

# Laserová spektroskopie magneticky uspořádaných materiálů

Vladislav Wohlrath

Matematicko-fyzikální fakulta UK

Katedra chemické fyziky a optiky (KChFO)

Vedoucí: prof. RNDr. Petr Němec, Ph.D.

Konzultace teorie: doc. RNDr. Tomáš Ostatnický, Ph.D.

16. června 2022

- ▶ Materiálový výzkum pro spintroniku
  - ▶ Pro spintroniku důležité magnetické materiály

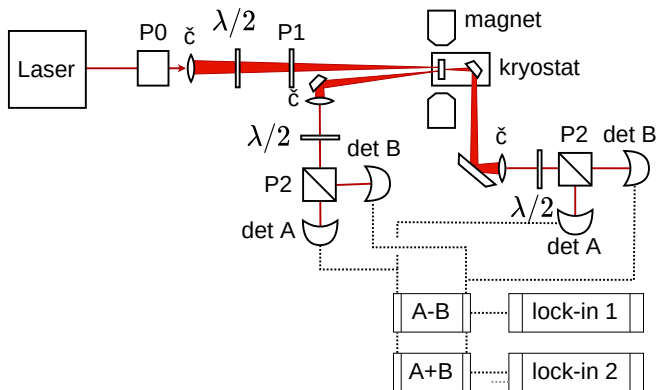
- ▶ Materiálový výzkum pro spintroniku
  - ▶ Pro spintroniku důležité magnetické materiály
- ▶ Probíhající experiment v laboratoři optospintroniky (LOS)
  - ▶ Metoda studia magneticky uspořádaných materiálů pomocí kvadratických magneto-optických jevů ( $\propto \mathbf{M}^2$ )
    - ▶ Širší třída materiálů než lineární ( $\propto \mathbf{M}$ ) – antiiferomagnety

- ▶ Materiálový výzkum pro spintroniku
  - ▶ Pro spintroniku důležité magnetické materiály
- ▶ Probíhající experiment v laboratoři optospintroniky (LOS)
  - ▶ Metoda studia magneticky uspořádaných materiálů pomocí kvadratických magneto-optických jevů ( $\propto \mathbf{M}^2$ )
    - ▶ Širší třída materiálů než lineární ( $\propto \mathbf{M}$ ) – antiferomagnety
  - ▶ Předchozí práce
    - ▶ Kimák, bakalářská práce 2017
    - ▶ Wohlrath, bakalářská práce 2018
    - ▶ Kubaščík, bakalářská práce 2019
    - ▶ Kimák, diplomová práce 2019

- ▶ Materiálový výzkum pro spintroniku
  - ▶ Pro spintroniku důležité magnetické materiály
- ▶ Probíhající experiment v laboratoři optospintroniky (LOS)
  - ▶ Metoda studia magneticky uspořádaných materiálů pomocí kvadratických magneto-optických jevů ( $\propto \mathbf{M}^2$ )
    - ▶ Širší třída materiálů než lineární ( $\propto \mathbf{M}$ ) – antiferomagnety
  - ▶ Předchozí práce
    - ▶ Kimák, bakalářská práce 2017
    - ▶ Wohlrath, bakalářská práce 2018
    - ▶ Kubaščík, bakalářská práce 2019
    - ▶ Kimák, diplomová práce 2019
  - ▶ Nekonzistentní výsledky
- ▶ **Cíl práce:** identifikovat problémy, případně je odstranit

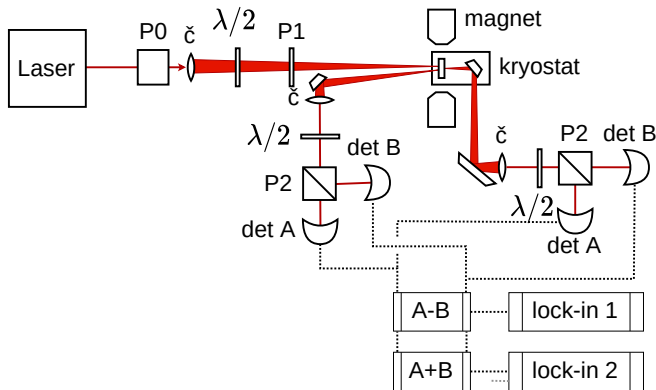
# Popis experimentu

- ▶ 2-D elektromagnet, v rovině vzorku (transversální pole)
  - ▶ Změna směru magnetického pole o konstantní velikosti



