



# レーザー干渉計型重力波検出器TAMA300の パワーリサイクリング XV (変調・復調系雑音)

国立天文台、東大天文<sup>A</sup>、東大理<sup>B</sup>、東大宇宙線研<sup>C</sup>、東大新領域<sup>D</sup>、  
阪市大理<sup>E</sup>、電通大<sup>F</sup>、情通機<sup>G</sup>、The TAMA Collaboration

佐藤 修一、新井 宏二、高橋 竜太郎、阿久津 智忠<sup>A</sup>、中川 憲保<sup>C</sup>、辰巳 大輔、  
常定 芳基、福嶋 美津広、山崎 利孝、長野 重夫<sup>G</sup>、安東 正樹<sup>B</sup>、森脇 成典<sup>D</sup>、  
武者 満<sup>F</sup>、神田 伸行<sup>E</sup>、三尾 典克<sup>D</sup>、川村 静児、藤本 眞克、坪野 公夫<sup>B</sup>、  
大橋 正健<sup>C</sup>、黒田 和明<sup>C</sup>、他 The TAMA Collaboration

# 概要

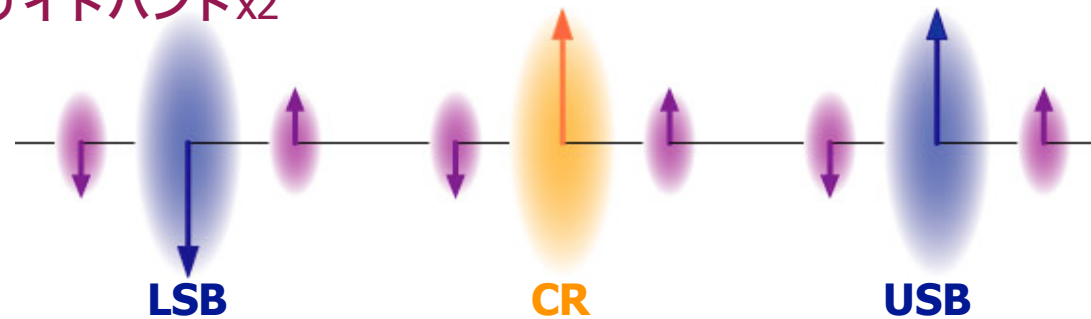
- Introduction
  - TAMA300の感度向上実験とアプローチ
  - 変調・復調系雑音
  - 目的
- 雑音の発現メカニズム
  - 雑音の分類
  - 伝達函数の計算
- 干渉計雑音への寄与の推定
  - RF発振器の位相雑音
  - RF発振器の振幅雑音
- まとめ

# Introduction

- TAMA300の感度向上実験におけるアプローチ
  - 散乱光を起源として雑音になるもの
  - 光電場の雑音サイドバンドを起源とし、変調・復調を通して雑音となるもの
  - 制御ループ間のカップリングを介して雑音となるもの
  - その他
- 変調・復調系を介する雑音
  - 雑音源
    - 位相変調用RF信号発振器の位相雑音・振幅雑音
    - レーザーの周波数雑音・強度雑音
  - 複数の光学系（MC、干渉計等）を透過
  - 復調した後に雑音となる
- 目的
  - 発現メカニズムの理解（非対称性・不完全性とのカップリング）
  - 干渉計設計へのフィードバック
    - 雑音源（信号発振器・レーザー）への仕様要求
    - 伝達経路を特徴付けるパラメータ（非対称性・不完全性）への要求
    - 光学設計（アシンメトリ等）・制御設計（制御帯域等）への要求

## 雑音の発現メカニズム(1) -雑音の分類-

- 光学系への入射電場
  - キャリア(CR) + RFサイドバンド(USB+LSB)
  - それぞれの周りのAF(雑音)サイドバンドx2
  - 合計9種類の電場が存在

