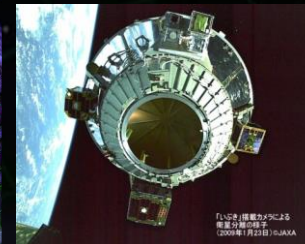
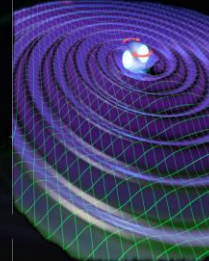
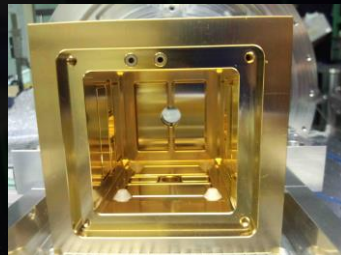
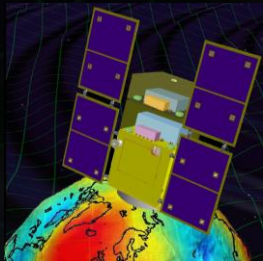


DECIGO方針相談

安東 正樹 (東京大学 / 国立天文台)

DECIGO/DPF collaboration



- JAXA・イプシロン搭載小型計画に応募していた。
 - 2014年2月末締め切り。
 - 理学4ミッション (光赤外, X線, 重力波, 月科学)
工学3ミッション の応募。
 - 選定の流れ：
 - 第1段階: 理学委員会, 工学委員会でそれぞれ0-2を選定。
 - 第2段階: 宇宙研のサポートにより洗練させ, 再提出。
 - 理学委員会, 工学委員会でそれぞれ0-1を選定。
 - 第3段階: JAXA内での議論を受け, 0-1ミッションを選定。



4/28 DPFは第1段階で落選 (光赤外, 月科学が選ばれた.)

- DPFミッションの意義・位置づけ.
 - DPFのミッション目標設定が適切か? サイエンス/コスト.
 - DPFの技術がどのようにDECIGOにつながるのか?
- DECIGOデザインの適切さ.
 - 科学的意義とそれに対するデザイン.
 - 何をどこまで明らかにするのか?
- 衛星規模の検討
 - より小型のミッションの組み合わせは可能か?
 - DPFではなく、Pre-DECIGOを目指す可能性は?
- コミュニティ
 - KAGRAとの関係. LiteBIRDとの関係.
 - 海外との協力, 役割分担, 日本が開発を行う意義.

- **時間の経過**. DECIGOロードマップとDPFのコンセプトができてから約9年が経過し、状況が変化してきている.
 - KAGRAの開始 (2010-) → コミュニティでの位置づけ.
 - JAXA内での位置づけ. 小型ミッション → 中核ミッション.
 - LISAの状況変化.
- 一貫した説明を繰り返すことで、JAXAに対する重力波分野のプレゼンスは大幅に向上した. その一方で、当初のコンセプトを大幅に変更するタイミングを逸してきた.

•DECIGOのミッション検討

DECIGOの科学的意義をより整理して明確化し切れなかった。また、DECIGOの設計は当初のPre-Conceptual Designからあまり進んでいない。DPFに必要な技術を明確に定義できなかった。

→ DECIGOミッションの再定義。

•組織体制

KAGRAとの関係を指摘され続けてきたが、根本的な解決はできなかった。

→ DPF WGと組織体制の再設定。

•ロードマップ

DPF, Pre-DECIGOの流れの再設定。技術実証ミッションとして行う可能性、小型ミッションの機会の模索。

Q: DPF推進のデメリット(リソースの分散)について、なぜKAGRAをやらないか？

A: 多くが別技術なのでリソース失うだけ

Q: 長期計画のなかでの位置付け、特にBBOの方向性と関係・位置付け

A: BBOはまだ具体化していない

Q: 宇宙における重力波はDECIGOだというのは国際合意か？

A: ロードマップにはDECIGO, BBO両方がのっている

Q: 将来DECIGO方式でなくなったらどう貢献する？

A: 0.1HzではDECIGO方式が有利

Q: なぜBBOはDECIGO方式をやらない？

A: LISAは確実なソースからはじまっており、BBOはそれを継承したから

Q: DPFとPreDECIGOはどちらが難しい？(天文ではFPは実証されているので)

A: PreDECIGO

Q: DPFはどこがどれくらいむずかしいのか感覚が分からない

Q: 実証しないとけない技術があるのかどうか分からない

Q: 何が難しいから宇宙に出ないとけないかが分かりづらい

A: 非接触保持した上で6自由度制御の例はない

Q: 宇宙にいかないといけない理由は？

A: 感度を実現するため

Q: 干渉計の要求感度がなぜ1桁ずつ上がるのか？

Q: 2桁低い値をDPFで示してDECIGOに対して実証したことになるのか？

A: リソースの違い

Q: まちがいなくスケールするのか？それで十分なのか？

Q: 要求ではなくできることをかいてあるのか？

A: 技術的にできることから一步步、これが重要な一歩

Q: DPF+FFでPreDECIGOと一緒にできないのか？

A: 中型計画になる

Q: 1桁ずつの感度アップは実証になっていないのでは？

Q: なぜ実証しないとけないと思っているかが理解できない

Q: なぜ地上で・計算での結果では実証にならないのか提案書からよめない

A: 他の雑音(お化け)がないことを示すことが目標

Q: ならばやはり最終感度で実証するべきでは？

A: エキサイタで伝達関数を取得し、ソースとの掛け算で雑音レベルを見積もれる

Q: それは地上ではできないのか？

A: この感度レベルに到達してはじめてできる

Q: 周波数安定化方法なぜちがう？いい物を使わないのはなぜ？

A: 両方検討した、推進グループの違い

Q: でも行き着くところ(安定度)はちがうはず

A: 0.1Hzは両方の安定度がクロスする帯域、

低い周波数はヨウ素、高い周波数は共振器が得意

DPFでは地上実験の結果を再現しやすいのはヨウ素だから

Q: どちらにするかは先に決めるべき、ヨウ素の優位性は将来的にも明確か？

A: 十分な性能を見込める、ヨウ素と倍波とは相性がよいのも理由

Q: 変位感度は打ち上げ前に確認できるか？

A: 高い周波数で確認し低周波へ外挿する、外力雑音は難しい

Q: ならばやはり最終感度を目指すべきでは？

A: リソースをかければできる

Q: リソースをかけるとなぜできるのか？

A: 大きさが確保できる

Q: 今想定している外力雑音についてはスケーリングすると思っているが、それ以外のお化けを探すために宇宙に出ないとけないという意味か？

A: そうです、

Q: 目標と設計の間に矛盾があるような気がする

Q: DECIGOはFFが難しいと思う。先にPreDECIGOでは？

A: DPFでDragfreeを先に実証しておくはPreDECIGOへのステップとなる

Q: 宇宙に出る意味として何が分かるのか(お化けの内容)を明確にしては？

A: 熱輻射などの想定寄与などは確認できる

Q: 結果として打ち上げないと分からない何かの具体化？

A: 何か分からないもの(お化け)を実証できるようなシステム構成になっていて、個々をクリアしないと次に進めないことをしめして欲しい

A: ソーラーセイルのケースと似ているのでは、

スケールアップすることで達成できることをもっと定量化するとよい(船木)

Q: 外に出る衛星の合乗りなら小型でも成立するのは？

A: SWIMでも機能が制限されたのはリソースのため

Q: 連星のフォアグラウンドは本当にないのか？

まだ背景重力波が支配的になるか分からない状態でDPFを進める意味/確信？は

A: 中性子連星系がフォアグラウンドだが分離できる

WD連成は合体後のため存在しないというのは天文学的推定

Q: 初期宇宙からの重力波で何がわかるか？

A: 見ている時期が違う

A: ビッグバンがいつおきたのかが、エネルギースケールが分かる

Q: rに関してDECIGOの要求になっているか？

A: ビッグバンのエネルギースケールを決定するための要求になるようにする

Q: リソースが限られていたら、Bモード観測とDPFどちらが優先？

A: Bモードの検証は必要だが、rが決まればBモード観測の重要性は薄れる

Q: 結局重力波だけはではなにもわからない？

A: 両方でみることが重要

Q: ほかの天体候補、第1世代の星などの影響はないとわかっているか？

A: BHなどは周波数が高くて低い

Q: テールは引くので、DECIGO帯でも大丈夫か？

A: 0.1Hzよりは低いと見積もっている

Q: システムティックはどうやってはかる？

A: 変動成分を見ているのであって、DCを見ているわけではない

Q: KAGRAとの関係、ミッションがDEFINEされれば人が集まるの論理がうまくいっていない。KAGRAと並行の場合、100%専従は？

A: 40くらい

Q: 安東さんはどうする？やらないのではあれば誰がリードする？

A: ミッション提案まではやるが、その後は再考。

Q: 安東さんは外れなければならないのか？

A: 必要であれば外れる

Q: プロジェクトを一貫してリードできる「顔」が何枚か必要(100%の人)

Q: 誰が研究人生をかけてとりくむのか(Astro-Gの教訓)の構想が必要

A: 重力波からでてきたミッションなので、裂かれていることは事実

A: やめたらシュリンクするだけ。投資は必要、2つやることで強くなる

Q: 「2つやると強くなる」はどれくらい説得力があるんでしょう

A: 学生には魅力的に映っている。

A: 10名くらいの専属スタッフは必要。とはいえ、現在7ミッションが並行

する中で専属の数は数えられない。ミッションが決定した後で体制を組みたい

Q: KAGRAがそのままの体制で済むか？大トラブルになる可能性もある

その際は全勢力を投入せざるを得ない。パラでいくときは相当深刻に考えるべき
今答えなくてよいが、考えてほしい

A: その通り。重力波としてけじめをつけるべき

Q: KAGRAと時期をずらすことはできないか？そうしたとき、何が失われるのか

A: 今やめると失うだけ。求心力が失われるだけ

Q:もうちょっと後でもいいのでは？最適時期はないのか？戦略的に提案してほしい

Q:ずらした場合の国際的イニシアチブにたいするインパクトは？

A:時期を逃したのでLISAは参加できなかった

A:DPFを今の形で提案するのは今回が最後.

次はPre-DECIGOを意識した設計にならざるを得ない

Q:運用期間はどこまで短くしてもよいか？

A:ドラッグフリーのための半年がミニマム

ヒアリング説明資料

DECIGOパスファインダー (DPF)

将来の宇宙重力波望遠鏡DECIGOのための前哨衛星

1機の衛星で可能な宇宙実証をおこなう

→ DECIGOのみならず、宇宙・無重力環境
利用のための先端宇宙技術の確立。



イプシロン搭載小型ミッション としての実現を目指す。

小型衛星 1機 (重量 400kg)

地球周回軌道 (高度 500km)

非接触保持された試験マスの変動を
レーザー干渉計を用いて精密計測

Q1 : DPFはDECIGOを実現するための技術実証を主目的とするミッションであると理解する。DPFとDECIGOの間にPre-DECIGOをおいているので、DPFの技術実証の中身が適切であるかはPre-DECIGOにも依存する。Pre-DECIGOを含めた全体像を示していただきたい（Q7と同様の質問）。

また、バイ・プロダクトとして想定している地球重力場観測について価値のある科学的成果が得られことを期待されている場合は、その科学的な内容について、より詳しい説明をお願いしたい。

宇宙重力波望遠鏡 DECIGO



DECIGO (DECI-hertz interferometer
Gravitational wave Observatory)

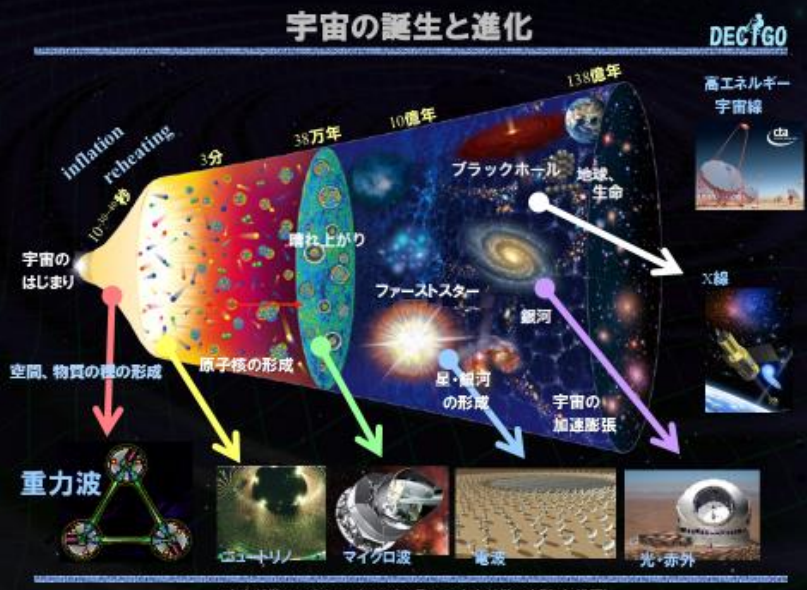
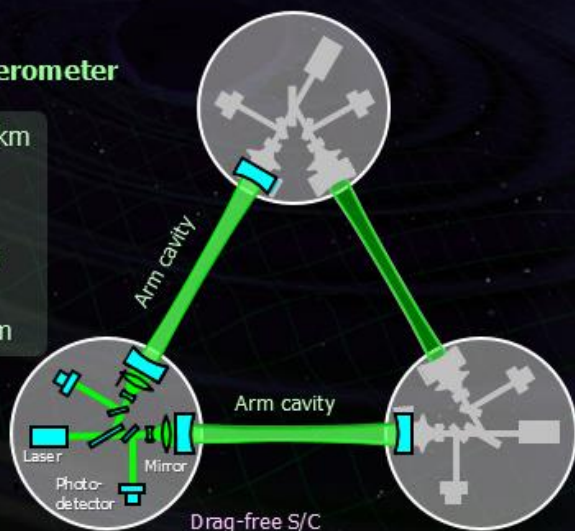
宇宙のはじまりを直接観測する。