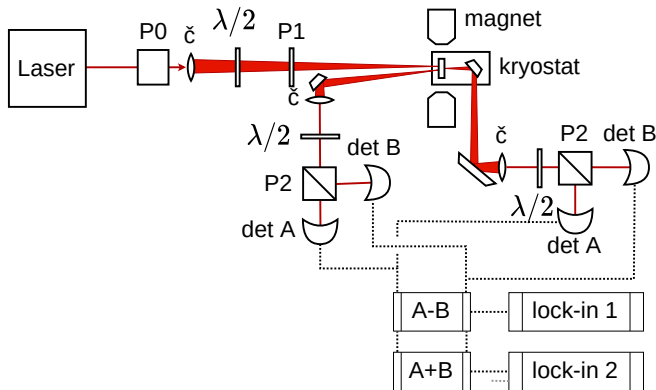
# Popis experimentu

- ▶ 2-D elektromagnet, v rovině vzorku (transversální pole)
  - ▶ Změna směru magnetického pole o konstantní velikosti
- ▶ Detekce stočení polarizace (schéma optického můstku)



# Popis experimentu

- ▶ 2-D elektromagnet, v rovině vzorku (transversální pole)
  - ▶ Změna směru magnetického pole o konstantní velikosti
- ▶ Detekce stočení polarizace (schéma optického můstku)
- ▶ (Téměř) kolmý dopad a transversální magnetizace
  - ▶ Vymizení lineárních jevů





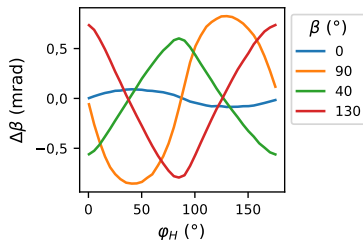
1. Nastavená vlnová délka  $\lambda$

1. Nastavená vlnová délka  $\lambda$
2. Rotující vnější pole  
 $\varphi_H \in (0^\circ, 360^\circ)$

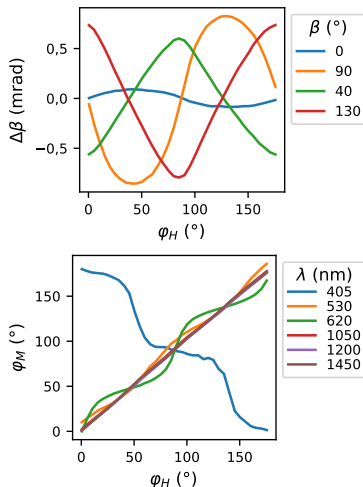
1. Nastavená vlnová délka  $\lambda$
2. Rotující vnější pole  
 $\varphi_H \in (0^\circ, 360^\circ)$
3. Měreno stočení polarizace  $\Delta\beta$

# Popis experimentu

1. Nastavená vlnová délka  $\lambda$
2. Rotující vnější pole  
 $\varphi_H \in (0^\circ, 360^\circ)$
3. Měreno stočení polarizace  $\Delta\beta$
4. Opakováno pro různé vstupní polarizace  $\beta$

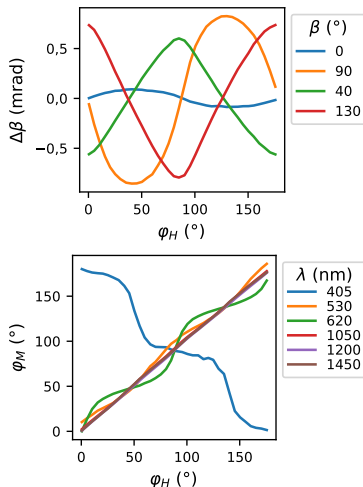


1. Nastavená vlnová délka  $\lambda$
2. Rotující vnější pole  
 $\varphi_H \in (0^\circ, 360^\circ)$
3. Měření stočení polarizace  $\Delta\beta$
4. Opakováno pro různé vstupní polarizace  $\beta$
5. Očekávaná závislost  
 $\Delta\beta = P \sin 2(\varphi_M - \beta)$ 
  - Určení  $P(\lambda)$  a  $\varphi_M(\varphi_H)$



# Popis experimentu

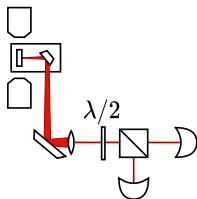
1. Nastavená vlnová délka  $\lambda$
2. Rotující vnější pole  
 $\varphi_H \in (0^\circ, 360^\circ)$
3. Měření stočení polarizace  $\Delta\beta$
4. Opakováno pro různé vstupní polarizace  $\beta$
5. Očekávaná závislost  
$$\Delta\beta = P \sin 2(\varphi_M - \beta)$$
  - ▶ Určení  $P(\lambda)$  a  $\varphi_M(\varphi_H)$
  - ▶ **Problém:** nekonzistence napříč  $\lambda$



