

Pierre Weiss

Tři přednášky o magnetismu

Časopis pro pěstování matematiky a fysiky, Vol. 55 (1926), No. 3, 275--282

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/124052>

## Terms of use:

© Union of Czech Mathematicians and Physicists, 1926

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

## Tři přednášky o magnetismu.

*Pierre Weiss.*

Obsah přednášek konaných dne 11. a 13. listopadu 1925 na Karlově univerzitě a dne 14. listopadu 1925 v Institut Français v Praze.

Přeložil dr. J. Šafránek.

P r v n í p ř e d n á š k a.

*Problém ferromagnetismu.*

Problém ferromagnetismu záleží ve výzkumu velikosti magnetisace jako funkce pole a teploty. Hlavní jeho obtíž tkví v tom, že pozorované zjevy jsou průměrnými hodnotami individuálních vlastností mikroskopických krystalků, rozložených ve všemožných směrech, jež tvoří obvyklé látky ferromagnetické, železo, nikl atd. Podrobné studium jistých látek, jako je pyrrhotin, které nalézáme v krásných krystalech v přírodě, uspíšilo řešení problému. Vedlo k tomuto výsledku: Vzájemné účinky molekul pyrrhotinu mohou být vykládány jako účinek strukturního pole úměrného intenzitě magnetisace. Silná magnetisace, kterou mohou mít látky ferromagnetické a okolnost, že se neřídí zákonem Langevinovým, vedou k domněnce, že u těchto látek nositelé momentů nejsou — jako u látek paramagnetických — bez vzájemného účinku. Případ pyrrhotinu vtiskl myšlenku, že jejich vzájemné účinky orientační mohou být vyjádřeny polem úměrným magnetisaci, které se přičítá k poli vnějšímu, a které jsem nazval polem molekulárním.

Tato teorie pole molekulárního, kombinovaná se zákonem paramagnetismu, řeší problém ferromagnetismu. Ona vedla k jistému počtu výsledků shodných s fakty, které v tomto resumé hodláme vypočítati.

1. Existence spontánní magnetisace a její změna s teplotou.

Z teorie pole molekulárního vyplývá ihned, že i není-li žádného pole vnějšího, magnetisace látky ferromagnetické nabývá hodnoty konečné — to jest magnetisace spontánní. Snadno se můžeme přesvědčiti, že tato magnetisace spontánní není nic jiného než to, co nazýváme obecně magnetisací nasycení.

Z teorie můžeme počítati hodnotu spontánní magnetisace pro všechny teploty; ona ubývá od nuly absolutní a anuluje se pro jistou teplotu, kterou nazýváme bodem Curieovým. Změna tepelná,

takto nalezená, jest konformní s tou, kterou dává pokus pro magnetit, až na nepatrnou úchylku při nízkých teplotách.

2. Látky ferromagnetické nad bodem Curieovým. Teorie pole molekulárního ukazuje, že v tomto oboru převratná hodnota koeficientu magnetisace jest úměrná rozdílu mezi teplotou uvažovanou a bodem Curieovým. Tento zákon byl verifikován velkým počtem přesných pokusů.

3. Diskontinuita specifických tepel. Tepelná anomalie látek ferromagnetických jest známa dávno; teorie molekulárního pole dovolila poznati její pravou povahu; je to diskontinuita specifického tepla v bodu Curieově. Velikost této diskontinuity byla počítána na základě údajů čistě magnetických a nalezena v souhlase s výsledky měření kalorimetrických.

4. Zjev magnetokalorický. Je to zvratný děj tepelný, který doprovází magnetisaci. Byl pozorován a výsledek pozorování je ve shodě s tím, který dává teorie.

5. Synthesa vlastností pyrrhotinu. Připouštíme-li, že v krystalu má koeficient úměrnosti s polem magnetickým hodnoty různící se podle tří hlavních os, pak je možno rekonstruovati vlastnosti krystalu pyrrhotin v celé jich bohaté tvářnosti.

