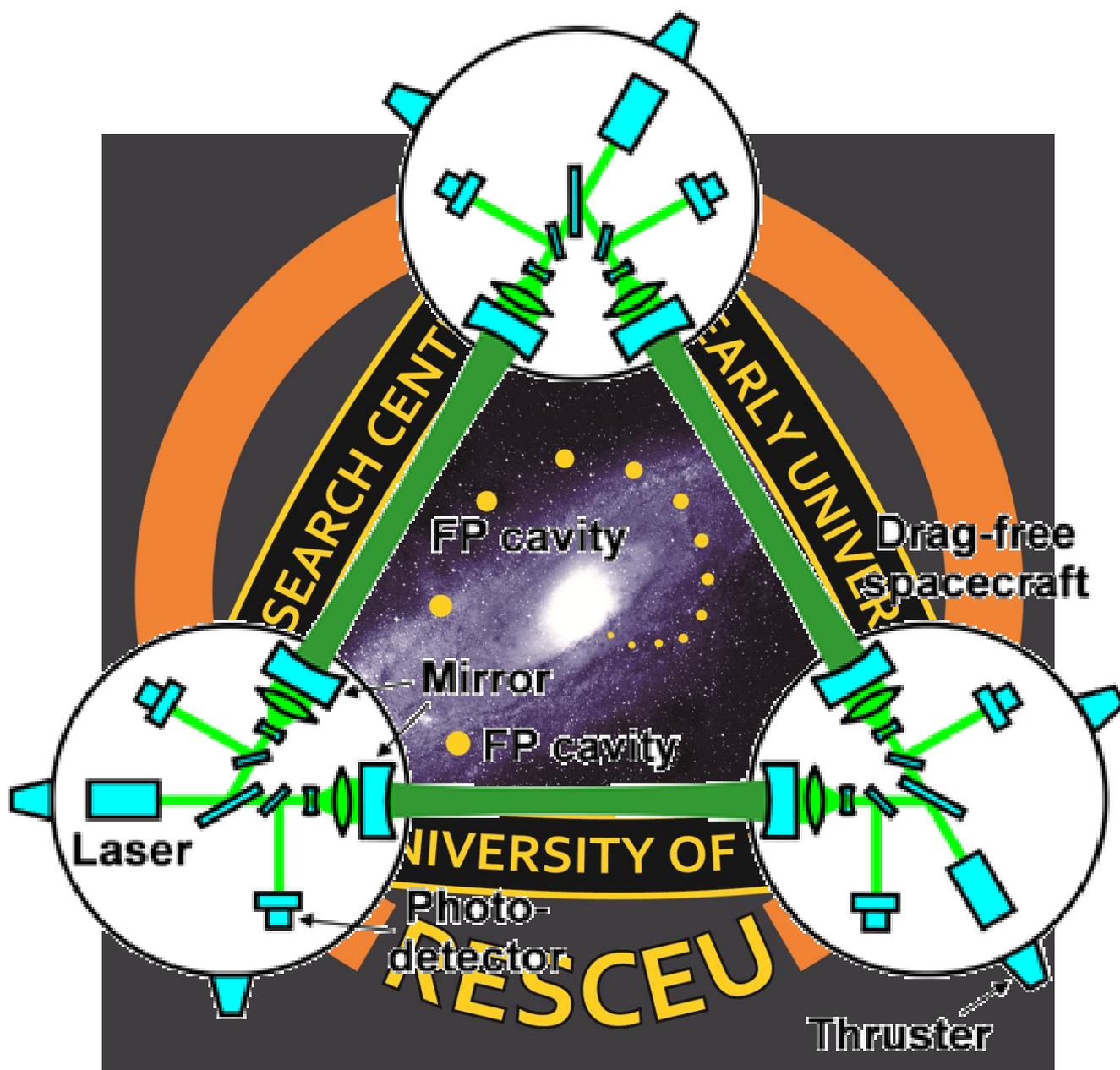


DECIGO/B-DECIGOの 初期捕捉への要求値

道村唯太

東京大学 大学院理学系研究科附属ビッグバン宇宙国際研究センター





これまでの経緯と今回のお話

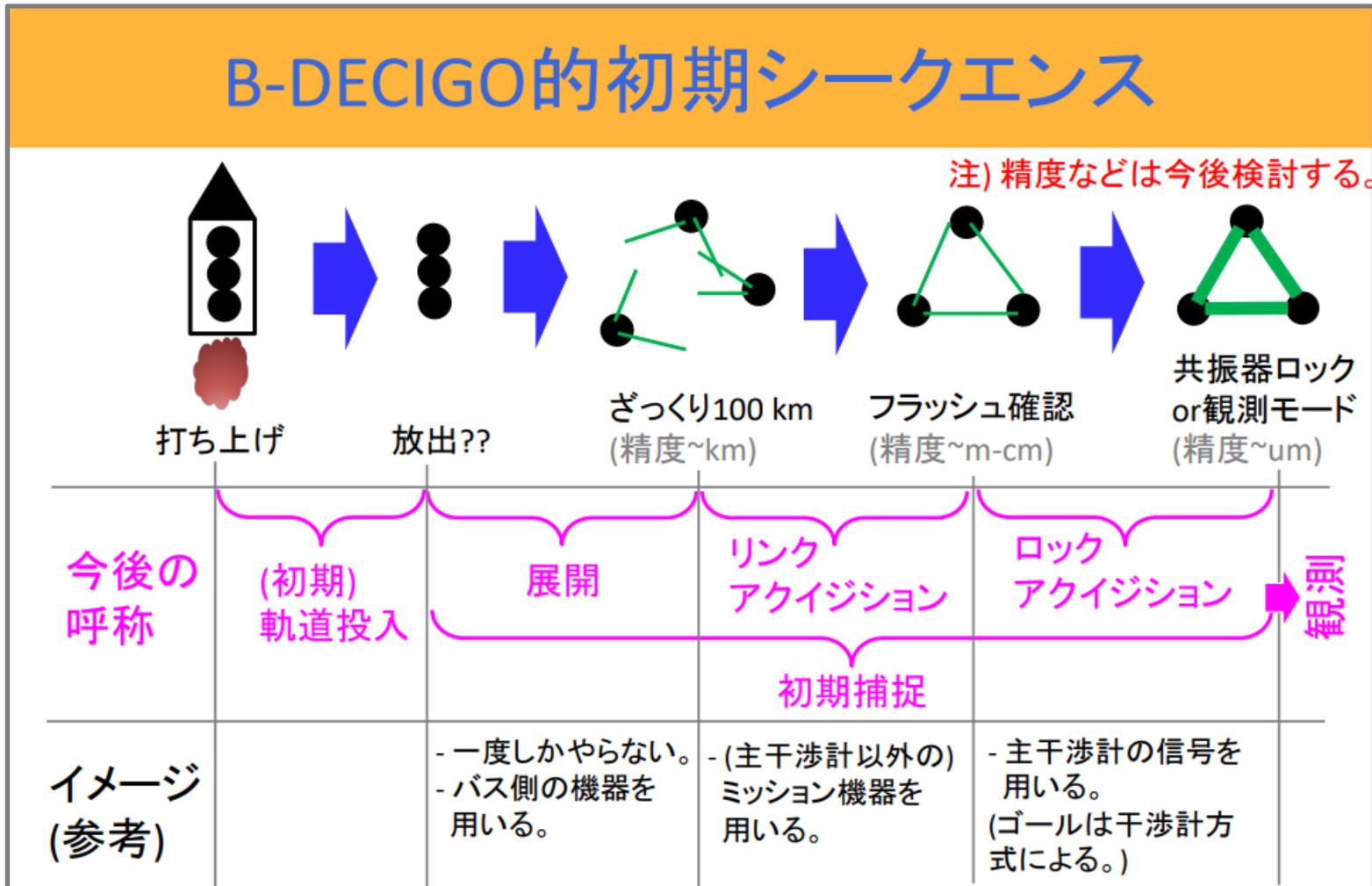
- 2019-2020年あたり SILVIAの提案
- 2019年10月-2021年9月 **B-DECIGO**技術打ち合わせ
- 2019年11月10日 [DECIGO WS18で小型望遠鏡の提案](#)
- 2020年11月21日 [DECIGO WS19で小型での重力波観測検討](#)
アクシオンDM、ベクトルDMも
- 2021年12月10日 [DECIGO WS20で活動報告](#)

(道村は2022年4月-2024年3月に消息を絶つ)

- 2023年10月-2024年4月 **B-DECIGO**技術検討会
- [DECIGO / B-DECIGO 技術検討書](#)を執筆中(現在58ページ)
特に今日は第7章の初期捕捉について復習する

DECIGO初期シーケンスの呼称

- 下記の呼称を用いる(現SILVIAはここで言うリンクアクイジションまでであることに注意)