- Objeveno několik problémů

- 1. Optika

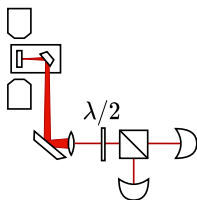
- $\lambda/2$  vlnové destičky nemají fázové zpoždění přesně  $\pi/2$
    - Zrcadla zanáší fázové zpoždění mezi s- a p- (pokrytí)



## ► Objeveno několik problémů

### 1. Optika

- $\lambda/2$  vlnové destičky nemají fázové zpoždění přesně  $\pi/2$
- Zrcadla zanáší fázové zpoždění mezi s- a p- (pokrytí)
- Oba problémy způsobují, že měřený signál neodpovídá čisté rotaci polarizace ( $\Delta\beta$ ), ale v podstatě náhodnému mixu rotace a elipticity (tj. jinou projekci komplexní Kerrovy rotace)

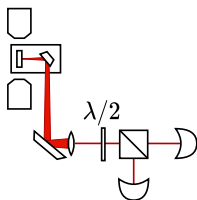




## ► Objeveno několik problémů

### 1. Optika

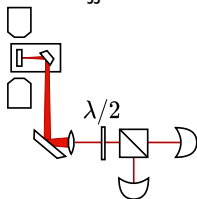
- $\lambda/2$  vlnové destičky nemají fázové zpoždění přesně  $\pi/2$
- Zrcadla zanáší fázové zpoždění mezi s- a p- (pokrytí)
- Oba problémy způsobují, že měřený signál neodpovídá čisté rotaci polarizace ( $\Delta\beta$ ), ale v podstatě náhodnému mixu rotace a elipticity (tj. jinou projekci komplexní Kerrovy rotace)
- Nutná buď kompenzace nebo charakterizace



## ► Objeveno několik problémů

### 1. Optika

- $\lambda/2$  vlnové destičky nemají fázové zpoždění přesně  $\pi/2$
- Zrcadla zanáší fázové zpoždění mezi s- a p- (pokrytí)
- Oba problémy způsobují, že měřený signál neodpovídá čisté rotaci polarizace ( $\Delta\beta$ ), ale v podstatě náhodnému mixu rotace a elipticity (tj. jinou projekci komplexní Kerrovy rotace)
- Nutná buď kompenzace nebo charakterizace
- Navrženo a vyzkoušeno několik metod, vybrána ta nejjednodušší



- ▶ Objeveno několik problémů

1. Optika

2. Magneto-optika

- ▶ Dříve používaný vzorec  $\Delta\beta = P \sin 2(\varphi_M - \beta)$  neplatí pro krystaly

- ▶ Objeveno několik problémů

1. Optika

2. Magneto-optika

- ▶ Dříve používaný vzorec  $\Delta\beta = P \sin 2(\varphi_M - \beta)$  neplatí pro krystaly
- ▶ Důkladné přezkoumání relevantní fyziky  $\Rightarrow$  vzorec platný pro kubický vzorek s normálou [001] ( $\gamma =$  úhel in-plane rotace)  
$$\Delta\beta = P_+ \sin 2(\varphi_M - \beta) + P_- \sin 2(-\varphi_M - \beta + 2\gamma)$$

## ► Objeveno několik problémů

### 1. Optika

### 2. Magneto-optika

- Dříve používaný vzorec  $\Delta\beta = P \sin 2(\varphi_M - \beta)$  neplatí pro krystaly
- Důkladné přezkoumání relevantní fyziky  $\Rightarrow$  vzorec platný pro kubický vzorek s normálou [001] ( $\gamma =$  úhel in-plane rotace)  
 $\Delta\beta = P_+ \sin 2(\varphi_M - \beta) + P_- \sin 2(-\varphi_M - \beta + 2\gamma)$
- Po mnoha stránkách vylepšena metodika zpracování dat

- ▶ Objeveno několik problémů
  1. Optika
  2. Magneto-optika
  3. Další problémy
    - ▶ Nepřesnosti v magnetickém poli

- ▶ Objeveno několik problémů
  1. Optika
  2. Magneto-optika
  3. Další problémy
    - ▶ Nepřesnosti v magnetickém poli
    - ▶ Dodatečné MO jevy pocházející od okénka kryostatu – odstranění na základě rozdílné symetrie

- ▶ Objeveno několik problémů
  1. Optika
  2. Magneto-optika
  3. Další problémy
- ▶ Všechny problémy vyřešeny