Hypothese molekulárního pole, spojená se zákonem paramagnetismu, byla tedy široce potvrzena fakty. Než přece jen, srovnáváme-li výsledky teorie s velmi úplnou a velmi přesnou topografií magnetických vlastností niklu, jež byla provedena, pak postřehneme některé nesrovnatelné rozpory.

Docházíme k přesvědčení, že bylo by zapotřebí poopraviti zákon paramagnetismu, abychom obnovili souhlas, a na druhé straně, že zákon molekulárního pole až příliš odpovídá experimentálním faktům, než aby měl býti opuštěn. Byla tedy hledána příčina rozporů v základní hypotese o stálosti momentů atomických. Víme, že atomický moment niklu jest při nízkých teplotách 3 magnetony a nad bodem Curieovým 8. Zavedeme-li do teorie proměnlivost atomického momentu, pak rozpory mohou býti odstraněny.

Ostatně podle toho, co víme, tato změna atomického momentu nemůže býti leč rozpojitá, neboť zdánlivá kontinuita jest zjevem statistickým: v každém okamžiku máme směs atomů o 3 a 8 magnetonech a mění se jenom poměr směsi.

Jest zajímavo poznamenati, že rozdíl mezi dvěma momenty, které může mít atom niklu, jest 5 experimentálních magnetonů, tedy jeden magneton Bohřův.

Zbývalo by pro rozšíření problému ferromagnetismu, tak jak jsme jej stanovili, znáti, podle jakých zákonů se děje přechod od jednoho momentu atomického ke druhému. Kdežto tato intraatomová část mechanismu stavově rovnice ferromagnetismu nám ještě uniká, molekulární část problému může býti vysvětlena metodou, které jsme užili.

## Druhá přednáška.

### *Atomové momenty.*

Jakýkoli magnet charakterisujeme jeho momentem; to jest magnetické množství, násobené vzdáleností, která dělí jeho póly. Moment jakéhokoli tělesa jest výslednice momentů jeho různých částí; a jestliže v myšlenkách je dělíme až na atomy, pak jsme vedeni k tomu, že moment tělesa jest výslednice momentů všech atomů, které je skládají.

Tato výslednice jest jednoduše součet, když všechny magnety atomové jsou paralelní. Pro tento případ je třeba, aby látka byla magnetována velmi silným polem. Tato podmínka je nutná, ale ne postačující: tepelné pohyby rotační způsobují, že elementární magnety mají jistý sklon vzhledem k poli. Jenom při absolutní nule jsou skutečně paralelní. Postačí tedy dělit pozorovaný moment počtem přítomných atomů, abychom obdrželi atomový moment.

Abychom dostali atomový moment, je tedy třeba měřiti magnetisaci nasycení při nízkých teplotách. Toto určení, provedené při 20° absol. pro železo a nikl, ukázalo, že atomový moment železa jest 11tinásobek, atomový moment niklu 3násobek téhož elementárního momentu, rovného 1123·5 pro gramatom. Tento společný násobek nazývá se magneton. Pozdější měření ukázala, že všechny atomové momenty jsou celistvými násobky tohoto magnetonu.<sup>1)</sup>

Studium slitin kovů ferromagnetických rozšířilo tyto údaje. Čistý kobalt jest magneticky příliš tvrdý, než aby byl nasycen. Do slitin vstupuje s 9 magnetony v atomu. Sloučenina  $\text{Fe}_2\text{Co}$ , více magnetická než kovy, které ji skládají, má 36 magnetonů v molekule, to jest 12 v atomu. Studium slitin dovoluje ještě poznati železo o 10 magnetonech, ferronikly  $\text{Fe}_2\text{Ni}$  a  $\text{Fe}_3\text{Ni}_2$  mají oba 9 magnetonů v atomu.

Již na těchto příkladech poznáváme všeobecný fakt: Za různých podmínek fysikálních a chemických může týž atom nabýti více stavů, ve kterých má různý počet magnetonů.