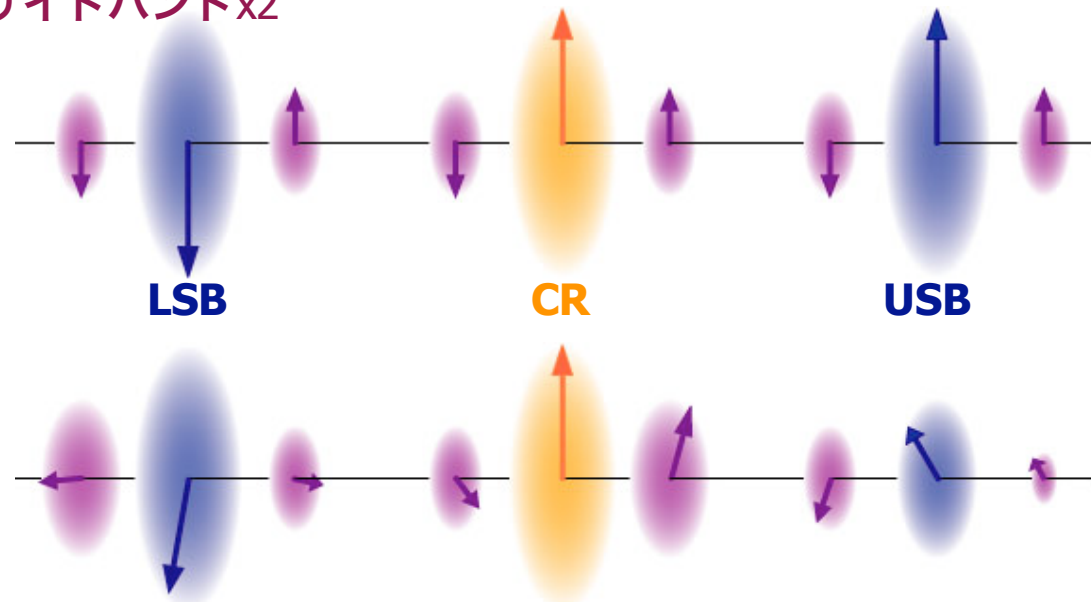


# 雑音の発現メカニズム(1) -雑音の分類-

- 光学系への入射電場
  - キャリア(CR) + RFサイドバンド(USB+LSB)
  - それぞれの周りのAF(雑音)サイドバンドx2
  - 合計9種類の電場が存在

- 雑音の種類
  - レーザー周波数雑音
  - レーザー強度雑音
  - RF信号発振器位相雑音
  - RF信号発振器振幅雑音

- 任意の電場状態を表現



	位相変調(PM)	強度変調(AM)
周波数雑音(fn)	fnPM	fnAM
強度雑音(in)	inPM	inAM
位相雑音(pn)	pnPM	pnAM
振幅雑音(an)	anPM	anPM

## 雑音の発現メカニズム(2) -伝達函数の計算-

- 伝達函数計算のアイデア
  - 8種類の雑音を基底とする
  - 8雑音状態が光学系X透過
    - 互いが互いに散乱される
  - 散乱行列を計算すればよい
- メリット
  - 複数の光学系を経由した多重散乱の効果を簡単に計算できる