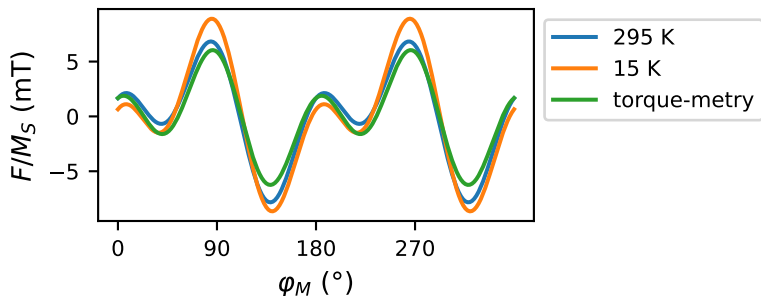


- ▶ Objeveno několik problémů
  1. Optika
  2. Magneto-optika
  3. Další problémy
- ▶ Všechny problémy vyřešeny
- ▶ Ověření funkčnosti metody s feromagnetickými vzorky
  - ▶ Transmisní geometrie: CoFe – 295 K, 15 K
  - ▶ Reflexní geometrie: FeRh – 420 K

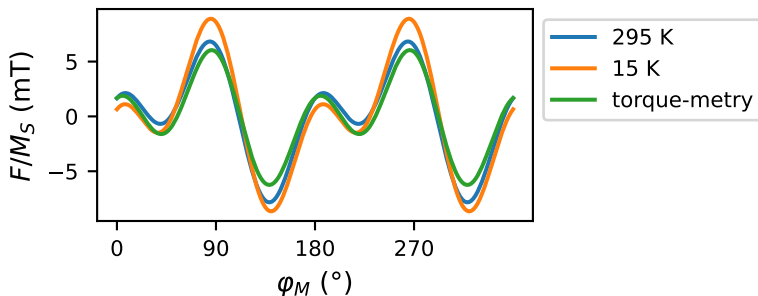
- ▶ Magnetická anizotropie změřená různými vlnovými délkami se velmi přesně shoduje  $\Rightarrow$  důkaz funkčnosti

- ▶ Magnetická anizotropie změřená různými vlnovými délkami se velmi přesně shoduje  $\Rightarrow$  důkaz funkčnosti
- ▶ Shoduje se i s výsledky poskytnutými výrobcem vzorku (torque-metrie)

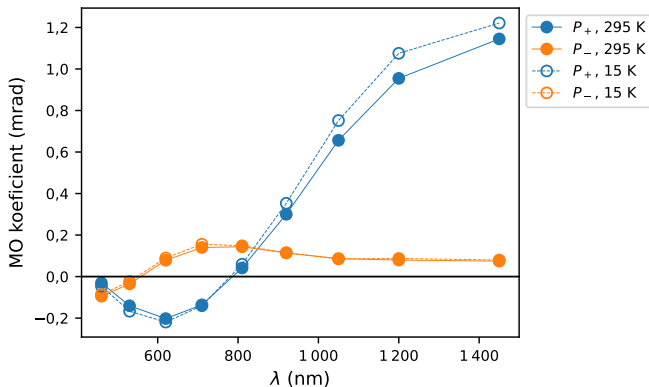
- ▶ Magnetická anizotropie změřená různými vlnovými délkami se velmi přesně shoduje  $\Rightarrow$  důkaz funkčnosti
- ▶ Shoduje se i s výsledky poskytnutými výrobcem vzorku (torque-metrie)
- ▶ Funkcionál magnetické volné energie
  - ▶ Určení snadných/těžkých os magnetizace (minima  $F$ )



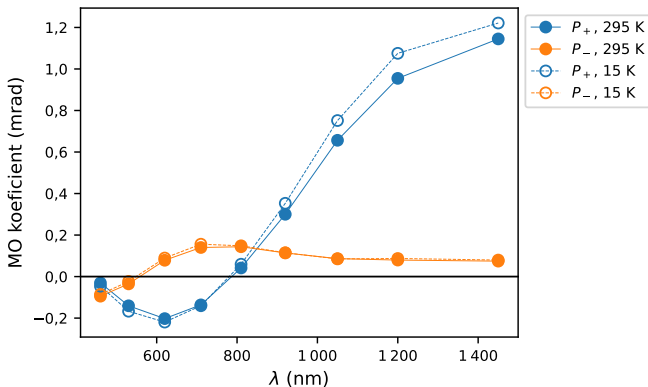
- ▶ Magnetická anizotropie změřená různými vlnovými délkami se velmi přesně shoduje  $\Rightarrow$  důkaz funkčnosti
- ▶ Shoduje se i s výsledky poskytnutými výrobcem vzorku (torque-metrie)
- ▶ Funkcionál magnetické volné energie
  - ▶ Určení snadných/těžkých os magnetizace (minima  $F$ )
- ▶ Slabá závislost na teplotě