ビッグバン宇宙論において、空間・物質の種が、
いかに形成されたかを観測によって解き明かす。

Interferometer Unit:
Differential FP interferometer

Arm length: 1000 km
Finesse: 10
Mirror diameter: 1 m
Mirror mass: 100 kg
Laser power: 10 W
Laser wavelength: 532 nm

S/C: drag free
3 interferometers



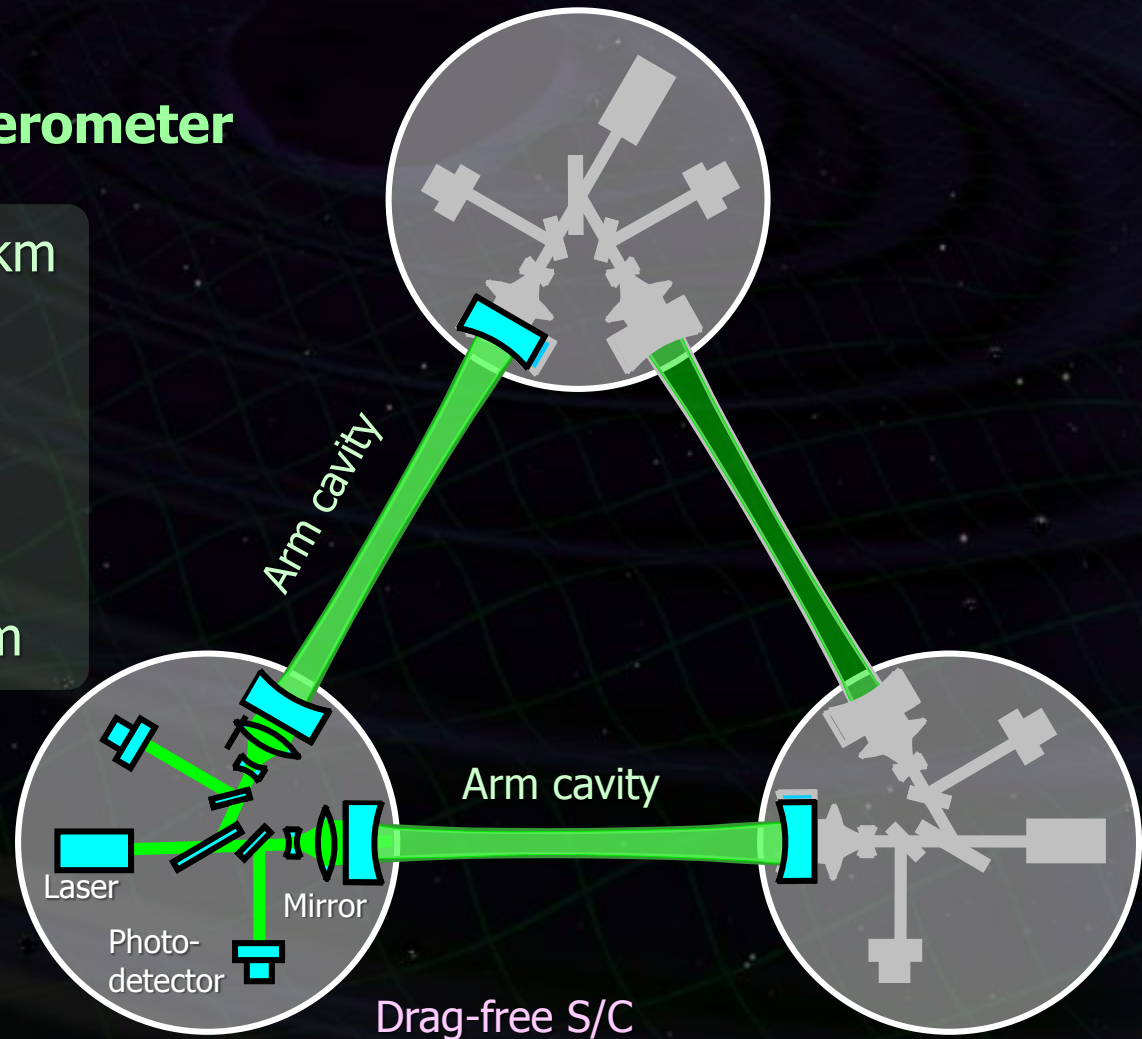
宇宙科学シンポジウム (2014年1月8日, 宇宙科学研究所, 相模原)

Interferometer Unit:

Differential FP interferometer

Arm length:	1000 km
Finesse:	10
Mirror diameter:	1 m
Mirror mass:	100 kg
Laser power:	10 W
Laser wavelength:	532 nm

S/C: drag free
3 interferometers



• DECIGOで必要とされる先端技術

(1) レーザー干渉計による精密計測技術.

宇宙空間において、レーザー干渉計を用いた精密変動計測・外乱除去が行われた例はない。

⇒ DPFによる宇宙実証.

(2) 長基線長の精密フォーメーションフライト技術.

基線長1000km規模でのフォーメーションフライトが行われた例はない。

⇒ Pre-DECIGOによる宇宙実証.

長基線長FFにおける制御

補足

干渉計(FP共振器)の基線長制御

干渉計信号

→ 鏡の位置(と光源周波数)制御

宇宙機と鏡の相対位置

ローカルセンサー信号

→ スラスタ (ドラッグフリー制御)

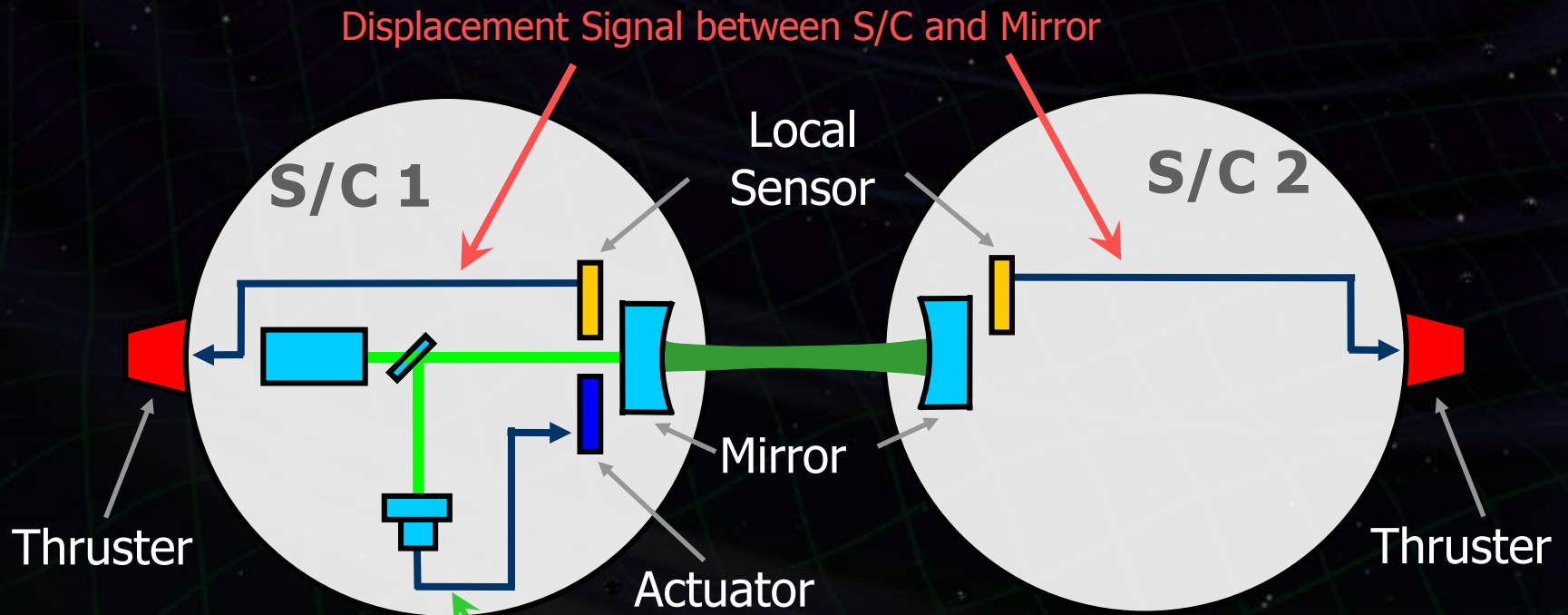
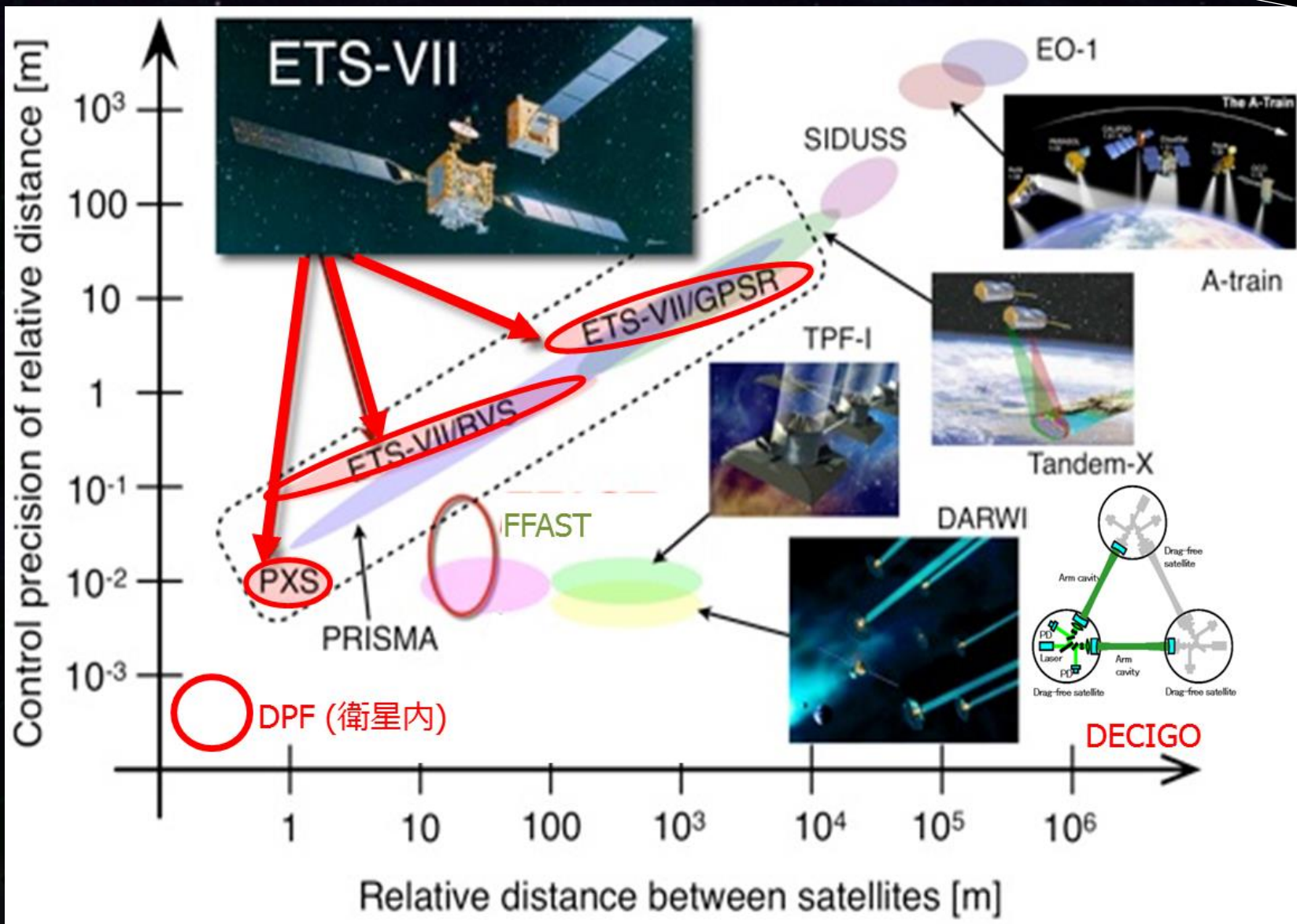


