

日本の宇宙レーザー干渉計計画 DECIGO

宇宙線研究所将来計画に向けた勉強会
@宇宙線研究所

2006年5月18日

川村静児
国立天文台

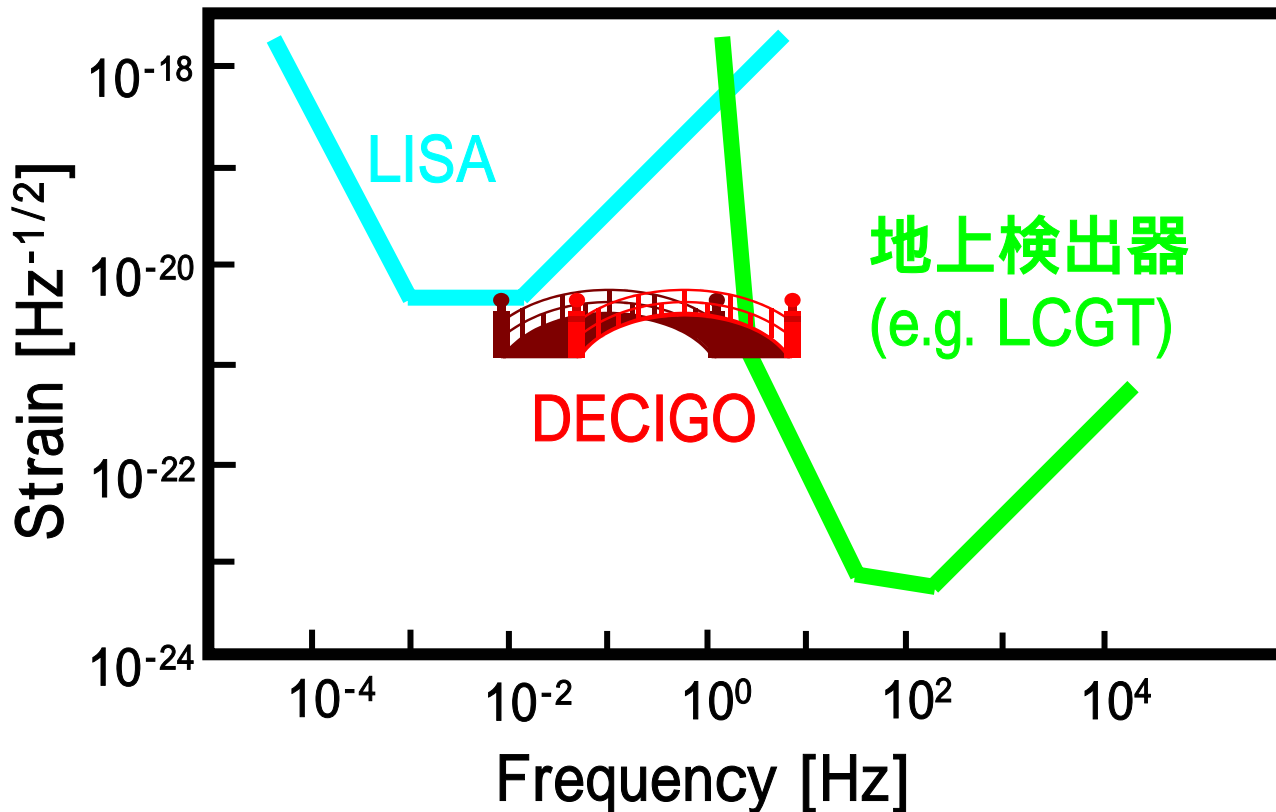
話の内容

1. DECIGOとは何か？
2. 予備概念設計
3. 得られるサイエンス
4. 今後の研究計画
5. まとめ

DECIGOとは？

Deci-hertz Interferometer Gravitational Wave Observatory

- LISAと地上検出器の帯域のギャップを埋める
- 超高感度の実現



周波数ギャップを埋めることの 重要性

新しい窓は新しい物理を生む！

- ・ LISAの帯域から出て行った連星からの重力波の検出
- ・ 地上干渉計の帯域に入る前の連星からの重力波の検出
- ・ 宇宙初期からの重力波
- ・ 全く新しい重力波源
- ・ 全く新しい物理

WD連星からの重力波

- WD連星は我々の銀河にたくさんありすぎるため、そこからの重力波が**分離できず雑音となる。**
- LISAの感度はこの**Confusion Noise**で制限される。
- WD連星はすぐに合体するため**0.1Hz以上の重力波は出ない。**
- したがって**0.1Hz以上では極端に高い感度を実現**することができる。

DECIGOの歴史

- 1990年代 宇宙研で河島・高野がスペース重力波アンテナの可能性を検討
- 1999年 坪野を中心にLISAのスタディーを行なう
- 2000年 川村が短距離型スペースアンテナにてLISAと地上干渉計のギャップを狙う計画を提唱(宇宙線研サテライトシンポジウム)
- 2001年 国立天文台将来計画委員会においてスペース重力波アンテナWG発足
- 2001年 瀬戸・川村・中村が宇宙膨張加速度の計測に関する論文発表
(DECIGOと命名)
- 2002年 WG第1回ミーティング開催
- 2003年 WG第2回ミーティング開催
安東が光共振型DECIGOを提案
- 2005年 WG第3回ミーティング開催
予備概念設計完了
- 2006年 WG第4回ミーティング開催

DECIGO-WG

川村静児, 中村卓史^{AA}, 安東正樹^{BA}, 坪野公夫^{BA}, 沼田健司^{CA}, 瀬戸直樹^{DA}, 高橋龍一, 長野重夫^{EA}, 石川毅彦^{FA}, 植田憲一^{GA}, 武者満^{GA}, 細川瑞彦^{EA}, 佐藤孝^{HA}, 佐藤修一, 苔山圭以子^{IA}, 我妻一博^{BA}, 青柳巧介^{JA}, 阿久津智忠^{KA}, 浅田秀樹^{LA}, 麻生洋一^{BA}, 新井宏二, 新谷昌人^{MA}, 井岡邦仁^{AA}, 池上健^{NA}, 石徹白晃治^{BA}, 市末淨與, 伊藤洋介^{OA}, 井上開輝^{PA}, 戎崎俊一^{QA}, 江里口良治^{RA}, 大石奈緒子, 大河正志^{HA}, 大橋正健^{SA}, 大原謙一^{TA}, 奥富聡^{BA}, 鎌ヶ迫将悟^{BA}, 河島信樹^{PA}, 神田展行^{UA}, 雁津克彦^{AA}, 木内建太^{JA}, 桐原裕之^{BA}, 工藤秀明^{BA}, 國森裕生^{EA}, 黒田和明^{SA}, 郡和範^{VA}, 古在由秀^{WA}, 小鷹康史^{XA}, 小林史歩^{YA}, 西條統之^{ZA}, 阪上雅昭^{AAA}, 阪由紫帆里^{IA}, 佐合紀親^{ABA}, 佐々木節^{ACA}, 柴田大^{ADA}, 真貝寿明^{AEA}, 杉山直, 宗宮健太郎^{AF}, 祖谷元^{JA}, 高野忠^{FA}, 高橋忠幸^{FA}, 高橋弘毅^{UA}, 高橋竜太郎, 田越秀行^{ABA}, 田代寛之^{AA}, 田中貴浩^{AA}, 谷口敬介^{AGA}, 樽家篤史^{ABA}, 千葉剛^{AHA}, 辻川信二^{BA}, 常定芳基^{AI}, 徳成正雄^{BA}, 内藤勲夫^{AJA}, 中尾憲一^{UA}, 中川憲保^{ABA}, 中野寛之^{UA}, 中村康二, 西澤篤志^{AAA}, 丹羽佳人^{AAA}, 野沢超越^{TA}, 橋本樹明^{FA}, 端山和大, 原田知広^{AA}, 正田涉^{ACA}, 姫本宣朗^{BA}, 平林久^{FA}, 平松尚志^{BA}, 福嶋美津広, 藤本眞克, 二間瀬敏史^{AK}, 前田恵一^{JA}, 松原英雄^{FA}, 水澤広美^{TA}, 養泰志^{AL}, 宮川治^{AL}, 三代木伸二^{SA}, 向山信治^{BA}, 森澤理之^{AA}, 森脇成典^{AM}, 柳哲文^{UA}, 山崎利孝, 山元一広^{SA}, 横山順一^{BA}, 吉田至順^{JA}, 吉野泰造^{AJA}

