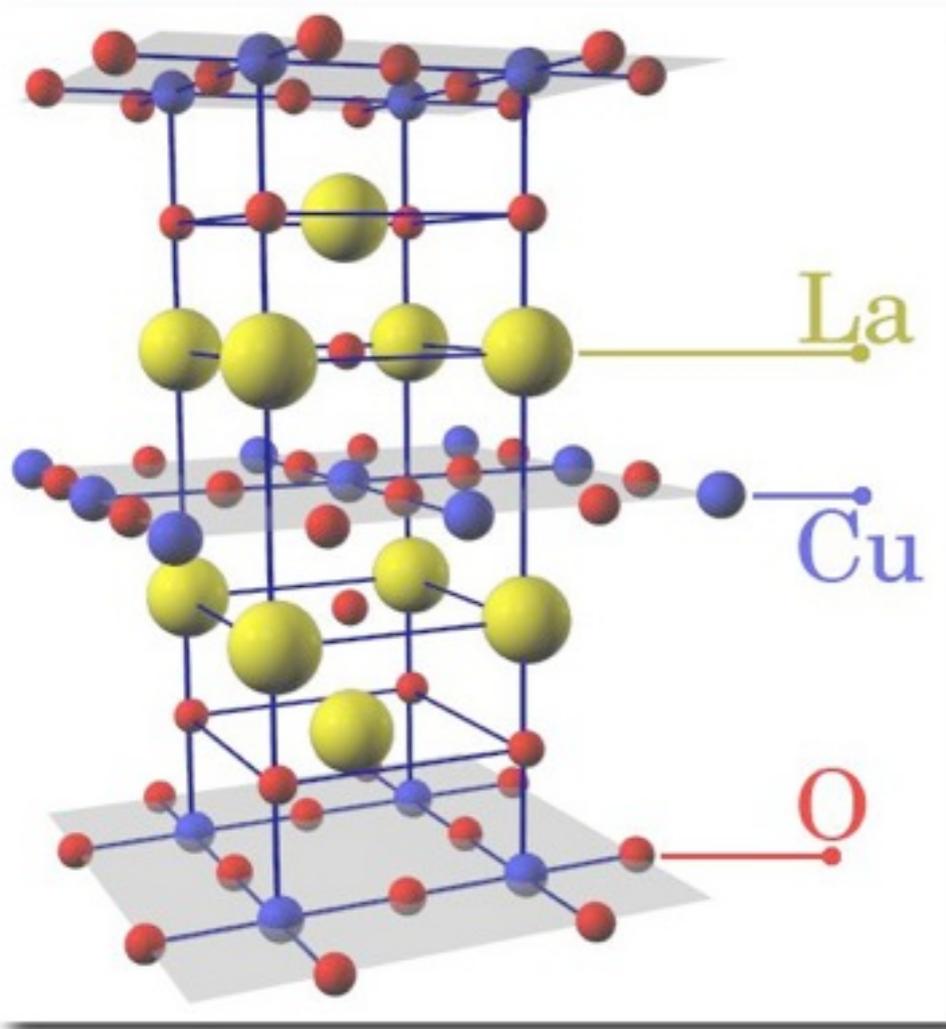
a magnon mozog

idő

Anomalous High-Energy Spin Excitations in the High- T_c Superconductor-Parent Antiferromagnet La_2CuO_4

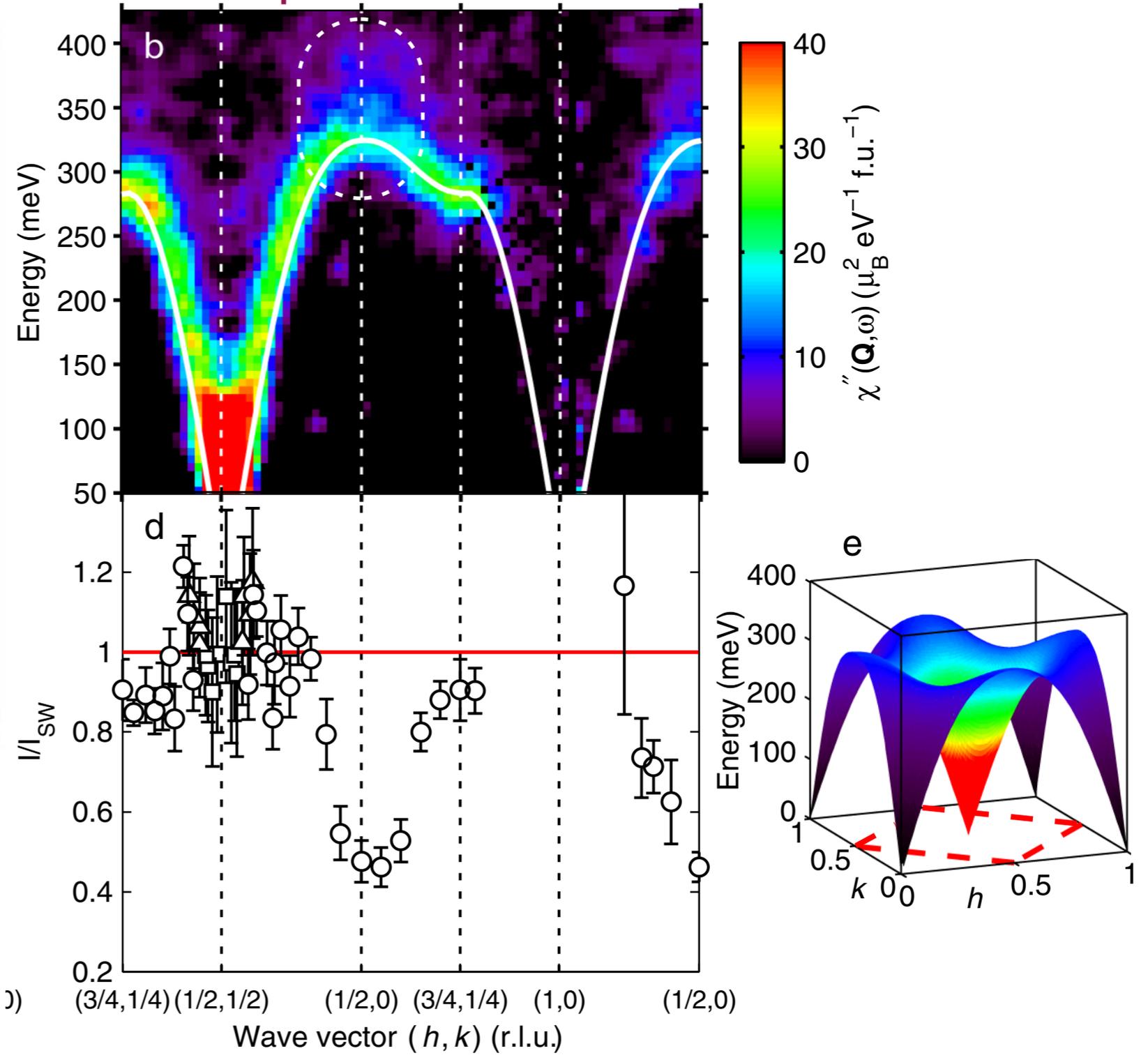
N. S. Headings,¹ S. M. Hayden,^{1,*} R. Coldea,^{1,2} and T. G. Perring³

impulzus



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

magnon neutronszórás
spektruma: keskeny ág,
nincs kontinuum



Tört gerjesztések magasabb dimenziókban ?