Fig: S. Kawamura

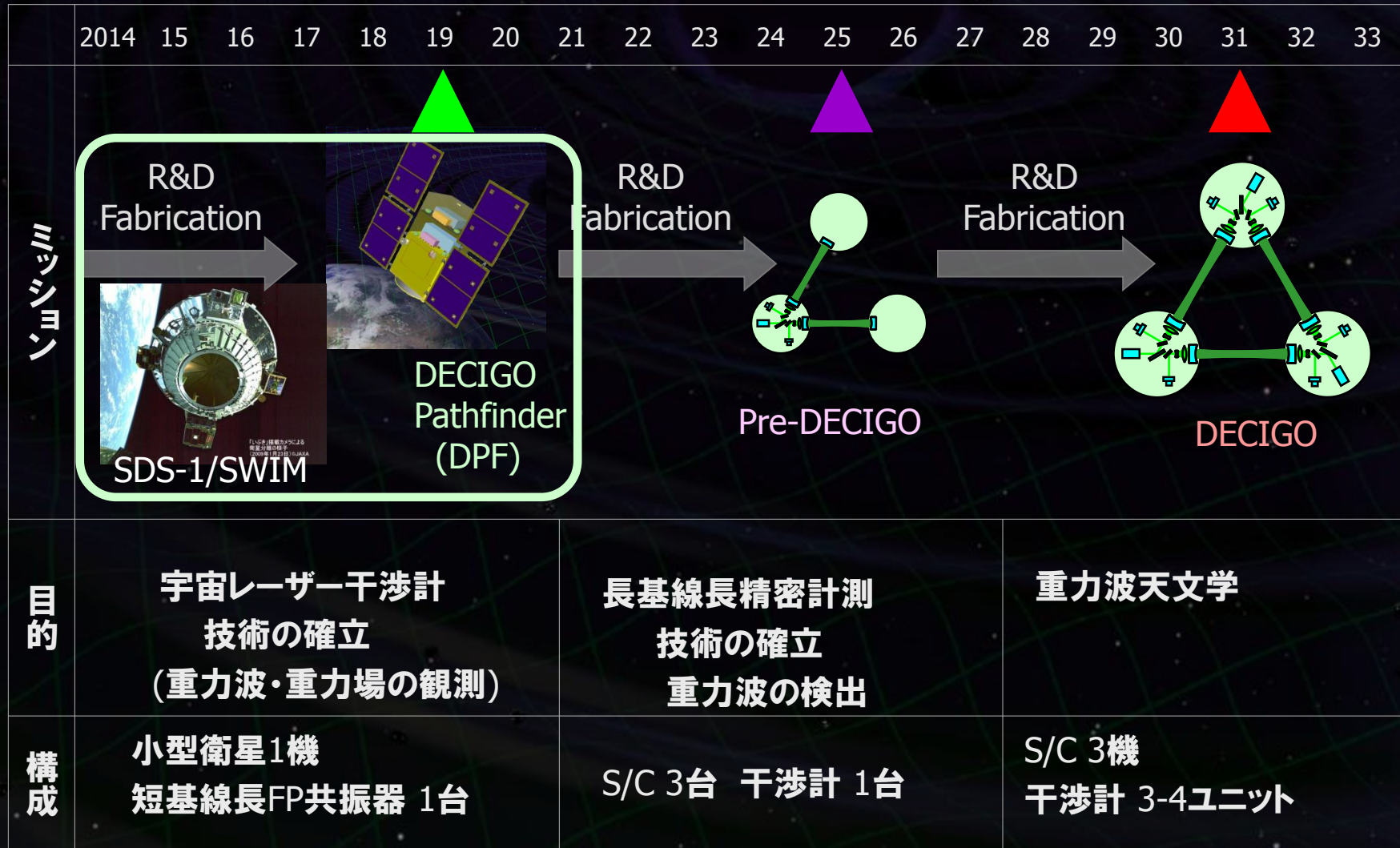
DECIGOのフォーメーションフライト技術

補足



DECIGOのロードマップ

Figure: S.Kawamura



DECIGOのための技術実証

補足

	既存技術, 背景	DPFの目標	DECIGOの要求値
宇宙干渉計	宇宙空間で精密変動計測した例はない。地上では、 $10^{-19}\text{m}/\text{Hz}^{1/2}$ 程度は実現済。LPFでは、MZ干渉計で $10^{-12}\text{m}/\text{Hz}^{1/2}$ を目指す。	宇宙空間では初めてのFP干渉計動作。 $10^{-16}\text{m}/\text{Hz}^{1/2}$ の変位感度。 $10^{-15}\text{N}/\text{Hz}^{1/2}$ の外力雑音。	感度 $3 \times 10^{-18}\text{m}/\text{Hz}^{1/2}$. 外力雑音 $10^{-17}\text{N}/\text{Hz}^{1/2}$.
安定化レーザー光源	地上では、時間・周波数基準として多くの研究 ($\text{数Hz}/\text{Hz}^{1/2}$ の安定度)。重力波望遠鏡 $\text{数}10^{-6}\text{Hz}/\text{Hz}^{1/2}$ の相対安定度が実現されている。宇宙用では6桁程度悪い。	現在地上で実現されている最も良い安定度 $0.5\text{Hz}/\text{Hz}^{1/2}$ の宇宙空間での実現。出力 100mW 。	安定度 $0.5\text{Hz}/\text{Hz}^{1/2}$. 出力 10W .
ドラッグフリー技術	GOCE衛星では4自由度制御で $5 \times 10^{-9}\text{m}/\text{Hz}^{1/2}$ が実現されている。LPFは同程度で全自由度制御。	全自由度制御で $1 \times 10^{-9}\text{m}/\text{Hz}^{1/2}$ の実現。	全自由度制御で $1 \times 10^{-9}\text{m}/\text{Hz}^{1/2}$.

DECIGOのための技術実証

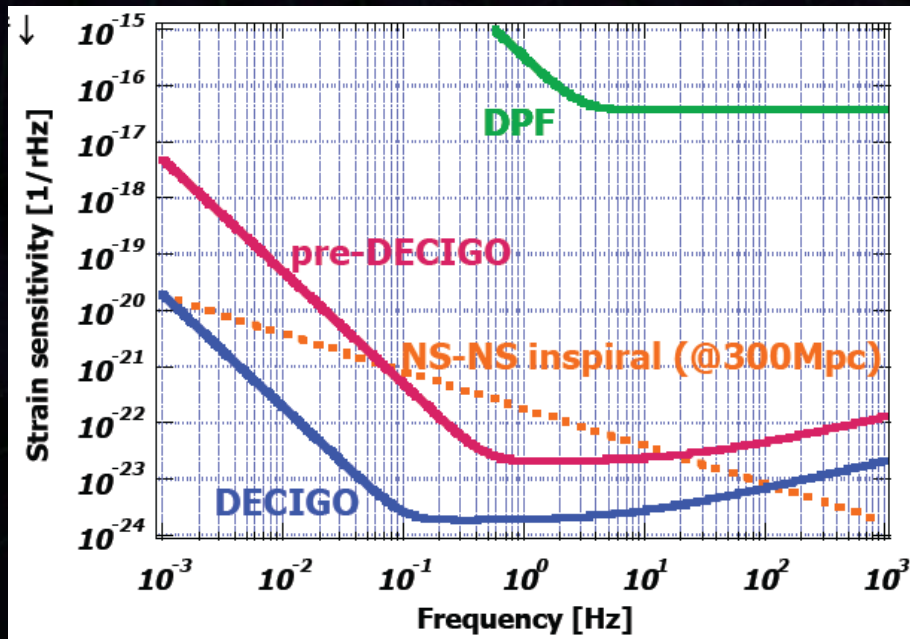


	DPFの目標	Pre-DECIGOの目標	DECIGOの要求値
宇宙干渉計	宇宙空間では初めてのFP干渉計(30cm)動作. $10^{-16} \text{m/Hz}^{1/2}$ の変位感度. $10^{-15} \text{N/Hz}^{1/2}$ の外力雑音.	長基線長FF(100km). でのFP干渉計動作. $10^{-17} \text{m/Hz}^{1/2}$ の変位感度. $10^{-16} \text{N/Hz}^{1/2}$ の外力雑音.	感度 $3 \times 10^{-18} \text{m/Hz}^{1/2}$. 外力雑音 $10^{-17} \text{N/Hz}^{1/2}$. 基線長 1000km.
安定化レーザー光源	現在地上で実現されている最も良い安定度 $0.5 \text{Hz/Hz}^{1/2}$ の宇宙空間での実現.出力 100mW.	現在地上で実現されている最も良い安定度 $0.5 \text{Hz/Hz}^{1/2}$ の宇宙空間での実現.出力 1W.	安定度 $0.5 \text{Hz/Hz}^{1/2}$. 出力 10W.
ドラッグフリー技術	全自由度制御で $1 \times 10^{-9} \text{m/Hz}^{1/2}$ の実現.	全自由度制御で $1 \times 10^{-9} \text{m/Hz}^{1/2}$ の実現. 長基線長FF 100km.	全自由度制御で $1 \times 10^{-9} \text{m/Hz}^{1/2}$. 超基線長FF 1000km.

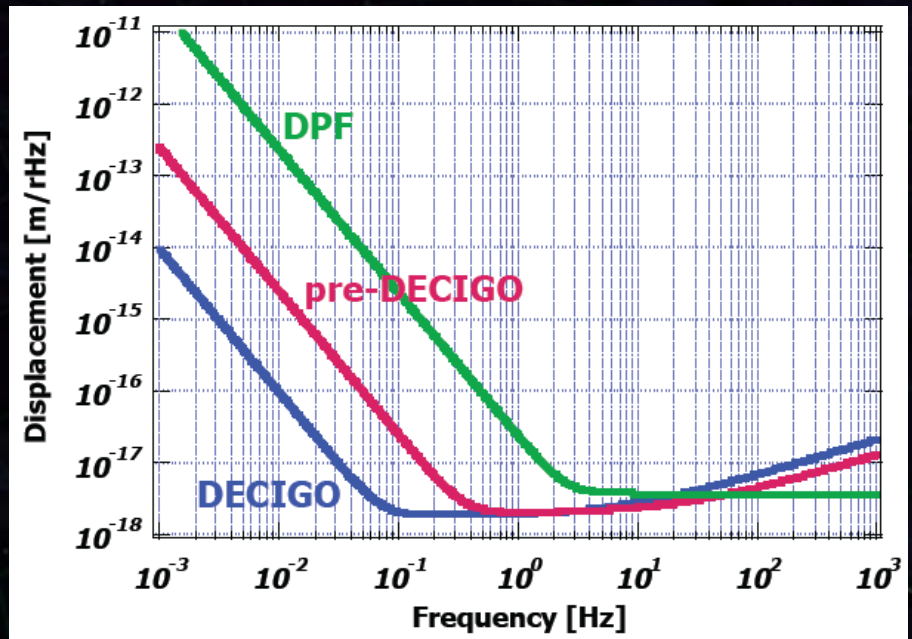
感度比較

補足

歪み(重力波振幅)感度



変位感度



※ 散射雑音, 力の雑音 のみを考慮した原理的な到達限界感度

Q1 : DPFはDECIGOを実現するための技術実証を主目的とするミッションであると理解する。DPFとDECIGOの間にPre-DECIGOをおいているので、DPFの技術実証の中身が適切であるかはPre-DECIGOにも依存する。Pre-DECIGOを含めた全体像を示していただきたい（Q7と同様の質問）。

また、バイ・プロダクトとして想定している地球重力場観測について価値のある科学的成果が得られことを期待されている場合は、その科学的な内容について、より詳しい説明をお願いしたい。

地球重力ポテンシャルを 球面調和関数展開で表現

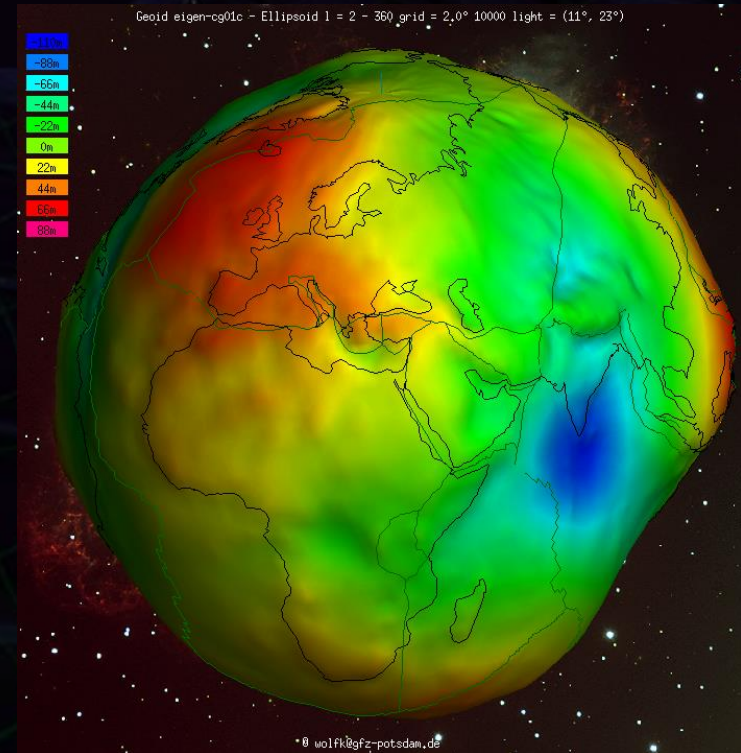
$$U(r, \lambda, \phi) = \frac{GM}{r} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{R}{r}\right)^l P_{lm}(\sin \phi) \times [C_{lm} \cos(m\lambda) + S_{lm} \sin(m\lambda)]$$

G, M, R : 重力定数, 地球質量, 地球半径

r, λ, ϕ : 軌道半径, 経度, 緯度

P_{lm} : Legendre陪関数

係数 C_{lm}, S_{lm} :
地球内部の質量分布に依存する
衛星による測定などの観測から求める

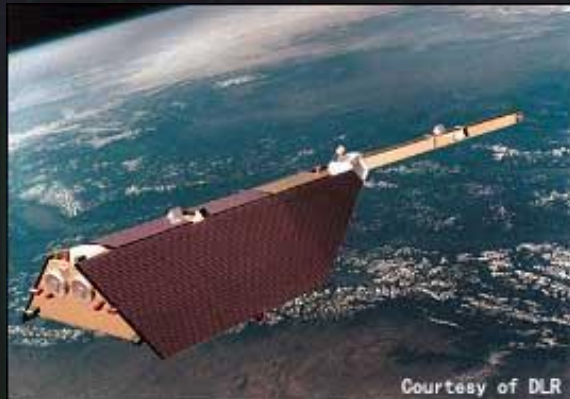


International Centre for Global
Earth Models (ICGEM)
[http://icgem.gfz-
potsdam.de/ICGEM/ICGEM.html](http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/ICGEM.html)