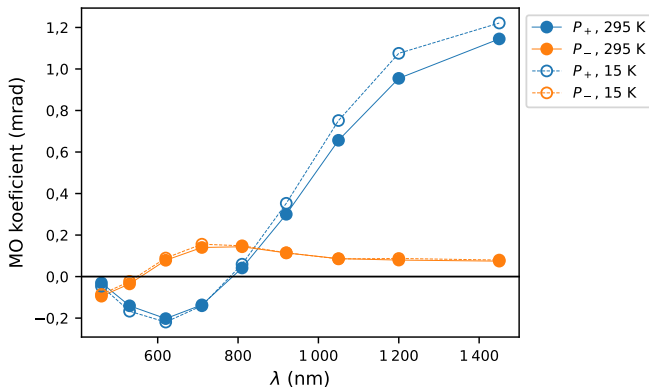
- Spektrum MO koeficientů (izotropní  $P_+$  a anizotropní  $P_-$ )



- ▶ Spektrum MO koeficientů (izotropní  $P_+$  a anizotropní  $P_-$ )
- ▶ Slabá závislost na teplotě

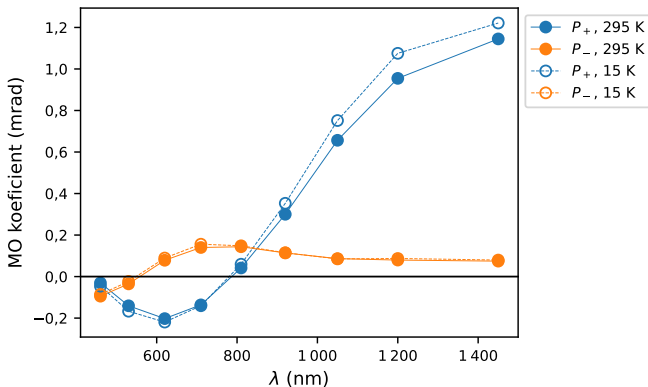


- ▶ Spektrum MO koeficientů (izotropní  $P_+$  a anizotropní  $P_-$ )
- ▶ Slabá závislost na teplotě
- ▶ Změna znaménka obou koeficientů

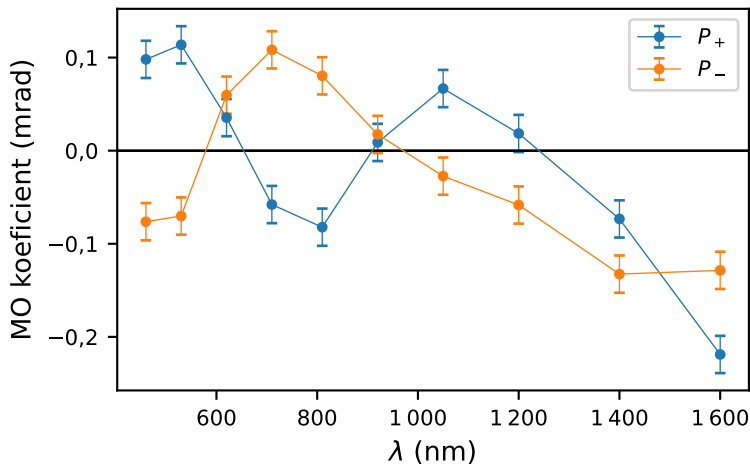




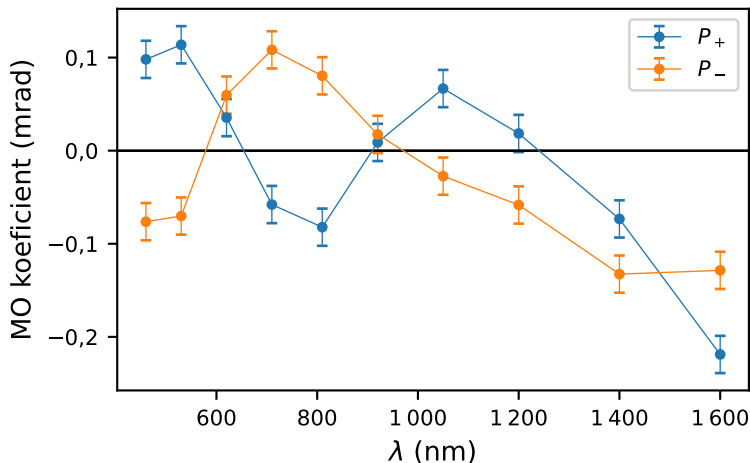
- ▶ Spektrum MO koeficientů (izotropní  $P_+$  a anizotropní  $P_-$ )
- ▶ Slabá závislost na teplotě
- ▶ Změna znaménka obou koeficientů
- ▶ “Maximální anizotropie”:  $P_+ = 0$ ,  $P_+ = P_-$ ,  $P_+ = -P_-$ 
  - ▶ Dosaženo ve viditelné oblasti