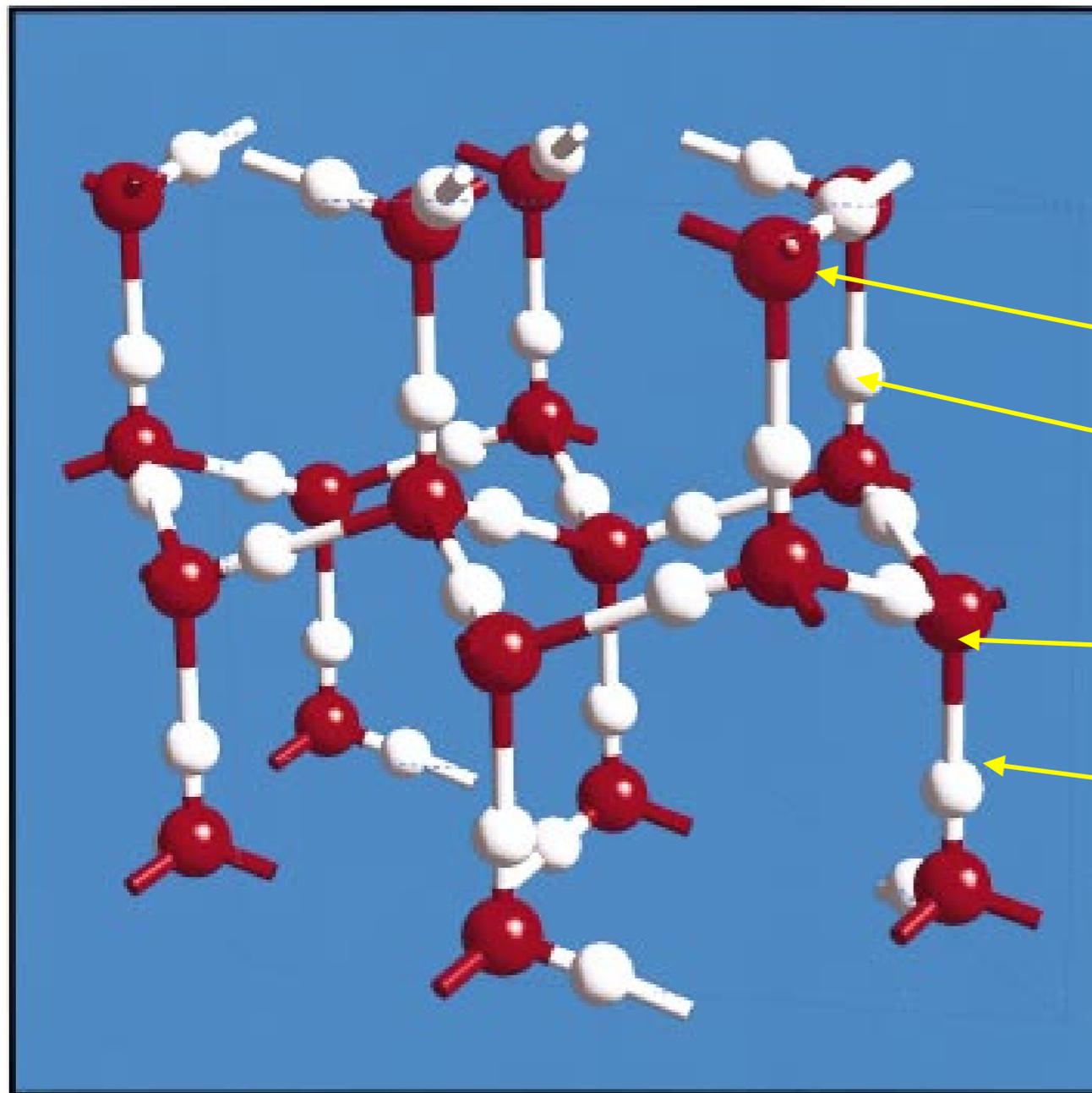
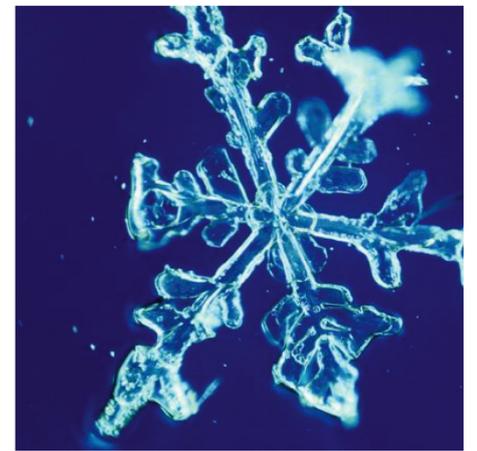
Bezárás problémája: rendezett háttéren a távolsággal (határfelülettel) nő az energia.

Mi történik rendezetlen háttéren ?

Létezhet-e rendezetlen háttér ?

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

E. D. Isaacs,¹ A. Shukla,² P. M. Platzman,¹ D. R. Hamann,¹ B. Barbiellini,¹ and C. A. Tulk³



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

O^{2-}

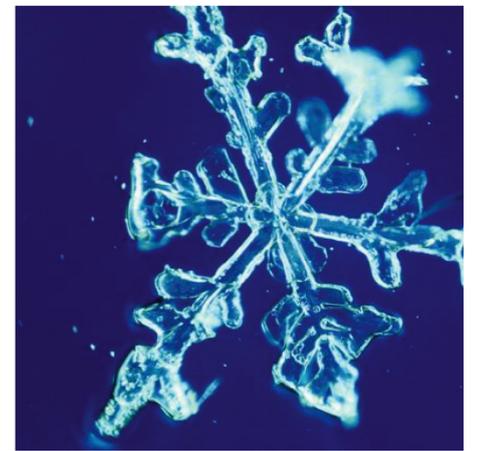
H^+

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.