3種類の観測手法, 衛星ミッション

高軌道-低軌道衛星追跡 (SST High-Low)

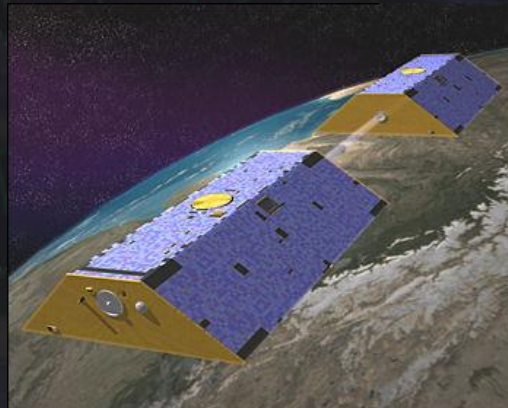
- GPSなどの測位システムで衛星軌道を連続測定
- 搭載加速度計データを用いて擾乱摂動を差し引く



CHAMP (GFZ, 2000-)

低軌道-低軌道衛星追跡 (SST Low-Low)

- 2機の衛星間の距離変動から、重力場を観測
- 搭載加速度計データを用いて擾乱摂動を差し引く



GRACE (NASA, 2002-)

衛星による重力勾配観測 (Satellite GG)

- 衛星搭載の**重力勾配計**により、重力場を観測
- 衛星擾乱を抑えるため、ドラッグフリー制御を行う



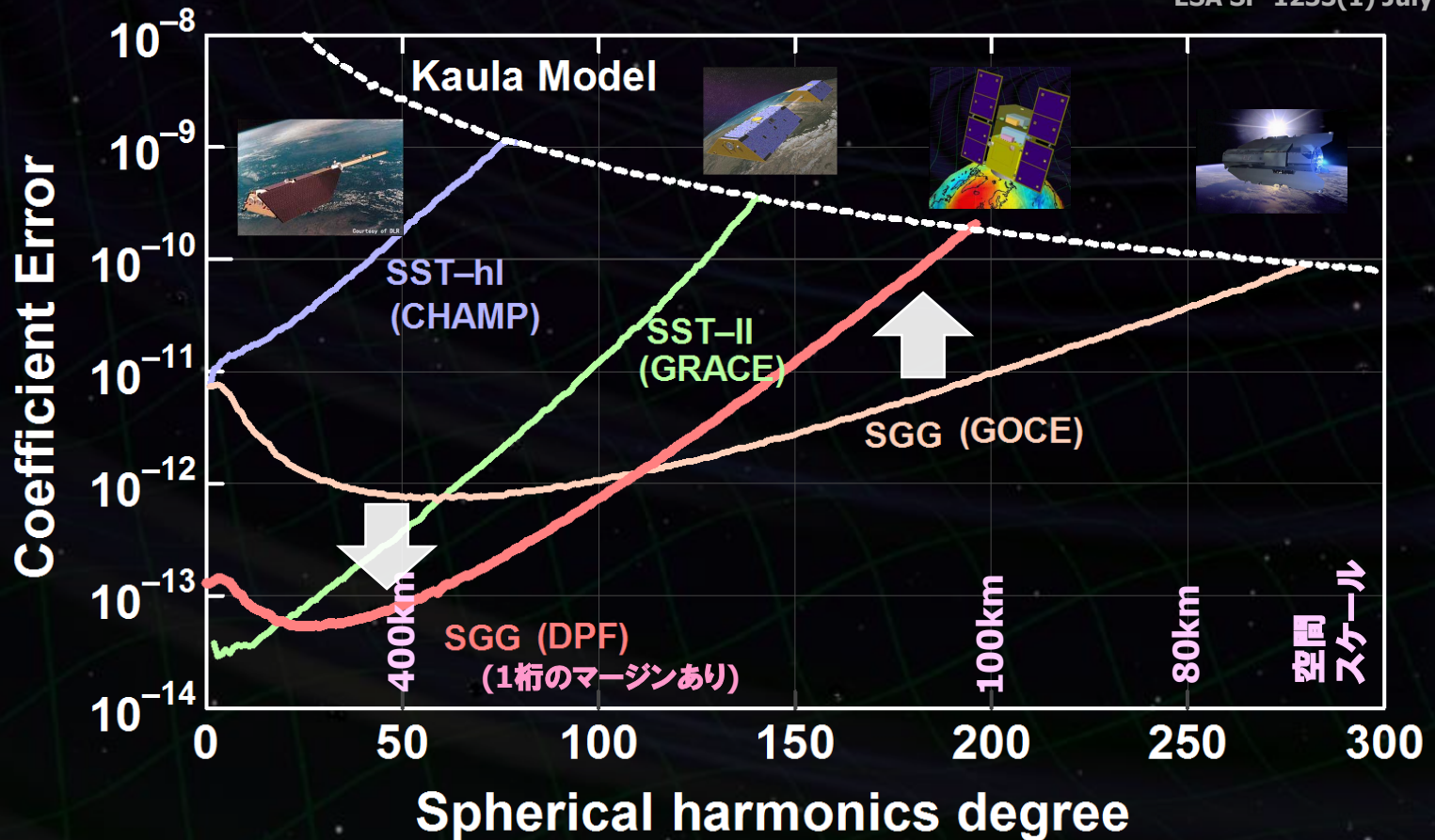
GOCE (ESA, 2009-2013)

DPFの観測精度

補足

低次係数 (大スケール) で良い感度 ← 高いセンサ感度
高次係数 (小スケール) で悪化 ← 高い軌道高度

Report for Mission Selection
Gravity Field and Steady-State
Ocean Circulation Mission
ESA SP-1233(1) July 1999.



• 国際情勢 :

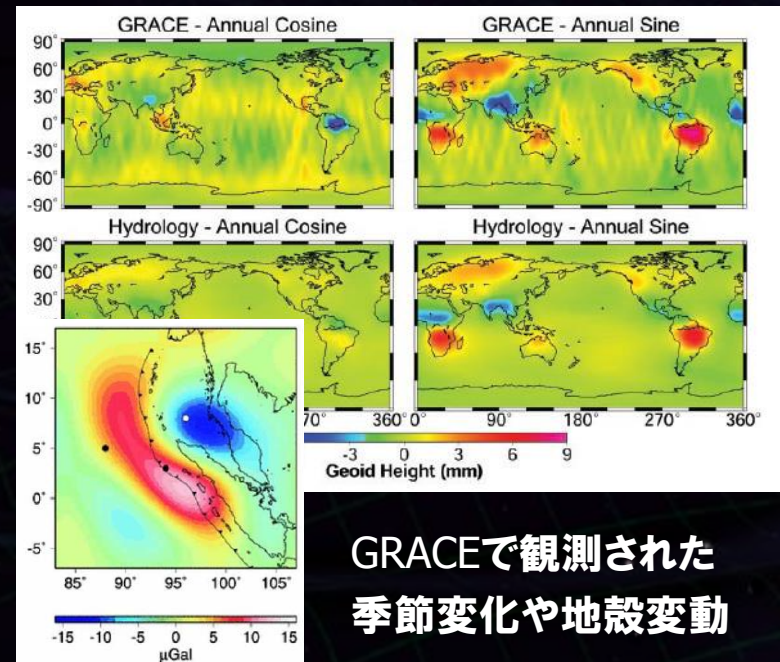
- GOCE 2013年運用停止.
- GRACE 稼働中 (~2017).
- GRACE-FO (2017~目標).

• DPFの意義 :

- GOCE-GRACEに対して、**時間的・空間的中間スケール**の観測.
- 複数機による同時観測.
→ **エリアシングの除去, 早い時間スケール.**

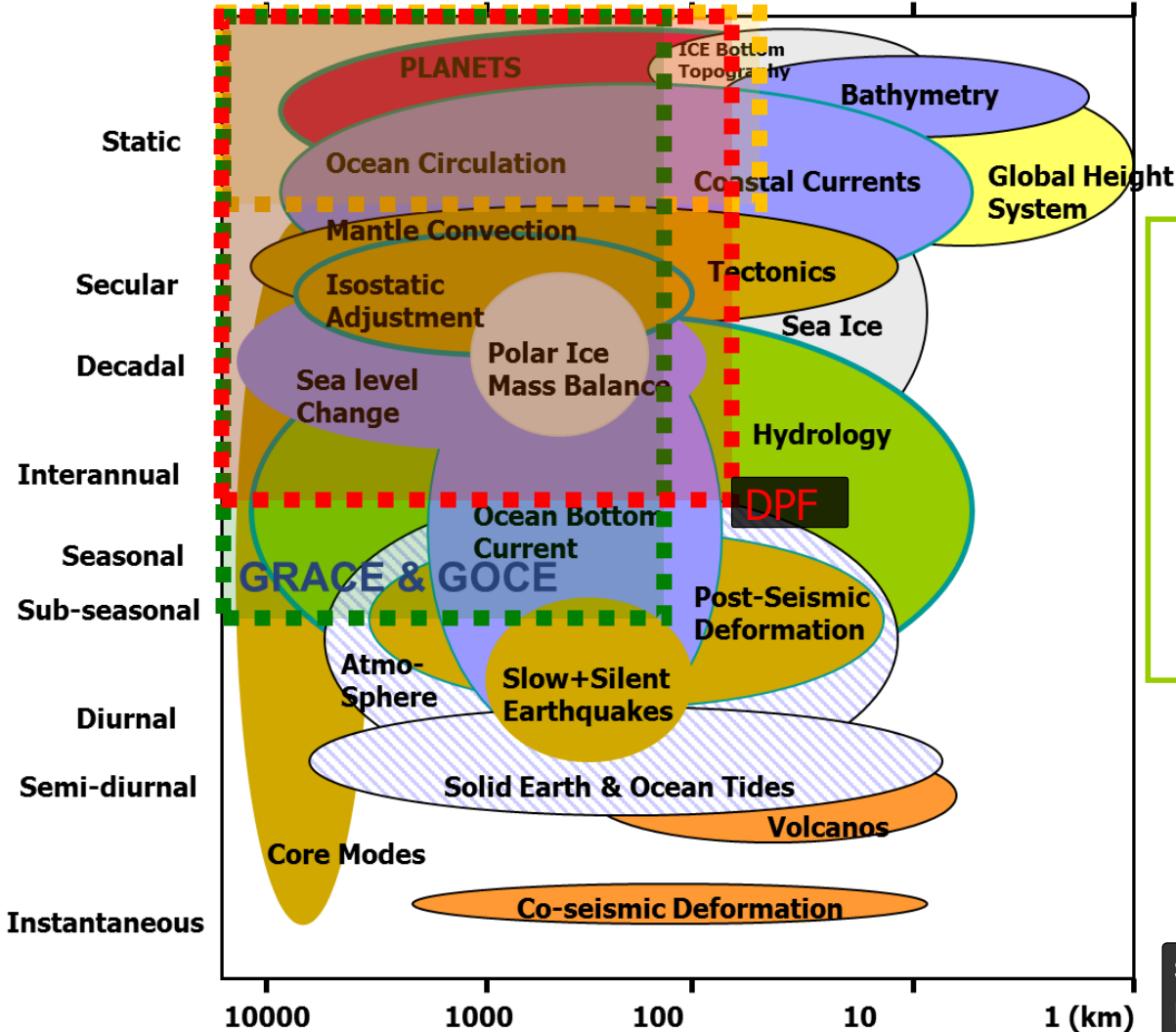
• これまでの経緯・活動 :

- 衛星重力ミッション(PPM-Sat)グループとの連携.
- NASA/GRACEチームへの人員派遣と共同研究.



GRACEで観測された
季節変化や地殻変動

Challenges for Future Missions



Solid Earth
Oceans
Ice
hydrology
Geodesy
Planets

After Haagmans & Rummel (GGSM 2004, Port)

福田洋一先生(京都大)
 DPFサイエンス検討会 資料より(2009.11.24).

Q2：技術実証が目的であるならば、**工学実証衛星あるいは技術試験衛星として実施することがより妥当ではないか？**

提案されている技術実証を行うのに、打ち上げ費用を含めて100億円以上を必要とするイプシロン搭載型のミッションを用いる代わりに、より小さな複数の搭載機会を使って行うほうが、コストパフォーマンスと実現性が高いということはないか？たとえば、ドラッグフリー技術は、SDS クラスの、ピギーとして打ち上げられるクラスの衛星により実証し、レーザーや測定系雑音の実証は、**他の衛星の相乗り搭載機会を探す等のロードマップを描く事はできないか。**

⇒ **工学実証衛星として位置づけて頂いても問題ない。**

衛星スケールの検討

	中型衛星 (ASTRO-X)	小型科学衛星 (SPRINT-X)	技術実証衛星 (SDS-X)	大学衛星 (Cube sat.)
衛星 サイズ [m]	1 - 10	1 - 3	0.5 - 1	0.1-0.5
衛星重量 [kg]	~ 2000	~ 400	~ 100	~ 10
開発期間 [年]	~ 10	~ 5	~ 4	~ 3
コスト [億円]	~ 200	~ 100	~ 5	~ 0.1
期待できる 成果	(Pre-DECIGO) 重力波の検出 フォーメーション フライト	(DPF) 観測データ取得 根幹技術の 総合試験	(SWIM) 根幹技術の 個別試験 (×Drag-free)	動作試験 原理実証

- SDS-1衛星搭載されたSWIMモジュール.
 - 2005年より検討開始, 2009年打ち上げ, 2010年運用停止.
 - 宇宙用計算機SpC2 + 重力波センサモジュール SWIM $_{\mu\nu}$.
 - エクストラサクセスまで達成.
 - 信号処理系の動作実証, 重力波観測運転.
 - **動作実証が主. 感度・性能の評価は十分ではない.**
- DPF相当の宇宙実証を、より小型ミッションで行う場合.
 - 考慮する余地はあるが、必ずしも効率的とは言えない.
 - リソースの制約：干渉計・光源の感度・安定度評価.
 - 高精度ドラッグフリー制御の実証は困難.
 - 個々の技術に対して複数機で実証 → 期間と労力の増大.