(B-)DECIGOの仕様/要求値 (ver. 0.2) より

各段階の達成目標

(B-)DECIGO初期捕捉の要求値仮決定 より

• 展開

- 3つの基線長を(最終的に必要な精度まで)合わせる
- リンクアクイジション可能な範囲まで、
干渉計ビーム打ち出し方向を定める

• リンクアクイジション

- フラッシュが見えるまで、
干渉計ビーム打ち出し方向と鏡の姿勢を合わせる
- 周波数アクチュエータでのロックが一瞬でも[2020.12.03追記]
可能になるまで、鏡間の相対速度を減速させる
~~とともに、基線長変動を抑える~~

• ロックアクイジション

- 共振器の制御を継続的に行えるようになるまで、
鏡間の相対速度を減速させるとともに、
基線長変動を抑える[2020.12.03追記]
- 感度要求を達成する精度での制御を行う

DECIGO 初期捕捉の流れ

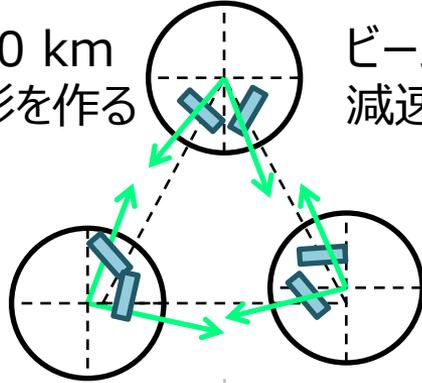
展開

リンクアクイジション

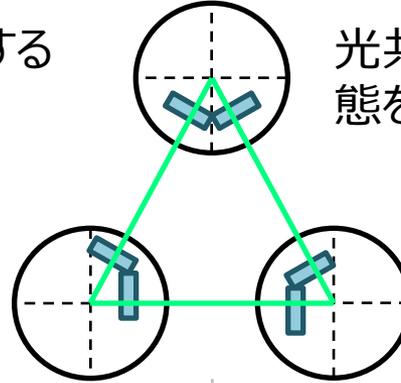
ロックアクイジション

観測

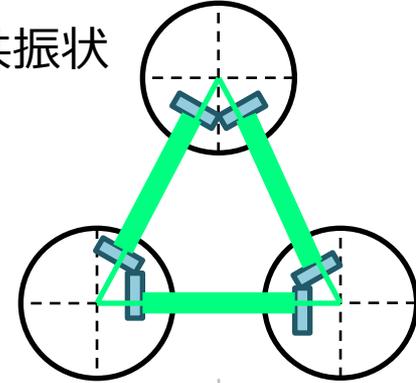
ざっくり1000 km
の正三角形を作る



ビームのリンクする
減速する



光共振器の共振状
態を維持する



正三角形の精度 2 km以下

GPS(的なもの)
衛星スラスト

鏡間の相対距離変動 34 cm以下

なんらかのセンサ
テストマス、衛星スラスト

0.5 nm以下

PDH
テストマス

鏡間の相対速度

GPS(的なもの)
衛星スラスト

13 cm/sec以下

80 μ m/sec以下

23 nm/sec以下

12 μ m/sec以下

PDH
レーザー
周波数

PDH
テストマス

相対角度精度 3 mrad以下

スタートラッカ
衛星スラスト

AOD
ステアリングミラー、テストマス

QPD?