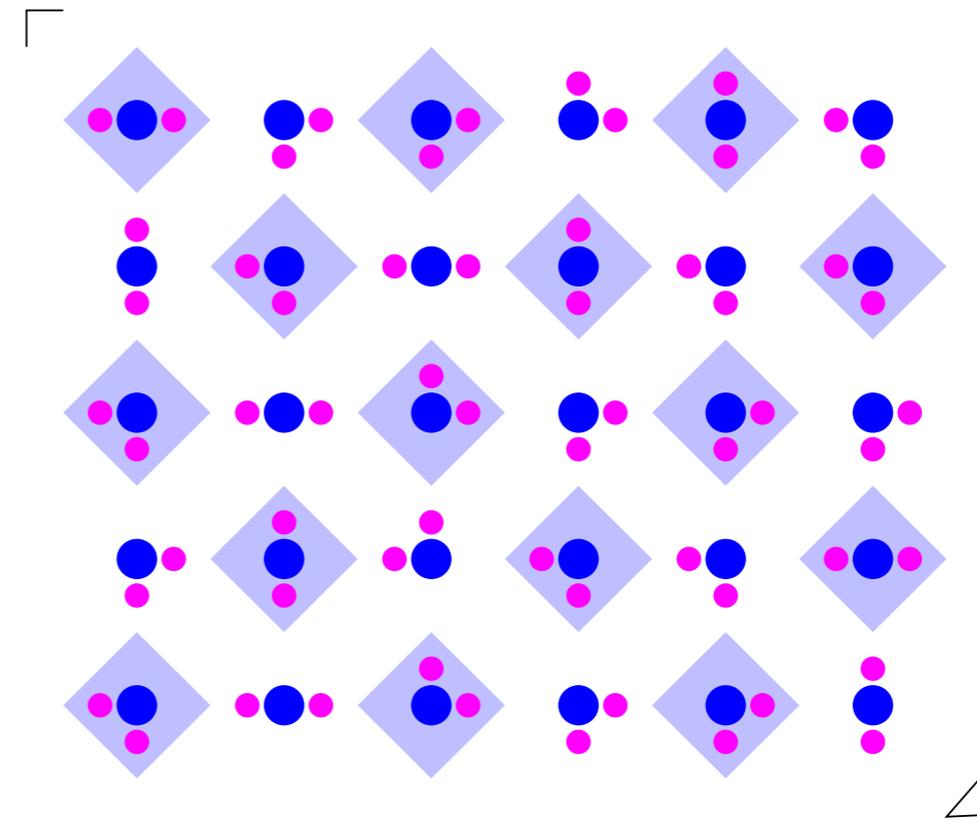
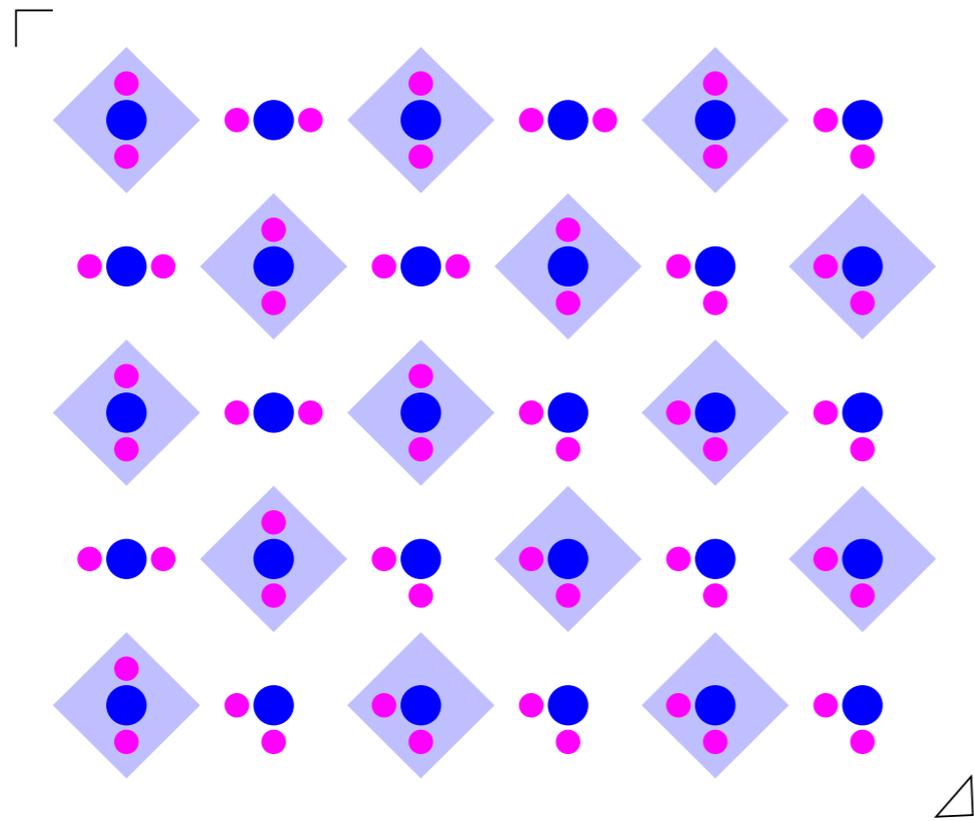
Pauling becslés (1935):