DPFによる総合的な評価を行うことが適していると判断.

Q3-1: DPFで実証しようとしている技術のうちいくつかは、地上では十分実証され、また海外では宇宙でもすでに実証されていると思われる。それでも宇宙で、もしくは**日本で技術実証する位置づけ**を示して頂きたい。

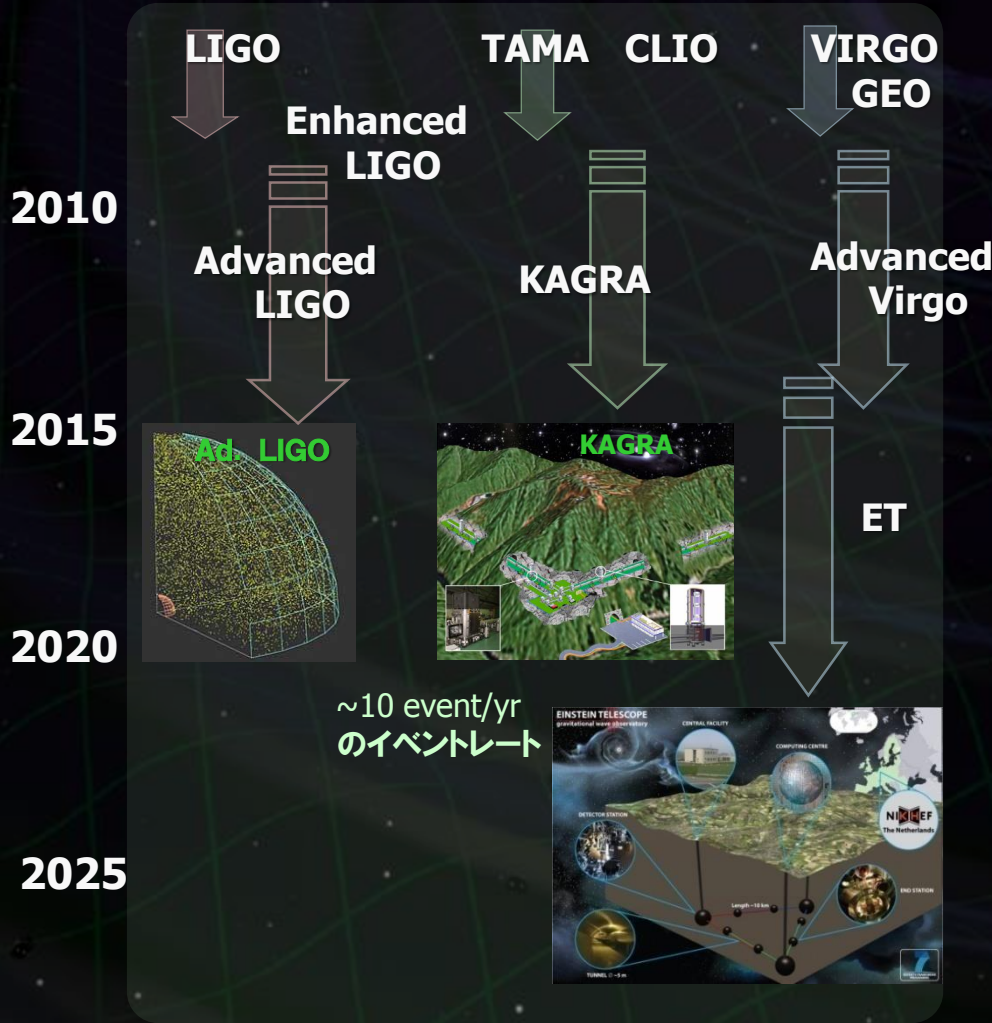
Q3-2: ESAがLクラスの3番目のミッション分野として重力波を採択した状況において、日本の重力波コミュニティは、日本独自の開発を目指していくのか、あるいは**国際協力の道**を探るのか？ 仮に後者だとした場合、DPFの位置づけとその中における日本の役割分担は？

Q3-3:大規模な素粒子実験、衛星開発、地上計画等において、国際協力が当たり前になっている。例えばALMAでは、日米欧が協力して世界で一つの観測装置を開発することによって、それぞれが独自の装置を持つことに比べて、飛躍的にすぐれたものを作り上げた。重力波分野における国際協力とその役割分担を、ロードマップを示す事で説明して頂きたい

重力波天文学のロードマップ

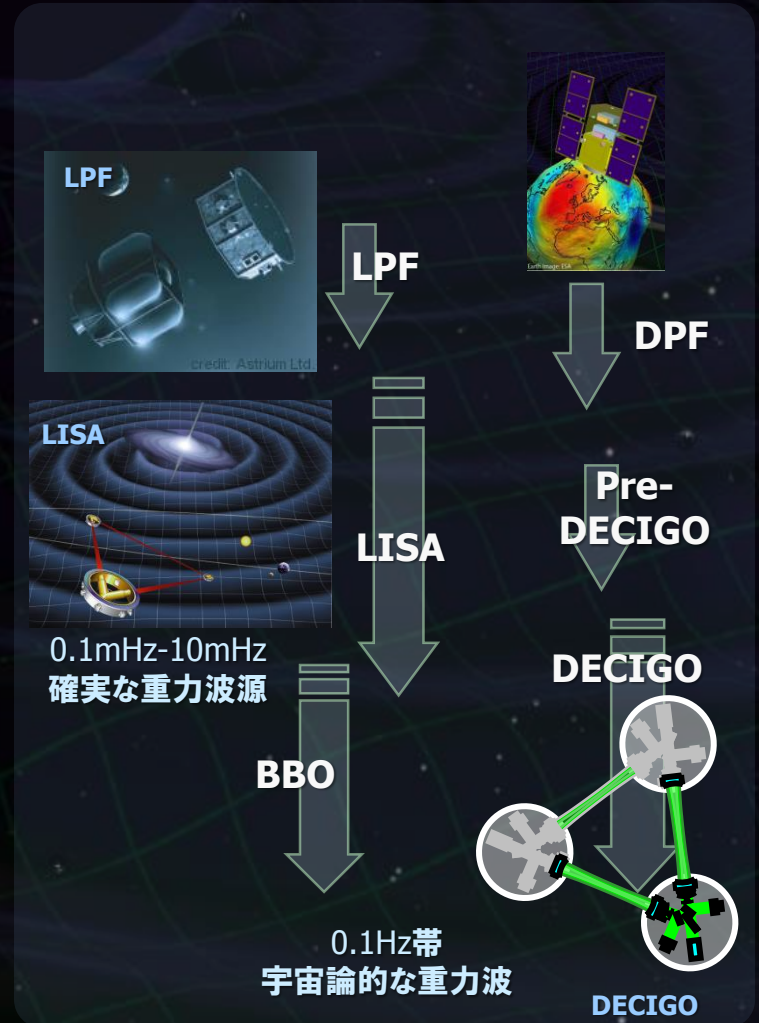
地上望遠鏡

より遠くを観測 (10Hz-1kHz)



宇宙望遠鏡

低周波数帯の観測 (1Hz以下)



・欧米の宇宙重力波望遠鏡 LISA.

- 従来は ESA/NASAのプロジェクトだった.

→ 2012年 NASAが手を引きESA単独ミッション eLISAとなった.

* ESA : **Cosmic Vision L3 (2034年) として重力波を選定.**

* NASA : 単独での重力波ミッションの可能性を検討.

eLISAへの部分参加の可能性も捨てていない.

- LPFはESA/NASAミッションとして 2015年に打ち上げ.

⇒ 国際協力の可能性を模索. **日本も検討に加わっている.**

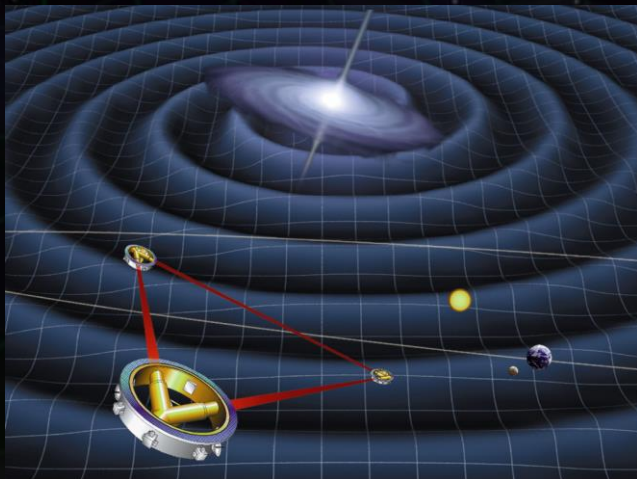
2014年 5月LISAシンポジウムの際に

Round-table discussionを開催 → 安東らが出席.

eLISA

(Laser Interferometer Space Antenna)

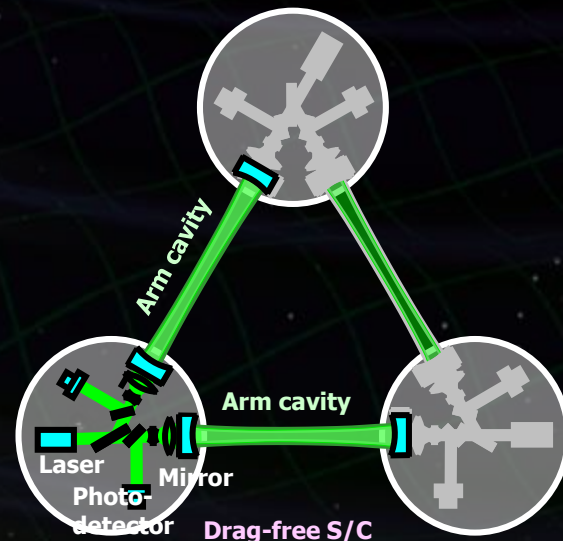
- 観測対象: 超巨大BH, 連星系.
1mHz付近の確実な重力波源.
- 基線長: 100万km.
S/C 3機による編隊飛行.
- 測距方式: 光トランスポンダ.



DECIGO

(Deci-hertz Interferometer
Gravitational Wave Observatory)

- 観測対象: 初期宇宙・宇宙論的知見.
0.1Hz付近の重力波.
基線長: 1000km. S/C 3機による
フォーメーションフライト.
- 測距方式: FP干渉計 (直接干渉).



		LPF (LISA Pathfinder)	DPF (DECIGO Pathfinder)
相違点	干渉計方式・感度	MZ干渉計 (10^{-12} m/Hz ^{1/2})	FP干渉計 (6×10^{-16} m/Hz ^{1/2})
	レーザー安定化	外部共振器	ヨウ素吸収線
	投入軌道	L1	LEO 500 km
	衛星規模	1,900 kg	400 kg
	打ち上げ時期	2015 年	2019 年
類似・共通点	位置付け	将来の大型ミッションのための技術実証	
	試験マスモジュール	静電S/A, ローンチロック, 帯電キャンセル.	
	ドラッグフリー	低雑音スラスタによる 6自由度制御.	

- DECIGOは国際協力ミッションとして実現される可能性が高い。
(他では得られない究極的な科学的成果, ミッション規模)
国際協力の枠組み・役割は、今後議論が進められていく。
- 共通技術に関しては、LPF-DPFの技術交流は進められている。
- 地上で実証されている項目：干渉計光学系。
→ 試験マス制御など大部分は宇宙実証がされていない。

DPF/DECIGO独自の技術を国内で進めることによって、
国際協力の中でイニシアティブをとる可能性が広がる。

Q4:地上計画(KAGRA)との関係を明確にして頂きたい。日本の重力波コミュニティがKAGRAに注力している時期に、本計画を推進することのメリットとデメリットについてコミュニティにおける位置づけも含めて説明していただきたい。

- 広いコミュニティでは CRC に所属.
 - DECIGOは、CRC将来計画の中に位置づけられている。
(2030年代までのロードマップに記載)
 - DPFメンバー(神田)は CRC実行委員会 委員長を務める.
 - DPFは、2014.3のCRCタウンミーティングなどでも議論.
- 国内重力波コミュニティ : JGWC (注1) (運営委員長 安東)
 - コンセンサス:
「まずKAGRAにより重力波初検出を行い、
その後DECIGOで天文学として展開する。」
 - 地上望遠鏡とは異なった観測時期、目指すサイエンス(注2).

*注1 JGWC : Japan Gravitational Wave Communityの略.

*注2 観測周波数に応じて異なった観測対象になる. 電磁波観測における 電波-光赤外-X線などの関係と同じ.

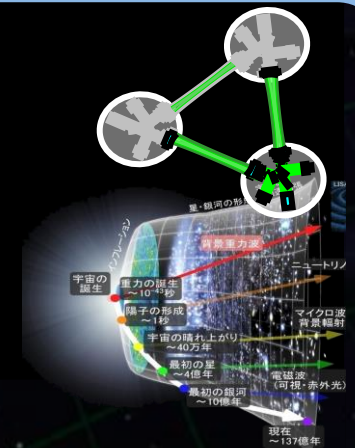
KAGRA : 地上重力波望遠鏡.

