

2019年12月25日

# (B-) DECIGOの長さ制御と測距

道村唯太

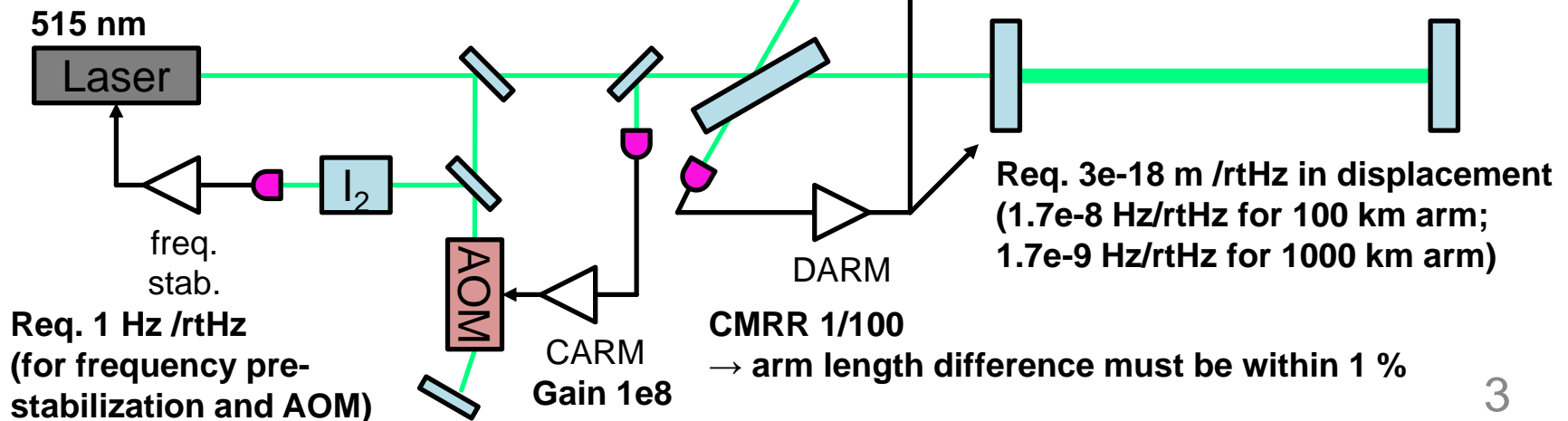
東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻

# 前提

- DECIGO  
1000 km, finesse 10, 100 kg  
(FSR: 150 Hz, cavity pole: 7.5 Hz)  
displacement noise requirement:  $3e-18$  m/rtHz
- B-DECIGO  
100 km, finesse 100, 30 kg  
(FSR: 1500 Hz, cavity pole: 7.5 Hz)  
displacement noise requirement:  $3e-18$  m/rtHz
- Laser source (both DECIGO and B-DECIGO)  
515 nm, iodine stabilized to  $<1$  Hz/rtHz