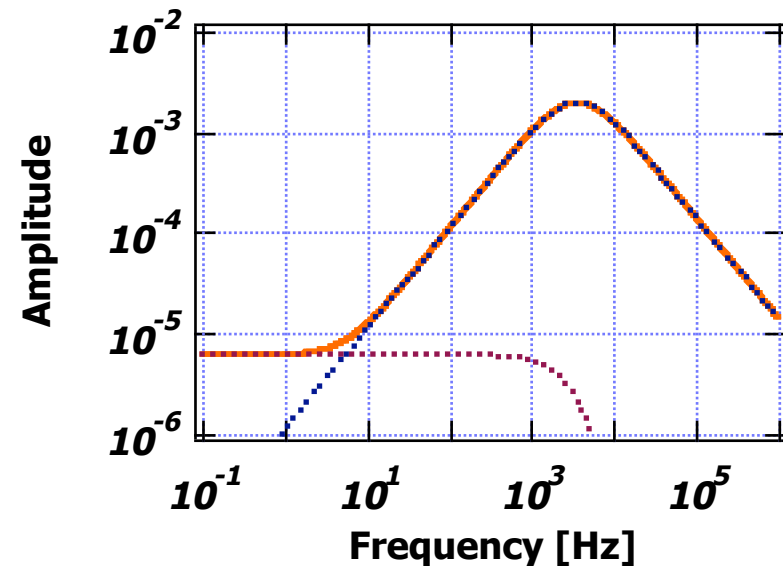
$$\begin{bmatrix} n_{fP} \\ n_{iP} \\ n_{fA} \\ n_{iA} \\ n_{pP} \\ n_{aP} \\ n_{pA} \\ n_{aA} \end{bmatrix} \mathbf{X}_i \begin{bmatrix} n'_{fP} \\ n'_{iP} \\ n'_{fA} \\ n'_{iA} \\ n'_{pP} \\ n'_{aP} \\ n'_{pA} \\ n'_{aA} \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} n''_{fP} \\ n''_{iP} \\ n''_{fA} \\ n''_{iA} \\ n''_{pP} \\ n''_{aP} \\ n''_{pA} \\ n''_{aA} \end{bmatrix}$$

## 雑音の発現メカニズム(3) -伝達函数の計算-

- MCの場合
  - 鏡の反射率はスペック値
  - 不完全性
    - 理想的な動作点と制御点のずれ(dL)
    - 変調周波数とMC-FSRのずれ(dΩ)

$$dL(a(f) + b(f)d\Omega^2)$$

雑音源								
fn PM	in PM	fn AM	in AM	pn PM	an PM	pn AM	an AM	散乱先
1	x	x	x	0	0	0	0	fn PM
x	1	x	x	0	0	0	0	in PM
x	x	1	x	0	0	0	0	fn AM
x	x	x	1	0	0	0	0	in AM
x	x	x	x	1	x	x	x	pn PM
x	x	x	x	x	1	x	x	an PM
x	x	x	x	x	x	1	x	pn AM
x	x	x	x	x	x	x	1	an AM

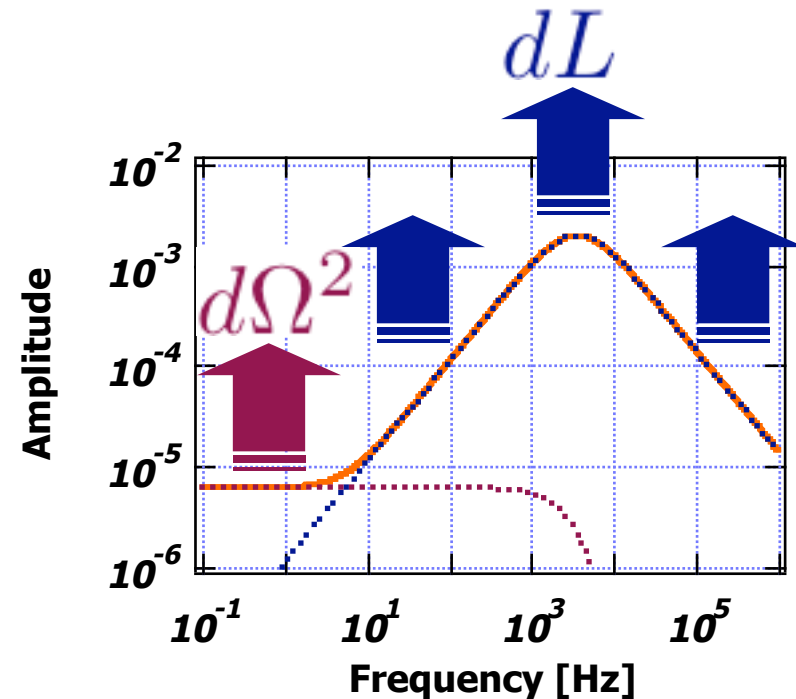


## 雑音の発現メカニズム(3) -伝達函数の計算-

- MCの場合
  - 鏡の反射率はスペック値
  - 不完全性
    - 理想的な動作点と制御点のずれ( $dL$ )
    - 変調周波数とMC-FSRのずれ( $d\Omega$ )