0.46 μ rad以下

WFS
テストマス

0.04 nrad以下

B-DECIGO 初期捕捉の流れ

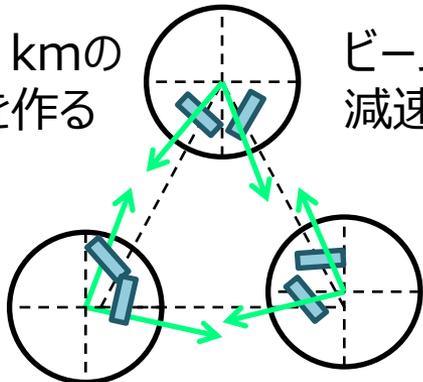
展開

リンクアクイジション

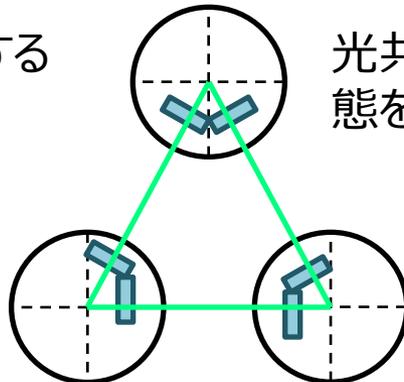
ロックアクイジション

観測

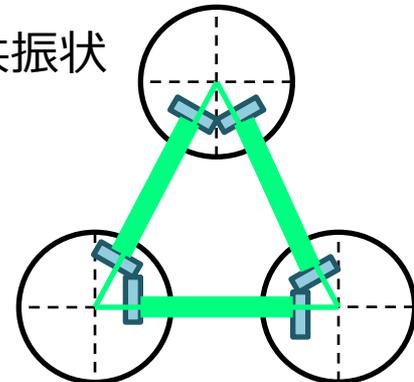
ざっくり100 kmの
正三角形を作る



ビームのリンクする
減速する



光共振器の共振状
態を維持する



正三角形の精度 40 m以下

GPS(的なもの)
衛星スラスト

鏡間の相対距離変動 3 cm以下

なんらかのセンサ
テストマス、衛星スラスト

0.1 nm以下

PDH
テストマス

鏡間の相対速度

GPS(的なもの)
衛星スラスト

1 cm/sec以下

80 μ m/sec以下

23 nm/sec
以下

0.12 μ m/sec以下

PDH
レーザー
周波数

PDH
テストマス

相対角度精度 3 mrad以下

スタートラッカ
衛星スラスト

AOD
ステアリングミラー、テストマス

QPD?

1.5 μ rad以下

WFS
テストマス

0.4 nrad以下

計算に用いた当時のパラメータ

DECIGO / B-DECIGO 技術検討書 より

表 7.2: 要求値計算に用いた干渉計パラメータ。なお、ストレイン感度要求は (B-)DECIGO は安全係数 10 を含む、0.1 Hz での要求値。SILVIA は安全係数を含まない 100 Hz での参考値。また、鏡の曲率半径やサイズについて、DECIGO/B-DECIGO は長野博論 [1] より。シリカ鏡を想定し、回折損失から決めている。SILVIA では g-factor が $g = -0.3$ となるように決めており、シリカ鏡を想定して $2r/t = 5$ とアスペクト比から決めた値。レーザー周波数安定度や強度安定度については、(B-)DECIGO は 0.1 Hz での値で、SILVIA は 100 Hz での参考値。SILVIA (orig.) は 2020 年 2 月のミッションコンセプト提案書時点でのパラメータ。SILVIA(new) は 2021 年 6 月時点での最新のパラメータ。

	記号	単位	DECIGO	B-DECIGO
ストレイン感度要求	h_{req}	$1/\sqrt{\text{Hz}}$	1×10^{-24}	1×10^{-23}
基線長	L	m	1.0×10^6	1.0×10^5
レーザー波長	λ	nm	515	515
BS での入射光強度	P_0	W	10	0.02
フィネス	\mathcal{F}	-	10	100
鏡の質量	m	kg	100	30
鏡の曲率半径	R	m	6.1×10^5	6.1×10^4
鏡の半径	r	m	0.83	0.35
鏡の厚さ	t	m	0.02	0.04
レーザー周波数安定度要求値	$\delta\nu$	$\text{Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$	1	1
レーザー強度安定度要求値	I_{RIN}	$1/\sqrt{\text{Hz}}$	2.0×10^{-9}	1.0×10^{-8}
地表からの軌道高度	H	m	(太陽周回)	3.6×10^7

当時の要求値まとめ

[DECIGO / B-DECIGO 技術検討書](#) より

表 7.7: DECIGO 初期捕捉の精度要求値まとめ。

	鏡間の 距離の差	鏡間の 相対距離変動	鏡間の 相対速度	干渉計ビーム 打ち出し方向	鏡の 姿勢
展開	2 km	-	-	3 mrad	-
リンクアクイジション	同上	-	13 cm/sec	0.46 μ rad	0.23 μ rad
干渉計制御信号を得る	同上	34 cm	1.2 μ m/sec	同上	同上
ロックアクイジション	同上	0.5 nm	23 nm/sec	-	0.035 nrad

表 7.8: B-DECIGO 初期捕捉の精度要求値まとめ。

	鏡間の 距離の差	鏡間の 相対距離変動	鏡間の 相対速度	干渉計ビーム 打ち出し方向	鏡の 姿勢
展開	40 m	-	-	3 mrad	-
リンクアクイジション	同上	-	1.3 cm/sec	1.5 μ rad	0.73 μ rad
干渉計制御信号を得る	同上	3.4 cm	0.12 μ m/sec	同上	同上
ロックアクイジション	同上	0.1 nm	23 nm/sec	-	0.35 nrad