## ► Spektrum MO koeficientů

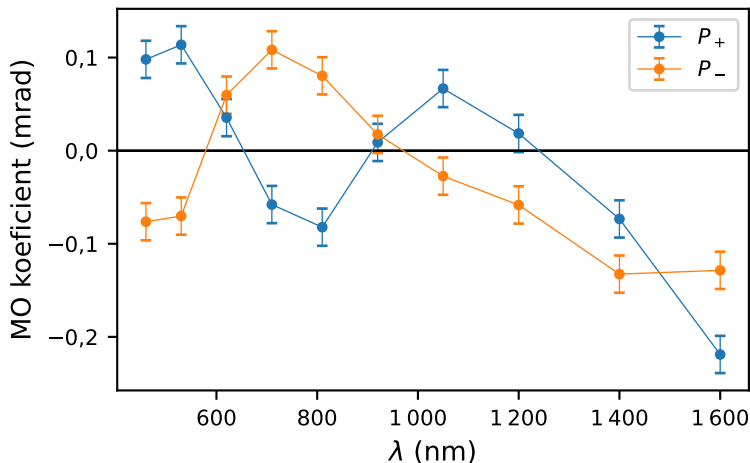


- ▶ Spektrum MO koeficientů
  - ▶ Vysoká anizotropie ( $P_+ = 0$ ,  $P_+ = P_-$ ,  $P_+ = -P_-$ )



## ► Spektrum MO koeficientů

- Vysoká anizotropie ( $P_+ = 0$ ,  $P_+ = P_-$ ,  $P_+ = -P_-$ )
- Velmi silná spektrální závislost



- ▶ Všechny problémy opraveny a metoda je konzistentní

- ▶ Všechny problémy opraveny a metoda je konzistentní
- ▶ Určení magnetické anizotropie ( $\mathbf{M}(\mathbf{H}_{\text{ext}})$ ) pouze z kvadratických jevů
  - ▶ V literatuře nepublikován

- ▶ Všechny problémy opraveny a metoda je konzistentní
- ▶ Určení magnetické anizotropie ( $\mathbf{M}(\mathbf{H}_{\text{ext}})$ ) pouze z kvadratických jevů
  - ▶ V literatuře nepublikován
- ▶ Není nutné otáčet vzorek  $\Rightarrow$  možnost použití kryostatu
  - ▶ V literatuře nepublikován

- ▶ Všechny problémy opraveny a metoda je konzistentní
- ▶ Určení magnetické anizotropie ( $\mathbf{M}(\mathbf{H}_{\text{ext}})$ ) pouze z kvadratických jevů
  - ▶ V literatuře nepublikován
- ▶ Není nutné otáčet vzorek  $\Rightarrow$  možnost použití kryostatu
  - ▶ V literatuře nepublikován
- ▶ Otevřené dveře pro použití metody k výzkumu antiferomagnetů
  - ▶ Již probíhá (Zeynab Sadeghi)



- ▶ Všechny problémy opraveny a metoda je konzistentní
- ▶ Určení magnetické anizotropie ( $M(H_{\text{ext}})$ ) pouze z kvadratických jevů
  - ▶ V literatuře nepublikován
- ▶ Není nutné otáčet vzorek  $\Rightarrow$  možnost použití kryostatu
  - ▶ V literatuře nepublikován
- ▶ Otevřené dveře pro použití metody k výzkumu antiferomagnetů
  - ▶ Již probíhá (Zeynab Sadeghi)
- ▶ Změřená silná anizotropie kvadratického MO jevu se silnou spektrální závislostí
  - ▶ **Důsledky pro ostatní metody**, které ho využívají (a často zanedbávají anizotropii)
    - ▶ Pump and probe metody, studium hysterezních smyček, ...