- 目的: 重力波天文学の創成.
- 主に200Mpc程度以内にある中性子連星合体などの高エネルギー天体現象の観測.
- 建設中, 2017年本格観測開始.



DECIGO : 宇宙重力波望遠鏡.

- 目的: 宇宙の物質起源への知見・宇宙論.
- 電磁波では観測できない初期宇宙の観測など.
- 2030年前後の実現に向け、
前哨衛星DPFでの技術実証
→ DPFをイプシロン搭載小型ミッションとして提案中.



•JGWC (Japan Gravitational Wave Community) : 325名



•DPF WGメンバー : 109名 (DECIGO WG 148名)

DECIGO/DPF開発だけに

参加するメンバーも多い。

- 宇宙用干渉計開発・無重力実験
- 安定化レーザー開発
- スラスタ開発
- 衛星システム検討/ドラッグフリー



このうち 11名が
KAGRAのコアメンバー

• メリット

- 「宇宙の始まりを直接観測する」という人類の夢の早期実現.
- 宇宙科学分野における新しい価値の創造.
- 宇宙科学・重力波分野の継続的な発展.
- 魅力ある研究分野としての裾野の拡大と人材育成.
(DPFメンバーの多くは他分野からの参加).

• デメリット

- リソースの分散 (大部分は誤解でもある).

Q5-1: Q1で述べたように、イプシロン一機を使う**価値のあるサイエンス**(技術実証としての価値を含む)が、DPFから得られるか？

Q5-2: DECIGOが目標とするサイエンス実現までのコストを考えると、国際協力を検討した方が、**サイエンス/コスト**は高いのではないか？

• DECIGOという**究極的な科学的価値**を持つものへの重要な1歩.

• 科学技術的価値

- 宇宙空間における**最高精度での長期変動測定.**

(干渉計・安定化レーザー光源・ドラッグフリー)

→ **宇宙環境を利用した基礎物理実験などの新しい可能性.**

- 宇宙空間での**最も安定なレーザー光源.**

→ 衛星間通信, 地球・惑星大気観測, 時刻標準.

- **長基線長フォーメーションフライト技術の基礎.**

→ 系外惑星探査望遠鏡, 長基線長望遠鏡, 干渉SAR観測.

- **次世代の衛星重力ミッションのための実証.**

- DECIGOは国際協力ミッションとなる可能性が高く、その枠組みの議論ははじめられたところ。
- DPFにおいても国際的な技術協力（研究者レベルでの技術協力）は、既に行われている。
- DPFが採択された場合、国際協力を依頼できる可能性はある。

DECIGOのサイエンス実現のためのトータルのコストは、大きくは変わらないと考えられる。（良い知恵を拝借したい。）

Q6:WGには多くの名前が挙げられているが、**衛星開発に参加する実体**がどこまではっきりとしているか？衛星の経験者は少なく、実施主体を作る必要があると思われるが、どのように進めていく計画であるか？

代表: 中村 (京都大)
副代表: 安東 (東大理), 瀬戸 (京大理)

運営委員会

川村 (東大宇宙線研), 安東 (東大理), 瀬戸 (京大理), 中村 (京大理), 坪野 (東大理), 佐藤 (法政大理工), 田中 (京大基研), 船木 (JAXA), 沼田 (Maryland), 神田 (阪市大理), 井岡 (KEK), 高島 (JAXA), 横山 (東大理), 阿久津 (国立天文台), 中澤 (東大理)

Pre-DECIGO

佐藤 (法政理工)

検出器

阿久津
(国立天文台)
沼田 (Maryland)

サイエンス・データ

田中 (京大基研)
瀬戸 (京大理)
神田 (阪市大理)

衛星

船木 (JAXA)

DECIGO パスファインダー
リーダー: 安東 (東大理)

Design phase

Mission phase

干渉計

佐藤 (法政理工),
上田 (国立天文台),
麻生 (東大理)

レーザー

武者 (電通大)
植田 (電通大)

衛星システム/
ドラッグフリー
佐藤 (法政理工),
坂井 (JAXA)

スラスタ

船木 (JAXA)

信号処理

阿久津
(国立天文台)

データ解析

神田
(阪市大理)

代表 安東 (東京大)

・レーザー干渉計

佐藤* (リーダー, 法政大), 麻生 (サブリーダー, NAOJ), 上田 (サブリーダー, NAOJ),

・干渉計モジュール

阿久津 (リーダー, NAOJ), 牛場, 黒田, 柴田, 正田, 丹羽, 松本, 道村, 宮川, 三代木, 山元 (以上 東京大), 岡田, 高橋, 福嶋 (以上 NAOJ), 奥富 (総研大), 川添 (AEI), 苔山 (ルイジアナ州立大), 阪田 (日本学生支援機構), 宗宮 (東工大)

・試験マスモジュール

阿久津* (リーダー, NAOJ), 石崎, 大淵, 田中, 鳥居 (以上 NAOJ), 陳 (東京大), 和泉 (カリフォルニア工科大), 穀山 (AIST)

・安定化レーザー光源・周波数安定化

武者 (リーダー), 植田, 末正 (以上 電通大), 池上, 洪 (以上 AIST), 國森, 長野, 細川 (以上 NICT), 大河, 佐藤 (以上 新潟大), 沼田 (NASA)

・衛星システム

佐藤 (構造・ドラッグフリー部リーダー, 法政大), 阿久津 (信号処理部リーダー, NAOJ), 船木*, 坂井 (JAXA), 河野* (JAXA), 武者* (電通大)

・ミッションスラスタ

船木 (リーダー, JAXA), 小泉 (東京大), 中山 (防衛大), 堀澤 (東海大)

・重力波データ解析

神田 (リーダー, 大阪市大), 高橋 (長岡技科大), 田越 (大阪大), 端山 (大阪市立大)

・地球重力場観測

新谷, 高森 (以上 東京大)

・重力波技術検討

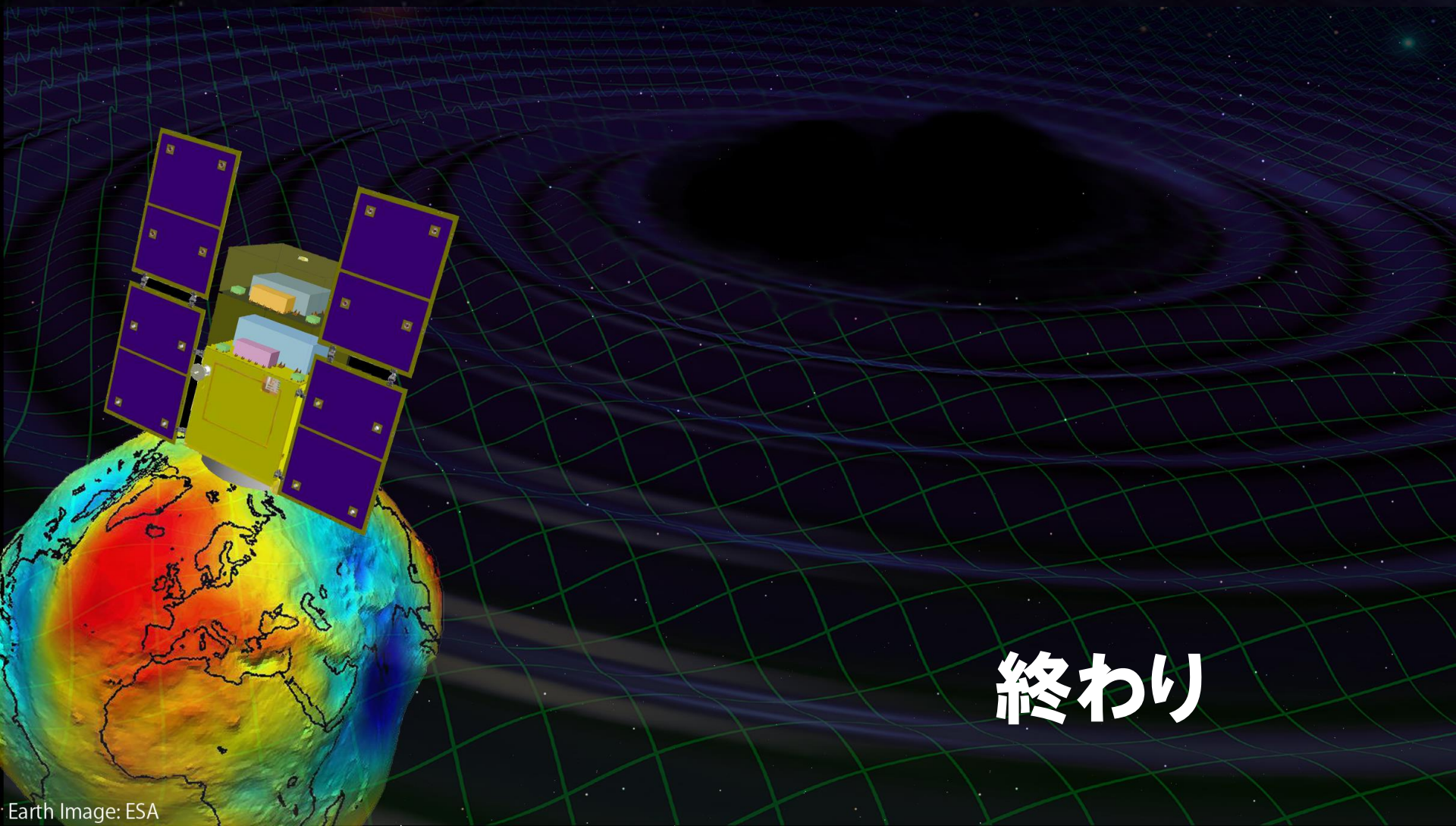
・宇宙技術支援

- **体制・組織は状況の変化に応じて適宜更新されていくべき。**
- **DPFがイプシロン搭載ミッションに選定されるときは、組織の見直しをする良いタイミングと考えている。**

- **経験豊富な衛星メーカーの協力。**
 - **SWIM実施時の経験・実績とつながり。**
 - **戦略的開発経費のサポートと、衛星メーカーとの共同開発。**

Q7:DPFで実証する技術とレベルに限れば、ミッション要求は妥当と思われる。しかし、DECIGOの技術実証として、実証する技術とそのレベルが妥当であるかどうかは、Pre-DECIGOを含めて検討する必要がある。Pre-DECIGOで実証する技術とレベルは定義されているか？(Q1も参照)

⇒ Q1の箇所で回答しました。



Earth Image: ESA

宇宙重力波望遠鏡 DECIGO



DECIGO (DECI-hertz interferometer
Gravitational wave Observatory)

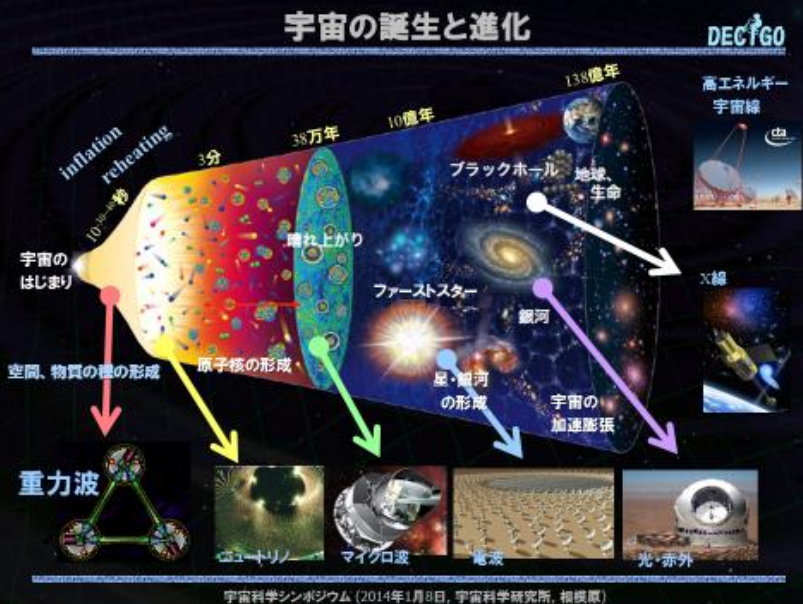
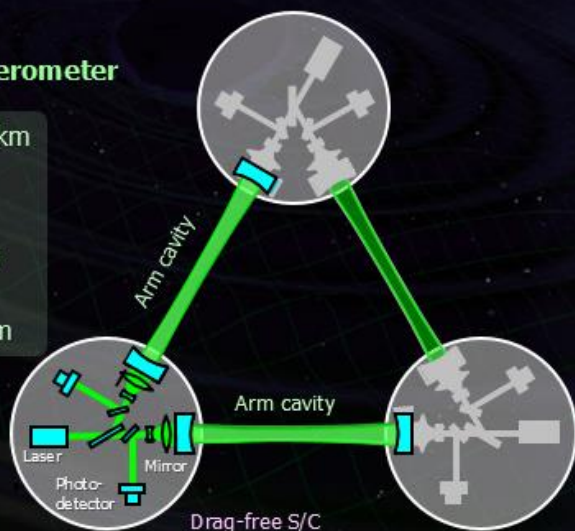
宇宙のはじまりを直接観測する。