SILVIA干渉計でこのあたりが
実現できると、
(B-)DECIGOに向けた
初期捕捉の精度が実証できたと主張できる

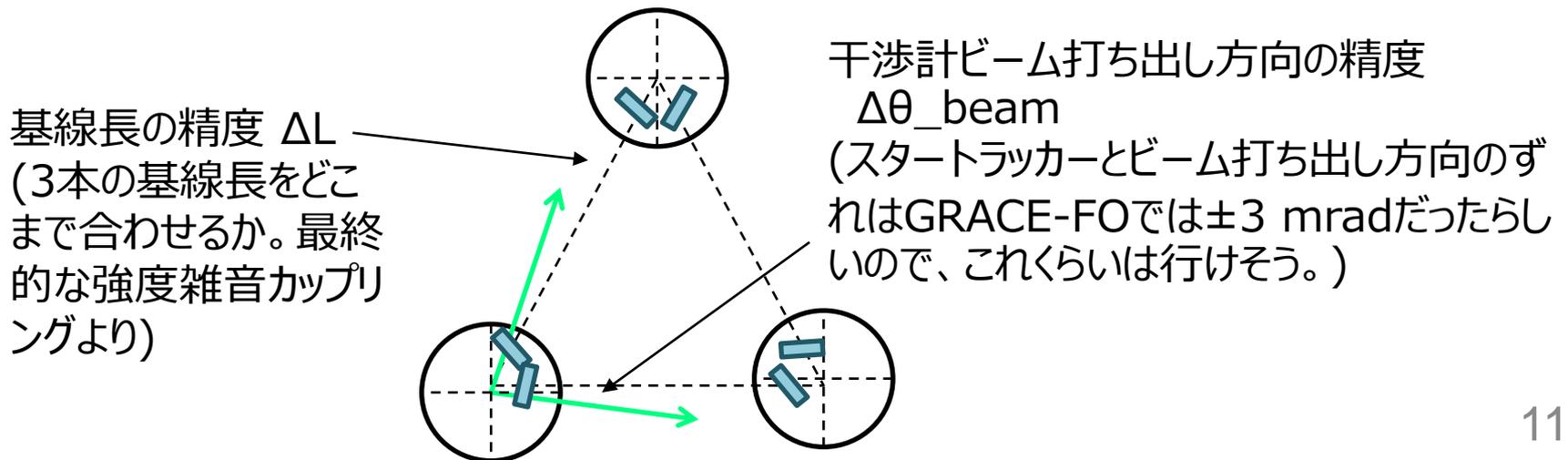
相対距離変動 O(1-10) cm
相対速度 O(0.1-1) μ m/sec

計算は下記でできる
[DECIGOの初期捕捉シーケンス
の要求精度spreadsheet](#)

