

## Kwantowe chłodzenie krytyczne w materiałach molekularnych

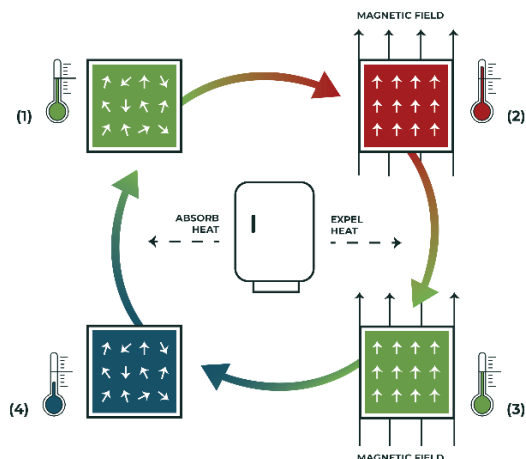
Globalne zapotrzebowanie na hel wynosi około 170 milionów metrów sześciennych rocznie, zwłaszcza w placówkach badawczych, przemysłowych i medycznych, w których konieczne jest stosowanie ciekłego helu — na całym świecie działa 50 000 tomografów rezonansu magnetycznego (MRI). Co więcej, obecnie prawie cały hel jest produktem ubocznym produkcji metanu i gazu ziemnego, co zwiększa ślad węglowy. Na świecie **w końcu zabraknie helu** i nastąpi stopniowe zwiększanie jego cen, co jest **niebezpieczne dla szpitali oraz postępu w nauce i przemyśle**. Alternatywa dla bezhelowego chłodzenia jest więc ważnym celem, by móc sprostać obecnym wyzwaniom.

Projekt ma na celu zbadanie **kwantowych cieczy spinowych (QSL)** i **efektu magnetokalorycznego (MCE)** w silnie sfrustrowanych materiałach molekularnych w procesach chłodzenia przez demagnetyzację. QSL to egzotyczny stan materii charakteryzujący się brakiem uporządkowania magnetycznego, silnie splątanymi momentami magnetycznymi i kwazicząstkami, które zachowują się inaczej niż cząstki tworzące zwykłą materię. QSL można znaleźć tylko w sfrustrowanych magnetykach, gdy konkurujące ze sobą oddziaływania pomiędzy momentami magnetycznymi (ukazane jako małe magnesy) nie mogą znaleźć satysfakcjonującej równowagi. Przykładowo, trzy momenty magnetyczne w rogach trójkąta chciałyby ustawić się antyrównolegle do siebie. Gdy dwa z nich są zorientowane antyrównolegle, górę i dół, trzeci nie może znaleźć optymalnej orientacji (Rys. 1, po prawej).

W MCE **materiał nagrzewa się lub ochładza podczas przykładania lub usuwania pola magnetycznego**, co może być wykorzystane w cyklu termodynamicznym do osiągnięcia niskich temperatur bez helu. Przykład takiego cyklu przedstawia Rys. 1. Chłodzenie magnetyczne jest do **40% wydajniejsze** niż konwencjonalna kompresja gazu stosowana w domowych lodówkach. Co więcej, chłodzenie oparte na MCE jest wolne od fluorowanych gazów cieplarnianych i bezpośredniej emisji CO<sub>2</sub>, jest prawie bezgłośnie i może być efektywnie skalowane bez utraty wydajności. W nauce chłodzenie magnetyczne ma kluczowe znaczenie dla **zastosowań kosmicznych i technologii kwantowych**, ponieważ pozwala uzyskać nawet temperatury poniżej 1 K, czyli w pobliżu zera bezwzględnego. Teoretyczne przewidywania wskazują, że spadek temperatury związany z MCE jest **znacznie większy w przypadku silnie sfrustrowanych magnetyków** niż w przypadku magnetyków niefrustrowanych. Ponadto, kandydaci do QSL są proponowani jako **doskonale materiały magnetokaloryczne**, zwłaszcza w pobliżu punktu, w którym przechodzą do stanu QSL. Ten rodzaj chłodzenia nazywany jest **kwantowym chłodzeniem krytycznym**, co jest związane z nagłym spadkiem temperatury w pobliżu punktu przejścia, który jest znacznie większy niż w przypadku zwykłych chłodziw magnetycznych.

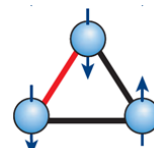
QSL są rzadko badane w molekularnych materiałach magnetycznych. Magnetyki molekularne to związki koordynacyjne składające się z dwóch rodzajów bloków budulcowych, **magnetycznych centrów metalowych i ligandów** (zwykle cząsteczki organiczne), które można zaprojektować w szerokim zakresie, wybierając różne kombinacje bloków budulcowych podczas syntezy. Przypomina to zabawę klockami dla dzieci, gdzie rolę klocków zastępują atomy lub cząsteczki. Pomimo obiecującego potencjału wykorzystania chemii koordynacyjnej, tylko **10% kandydatów na QSL** to związki organiczne lub molekularne. Jednocześnie magnetyki molekularne posiadają dobre właściwości MCE, szczególnie w zakresie temperatur kriogenicznych. Mimo to, ilość doniesień na temat MCE w sfrustrowanych materiałach molekularnych można policzyć na palcach jednej ręki. Proponowany projekt wypełni tę lukę.

Innowacyjność projektu opiera się na systematycznych badaniach, które mają prowadzić do opracowania strategii projektowania i manipulacji układami molekularnymi o właściwościach wzmocnionych frustracją magnetyczną. Realizacja projektu pozwoli na wybór odpowiedniej kombinacji bloków budulcowych do QSL i przygotowanie wytycznych do dalszych badań. Głównym celem jest znalezienie **doskonałych chłodziw magnetokalorycznych, które będą tanie, wolne od helu i przyjazne dla środowiska**. Podjęcie tego tematu w Polsce ma ogromny potencjał dla pionierskich badań, ponieważ pozostaje on tu w dużej mierze niezbadany. Eksploracja tego obszaru może przyspieszyć postęp naukowy i utorować drogę innym badaczom.



Rys. 1. Góra: chłodzenie magnetyczne<sup>1</sup>:

- (1) ogrzewanie materiału,
- (2) oddanie ciepła,
- (3) chłodzenie materiału,
- (4) pochłanianie ciepła.



Po prawej: przykład frustracji<sup>2</sup>

<sup>1</sup> MagnoTherm®. Magnetic Cooling Cycle. <https://www.magnotherm.com/technology> (dostęp: 01-03-2024)

<sup>2</sup> Balents, L. Spin liquids in frustrated magnets. *Nature* 464, 199–208 (2010).