A lehetséges állapotok száma
exponenciálisan nő az oxigén ionok
számával

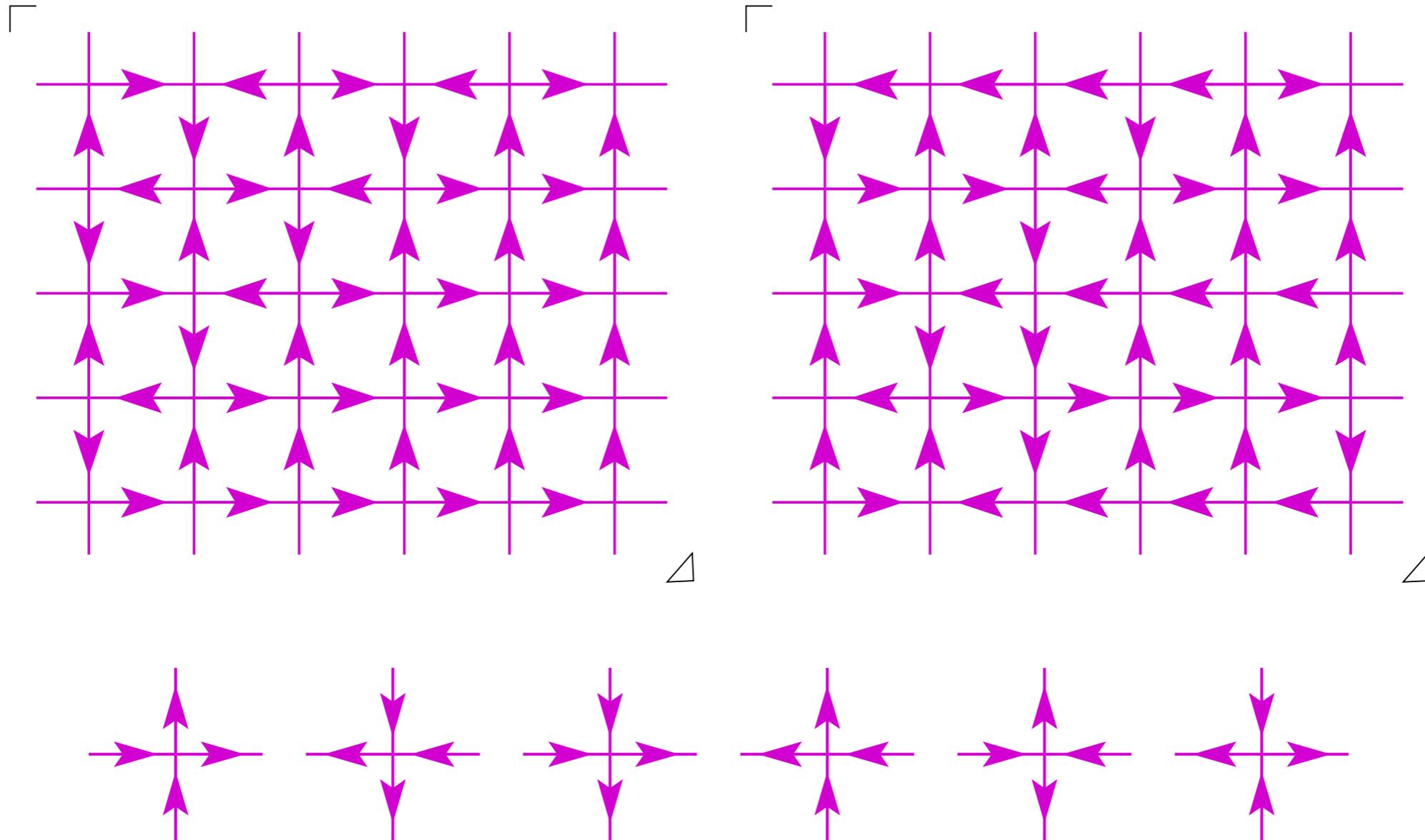
$$Z \approx 1.5^{N_{\text{Oxygen}}}$$

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

két dimenzióban - jég és 6 vertex modell



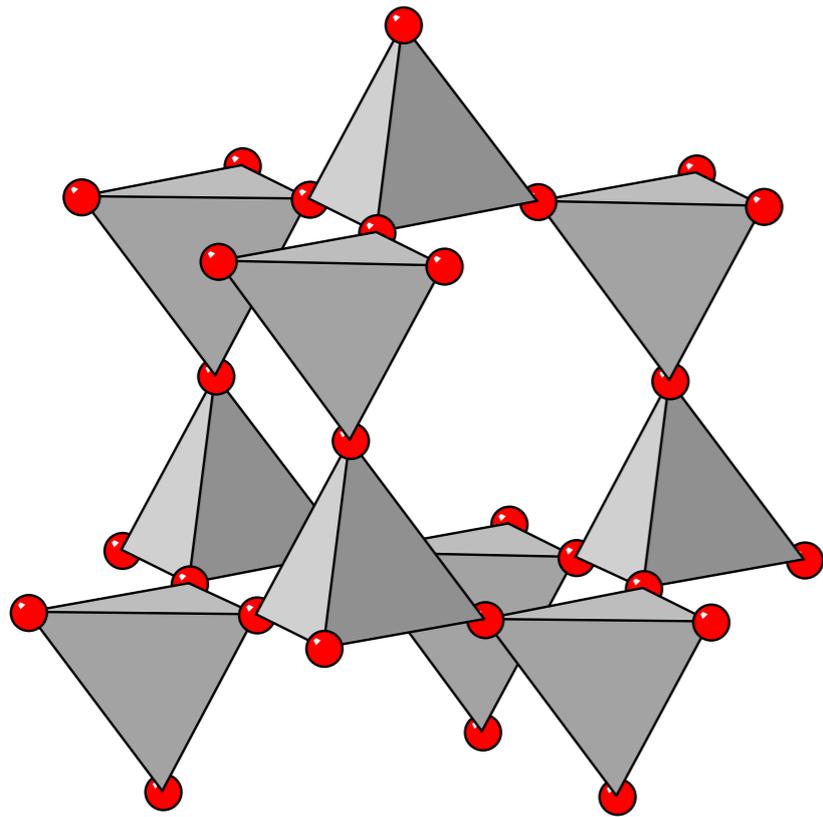
két dimenzióban - jég és 6 vertex modell



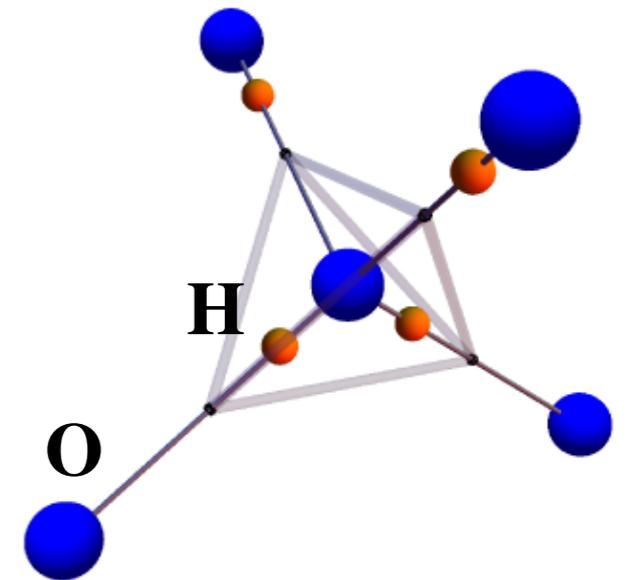
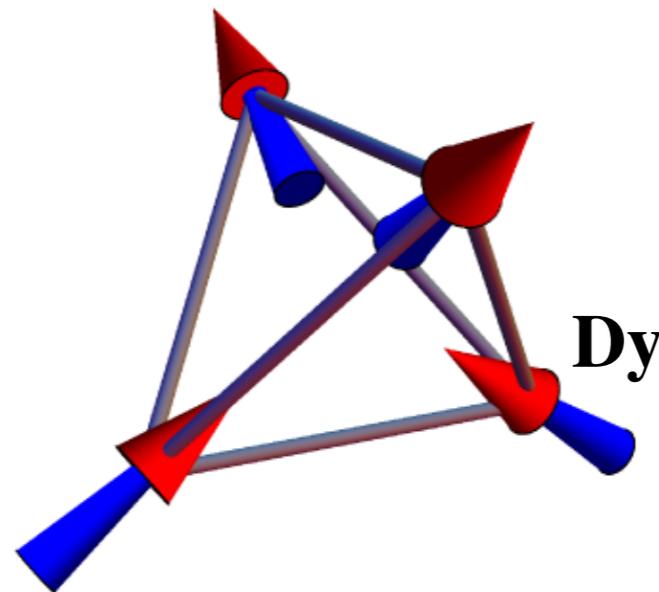
6-vertex model : a jég kétdimenziós hasonmása, egzaktul megoldható (Baxter, Lieb)

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 rácsot 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

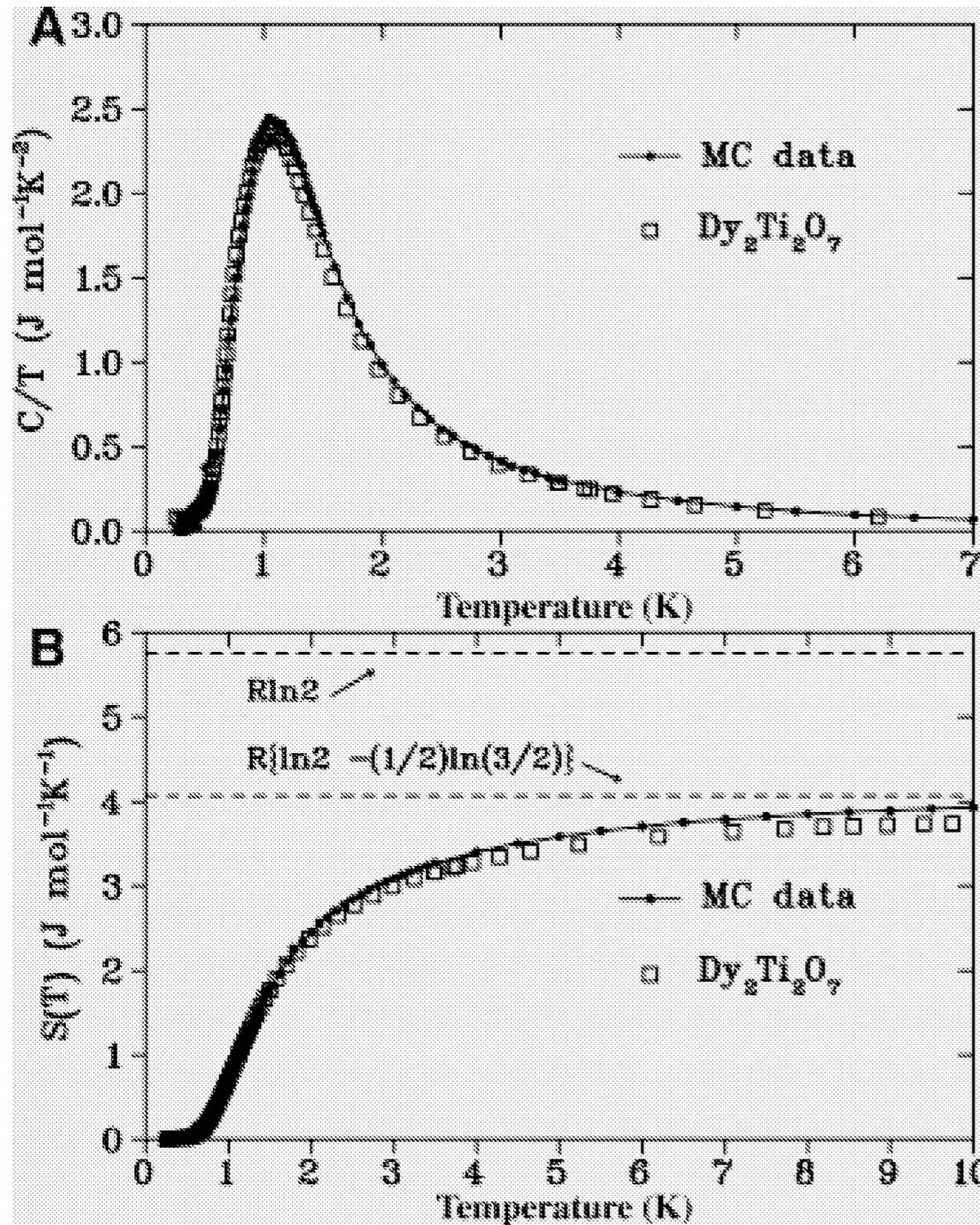
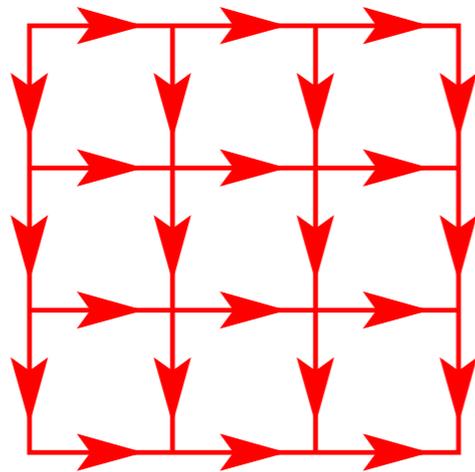