展開からリンクアクイジション

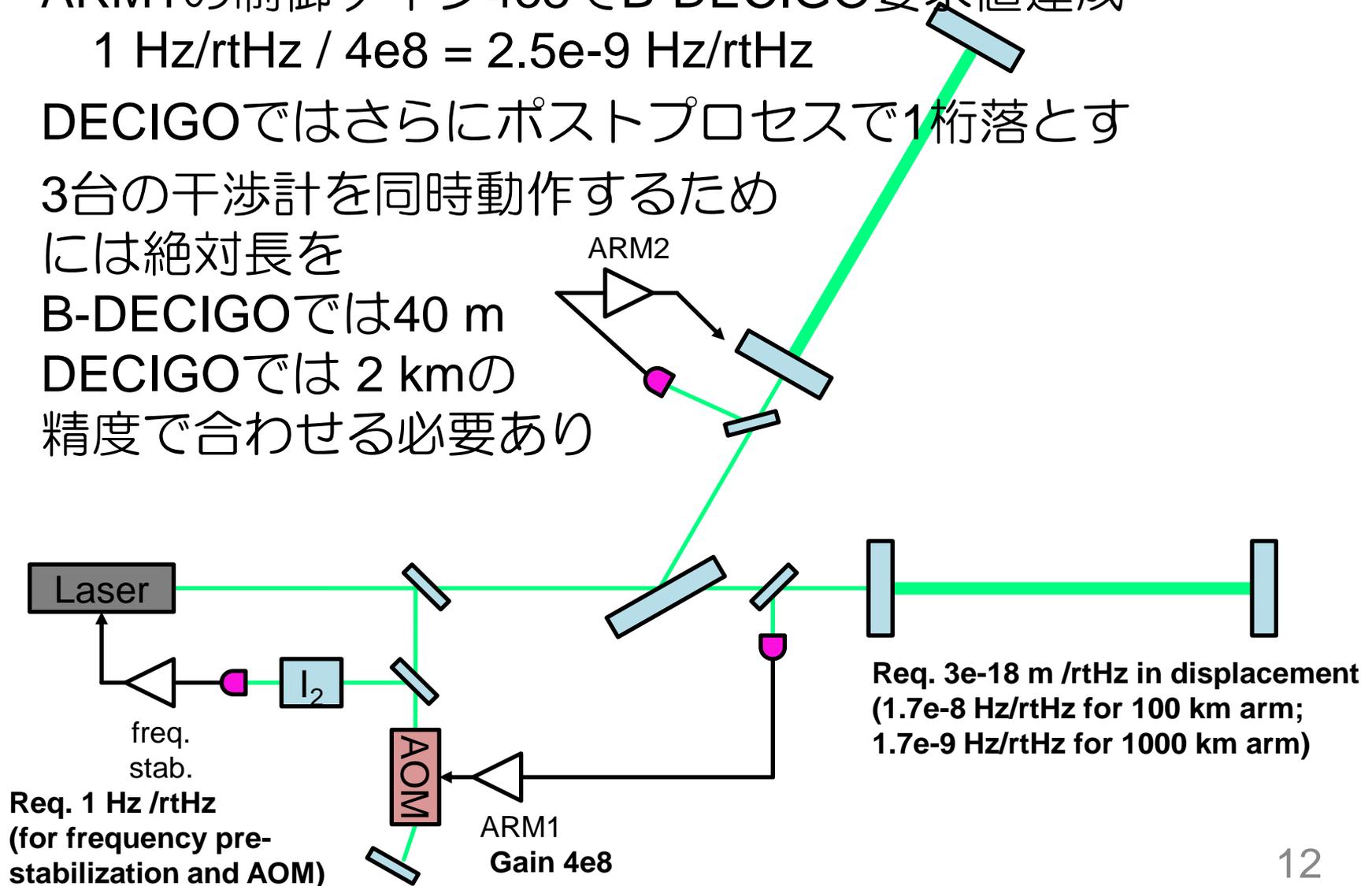
- リンクアクイジションに用いるセンサのレンジ次第だが
- とりあえず、最終的に必要な基線長合わせの精度まで、干渉計ビーム打ち出し方向とバス部の方向センサの絶対方向のずれまでは合わせるとする

	記号	DECIGO	B-DECIGO	100 m FP
基線長の精度	ΔL	2 km	40 m	40 cm
干渉計ビーム打ち出し方向の精度	$\Delta\theta_{\text{beam}}$	3 mrad	3 mrad	3 mrad



干渉計制御としては長野法を仮定

- ARM1の制御ゲイン $4e8$ でB-DECIGO要求値達成
 $1 \text{ Hz/rtHz} / 4e8 = 2.5e-9 \text{ Hz/rtHz}$
- 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



リンクからロックアクイジション

- ・フラッシュ確認と周波数ロックが可能な速度に抑えるまで

	記号	DECIGO	B-DECIGO	100 m FP
ロック前の基線長変動への要求	δL_{rms}	0.3 m	0.03 m	3e-5 m
鏡間の相対速度への要求(①周波数ロックがかかる ①' 共振器応答よりも変調が十分遅い ②周波数ロックを10秒維持する ③周波数制御信号を用いて鏡のロックがかかる) [最初から鏡でロックする場合]	v	① 10 cm/sec ①' 1.2 $\mu\text{m}/\text{sec}$ ② 3 cm/sec ③ 8e-5 m/sec [20 nm/sec]	① 1 cm/sec ①' 0.12 $\mu\text{m}/\text{sec}$ ② 0.3 cm/sec ③ 8e-5 m/sec [20 nm/sec]	① 1 cm/sec ①' 0.12 mm/sec ② 3 $\mu\text{m}/\text{sec}$ ③ 6 $\mu\text{m}/\text{sec}$ [50 nm/sec]
レーザー周波数ドリフトに対する要求 [最初から鏡でロックする場合]	$\Delta\dot{\nu}$ (ν)	75 MHz/sec [10 Hz/sec]	75 MHz/sec [100 Hz/sec]	75 GHz/sec [0.3 MHz/sec]
干渉計ビーム打ち出し方向の精度 (鏡の姿勢に対する精度はこの半分)	$\Delta\theta_{beam}$	0.46 μrad	1.5 μrad	41 μrad