ビッグバン宇宙論において、空間・物質の種が、
いかに形成されたかを観測によって解き明かす。

Interferometer Unit:
Differential FP interferometer

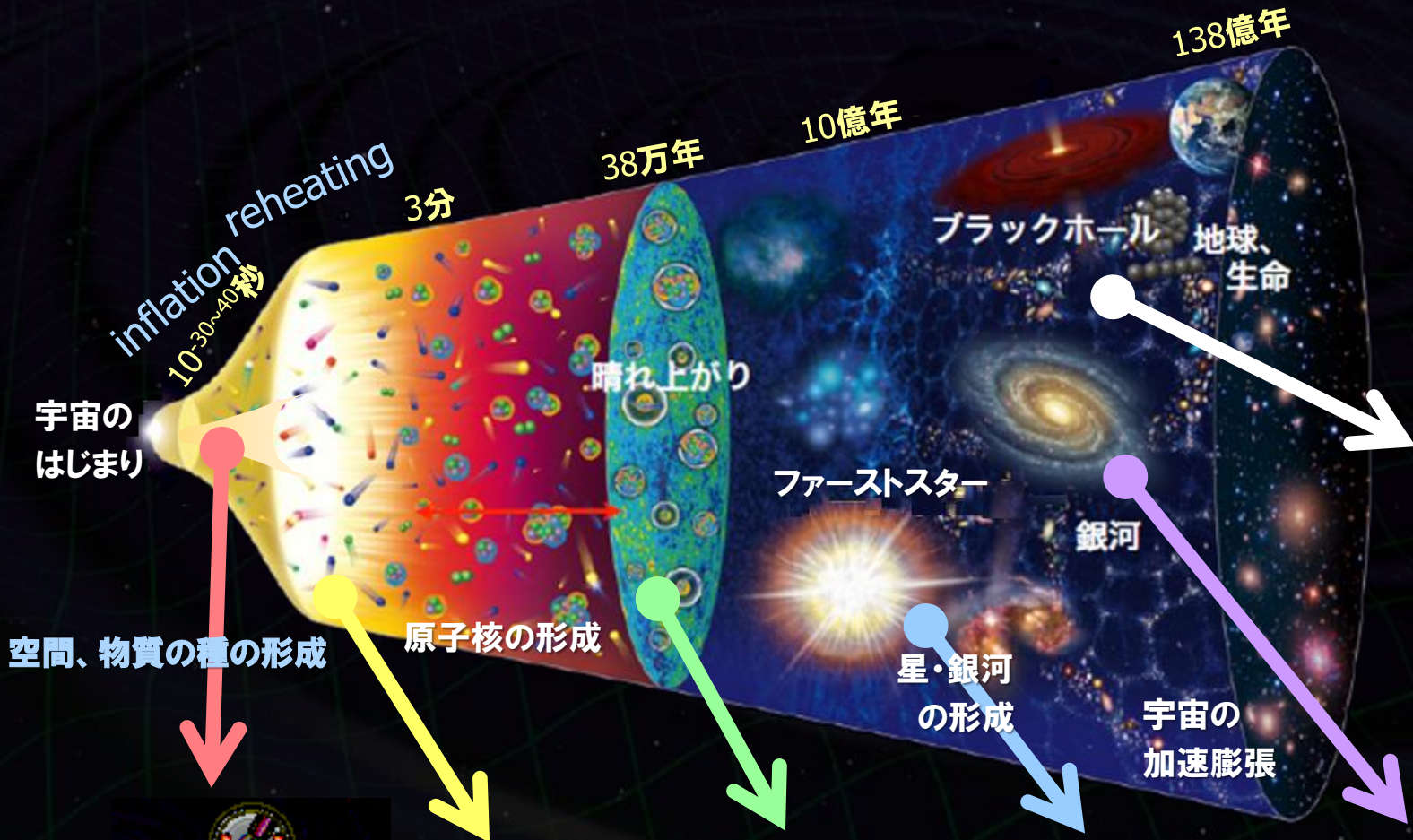
Arm length: 1000 km
Finesse: 10
Mirror diameter: 1 m
Mirror mass: 100 kg
Laser power: 10 W
Laser wavelength: 532 nm

S/C: drag free
3 interferometers



宇宙科学シンポジウム (2014年1月8日, 宇宙科学研究所, 相模原)

宇宙の誕生と進化



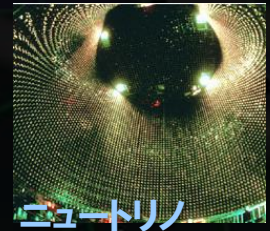
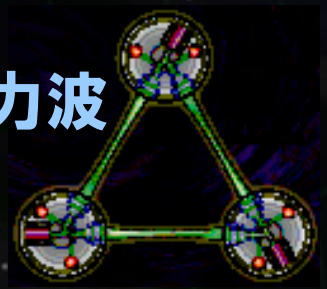
高エネルギー宇宙線



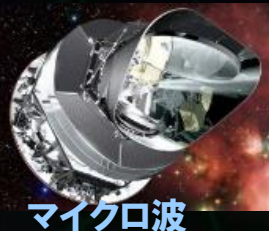
X線



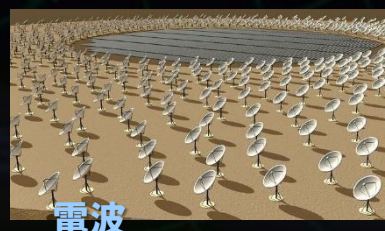
重力波



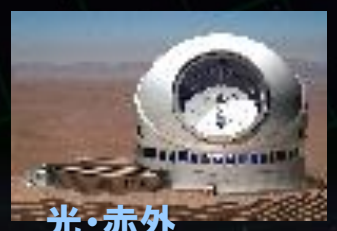
ニュートリノ



マイクロ波



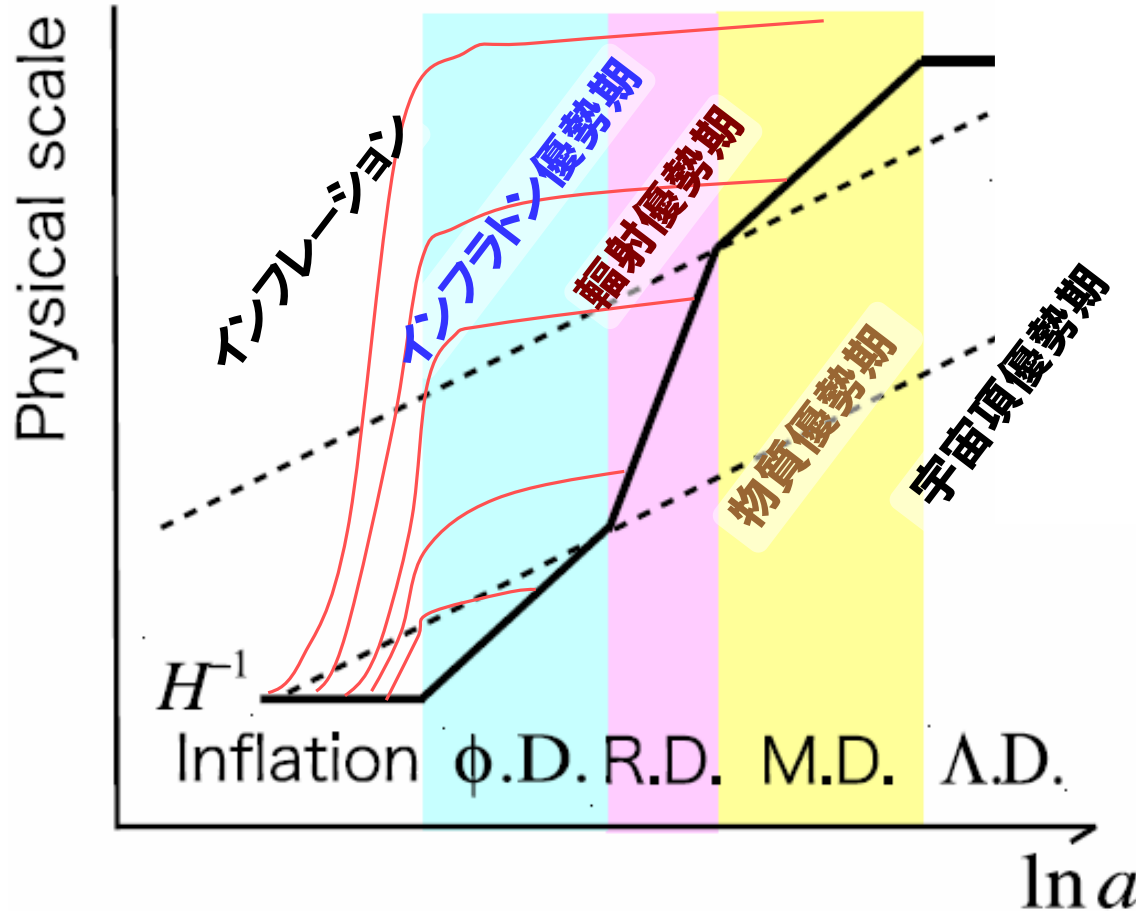
電波



光・赤外

インフレーションからの重力波

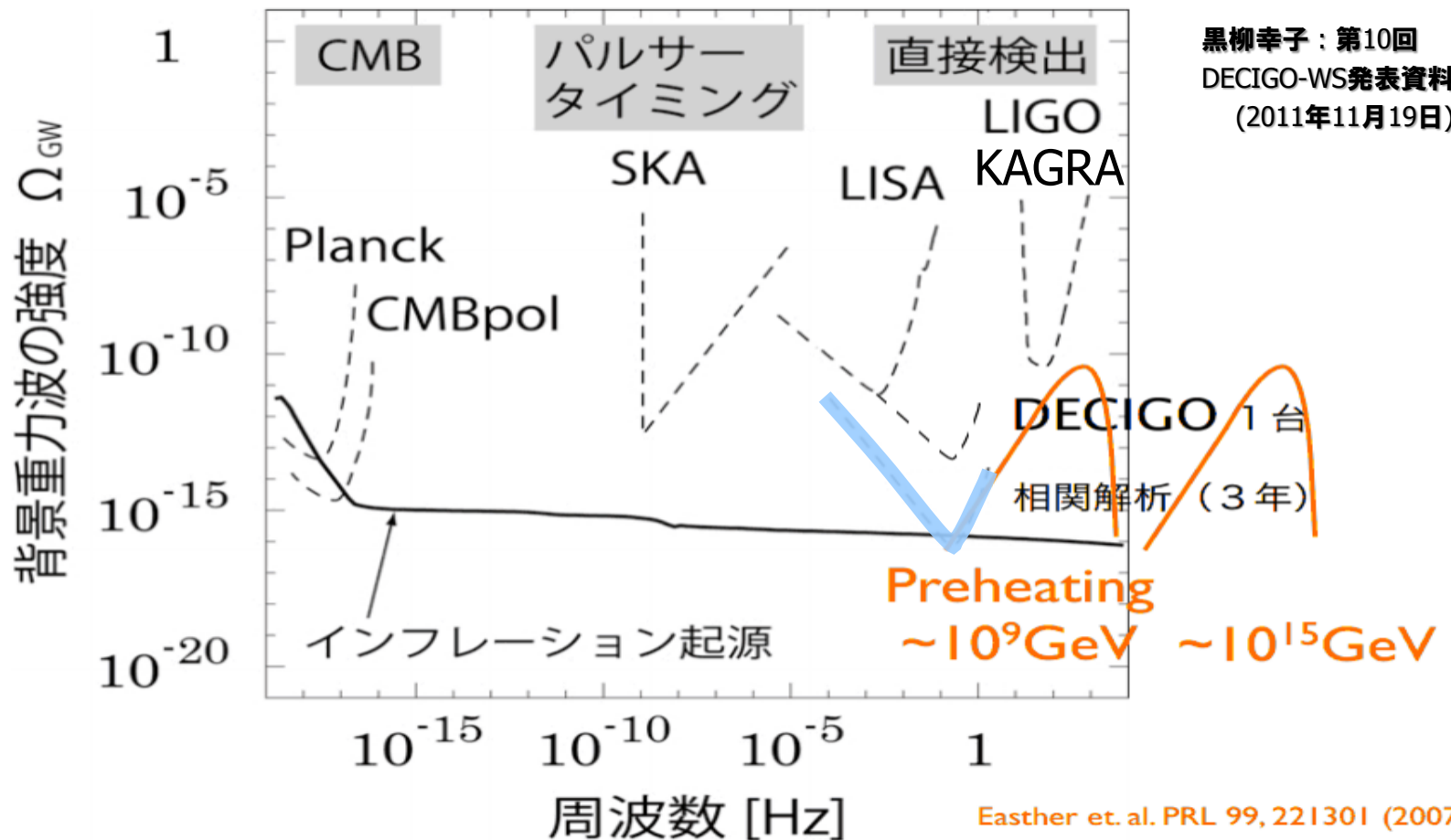
初期に生成された重力波ほど、より長くインフレーションで引き延ばされる → 低周波になる。