Fig. 3. (A) Specific-heat and (B) entropy data for $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ (29) compared with Monte Carlo simulation results for the dipolar spin ice model (34), with $J_{nn} = -1.24$ K, $D_{nn} = 2.35$ K and system size of 1024 spins.

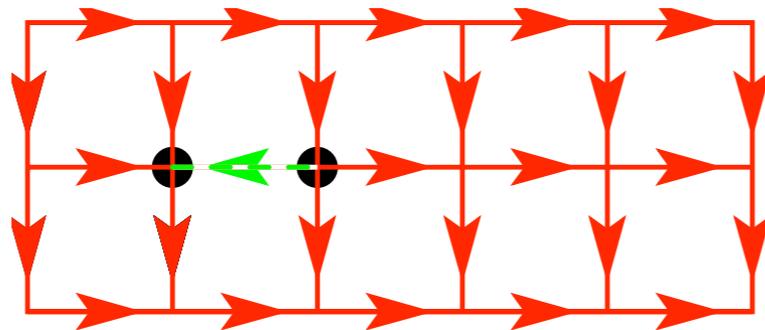


Bramwell & Gingras, Science **294**, 1495 (2001)

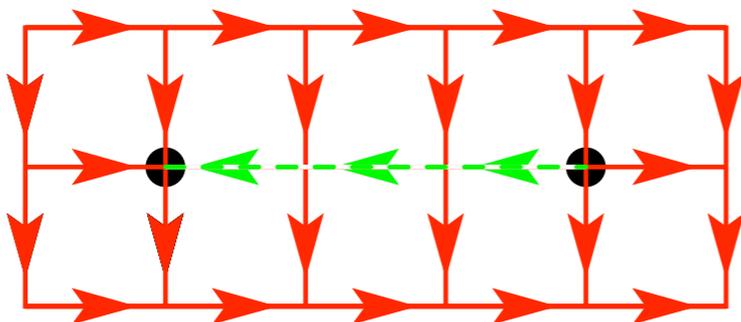
Mágneses monopólus gerjesztések



jégállapot: 2-be 2-ki



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

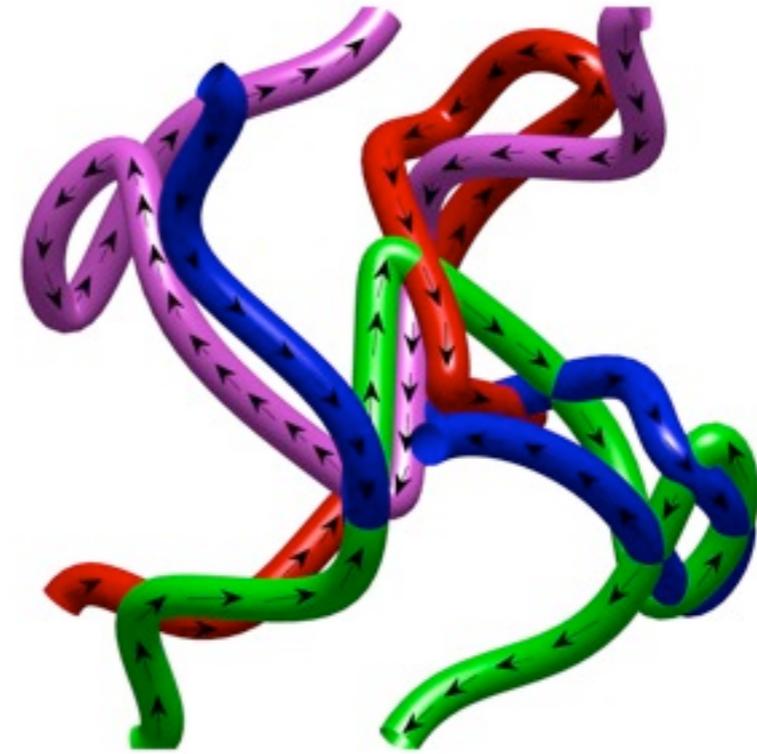
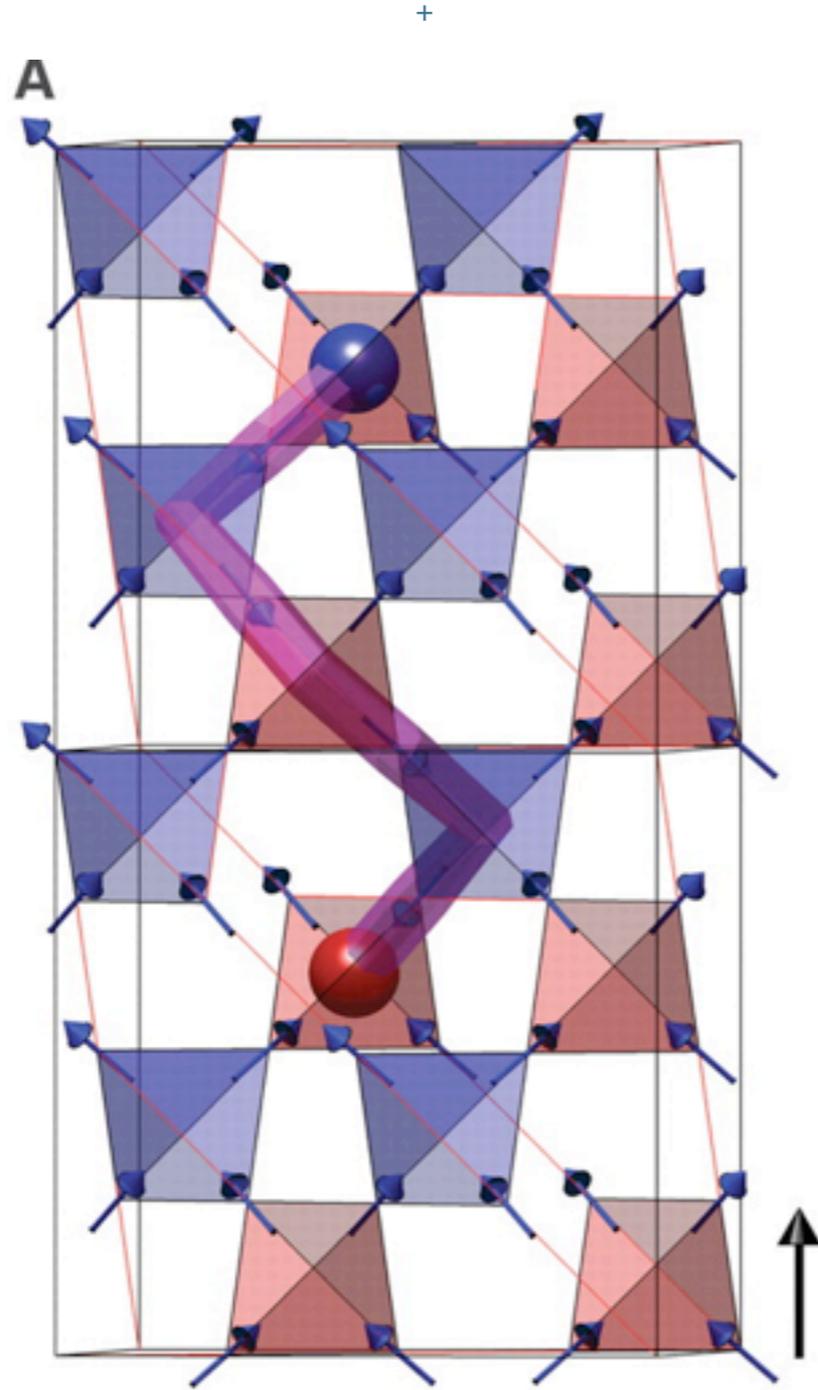