国立天文台, 京大理^{AA}, 東大理^{BA}, NASA^{CA}, UC Irvine^{DA}, NICT^{EA}, JAXA-ISAS^{FA}, 電通大^{GA}, 新潟大工^{HA}, お茶大人間文化^{IA}, 早大理工^{JA}, 東大天文^{KA}, 弘前大理工^{LA}, 東大地震研^{MA}, 産総研^{NA}, Univ. of Wisconsin^{OA}, 近大理工^{PA}, 理研^{QA}, 東大総合文化^{RA}, 東大宇宙線研^{SA}, 新潟大理^{TA}, 阪市大理^{UA}, Harvard-Smithsonian Center^{VA}, ぐんま天文台^{WA}, 広島大理^{XA}, Liverpool John Moores Univ.^{YA}, Observatoire de Paris^{ZA}, 京大総合^{AA}, 阪大理^{AB}, 京大基研^{AC}, 東大総合文化^{AD}, 稻盛財団^{AE}, MPI-AEI^{AF}, UI Urbana-Champaign^{AG}, 日大文理^{AH}, 東工大理^{AI}, 無所属^{AJ}, 東北大理^{AK}, Caltech^{AL}, 東大新領域^{AM}

日本の重力波研究の流れの中での DECIGOの位置づけ

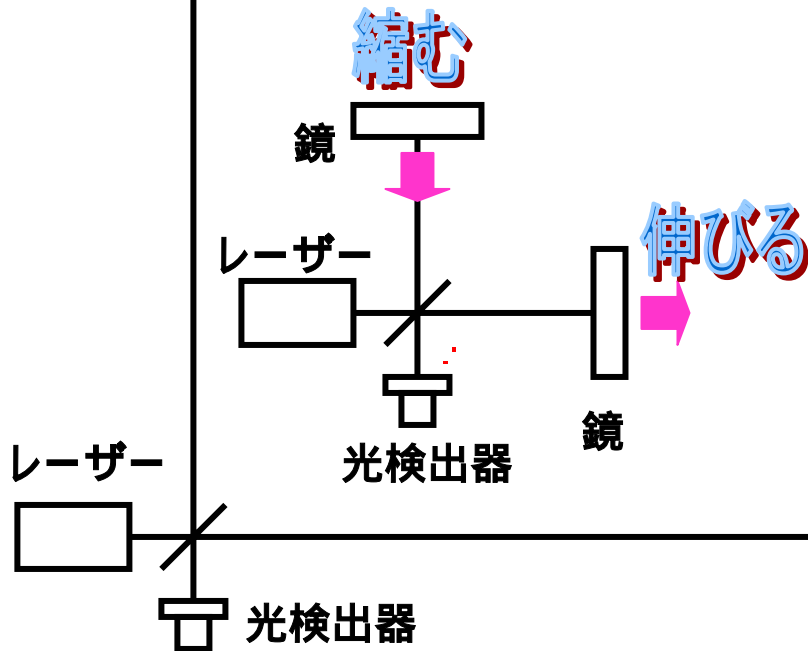
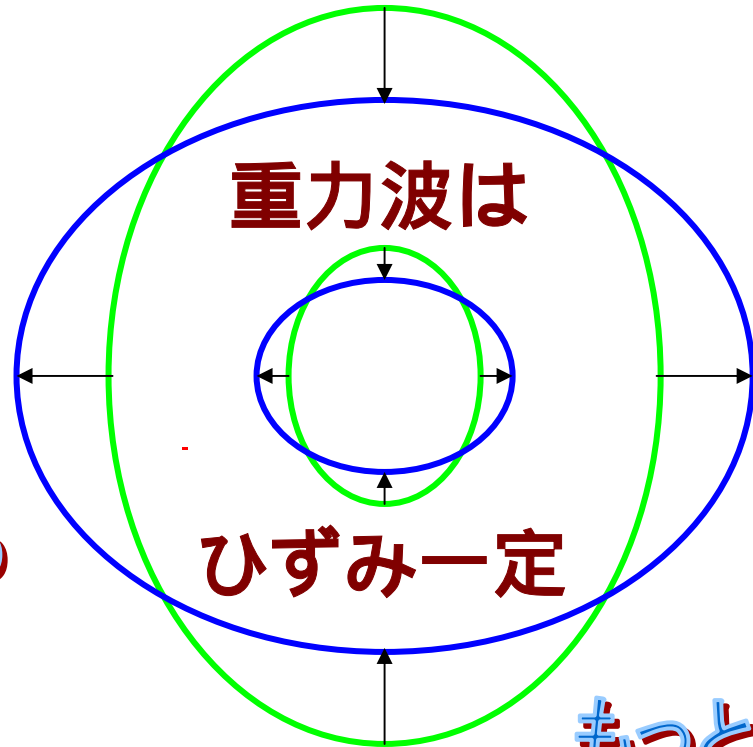
過去 現在 もうすぐ 将来