# 干渉計制御案1(直接干渉法)

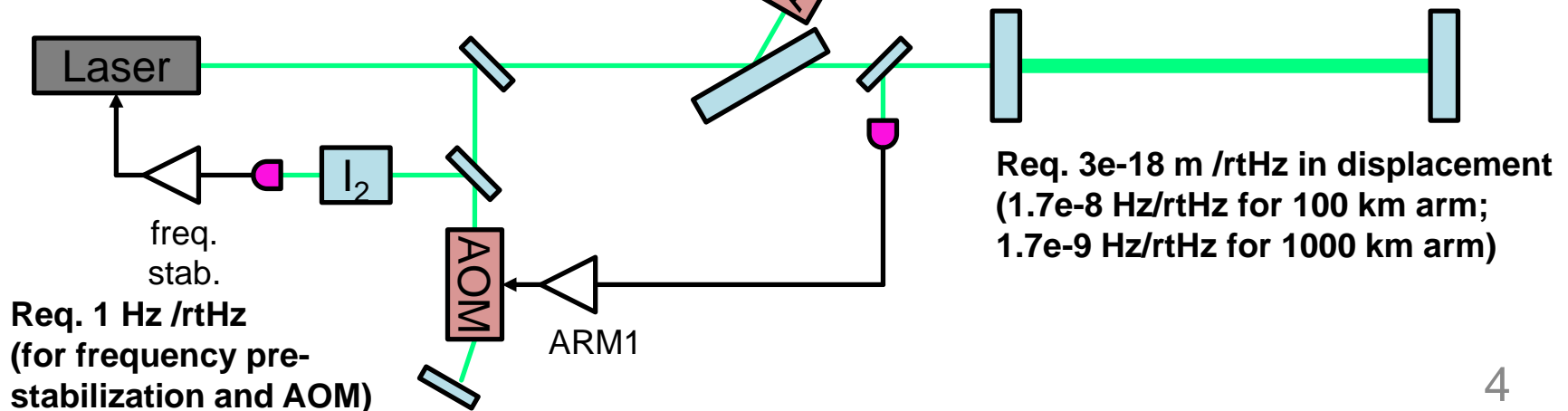
- 1 Hz/rtHz, CARM制御ゲイン $1e8$ , CMRR 1/100で  
 $1 \text{ Hz/rtHz} / 1e8 / 100 = 1e-10 \text{ Hz/rtHz}$   
の周波数雑音を達成
- CMRRのために共振器長の差が1%以下(片腕で0.5%以下)である必要(たぶん案3と同じで干渉計3台を動作させるためには絶対長をより高い精度で合わせる必要がある(案3で後述))
- Short Michelsonの制御も必要



# 干渉計制御案2(周波数シフト法)

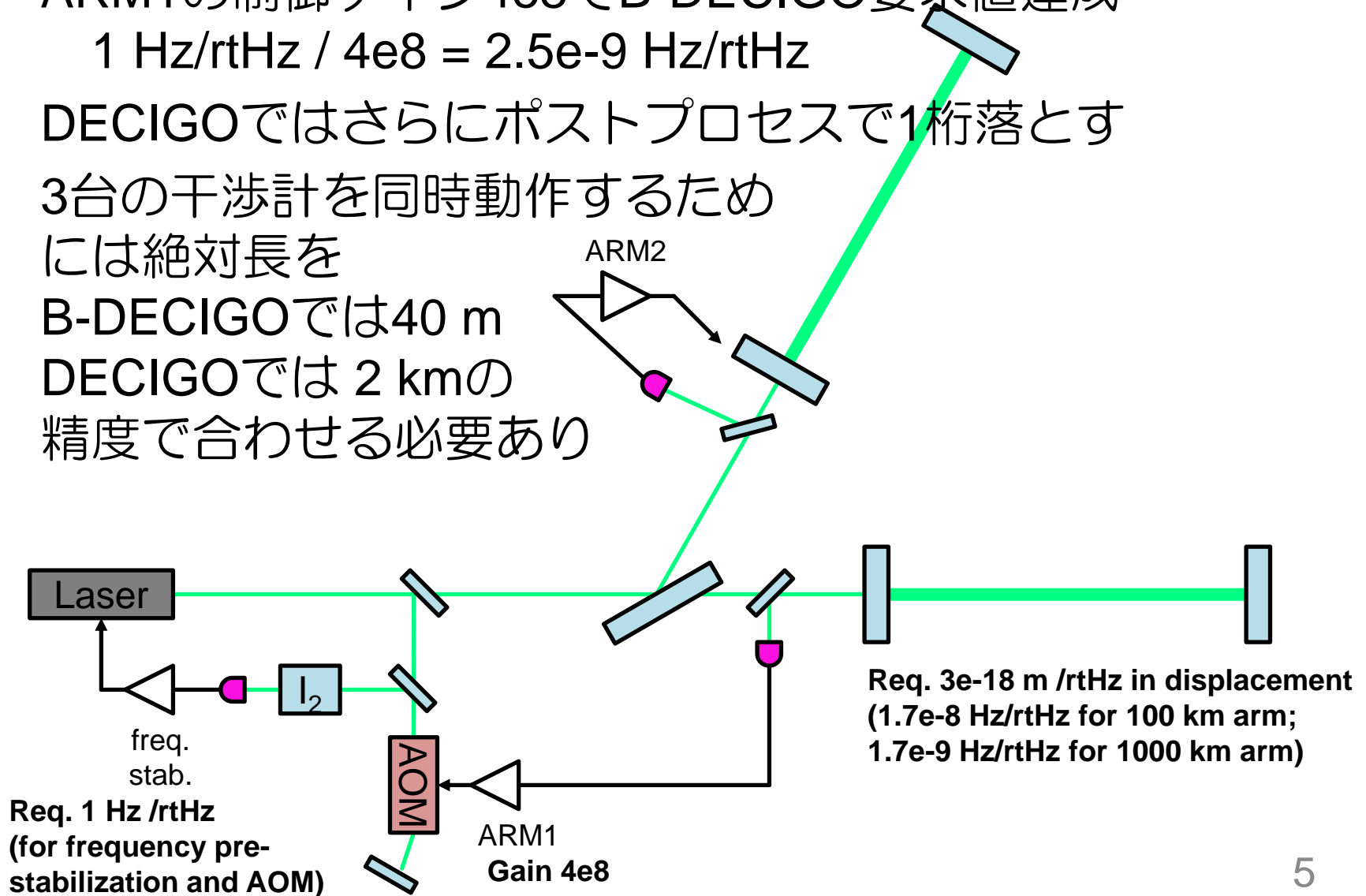
- 2つの腕を独立に制御すればRecombineは不要になるが、そのためには周波数シフトが必要
- 周波数シフトのためのAOMの周波数雑音がそのまま雑音になるので、AOMへの要求値が厳しすぎるのでだめそう