$$dL(a(f) + b(f)d\Omega^2)$$

雑音源								散乱先
fn PM	in PM	fn AM	in AM	pn PM	an PM	pn AM	an AM	
1	x	x	x	0	0	0	0	fn PM
x	1	x	x	0	0	0	0	in PM
x	x	1	x	0	0	0	0	fn AM
x	x	x	1	0	0	0	0	in AM
x	x	x	x	1	x	x	x	pn PM
x	x	x	x	x	1	x	x	an PM
x	x	x	x	x	x	1	x	pn AM
x	x	x	x	x	x	x	1	an AM



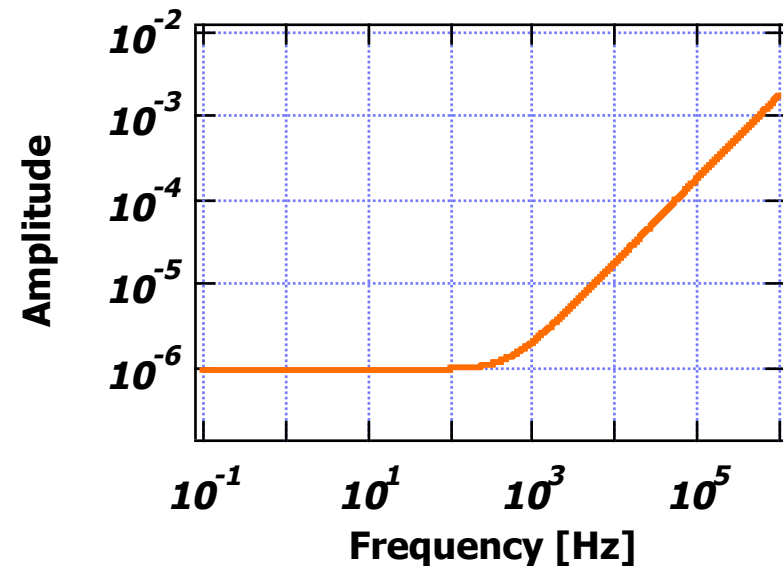


## 雑音の発現メカニズム(4) -伝達函数の計算-

- PRFPMIの場合
  - 不完全性
    - 鏡の反射率の非対称性( $dr$ )
    - 理想的な動作点と制御点のずれ( $dL+$ ,  $dL-$ ,  $dl+$ ,  $dl-$ )
    - 変調周波数とMC-FSRのずれ( $d\Omega$ )

$$c(\alpha)dL_- dl_- + e(\alpha) dr (g(\alpha, f) + d\Omega)$$

雑音源								
fn PM	in PM	fn AM	in AM	pn PM	an PM	pn AM	an AM	散乱先
x	x	x	x	0	0	0	0	fn PM
x	x	x	x	0	0	0	0	in PM
x	x	x	x	0	0	0	0	fn AM
x	x	x	x	0	0	0	0	in AM
x	x	x	x	x	x	x	x	pn PM
x	x	x	x	x	x	x	x	an PM
x	x	x	x	x	x	x	x	pn AM
x	x	x	x	x	x	x	x	an AM