Atomové momenty, které lze zkoumati při velmi nízkých teplotách, jsou v omezeném počtu. Daleko bohatší zdroj poznání máme ve výpočtu atomového momentu z Curieovy konstanty látek paramagnetických, který provádíme pomocí formule, kterou Langevin odvodil pomocí statistické mechaniky.

Tato formule jest aplikována v první řadě na dokonalé plyny. Pro kyslík dává s velikým přiblížením 10 magnetonů pro atom (výsledek pokusu jest 9·992). Postuláty Langevinovy teorie jsou

<sup>1)</sup> Tuto společnou míru atomových momentů nazývám experimentální magneton, abych jej odlišil od magnetonu Bohrova, který je odvozen z teorie kvant, a je pětkrát větší.

splněny také solnými roztoky. Pro soli niklu více pozorovatelů našlo s velikou přesností 16 magnetonů v atomu nezávisle na koncentraci. Kovový nikl dal 3 magnetony. Studium roztoků přináší tedy nový příklad proměnlivosti atomového momentu ve funkci podmínek fyzikálně-chemických.

Roztoky obsahují všeobecně více nositelů momentů různé povahy; jsou to ionty různého druhu a často produkty hydrolysy. Poměry těchto nositelů momentů se mění s koncentrací, nebo s přidáním kyseliny. Avšak, protože — pro různý chemický charakter — titi nositelé mají různé momenty, proto měříme všeobecně jenom střední momenty, závislé na koncentraci a na vlivu součástí. Při extrémních koncentracích, nebo přidáním přiměřených reagentů, zjednoduší se vlastnosti roztoků a objeví se celistvá čísla magnetonů. Tak byla prokázána pro  $\text{Fe}^{+++}$  existence stavů při 26, 27, 29 magnetonech, při  $\text{Fe}^{++}$  existence stavu při 26 magnetonech, pro iont  $\text{Co}^{++}$  stavu o 24 a 25 magnetonech a pro ion  $\text{Cr}^{+++}$  stavů o 18 a 19 magnetonech.

Při kovech paramagnetických nad bodem Curieovým, při solích krystalizovaných a také při jistém počtu roztoků solných, vidíme na základě změny koeficientu magnetisace jako funkce teploty, že nelze aplikovati zákony magnetisace dokonalých plynů. Avšak teorie molekulárního pole ukazuje, jak pro tyto látky je možno odvoditi z pokusu konstantu Curieovu, kterou by měly, kdyby tvořeny jsouc týmiž molekulami, uvedeny byly do stavu plynů dokonalých. Známe-li konstantu Curieovu, odvodíme z ní atomový moment. Tak nalézáme pro nikl při vysokých teplotách 8 magnetonů, pro palladium 8 magnetonů a pro platinu v různých intervalech teploturních 8 a 9 magnetonů.

Pevné soli chovají se analogickým způsobem jako kovy nad bodem Curieovým a lze pro ně aplikovati touže metodu výpočtu atomového momentu. Tak bylo nalezeno pro soli železité 29 magnetonů pro atom, pro soli železnaté 26 magnetonů, pro soli niklu 16 magnetonů, pro soli manganaté 27 a 29 magnetonů, soli měďnaté 10 magnetonů. Tyto momenty jsou zhusta tytéž jako momenty, které byly nalezeny v roztocích. To nepřekvapuje, protože jsme přesvědčeni, že v solných roztocích všech koncentrací jsou soli úplně ionisovány a že v pevných solích jsou jádra krystalických sítí zaujata ionty.