AOM frequency noise requirement  
 $1.7e-8$  Hz/rHz for 100 km arm;  
 $1.7e-9$  Hz/rHz for 1000 km arm  
→ sounds impossible



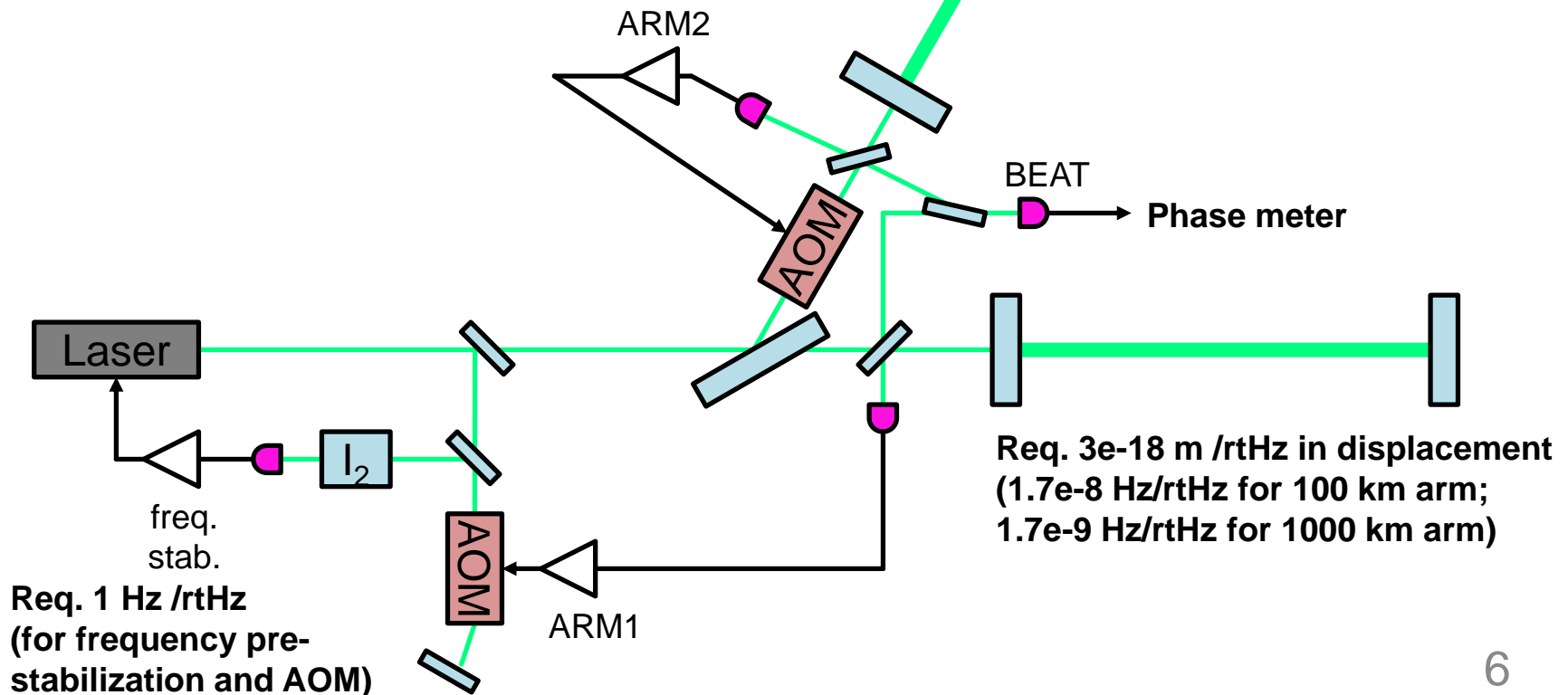
# 干渉計制御案3(長野法)