鏡間の相対速度への要求 v

共振器長変動への要求

ロックに使う周波数アクチュエータのレンジに依存 (200 MHzを仮定)

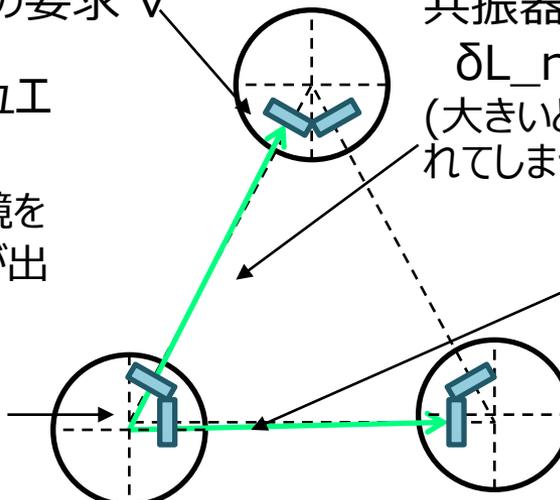
δL_{rms}
(大きいと周波数ロックが外れてしまう)

干渉計ビーム打ち出し方向の精度 $\Delta\theta_{beam}$

(相手の鏡上でのビーム位置のずれがビーム半径以下で、相手の鏡の姿勢精度も同等なら共振フラッシュが見えるはず)

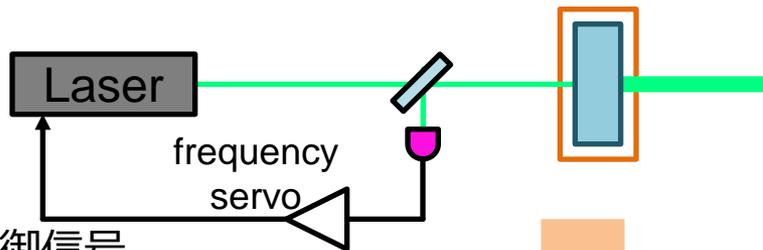
ロックに使う周波数アクチュエータの応答速度に依存 (1/(5 MHz)を仮定); 鏡を用いる場合はアクチュエータが出せる最大の力に依存

レーザー周波数ドリフトに対する要求 $\Delta\dot{\nu}$



要求値計算で想定しているロック

- まずは周波数アクチュエータでロック



共振器長変動が速すぎると周波数制御が追従できない(応答速度 $\Delta t_{AOM} = 1/(5 \text{ MHz})$ を仮定) ため、鏡間の相対速度に要求値

$$v < \lambda / (2F \Delta t_{AOM}) \quad \text{要求値①}$$

共振器変動が共振器応答より速すぎるとまともな制御信号が得られない **LF²が大きいと厳し**

要求値①' $v < \pi c \lambda / (4L F^2)$ **い! (制御方法によらない)**

共振器長変動が大きすぎると、周波数アクチュエータのレンジ ($\Delta \nu_{AOM} = 200 \text{ MHz}$ を仮定) を超えてしまうため、共振器長変動に要求値

$$\delta L_{\text{rms}} < L \Delta \nu_{AOM} / \nu \quad \text{Lが小さいと 厳しい!}$$

共振器の信号を用いて鏡の減速を始めるまでにかかる時間 Δt_{TM} の間の共振器長変動は δL_{rms} への要求値以下である必要がある

$$v < L \Delta \nu_{AOM} / \nu / \Delta t_{TM} \quad \text{要求値②}$$

周波数制御信号を用いて、そのロックが外れる前に鏡制御をかけるには、鏡のアクチュエータレンジ F_{max} から決まる鏡の速度への要求値がある $v < \sqrt{F_{\text{max}} L \Delta \nu_{AOM} / \nu / m}$ **要求値③**

周波数制御信号

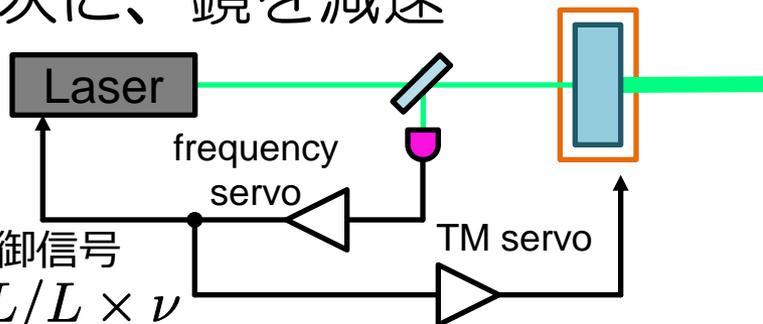
$$\delta \nu = \delta L / L \times \nu$$