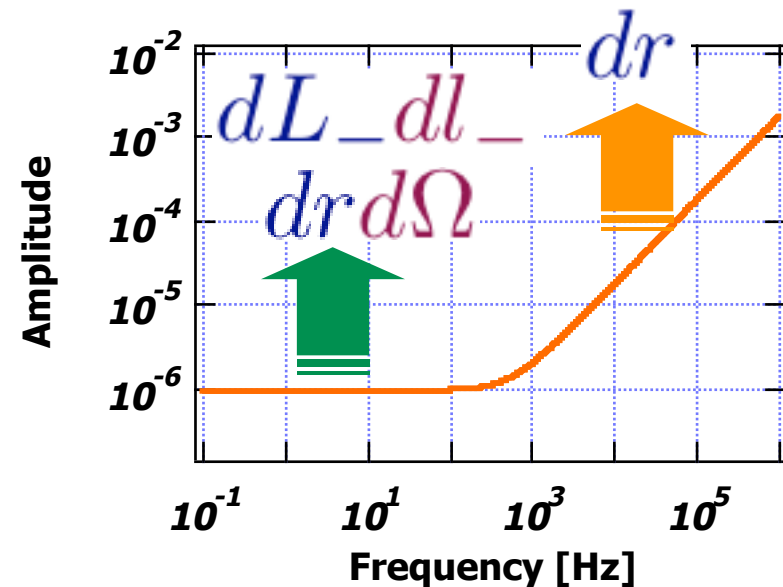


# 雑音の発現メカニズム(4) -伝達函数の計算-

- PRFPMIの場合
  - 不完全性
    - 鏡の反射率の非対称性
    - 理想的な動作点と制御点のずれ( $dL+$ ,  $dL-$ ,  $dl+$ ,  $dl-$ )
    - 変調周波数とMC-FSRのずれ( $d\Omega$ )

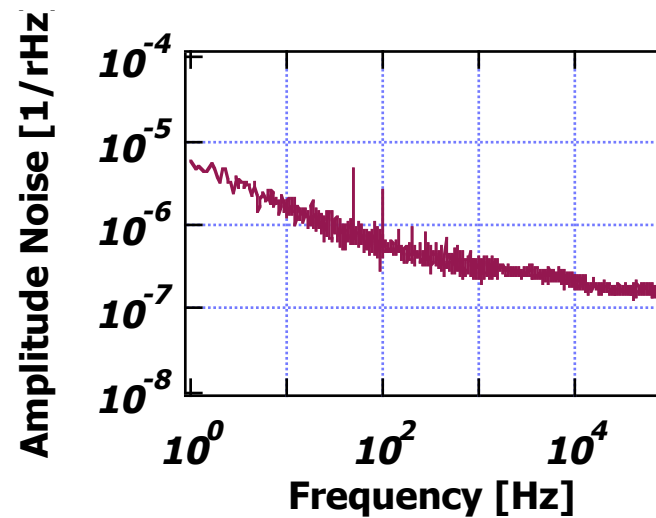
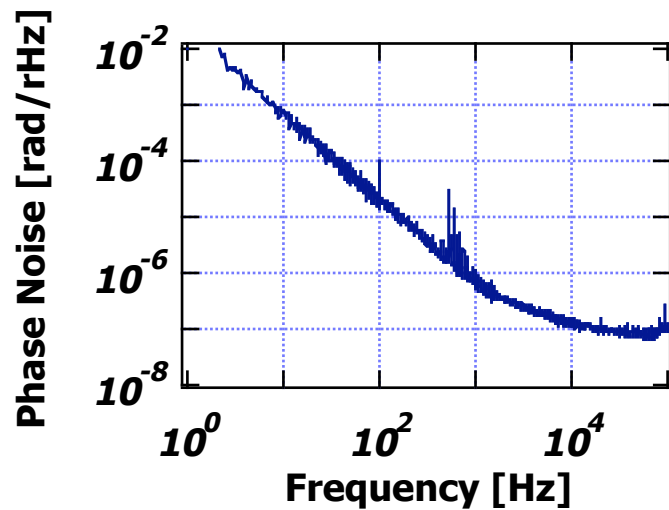
$$c(\alpha) \overset{\text{Contrast Defect}}{dL_-} \overset{\text{MI Imperfection}}{dl_-} + e(\alpha) \overset{\text{Contrast Defect}}{dr} (g(\alpha, f) + \overset{\text{MI Imperfection}}{d\Omega})$$