Proměnlivost atomového momentu jest jeden z podstatných základů atomové mechaniky. Dovolí nám najíti sblížení mezi magnetonem experimentálním a magnetonem Bohrovým, odvozeným z kvantové teorie. Oba momenty 3 a 8 magnetonů, nalezené pro kovový nikl, liší se o jeden magneton Bohrův. Dále pak, povšimneme-li si tabulky, ve které jsou shrnuty pro některé ionty počet elektronů, které obsahují a momenty atomové:

	Elektronů	Magnetonů
V <sup>'''</sup>	19	9
Cr <sup>'''</sup>	21	19
Fe <sup>'''</sup>	23	29

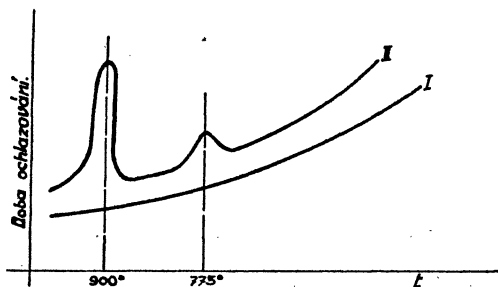
vidíme, že zvětšení počtu elektronů o dvě jednotky odpovídá vzrůst o 10 magnetonů experimentálních, čili o dva magnetony Bohrovy.

Až doposud neměly úspěchu jakékoli pokusy přenést všeobecným způsobem naměřené magnetické momenty na magneton Bohrov, než otázka ta jest v proudu. Jsme oprávněni souditi, že až bude rozřešena, bude učiněn důležitý krok v před v atomové mechanice.

### Třetí přednáška.

#### *Tepelná anomálie látek ferromagnetických a zjev magnetokalorický.*

Tepelná anomálie látek ferromagnetických. Ponecháme-li samu sobě nějakou látku, na příklad kus mědi, dřívě



Obr. 1.

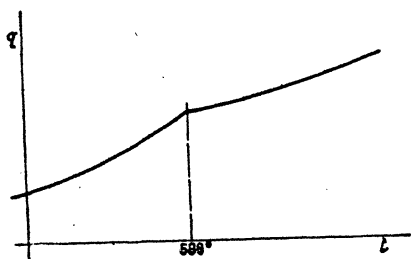
ji zahřívá, pak její ochlazování jest nejprve prudké, a potom se zvolňuje v té míře, jak teplota klesá. Studium toho, jak se zvolňuje ochlazování, to jest času nutného ke snížení teploty o 1°, tvoří »thermickou analýsu« látky. Obr. 1.

Křivka I jest výsledek thermické analýzy mědi, křivka II výsledek této analýzy pro železo. Kdežto první je dokonale pravidelná, tvoří druhá dvě nepravidelnosti při teplotách 900° a 775°. Avšak při 900° doznává železo změnu stavu, kterou lze srovnati na příklad s přeměnou síry oktaedrické na síru prismatickou. Železo  $\gamma$  nad 900° jest jistou látkou, železo  $\beta$  pod touto teplotou jest jinou látkou; železo  $\gamma$  krystalisuje v soustavě krychlové v plošně centrovanych krychlích; železo  $\beta$  v centrovanych krychlích.

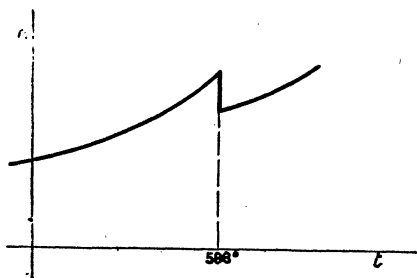
Specifický vohum železa  $\gamma$  jest menší asi o 2%, než vohum železa  $\beta$  při téže teplotě 100°. Při této teplotě mohou existovati obě fáze, železo  $\gamma$  i železo  $\beta$  v jakýchkoli poměrech. Je

to uvolněné transformační teplo, které zpomaluje ochlazování při  $900^{\circ}$ .