1. Automatizace experimentu

1. Automatizace experimentu
2. Poruchová teorie optiky anizotropních multivrstev
  - ▶ Nový přístup k výpočtu Jonesových matic založený na poruchovém počtu přenosových matic

1. Automatizace experimentu
2. Poruchová teorie optiky anizotropních multivrstev
  - ▶ Nový přístup k výpočtu Jonesových matic založený na poruchovém počtu přenosových matic
  - ▶ Použitelný ve výrazně širší třídě situací než jiné dostupné metody

1. Automatizace experimentu
2. Poruchová teorie optiky anizotropních multivrstev
  - ▶ Nový přístup k výpočtu Jonesových matic založený na poruchovém počtu přenosových matic
  - ▶ Použitelný ve výrazně širší třídě situací než jiné dostupné metody
3. “Stokesovy kovektory”
  - ▶ Formalismus pro popis optických detekčních schémat lineárních v intenzitě (např. optický můstek)

1. Automatizace experimentu
2. Poruchová teorie optiky anizotropních multivrstev
  - ▶ Nový přístup k výpočtu Jonesových matic založený na poruchovém počtu přenosových matic
  - ▶ Použitelný ve výrazně širší třídě situací než jiné dostupné metody
3. “Stokesovy kovektory”
  - ▶ Formalismus pro popis optických detekčních schémat lineárních v intenzitě (např. optický můstek)
  - ▶ Názorná geometrická interpretace
    - ▶ Snadné uvažování o vlivu dodatečných optických prvků v detekční soustavě

1. Automatizace experimentu
2. Poruchová teorie optiky anizotropních multivrstev
  - ▶ Nový přístup k výpočtu Jonesových matic založený na poruchovém počtu přenosových matic
  - ▶ Použitelný ve výrazně širší třídě situací než jiné dostupné metody
3. “Stokesovy kovektory”
  - ▶ Formalismus pro popis optických detekčních schémat lineárních v intenzitě (např. optický můstek)
  - ▶ Názorná geometrická interpretace
    - ▶ Snadné uvažování o vlivu dodatečných optických prvků v detekční soustavě
  - ▶ Návrh několika modifikací optického můstku

- ▶ Konečné opravení dlouhodobě problematické metody studia kvadratických MO jevů ve feromagnetech
  - ▶ Problém se zrcadly měnícími polarizací
  - ▶ Správné pochopení kvadratických MO jevů  $\Rightarrow$  opravený způsob zpracování dat



- ▶ Konečné opravení dlouhodobě problematické metody studia kvadratických MO jevů ve feromagnetech
  - ▶ Problém se zrcadly měnícími polarizací
  - ▶ Správné pochopení kvadratických MO jevů  $\Rightarrow$  opravený způsob zpracování dat
- ▶ Demonstrace a první úspěšné použití metody
  - ▶ Transmisní geometrie: CoFe
  - ▶ Reflexní geometrie: FeRh
  - ▶ První experimenty svého druhu s kryostatem

- ▶ Konečné opravení dlouhodobě problematické metody studia kvadratických MO jevů ve feromagnetech
  - ▶ Problém se zrcadly měnícími polarizací
  - ▶ Správné pochopení kvadratických MO jevů  $\Rightarrow$  opravený způsob zpracování dat
- ▶ Demonstrace a první úspěšné použití metody
  - ▶ Transmisní geometrie: CoFe
  - ▶ Reflexní geometrie: FeRh
  - ▶ První experimenty svého druhu s kryostatem
- ▶ Změřena silná anizotropie kvadratického jevu
  - ▶ Důsledky pro ostatní metody využívající kvadratické MO jevy (pump-probe, studium hysterezních smyček, ...)

- ▶ Konečné opravení dlouhodobě problematické metody studia kvadratických MO jevů ve feromagnetech
  - ▶ Problém se zrcadly měnícími polarizací
  - ▶ Správné pochopení kvadratických MO jevů  $\Rightarrow$  opravený způsob zpracování dat
- ▶ Demonstrace a první úspěšné použití metody
  - ▶ Transmisní geometrie: CoFe
  - ▶ Reflexní geometrie: FeRh
  - ▶ První experimenty svého druhu s kryostatem
- ▶ Změřena silná anizotropie kvadratického jevu
  - ▶ Důsledky pro ostatní metody využívající kvadratické MO jevy (pump-probe, studium hysterezních smyček, ...)
- ▶ Využití pro studium antiferomagnetů