雑音源								散乱先
fn PM	in PM	fn AM	in AM	pn PM	an PM	pn AM	an AM	
x	x	x	x	0	0	0	0	fn PM
x	x	x	x	0	0	0	0	in PM
x	x	x	x	0	0	0	0	fn AM
x	x	x	x	0	0	0	0	in AM
x	x	x	x	x	x	x	x	pn PM
x	x	x	x	x	x	x	x	an PM
x	x	x	x	x	x	x	x	pn AM
x	x	x	x	x	x	x	x	an AM



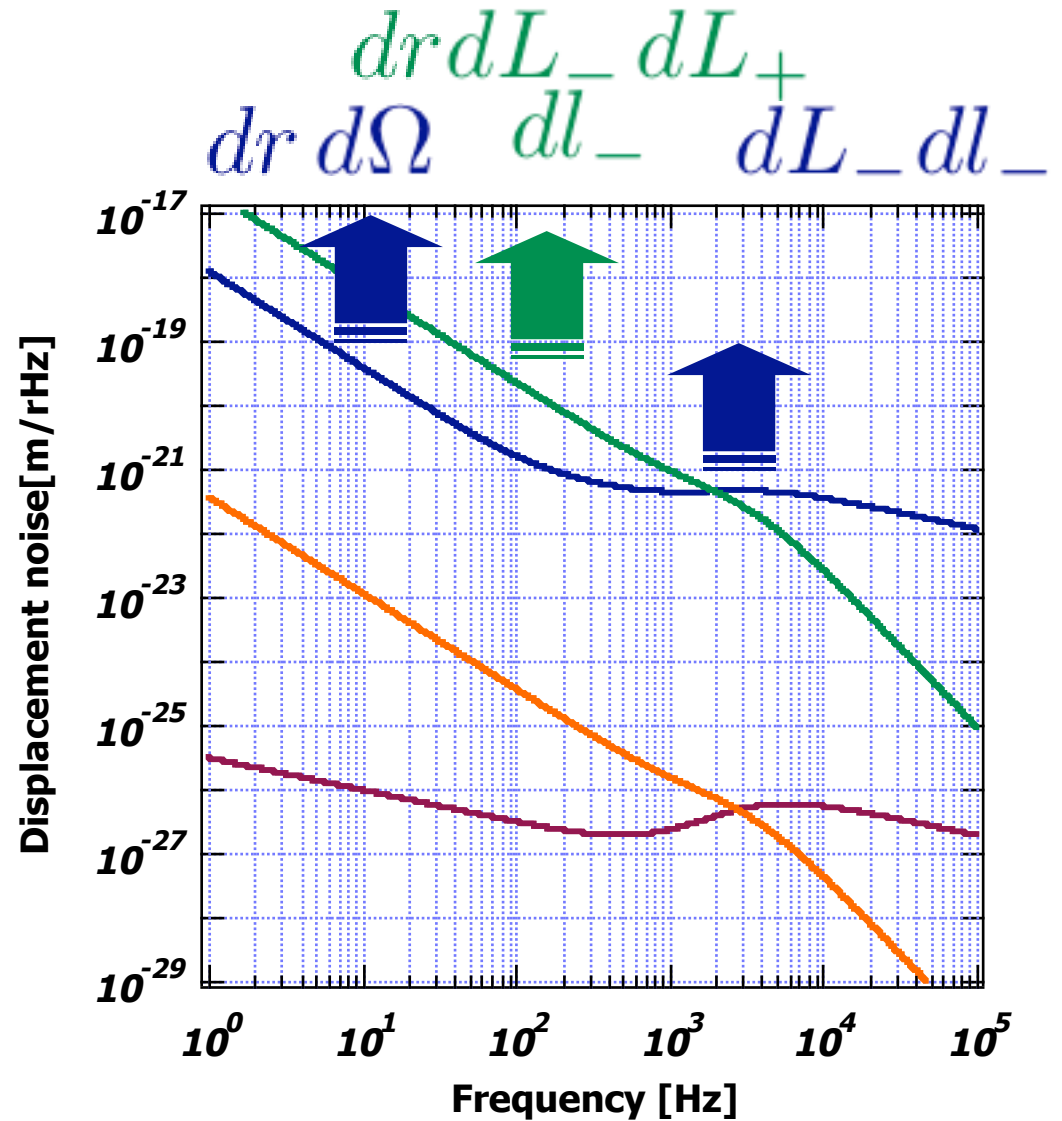
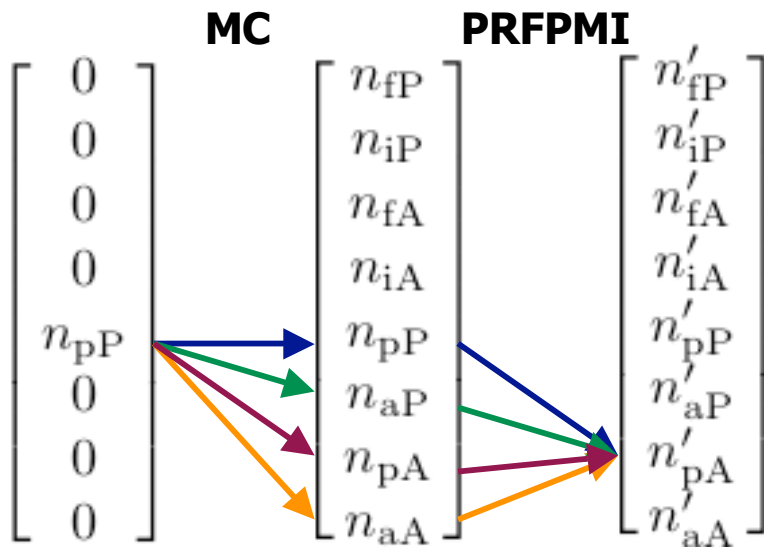
## 干渉計雑音への寄与の推定(1)