レーザー干渉計による 重力波検出は

アーム長が長いほど感度が高くなる

もっと縮む



もっと伸びる

世界の大型干渉計



地上の限界

●アーム長

●地面振動

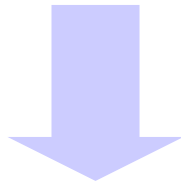
干渉計を宇宙に持っていくと もっと長くできる

- 信号が増える

- 重力波と光の相互作用の時間が長くなるため
- ただし高周波では信号のキャンセルが起こる

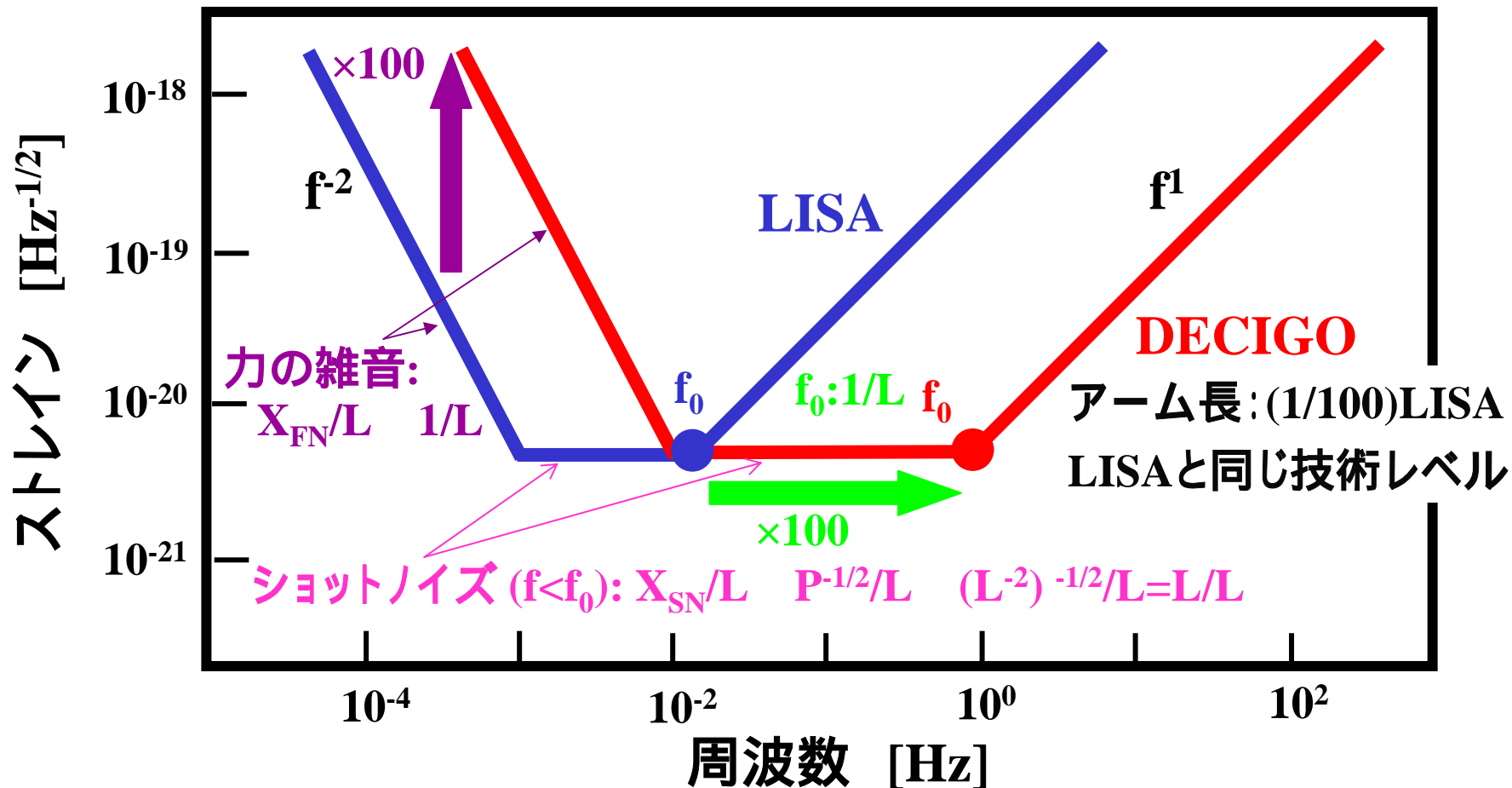
- ノイズが減る

- 地面振動や重力場の揺らぎノイズが小さい



低周波で感度がよくなる

アーム長と感度の関係

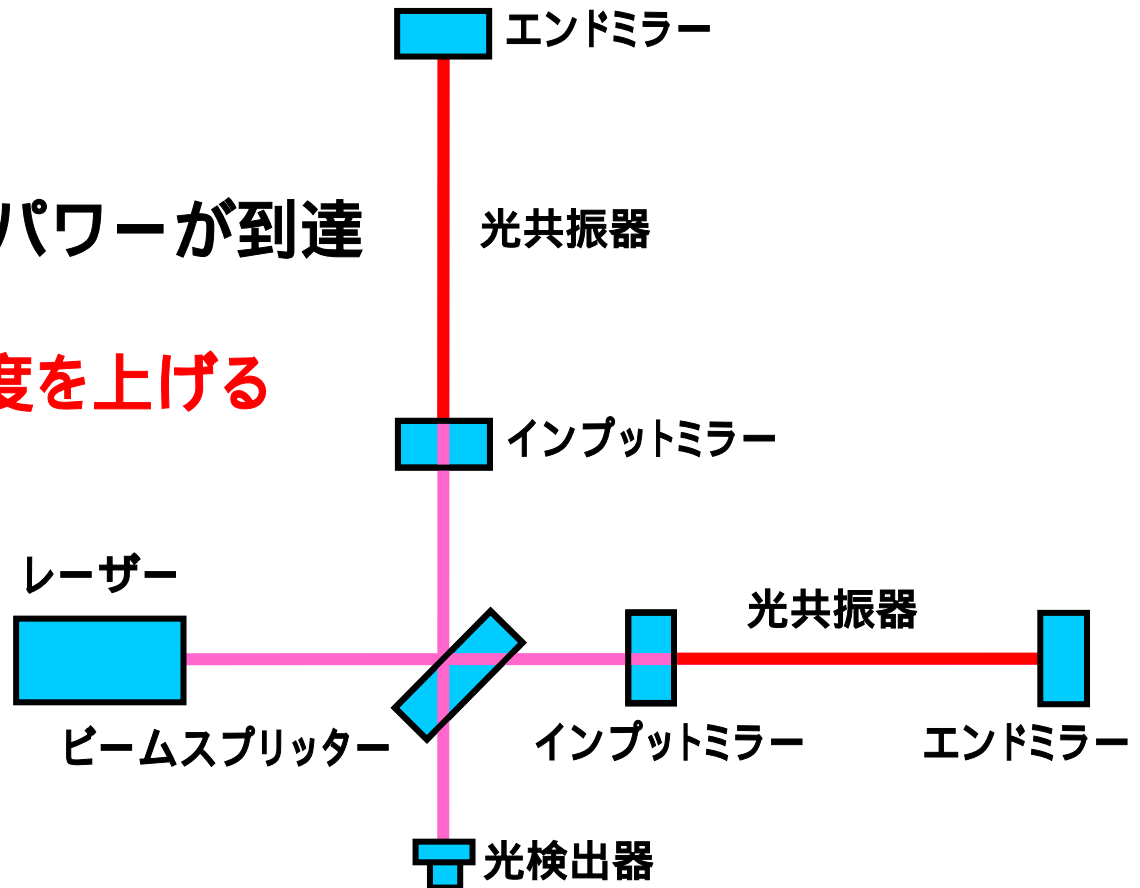


光共振型DECIGOの可能性

アーム長を短くする

大部分のレーザーパワーが到達

光共振器により感度を上げる

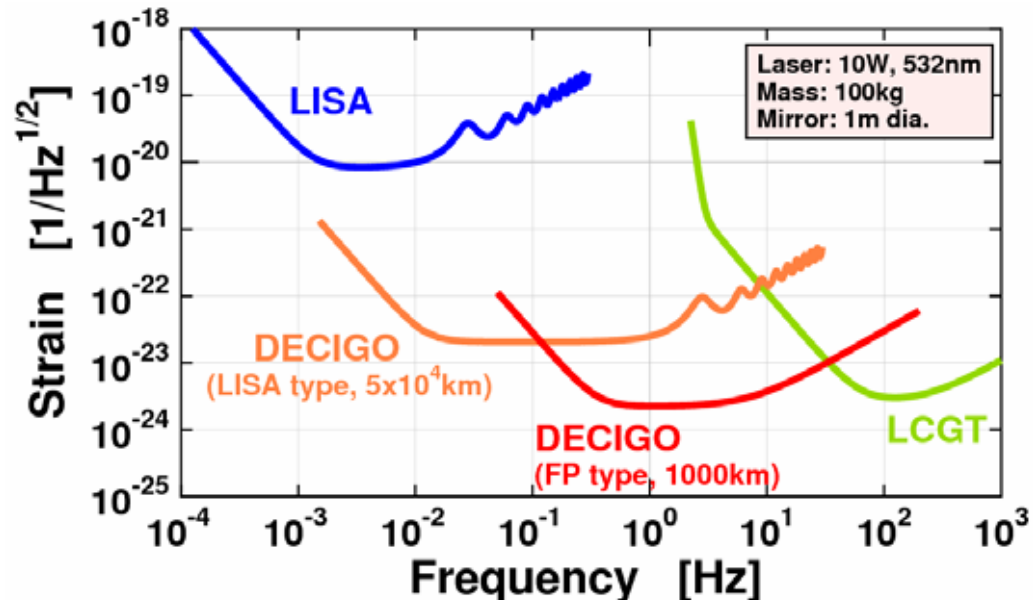


DECIGOの設計思想

- 同様のスペックを持つトランスポンダ型検出器(アーム長5万km)と比較

最高感度が高い(中性子星連星を合体前1年観測すると、SN ~ 600 at 100Mpc; トラポン型の7倍)