- ARM1の制御ゲイン $4e8$ でB-DECIGO要求値達成  
 $1 \text{ Hz/rHz} / 4e8 = 2.5e-9 \text{ Hz/rHz}$
- DECIGOではさらにポストプロセスで1桁落とす
- 3台の干渉計を同時動作するためには絶対長を  
B-DECIGOでは40 m  
DECIGOでは2 kmの  
精度で合わせる必要あり



# 干渉計制御案4(和泉法(改))

- ビート検出をすごいphase meterで行うことで周波数シフト用のAOMの周波数雑音をモニタし、ポストプロセスで差し引く方法
- 腕の長さは何でも良い



# 共振点引き込み(lock acquisition)

- 共振点引き込みのために必要な鏡に加える力は

$$F = \frac{mv}{t_{lw}} = \frac{mv^2}{x_{lw}} = \frac{2\mathcal{F}mv^2}{\lambda}$$

finesse →  $2\mathcal{F}$   
 mirror mass →  $m$   
 mirror velocity →  $v$   
 cavity linewidth →  $x_{lw}$   
 laser wavelength →  $\lambda$   
 $t_{lw}$ : time it takes to cross cavity linewidth

$$t_{lw} = \frac{\lambda}{2\mathcal{F}v}$$

- レーザー周波数変動を鏡の速度に換算すると

$$v_\nu = \frac{\lambda L}{c} \Delta \dot{\nu}$$

laser frequency fluctuation speed [Hz/s] →  $\Delta \dot{\nu}$

- 鏡の速度をレーザー周波数変化に換算すると

$$\Delta \dot{\nu}_{\text{AOM}} = \frac{cv}{\lambda L}$$

Rate of laser frequency change [Hz/s] →  $\Delta \dot{\nu}_{\text{AOM}}$

# 鏡を使った共振点引き込み

- 鏡を使って共振点引き込みする場合、鏡に加えられる最大の力から、鏡の速度とレーザー周波数変動量に要求値が出る

$$v < \sqrt{\frac{\lambda F_{\max}}{2\mathcal{F}m}}$$

$$\Delta \dot{\nu} < \sqrt{\frac{c^2 F_{\max}}{2\lambda L^2 \mathcal{F}m}}$$

DECIGOでは $F_{\max} = 8e-7$  N とすると (長野博論)

$v < 14$  nm/sec (厳しそう?)

$\Delta \dot{\nu} < 8$  Hz/sec (厳しそう?)

B-DECIGOでは $F_{\max} = 2e-7$  N とすると (長野博論)

$v < 4$  nm/sec (厳しそう?)

$\Delta \dot{\nu} < 24$  Hz/sec (厳しそう?)