- 雑音源
  - RF発振器(VCXO)の実測値をモデル化
- 伝達函数
  - パラメータ値を仮定した計算値
    - 反射率の非対称性 : 10ppm
    - 制御系のオフセット :  $10^{-12}$ m
    - 変調周波数とFSRのずれ : 10Hz



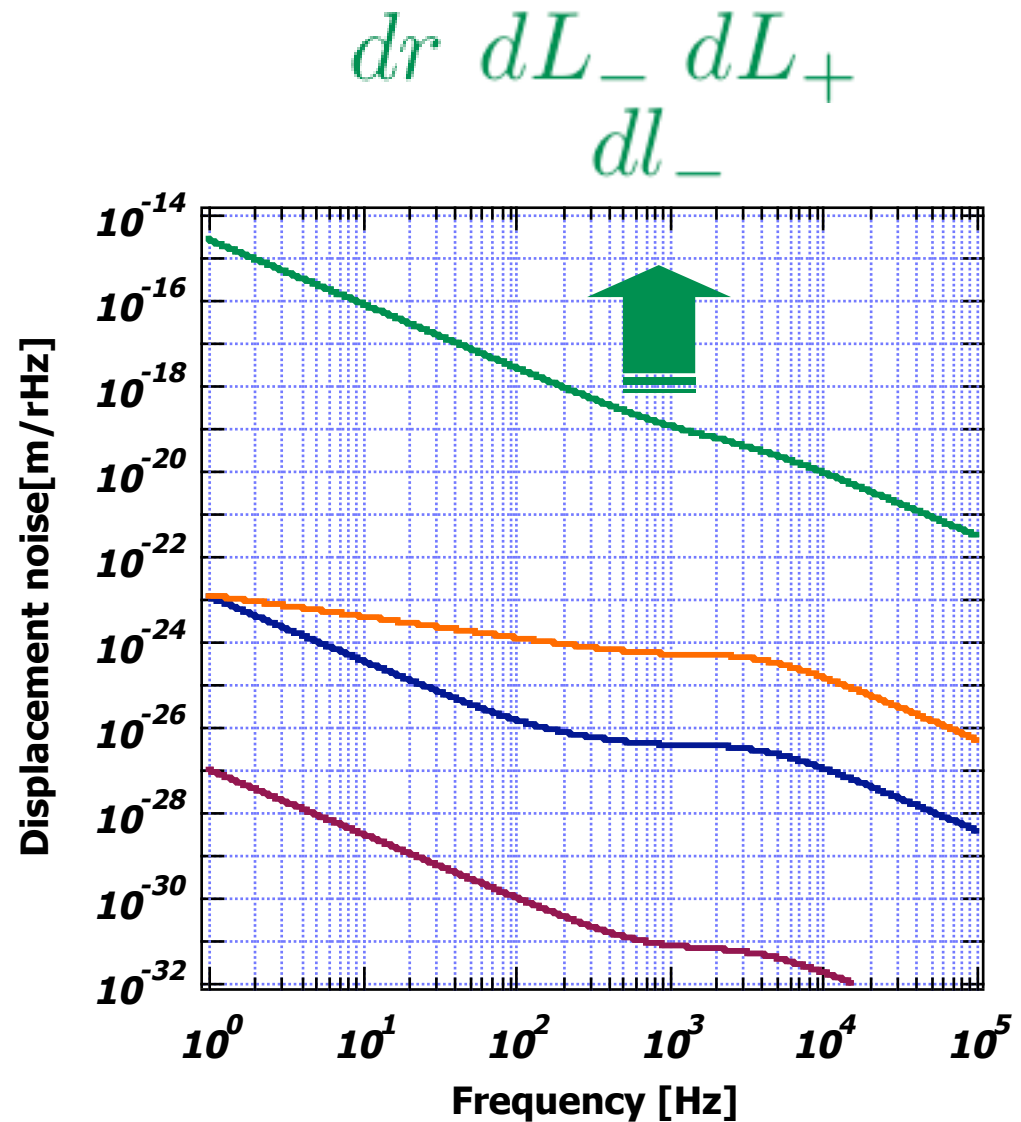
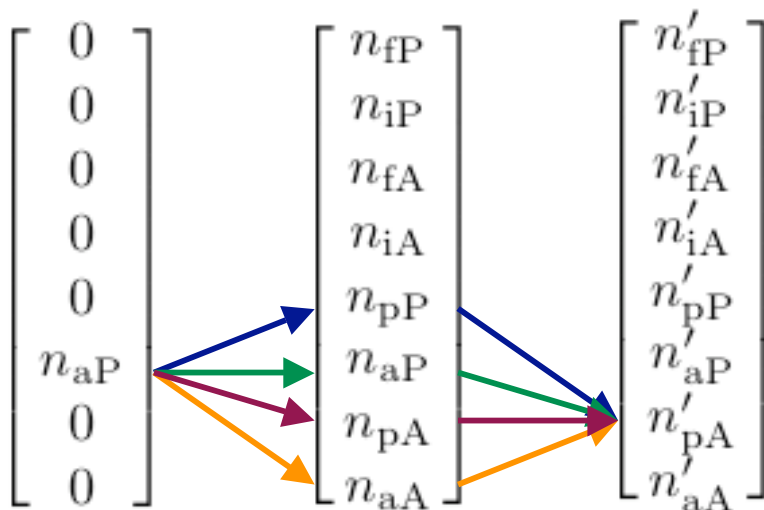
## 干渉計雑音への寄与の推定(2)

- RF信号発振器の位相雑音
  - $pP > pP > pA$
  - $pP > aP > pA$
 の寄与が支配的
- 低周波領域では緑が寄与する可能性



## 干渉計雑音への寄与の推定(3)

- RF信号発振器の振幅雑音
  - $a_P > a_P > p_A$  が支配的に寄与する
  - MCの効果は考えなくてよい



## まとめ

- 変調・復調系による雑音の取り扱い
  - 8種類の雑音に基底分解
  - 光学系による散乱を表す散乱行列の計算
  - 複数の光学系による多重散乱を容易に扱えるようになった
- 今後
  - 実験との擦り合わせ
  - 干渉計設計へのフィードバック