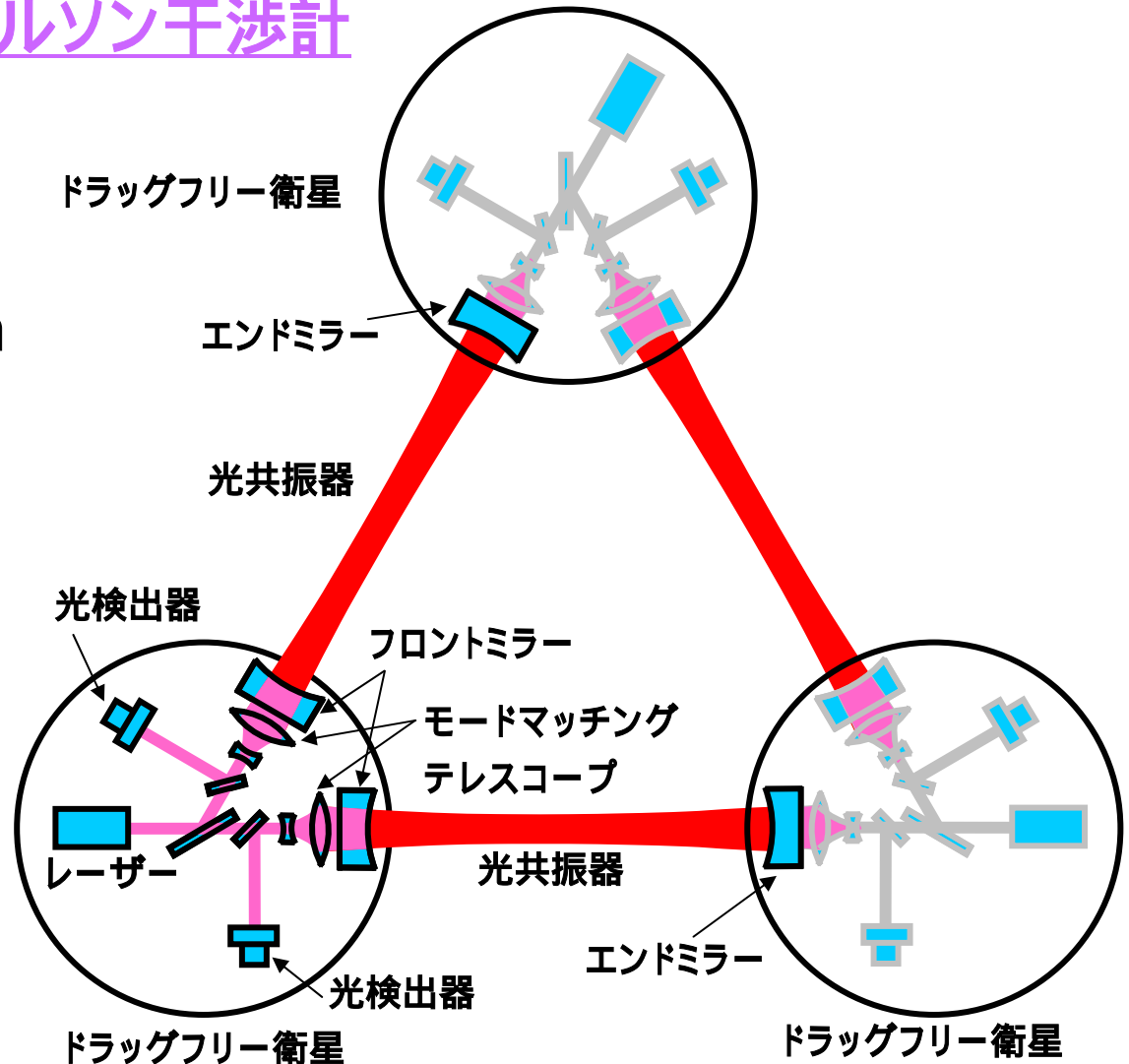
低周波ではコンフュージョン・ノイズにより感度が制限される



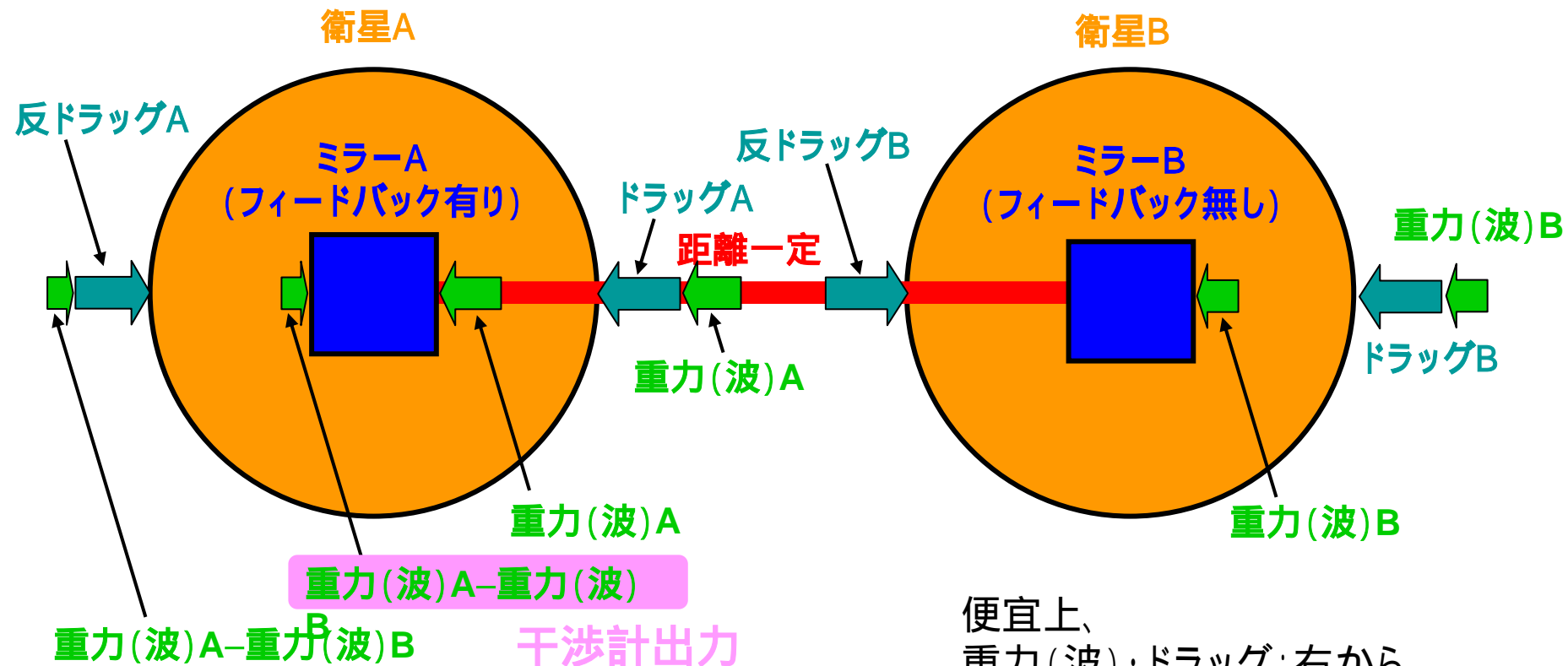
予備概念設計

ファブリペロー・マイケルソン干渉計

アーム長: 1000 km
レーザーパワー: 10 W
レーザー波長: 532 nm
ミラー直径: 1 m
ミラー質量: 100 kg
フィネス: 10

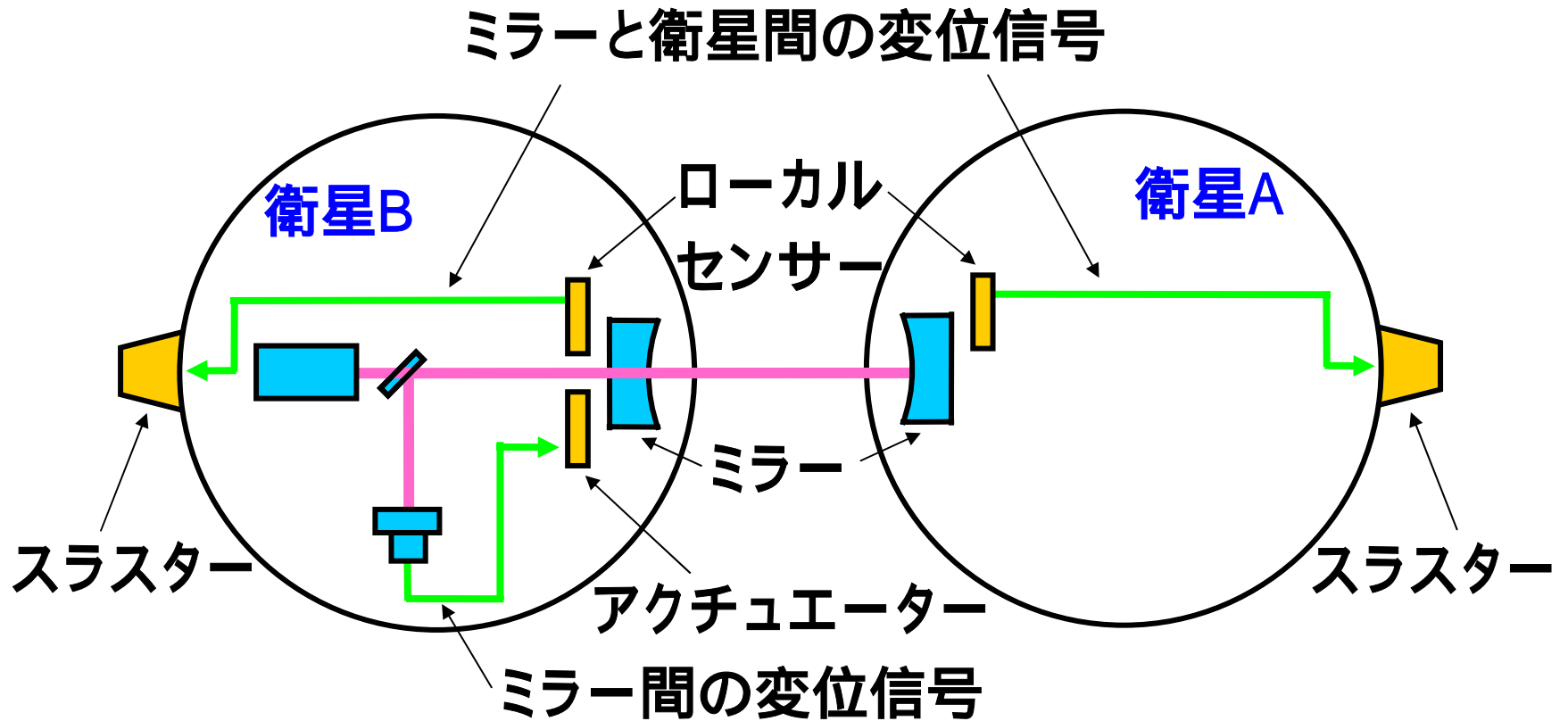


ドラッグフリー衛星と光共振器



便宜上、
重力(波)・ドラッグ: 右から
人工的な力: 左から
表示