# 周波数を使った共振点引き込み

- レーザー周波数を使って共振点引き込みをする場合、周波数変化させられる速度から鏡の速度に要求値が出る

$$v < \frac{\lambda L \Delta \dot{\nu}_{\text{AOM}}}{c}$$

$$\Delta \dot{\nu} < \Delta \dot{\nu}_{\text{AOM}}$$

AOMのレンジを200 MHz, バンド幅を5 MHzとすると  
 $\Delta \dot{\nu}_{\text{AOM}}$  は  $1e9$  MHz/sec 程度?

だとするとDECIGOでは

$$v < 1.7e6 \text{ m/sec (余裕)}$$

B-DECIGOでは

$$v < 1.7e5 \text{ m/sec (余裕)}$$

- 共振を通過する時間がAOMの応答速度より早いとだめなので

$$v < \frac{\lambda}{2F \Delta t_{\text{AOM}}}$$

$$\delta \dot{\nu} < \frac{c}{2LF \Delta t_{\text{AOM}}}$$

AOMのバンド幅を5 MHzとして $\delta t_{\text{AOM}} = 1 / 5\text{MHz}$ とすると

DECIGOでは

$$v < 0.13 \text{ m/sec (できそう?)}$$

$$\Delta \dot{\nu} < 75 \text{ MHz/sec (いけそう?)}$$

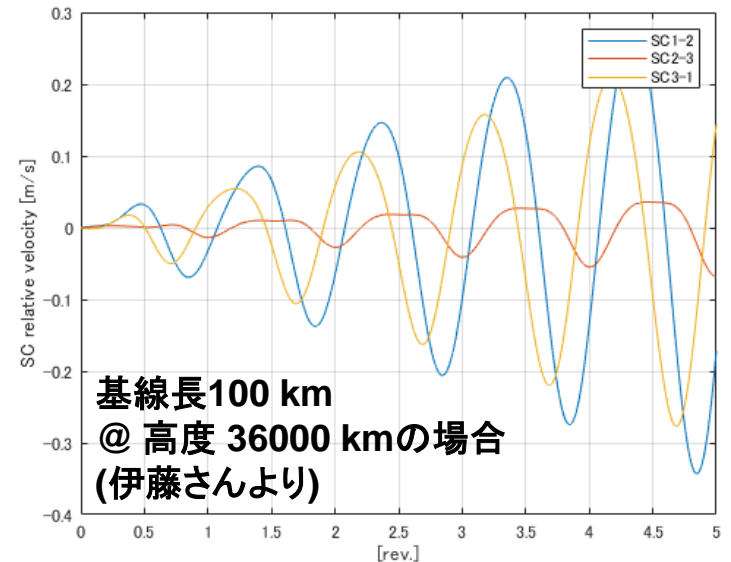
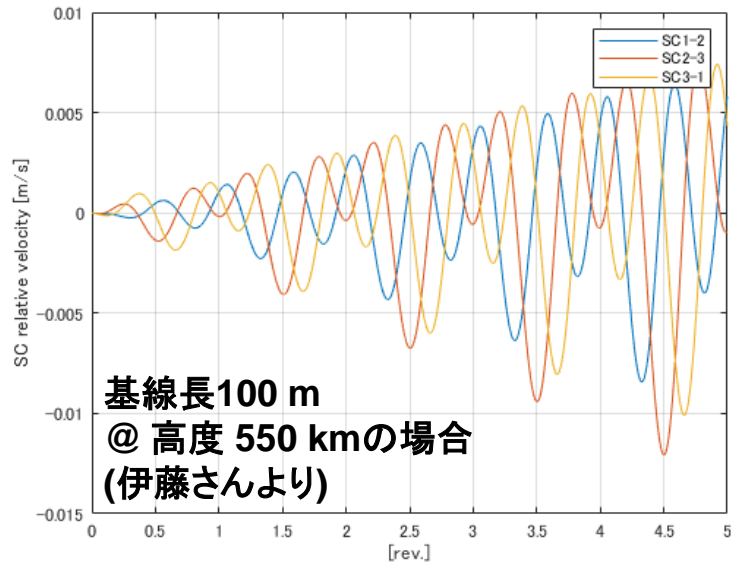
B-DECIGOでは