## Otázka 1a)

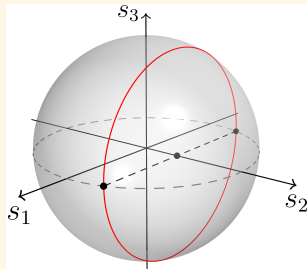
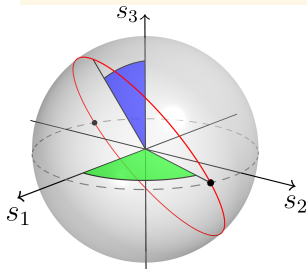
V práci zavádíte zobrazení intenzit Stokesova vektoru plně polarizovaného světla na Poincarého sféře (obr. 1.3). V práci dále řešíte odezvu optického můstku sestávajícího z fázové destičky, polarizačního děliče a dvojice detektorů, přičemž můstek je nastaven tak, aby rozdíl signálů z obou detektorů byl nula (kapitola 4.2). Množina polarizací, které poskutují nulový signál z ideálního optického můstku je pak znázorněna poledníkem mezi pólem kruhových polarizací a polarizací  $0-90^\circ$  (obr. 4.3). Můžete prosím graficky ukázat, jak se tato množina nulové odezvy změní, když můstek nebude sestaven z opticky ideálních elementů? Např. když zpoždění fázové destičky nebude přesně  $\pi/2$ , či fázová destička bude mít různou propustnost pro obě vlastní polarizace?

## Otázka 1a)

[Množiny nulové odezvy pro neideální fázovou destičku?]

## Odpověď 1a)

- ▶ Nepřesné fázové zpoždění
- ▶ Vyklopení do  $s_3$
- ▶ Rozdílná propustnost
- ▶ Posunutí v rovině  $s_1 s_2$



## Otázka 1b)

Jak se v této vizualizaci projeví, když např. k s-polarizovanému světlu na vstupu ( $\beta = 0$ ) a optický můstek je vyvážen) je přičtena např. Kerrova rotace a optický můstek tedy přestane být vyvážen?

## Odpověď 1b)

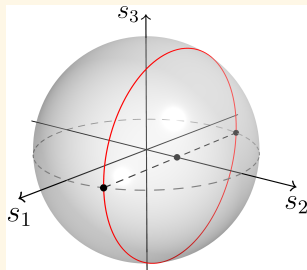
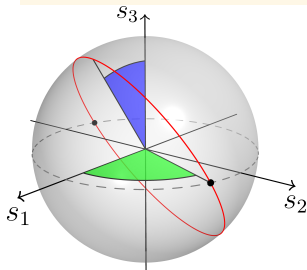
- ▶ Stokesův kovektor zůstane nezměněný – stav detekční aparatury (můstku) se nezměnil
- ▶ Změní se Stokesův vektor – vstupní světlo se změnilo právě o Kerrovu rotaci
- ▶ Detekovaný signál je dán “vzdáleností” bodu od kružnice

## Otázka 1b)

[Jak se projeví Kerrova rotace (rozdášení můstku)?]

## Odpověď 1b)

- ▶ Nepřesné fázové zpoždění
- ▶ Vyklopení do  $s_3$
- ▶ V signálu se projeví elipticita
- ▶ Rozdílná propustnost
- ▶ Posunutí v rovině  $s_1 s_2$
- ▶ Snížení faktoru stočení



## Otázka 2)

Při zpracování magnetooptických spekter CoFe je oddělena magnetooptická odezva (např. určení spekter amplitudy a anizotropie magnetooptického jevu) a magnetická odezva (určení snadných os a magnetické anizotropie), obr. 5.2. V tomto zpracování je magnetická anizotropie určena pro různé vlnové délky světla, což není fyzikálně přesné, ale indikuje správnost oddělení obou jevů. Bylo by možné modifikovat formalismus zpracování dat, aby bylo zcela odděleno magnetické chování vzorku (tj. stejné chování pro všechny vlnové délky světla) a magneto-optická spektrální odpověď vzorku?



## Otázka 2)

[Oddělené zpracování magnetické a magneto-optické odezvy?]

## Odpověď 2)

- ▶ Analýza  $\equiv$  globální minimalizace chybové funkce  $\mathcal{L} = \sum (U_{\text{experiment}} - U_{\text{model}})^2$ , kde  $U_{\text{model}}(M, MO)$
- ▶ Je možné zpracovávat všechny vlnové délky zároveň, pak  $U_{\text{model}}(M, MO(\lambda_1), MO(\lambda_2), \dots)$ 
  - ▶ Různé  $\lambda$  mají různou hladinou šumu, je nutné to zohlednit přidáním vah do chybové funkce  $\mathcal{L} = \sum_{\lambda} w^2(\lambda) (U_{\text{experiment}} - U_{\text{model}})^2$
  - ▶ Pokud jsou výsledky podobné (v jejich rozsahu je model přibližně lineární) je to ekvivalentní váženému průměru výsledků jednotlivých  $\lambda$
  - ▶ Vyzkoušeno, ale kvůli předchozímu bodu nepoužíváno