ドラッグフリー衛星と干渉計制御



軌道とコンステレーション

- 軌道

- 太陽周回
- ラグランジェポイント
- 地球周回

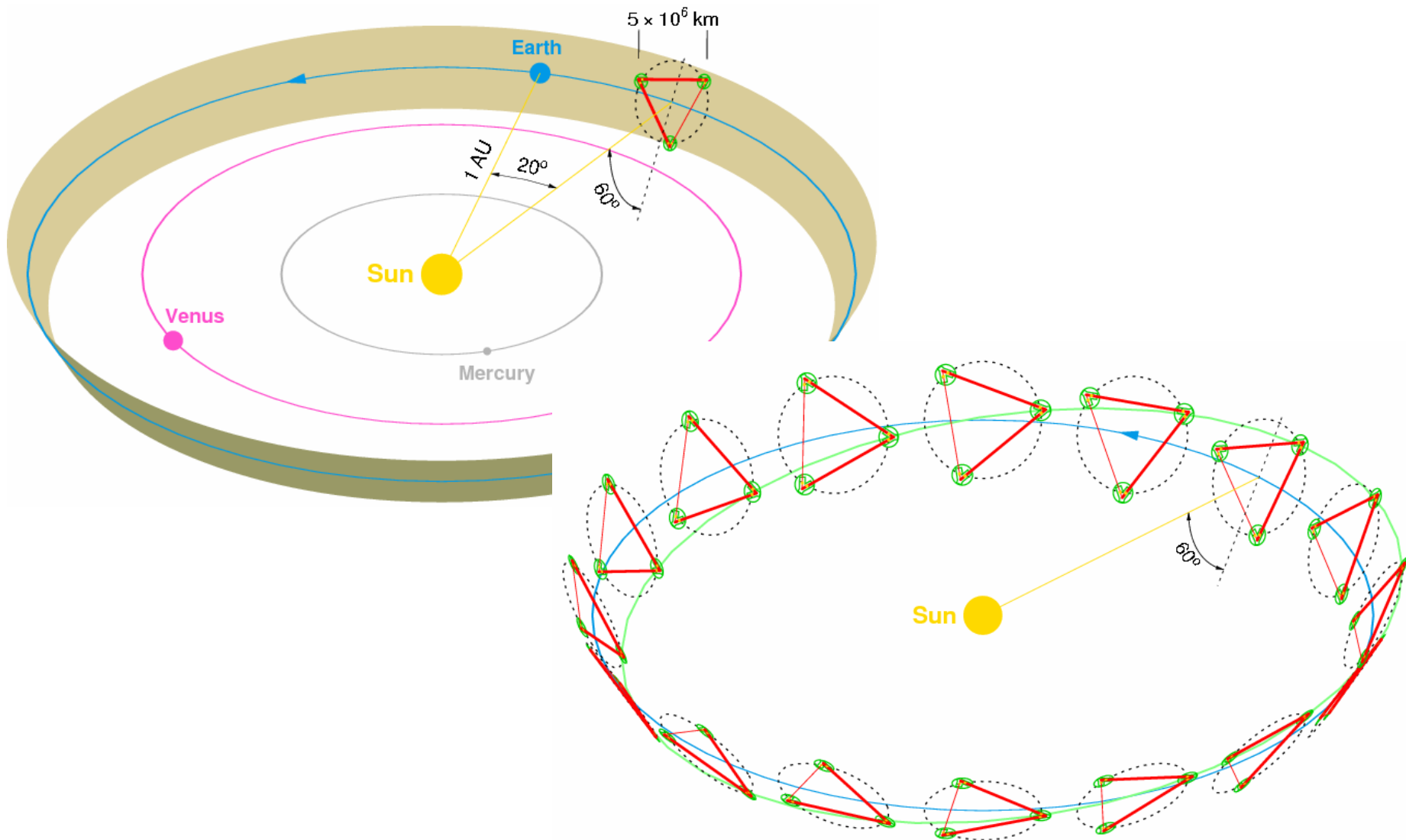
- コンステレーション

- 六芒星 (ストカスティックに対して感度を上げる)
- 遠くの2つの正三角形 (角度分解能を上げる)

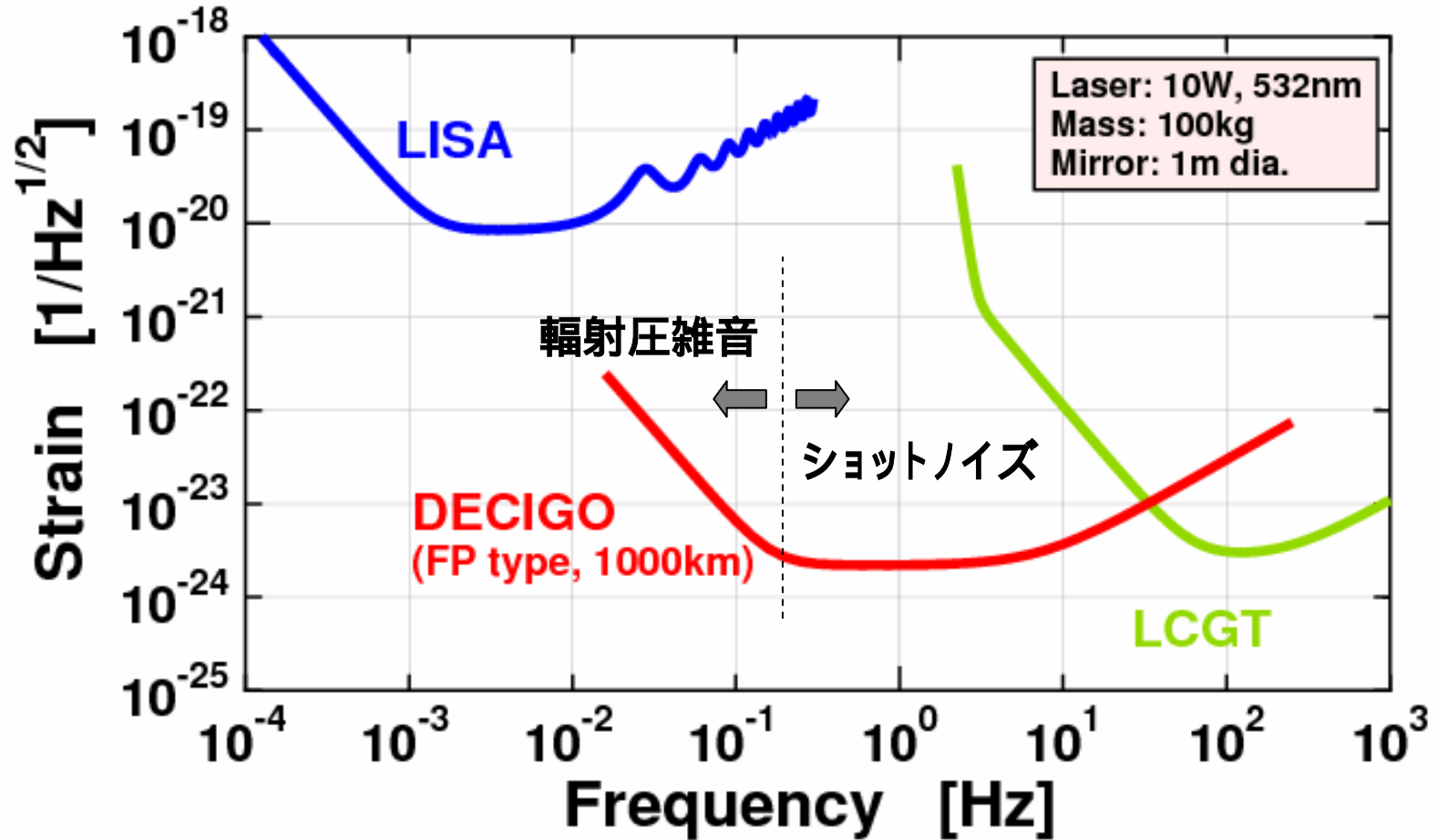
軌道を決めるための条件

- 衛星間の距離を一定に保ち続けるための推力の保持
- 必要なエネルギーの供給
- 重力場の勾配による信号が雑音とならない
- 温度変化
- 太陽光の影響
- 通信
- ロケット
- 予算