共振器長 L (共振器長変動 δL)

共振器信号を用いた鏡間の相対速度の減速(TM制御)を始めるまでにかかる時間 (10秒を仮定)

$$\Delta t_{TM}$$

- 次に、鏡を減速



周波数制御信号

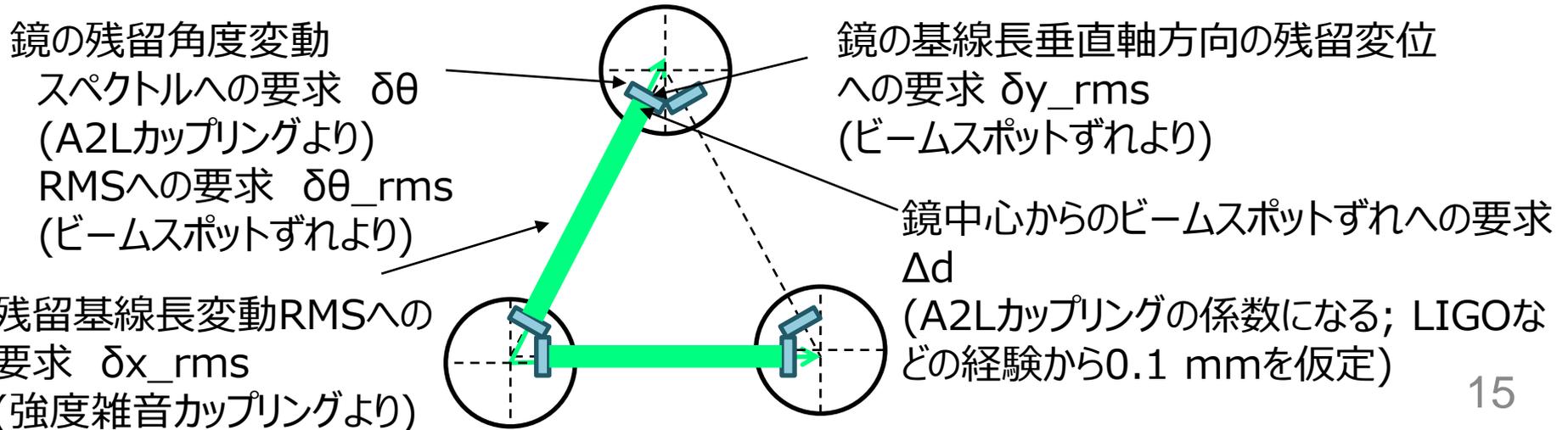
$$\delta \nu = \delta L / L \times \nu$$

線形信号を使って鏡を減速

ロックアクイジションから観測

- 感度要求を満たす精度での制御ができるまで

	記号	DECIGO	B-DECIGO	100 m FP
鏡中心からのビームスポットずれへの要求	Δd	0.1 mm	0.1 mm	0.1 mm
制御後の鏡の残留角度変動への要求	$\delta\theta$	1e-14 rad/rtHz	1e-14 rad/rtHz	1e-13 rad/rtHz
制御後の鏡の残留角度変動RMSへの要求	$\delta\theta_{rms}$	4e-11 rad	4e-10 rad	7e-7 rad
制御後の残留基線長変動RMSへの要求	δx_{rms}	0.5 nm	0.1 nm	1 nm
制御後の鏡の基線垂直軸方向の残留変位への要求	δy_{rms}	0.035 mm	0.035 mm	0.07 mm



まとめ

- 光共振器の制御信号を得て、ロックをかけるためには
DECIGO: 相対距離変動<34 cm 相対速度<1.2 um/sec
B-DECIGO: 相対距離変動<3.4 cm 相対速度<0.12 um/sec
が必要
- 相対距離変動については、周波数アクチュエータのレンジにしか寄らない
$$\delta L_{\text{rms}} < L \Delta \nu_{\text{AOM}} / \nu$$
- 相対速度変動については、制御方法によらない
$$v < \pi c \lambda / (4 L F^2)$$
- つまりわりと原理的な要求なので、SILVIAなどで実証できるととても良い