Pro nepravidelnost křivky při  $775^{\circ}$  předpokládáme, že při této teplotě děje se druhá transformace, a sice železa  $\beta$  v železo  $\alpha$ , a objevení se magnetických vlastností zdá se potvrzovati na první pohled tento výklad. Než všechna úsilí, směřující k tomu, aby odkryt byl rozdíl ve tvaru krystalickém mezi železem  $\beta$  a železem  $\alpha$ , byla marna. Není ani diskontinuity objemu, a vlastnosti magnetické nejsou takové, jaké by vyžadovala přítomnost dvou fází v proměnných poměrech při téže teplotě. Tomuto uvolnění se tepla, které není ve spojení se skutečnou změnou stavu, bylo dáno jméno tepelná anomálie látek ferromagnetických.



Obr. 2.



Obr. 3.

Měření tepelného množství nutného k tomu, aby jiná látka ferromagnetická — magnetit — byla uvedena z obyčejné teploty na teplotu  $t$ , doplnilo objasnění této anomálie. Tato množství tepla jsou znázorněna křivkou obrazu 2. Tato křivka má lom v Curieově bodu magnetitu při  $588^{\circ}$ . Avšak právě teplo specifické jest  $dq/dt$ ; je tedy dáno tangentou ke křivce obrazu 2. a výsledky takto znázorněné můžeme také vykládati tak, že pravíme, že v Curieově bodě má specifické teplo  $C$  diskontinuitu, jak ji znázorňuje obr. 3.

Významem této zvláštnosti s ohledem na teorii molekulárního pole byl nalezen výklad tepelné anomálie ferromagnetických látek.

Molekulární pole resultuje, jak jsme viděli, ze vzájemných účinků orientačních magnetických molekul. Přičítá se k poli vnějšímu, aby vytvořilo pole celkové, jež působí na látku, a protože pole molekulární jest nesrovnatelně větší než pole vnější, které dovedeme vzbuditi, tedy chápeme výmínečnou velikost magnetisace látek ferromagnetických. Na druhé straně snadno ukážeme, že látka magnetisovaná účinkem svého pole molekulárního má méně energie, než táž látka, o níž předpokládáme, že je zbavena vlastností magnetických. Avšak taková látka, jako železo, má »spontánní magnetisaci«, která se zmenšuje postupně od obyčejné teploty až

k bodu Curieovu. Tato magnetisace spontánní existuje i tehdy, když látka je ve stavu neutrálním, avšak jest zastřena, protože, směřujíc všemi směry v různých částech látky, ruší se ve svém celku. Zahříváme-li tedy látku ferromagnetickou, třeba zdánlivě neutrální, je třeba dodati více tepla nutného ke zvýšení jeho teploty, to je teplo demagnetisační. Z toho vzniká doplňkový člen ve specifickém teple, který zmizí náhle při bodu Curieově, protože při této teplotě je demagnetisace úplná. Nastává tedy, jak to ukazuje kalorimetr, diskontinuita pravého tepla specifického při bodu Curieově. Další tabulka obsahuje pro tři látky ferromagnetické hodnoty diskontinuity, vypočítané prostřednictvím veličin čistě magnetických a veličin, které dává kalorimetr.

	Měření kalorimetrické	Výpočet z veličin magnetických
Železo . . . . .	0·112	0·136.
Nikl . . . . .	0·027	0·025,
Magnetit . . . . .	0·050	0·048.

Souhlas je tak dobrý, jak to dovoluje přesnost pokusů. Tato verifikace ukazuje skutečný charakter tepelné anomálie látek ferromagnetických při bodu Curieově. Jsou-li železo  $\gamma$  a  $\beta$  dvě látky různé, pak železo  $\beta$  a  $\alpha$  jsou jedna a táž látka, která se řídí známými zákony.

#### *Zjev magnetokalorický.*

Nyní budu mluvit o jiném zjevu, zjevu magnetokalorickém, který je příbuzný s tepelnou anomálií, kterou jsme studovali, a který, tak jako tato, zůstal tajemným, až byl učiněn pokus o vysvětlení pomocí teorie pole molekulárního.