további spineket forgatva :
továbbra is csak két rácshelyen sérül
a jég szabály

nem zártuk be a monopólusokat,
szabadon mozoghatnak !

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

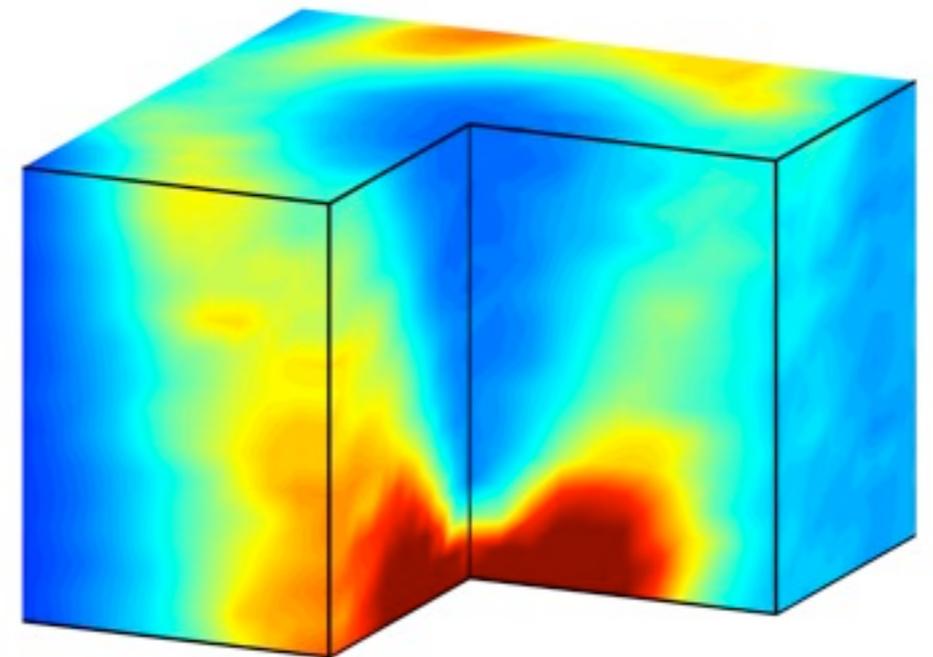
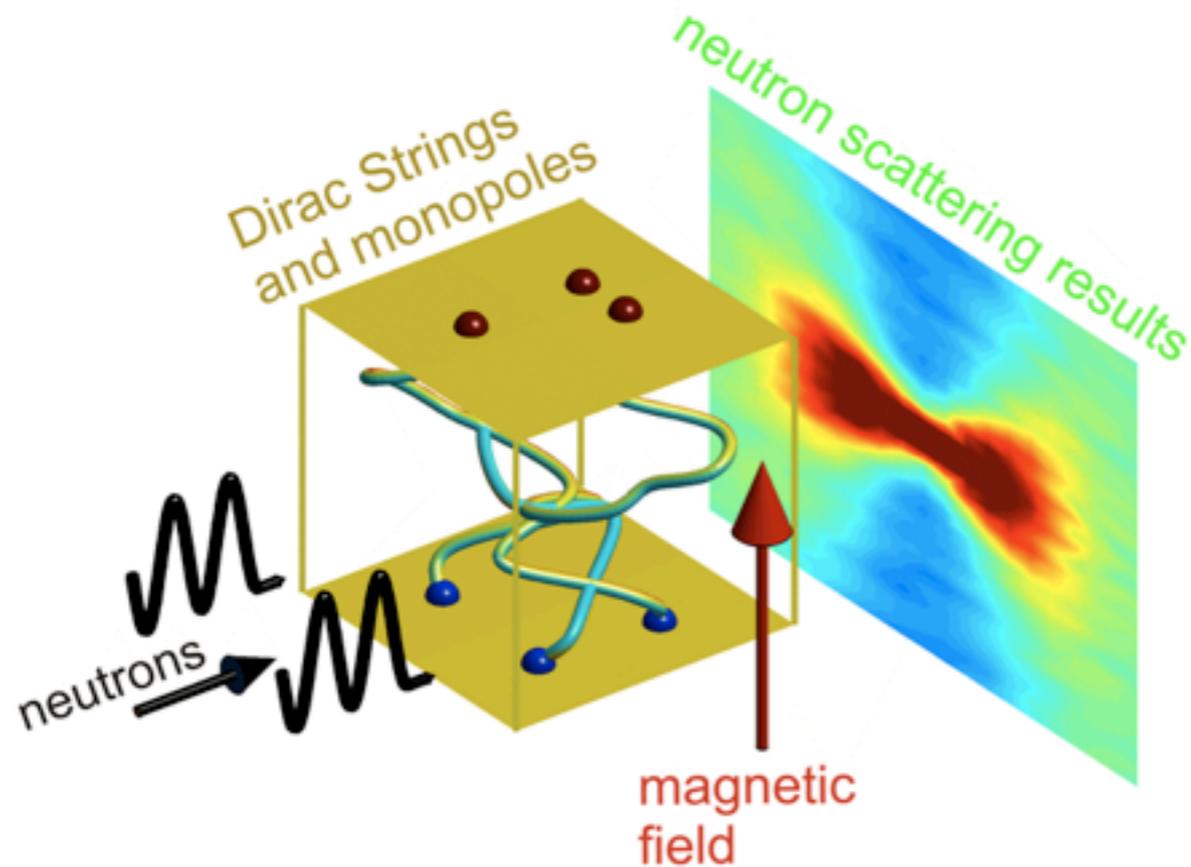
D. J. P. Morris, D. A. Tennant, S. A. Grigera, B. Klemke, C. Castelnovo, R. Moessner, C. Czternasty, M. Meissner, K. C. Rule, J.-U. Hoffmann, K. Kiefer, S. Gerischer, D. Slobinsky, R. S. Perry



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.