参考：LISAの軌道



目標感度



予備概念設計に対する要求値

[輻射圧以外の力の雑音]

- 鏡1枚につき 4×10^{-17} N/ $\sqrt{\text{Hz}}$
- (全体で 8×10^{-17} N/ $\sqrt{\text{Hz}}$)
- 安全係数: 3

[周波数雑音] @ 1 Hz

- 光源(初段の周波数安定化システムを含む)の周波数安定度: 1 Hz/ $\sqrt{\text{Hz}}$
- 同相腕共振器長による周波数安定化ゲイン: 10^5
- 同相信号除去比: 10^5
- 安全係数: 10

[強度雑音] @ 1 Hz

- 光源の強度雑音: 10^{-8} 1/ $\sqrt{\text{Hz}}$
- 差動腕共振器長の残留RMS: 2×10^{-11} m
- 安全係数: 10

工学的問題点

光源

- 短波長で高パワー
- 周波数安定化
- 強度安定化
- 寿命
- 予備レーザーとの交換

計測・制御

- 大口径ミラー
- ロックアクイジション
- 姿勢制御
- 同相アーム長信号による周波数安定化
- CMRR

ドラッグフリー

- センサー
- アクチュエータ
- 衛星のつくる重力場
- 推力
- リリース機構

軌道