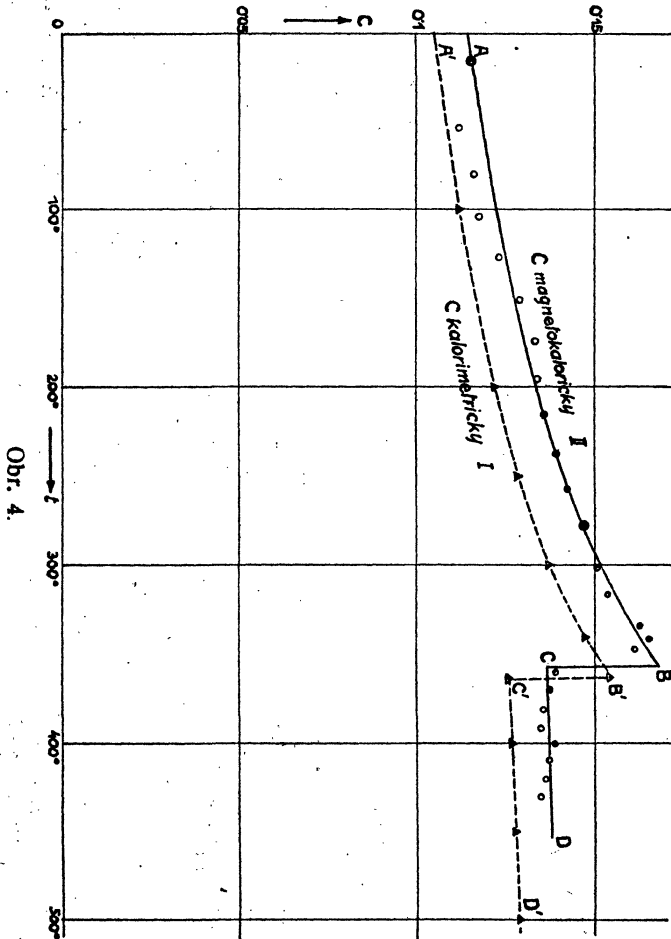
V práci vysoce přesní o magnetisaci niklu při různých teplotách zpozorovali jsme s A. Piccardem, že je-li nikl uveden do magnetického pole, jeho teplota stoupá, a že klesá, když jej vytáhneme z pole. Mysleli jsme nejprve, že je to chyba experimentální, kterou přes veškerou úsilí se nám nepodařilo odstraniti. Na cestu správného výkladu byli jsme přivedeni, znamenajíce, že mizí nad bodem Curieovým. Mysleli jsme tedy, že může pocházeti od energie magnetického pole molekulárního.

Počet thermodynamický nám ukázal, že zvrtný zjev thermický, který provází magnetisaci, byl právě té velikosti, jako zjev pozorovaný. Po tomto poznání se již nejednalo o to, hledati příčinu chyb, nýbrž studovati nový zjev. Zákony, jimiž se řídí, pokusem byly nalezeny jako shodné s oněmi, které dovoluje předvídati thermodynamika, doplněná znalostmi o magnetisaci spontánní a poli molekulárním. Teorie látek ferromagnetických je tím ještě potvrzena.

Kontrola teorie pokusem může býti provedena ve formě naznačené na obr. 4., kde křivka  $A'B'C'$  dává právě teplo specifické niklu, měřené pomocí kalorimetru a křivka  $II$  tutéž veličinu, odvo-



zenou ze zjevu magnetokalorického a z měření magnetisace. Tato křivka reprodukuje první křivku ve všech jejích zvláštnostech: stále rychlejší stoupaní od obyčejné teploty k bodu Curieovu, rychlý pokles při této teplotě a nad ní téměř konstantnost.



Bylo by velmi odvážno chtít odvozovati metodu z těchto dvou případů, kde vysvětlení získáno bylo způsobem nepředvídaným. Avšak nemýlíme se, jestliže soudíme, že je třeba zvětšiti počet pokusů, a dáti pozor na všechny jejich zvláštnosti. Teorie zjevů příbuzných přivodí pak zajímavé sblížení.