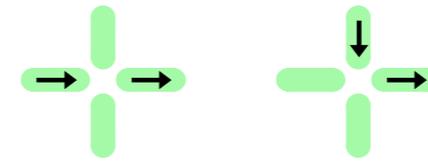
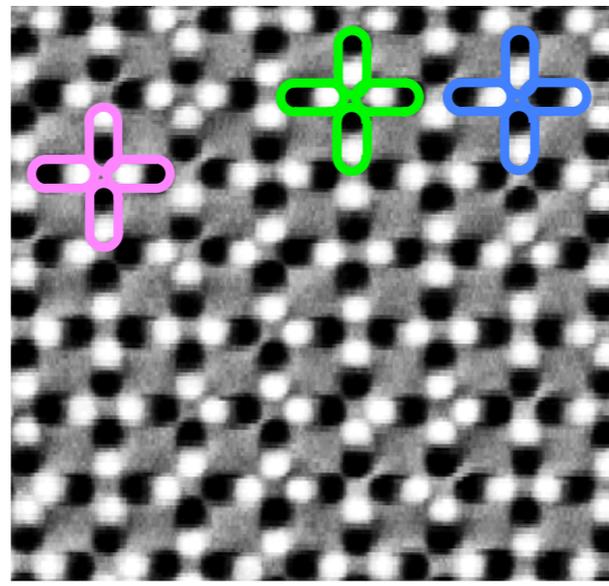
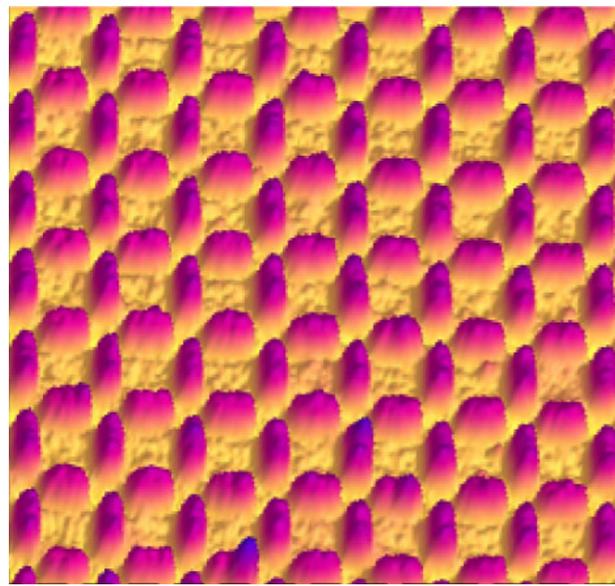
Mesterséges spin jég



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

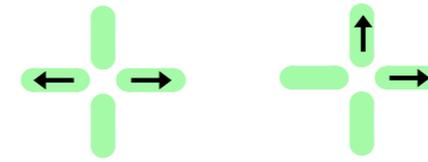
Artificial 'spin ice' in a geometrically frustrated lattice of nanoscale ferromagnetic islands

R. F. Wang¹, C. Nisoli¹, R. S. Freitas¹, J. Li¹, W. McConville¹, B. J. Cooley¹, M. S. Lund², N. Samarth¹, C. Leighton², V. H. Crespi¹ & P. Schiffer¹



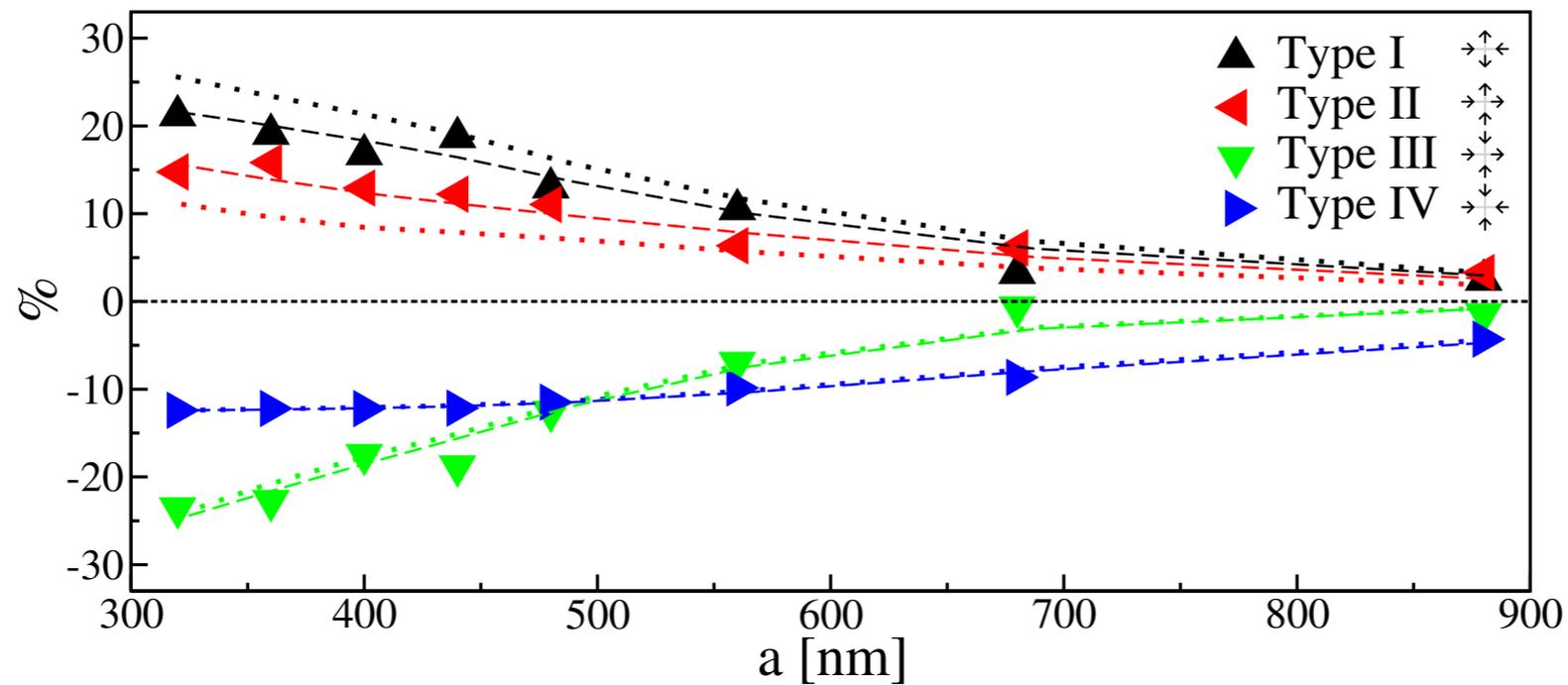
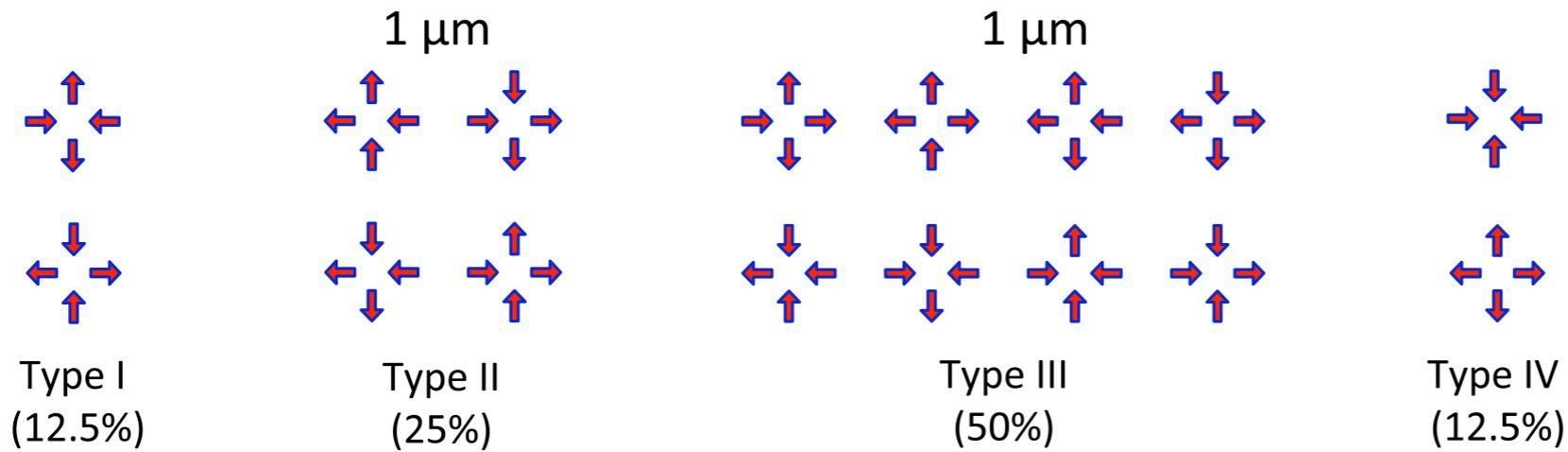
Favorable Pair Alignments