- アンテナ配置
- 推力の持続

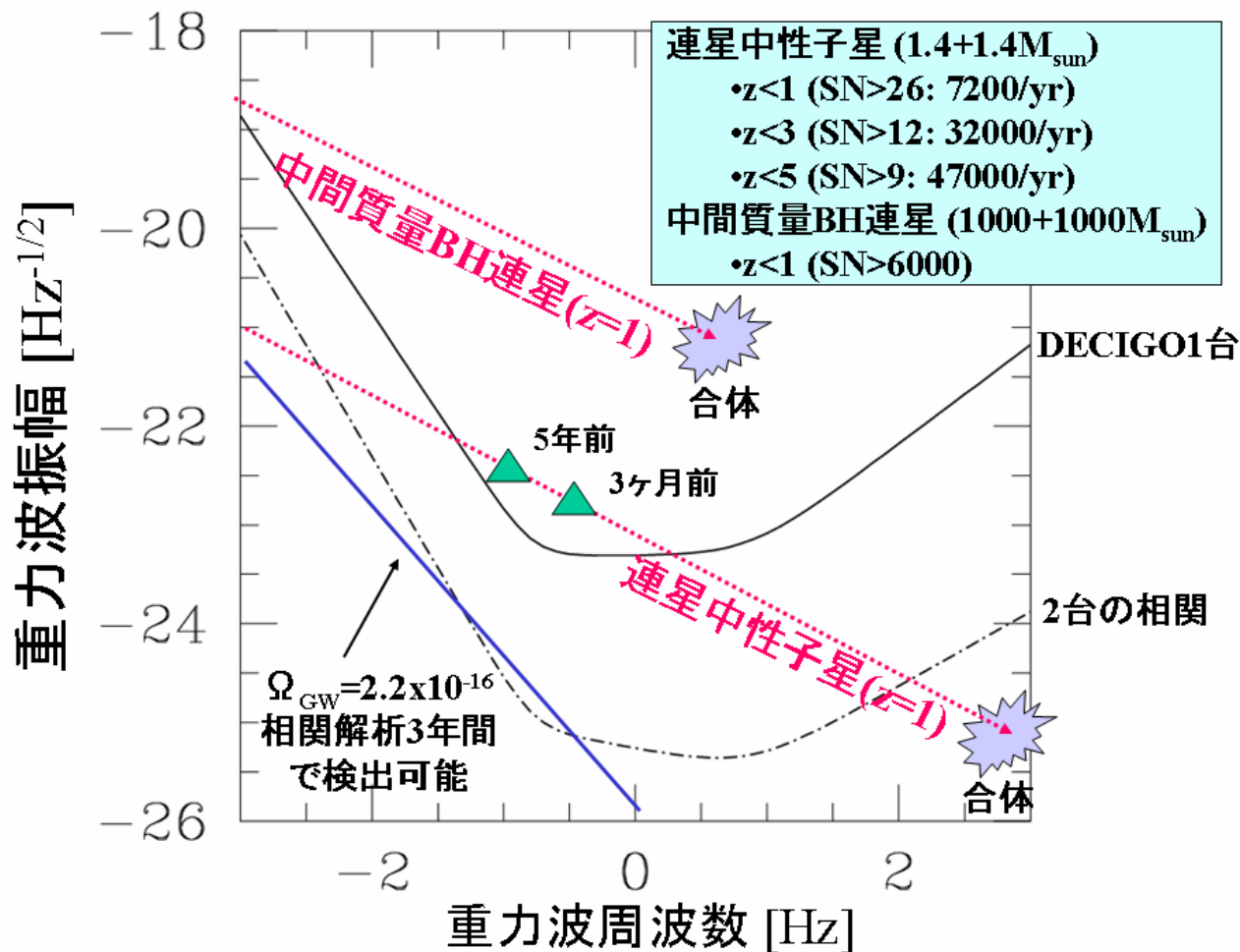
衛星一般

- 電力
- 通信
- 打ち上げ

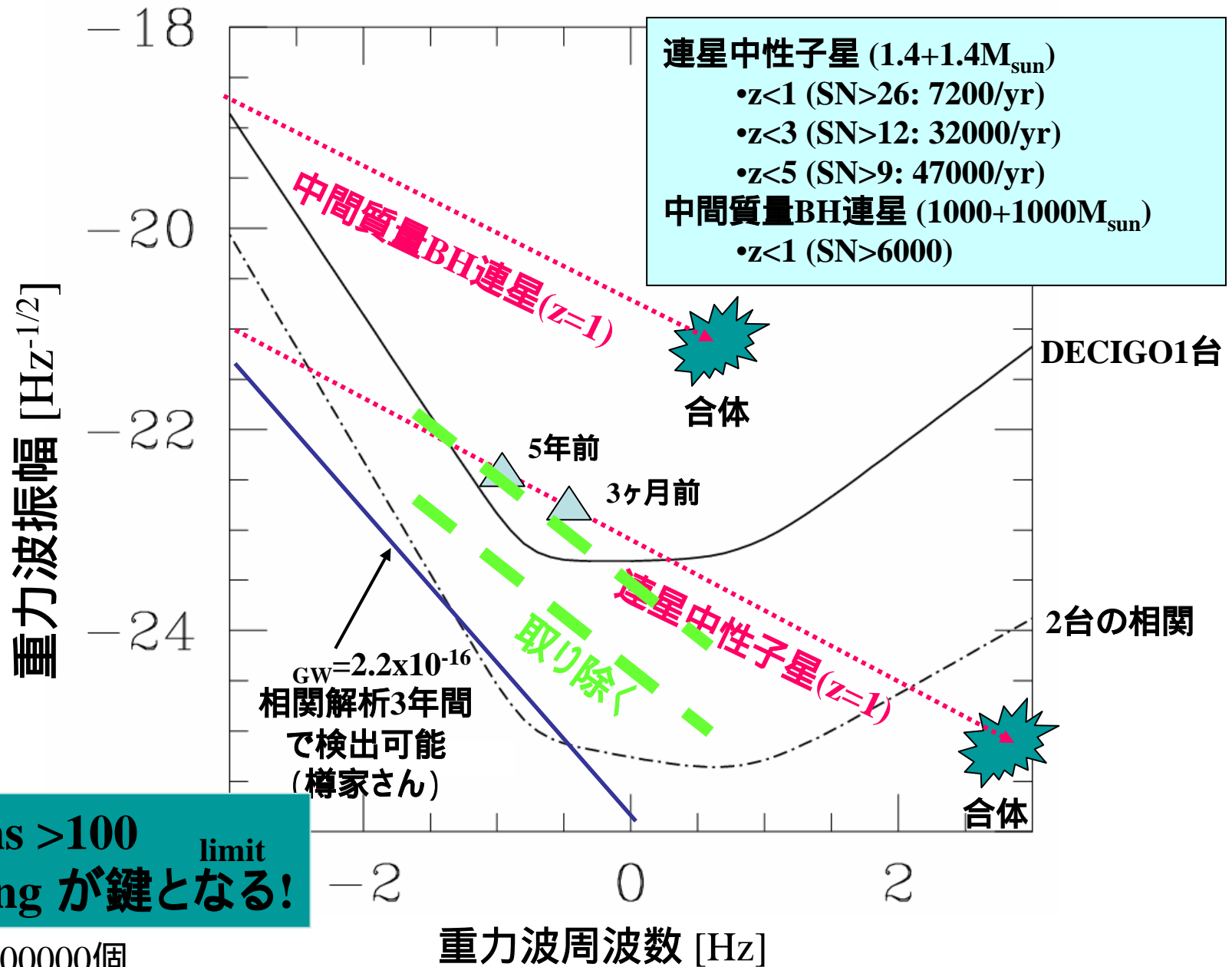
宇宙環境

- 電磁波
- 宇宙線
- ドラッグ
- 温度変化

DECIGOの狙う重力波源



背景重力波観測: NS+NS等取り除く

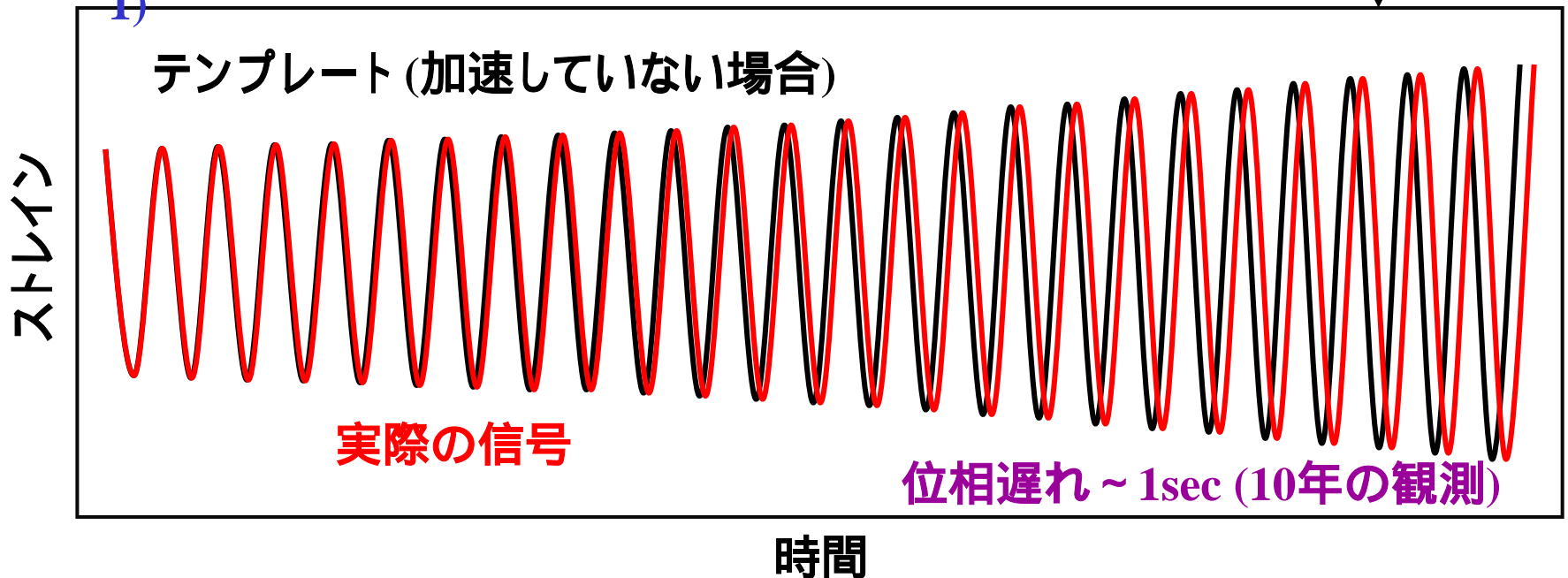
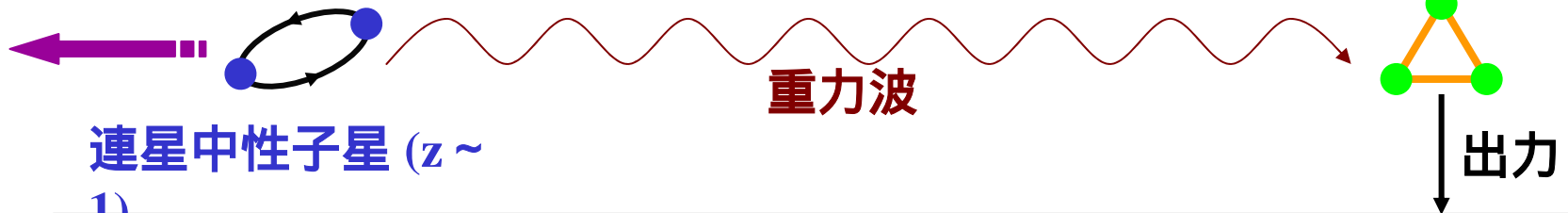


ns+ns > 100 limit
Cleaning が鍵となる!

~100000個

宇宙の膨張加速度の直接計測

膨張 + 加速？



DECIGOによる ダークエネルギーの制限

中性子星連星までの**距離 赤方偏移**関係から
モデルに制限 加速膨張(超新星と同じ)

・ 距離 ← チャープシグナルから、直接決定

・ 赤方偏移

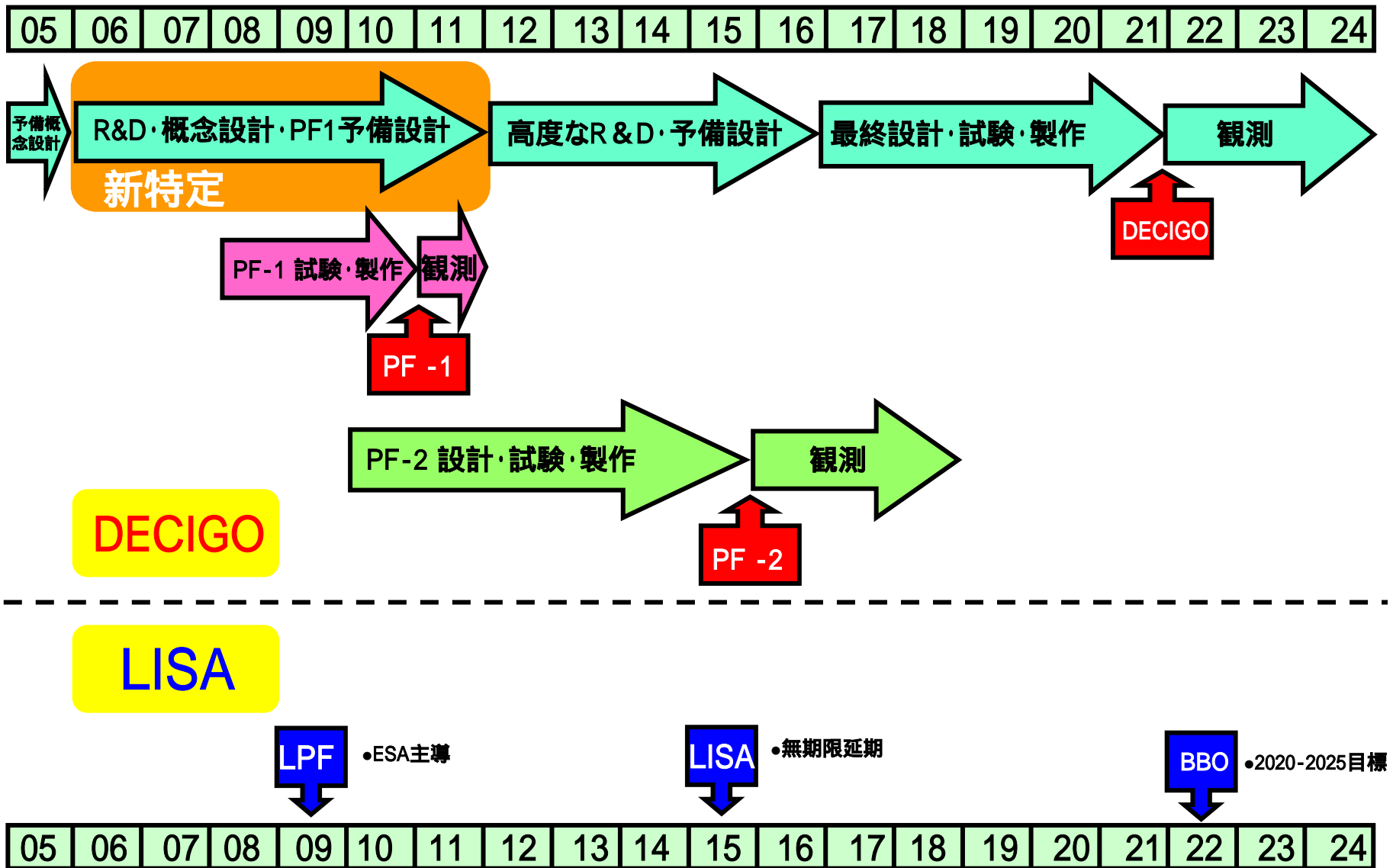
← host galaxy, host quasar を特定

角度分解能 ~ 10arcmin (1台)