$$v < 0.013 \text{ m/sec (できそう?)}$$

$$\Delta \dot{\nu} < 75 \text{ MHz/sec (いけそう?)}$$

# 鏡を減速させる？

- 周波数アクチュエータを用いての共振点引き込みはたぶんできる (鏡の相対速度は制御なしで~10 cm/sec 程度?)
- 鏡のアクチュエータを用いての共振点引き込みは厳しい  
→ 鏡を減速させる必要がある  
あるいは周波数アクチュエータを用いてロックしてから、鏡のアクチュエータに切り替えてもよい  
あるいはロック専用の強い鏡のアクチュエータを用意してもよい



# さまざまな絶対距離の測距方法

- GPSだと数m程度 (静止軌道より遠いと使えない)
- AODシステムを使う方法 (連続的にはできない)  
1秒で数m程度の精度 (武者さんの資料を参考)
- FSRを測定する方法 (連続的にはできない)  
N個分のFSRを $\delta f$ の精度で測定したとすると、測距精度は

$$\delta L = \frac{L}{f_{\text{FSR}} N} \delta f = \frac{2L^2}{cN} \delta f$$

$\delta f = 15 \text{ mHz}$ ,  $N=100$ とすると  
DECIGOでは  $\delta L = 1 \text{ m}$   
B-DECIGOでは  $\delta L = 0.01 \text{ m}$

- 双方向FPで透過光と入射光のビートを測定する方法 (連続的にできるがロックが必要; 長野博論を参考)

ビート周波数がFSRの何個分かが事前にわかって

いれば、ビート周波数

の測定精度で測定できる

$$\delta L = \frac{L}{f_{\text{beat}}} \delta f$$

$\delta f = 15 \text{ mHz}$ ,  $f_{\text{beat}}=15 \text{ MHz}$ とすると

DECIGOでは  $\delta L = 1 \text{ mm}$

B-DECIGOでは  $\delta L = 0.1 \text{ mm}$

(腕の長さは事前にGPSなどで

$L \cdot f_{\text{beat}} / f_{\text{FSR}} = 10 \text{ m}$ 程度の精度でわかっているものとする)

# 鏡の相対速度の測定

- GPSだと数cm/sec程度 (静止軌道より遠いと使えない)
- AODシステムを使う方法  
1 m/sec程度 (武者さんの資料を参考)
- FSR通過にかかる時間 $t_{\text{FSR}}$ を測定することで、時間測定精度と同等の精度で鏡の相対速度を測定できる

$$\delta v = v \frac{\delta t_{\text{FSR}}}{t_{\text{FSR}}} = \frac{2v^2}{\lambda} \delta t_{\text{FSR}}$$

$\delta v < 1\text{e-}2$  m/sec で鏡の相対速度を測定し、この測定精度のレベルまで減速したいと思うと、

$\delta t_{\text{FSR}} = 1\text{e-}6$  sec (1 MHzサンプリングを仮定)の場合

$v < 5\text{e-}2$  m/sec である必要がある

→ 結構つらそう

# 長さ/周波数のロック手順？

- ヨウ素を用いてレーザー周波数を1 Hz/rtHzに安定化する
- GPS信号やAODシステムの信号などを衛星+鏡にフィードバックすることで、数m以下の精度で三角形の長さを合わせ、衛星間(鏡間)の相対速度を数cm/sec以下におさえる
- 片方の光共振器のPDH信号をレーザー周波数(AOM)にフィードバックしてロックする(AOMのバンド幅5 MHz、鏡間の相対速度 数cm/sec以下、レーザー周波数変動75 MHz/sec以下ならできそう)
- フィードバック先をAOMから鏡に徐々にスイッチする(ロックさえできていれば鏡のアクチュエータレンジは足りる)
- 他方の光共振器のPDH信号をレーザー周波数(AOM)にフィードバックしてロックする(これも同様にできる)