kedvező beállítás

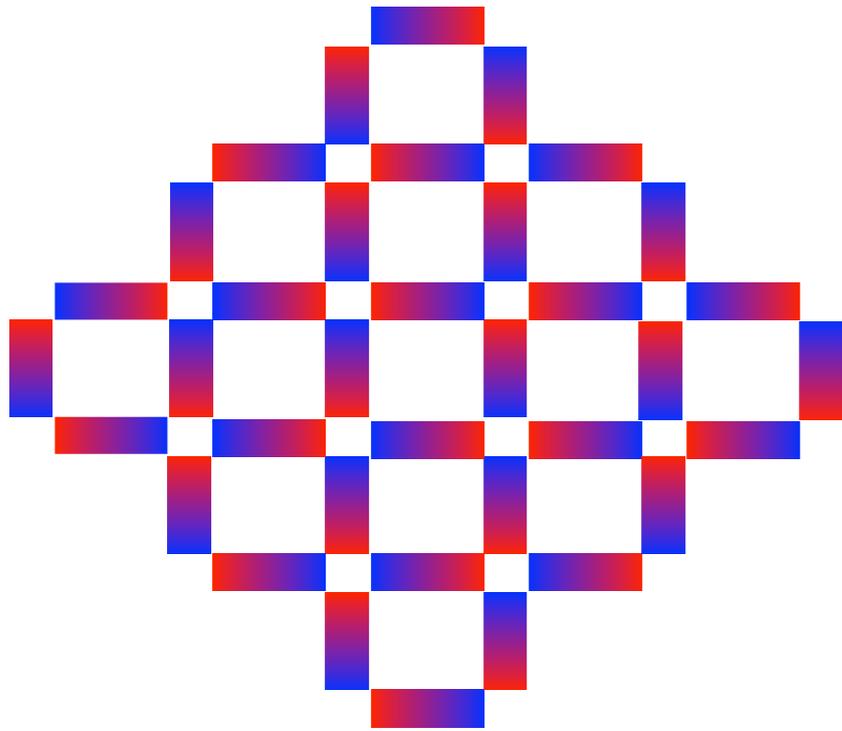


Unfavorable Pair Alignments

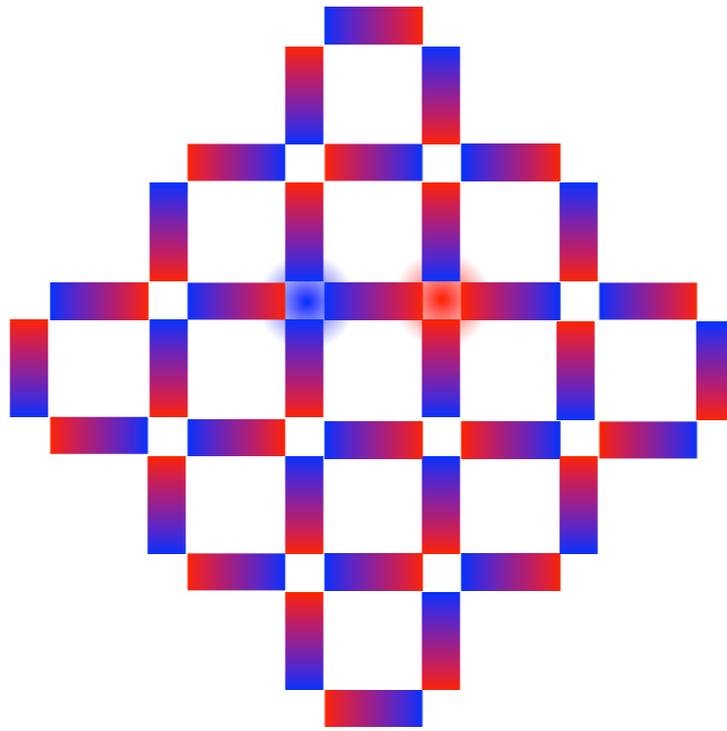
kedvezőtlen beállítás



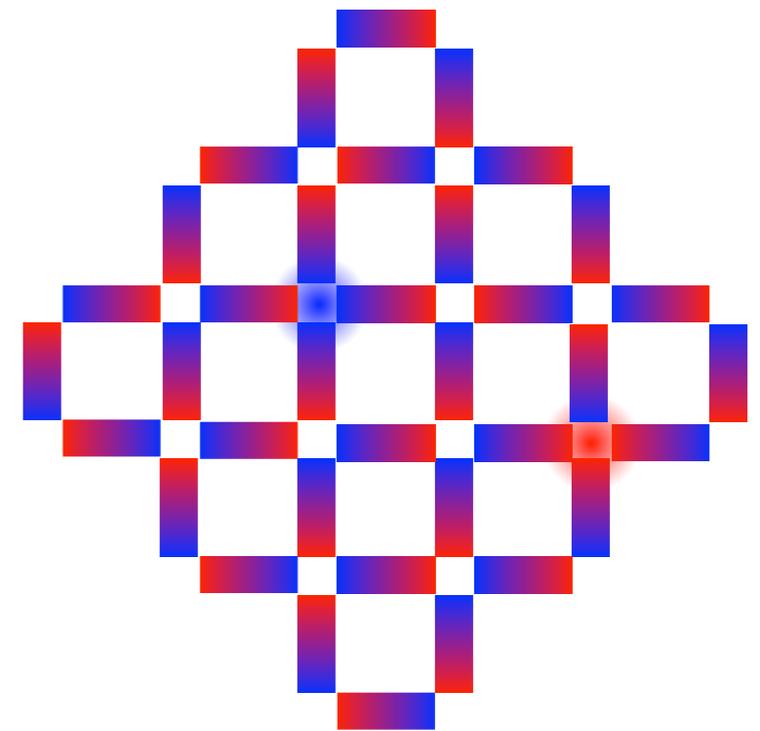
Mesterséges spinjég - bemutatott kísérlet



jégállapot: 2-be 2-ki



két monopólust kapunk,
ha megforgatunk egy
mágnest



A monopólusok
eltávolódnak egymástól,
ha további mágneseket
forgatunk meg.

Köszönöm a figyelmet !