~ 10arcsec (3台)

at $z=1$

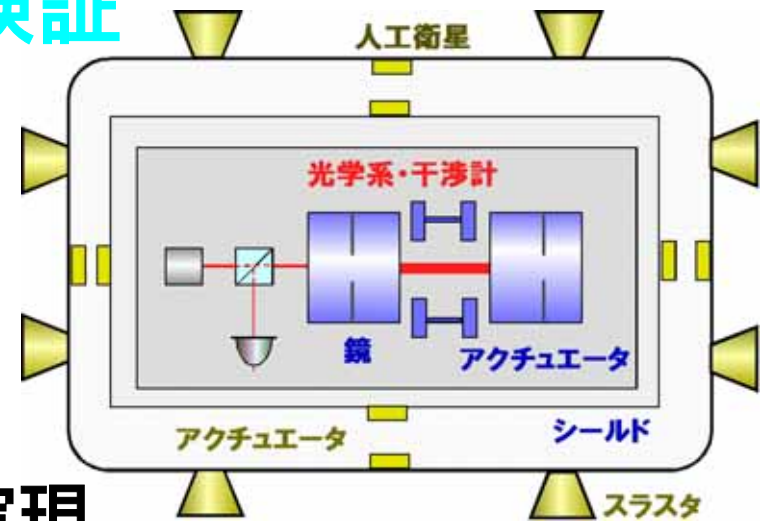
DECIGO実現へのロードマップ



パスファインダー1

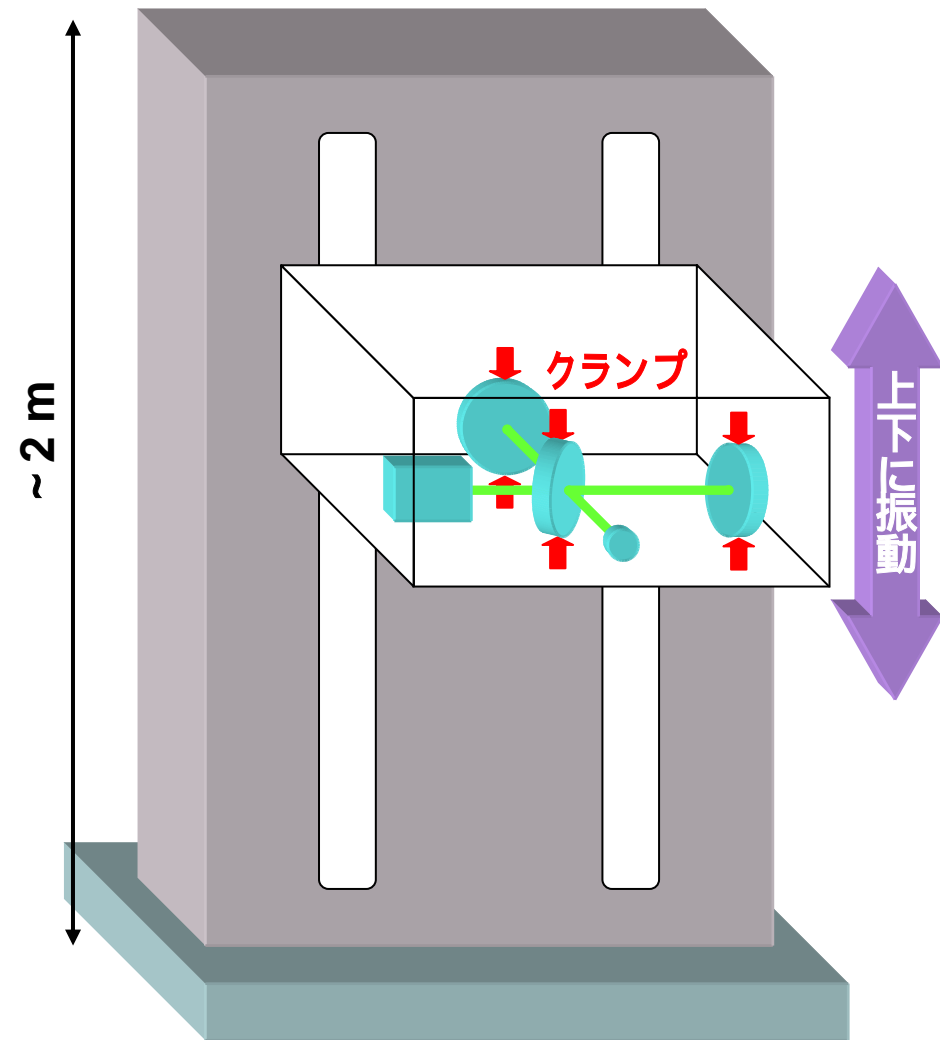
目的と構成

- 宇宙空間でないと試験できない技術の確認
 - ドラッグフリー
- 基礎技術の宇宙空間での検証
 - レーザー
 - 周波数安定化システム
 - 計測システム
- 低周波での重力波観測
 - 0.1-1Hzでの世界最高感度実現
(3×10^{-17} /rHz)

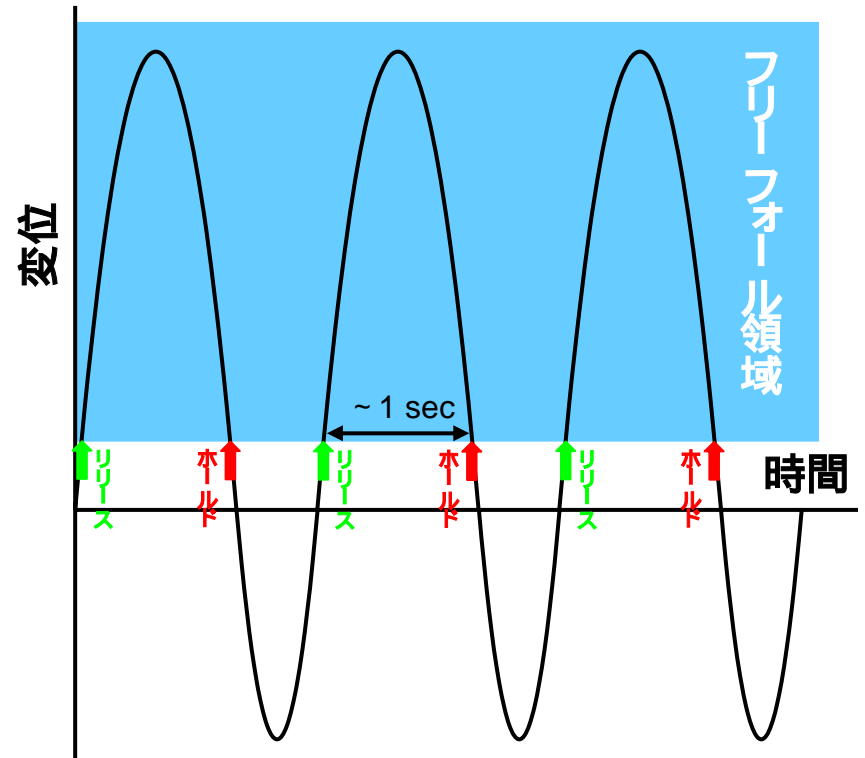


地上シミュレータ

繰り返しフリーフォール干渉計



- 地上においてフリーフォール状態を繰り返し実現
- 0.1Hz以上で重力波検出器として高感度の実現



まとめ

- スペース重力波アンテナDECIGOの検討が行なわれてきた
- DECIGOは極めて難しい技術を必要とする
- DECIGOが実現すれば、非常に頻度の高い重力波検出が可能となる
- それによりさまざまな新しいサイエンスが得られる
- DECIGOのためのR&D研究がまもなく始まる