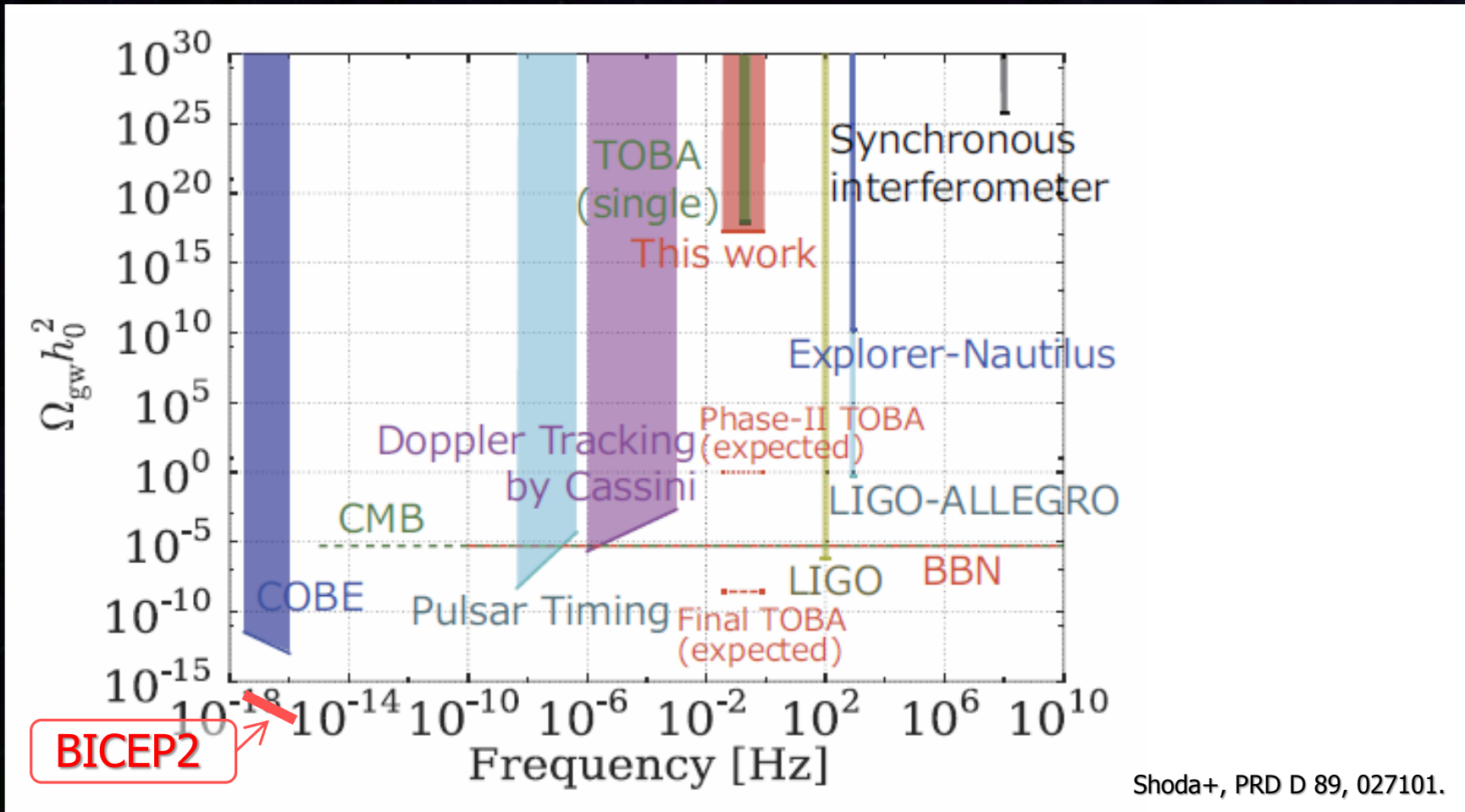
Nakayama+,
Journal of Cosmology
and Astroparticle Physics
06 (2008) 020.

初期宇宙からの重力波

初期の方が宇宙のサイズ(因果律を持つ領域)が小さい。
→ 初期に地平線内入ってきた重力波ほど高周波。

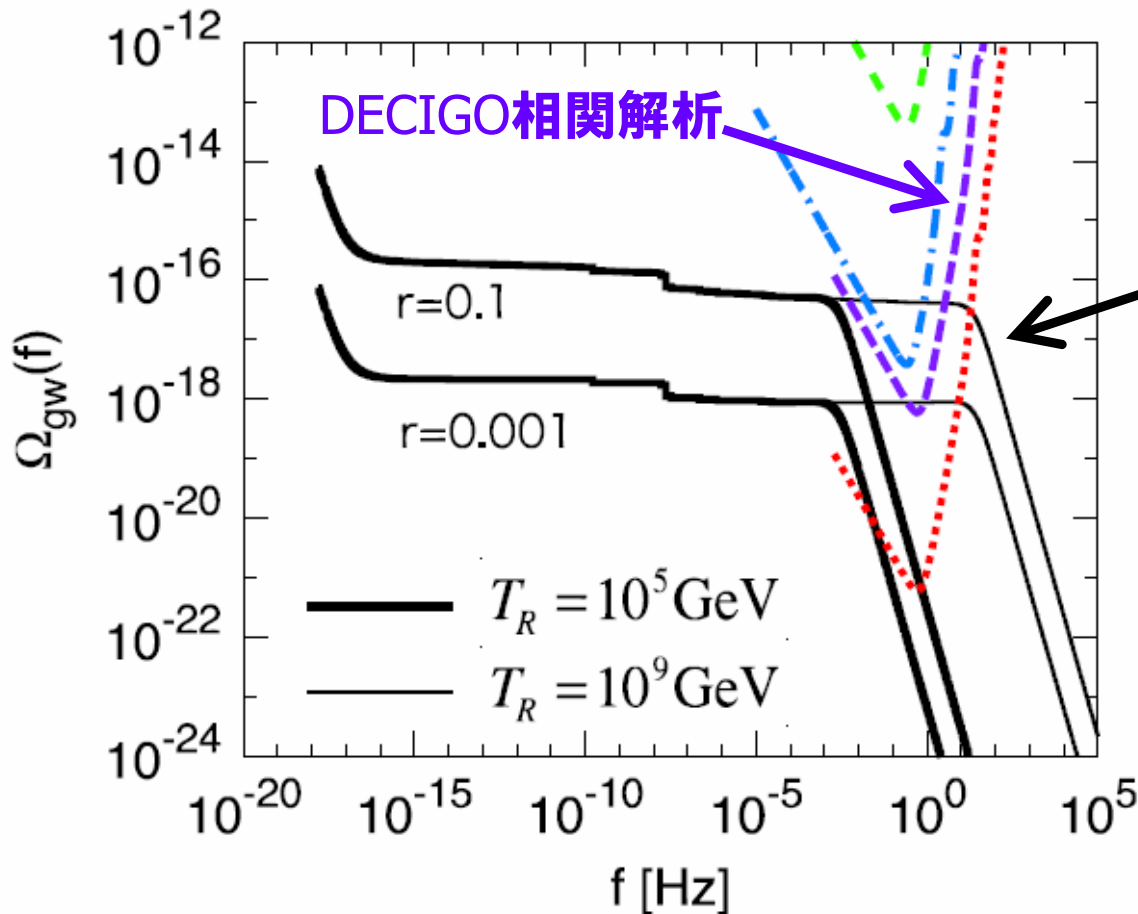


背景重力波探査の現状



インフレーションからの重力波

背景重力波のエネルギー密度 : テンソルスカラー比(r)に比例.
重力波のスペクトル : 宇宙の進化の歴史を反映.



- スペクトルの大きさ.
→ インフレーションのエネルギースケール.
- 折れ曲がりの周波数
→ 再加熱のエネルギースケール
'いつビッグバンが起きたか'.

Nakayama+,
Journal of Cosmology
and Astroparticle Physics
06 (2008) 020.

- 重力波の周波数 \sim (光の速度)/(波源の空間スケール)
 - 初期宇宙からの背景重力波の周波数は、それが放射された際の**宇宙のスケール(+赤方偏移補正)**に対応。



高い周波数ほど、より初期の宇宙を見ることになる。

- インフレーション起源の重力波: ほぼエネルギー一定スペクトル。
 - 重力波振幅 h は、**高周波数帯では振幅が小さくなる。**
 - 地上での観測 ($\sim 100\text{Hz}$): 振幅が小さい。地面振動の影響。
 - **DECIGO ($\sim 0.1\text{Hz}$)** : **背景重力波に対して開けた周波数帯。**
 - eLISA ($\sim 1\text{mHz}$) : 白色矮星連星によるフォアグラウンド。

インフレーションの重力波観測

BICEP2, (POLARBEAR,...)

マイクロ波望遠鏡を用いた
宇宙背景放射 B-mode偏光
成分の観測.

DECIGO, (KAGRA, aLIGO,...)

重力波望遠鏡を用いた
宇宙背景重力波の観測.

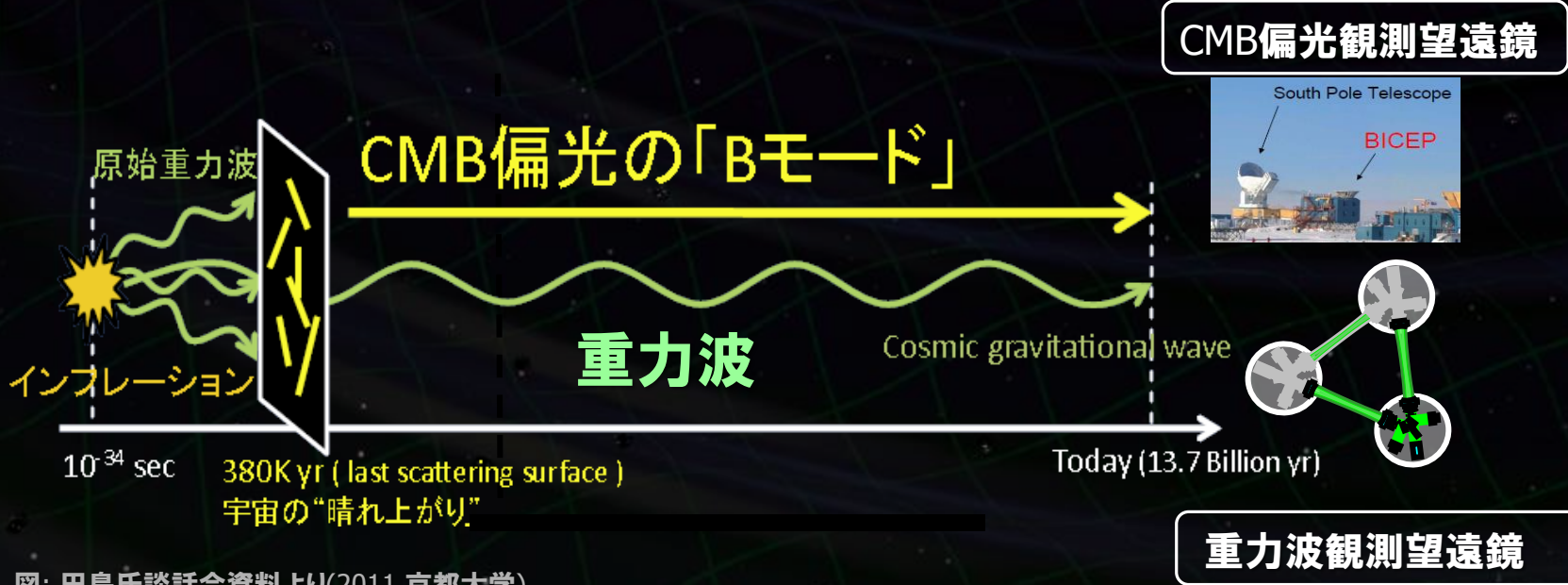


図: 田島氏談話会資料より(2011 京都大学)

Considering “Conceptual design”

By T.Akutsu

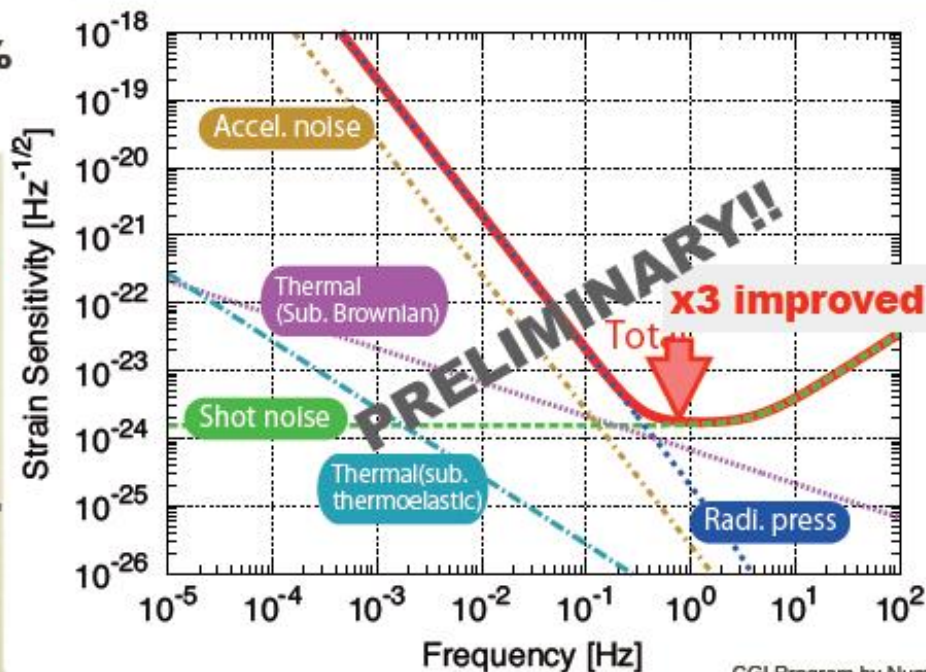
- Arm length: **1,500 km**
- Laser power: **30 W**
- Laser wavelength: **532 nm**
- Mirror diameter: **1.5 m**
- Mirror mass: **100 kg**
- Mirror reflectivity: **77.3%**
- Cavity g-param: **0.1**

This is the first step to considering the **conceptual design**.

Next:

- ➔ Confirm the calculations.
- ➔ Find the realistic way to realize this!

Preliminary
← Parameters tuned



**DECIGO obs. band: free from WD binary foreground
→ Open for cosmological observation**

DECIGO will watch
 $\sim 10^5$ NS binaries

⇒ Foreground for GWB

In principle, possible
to remove them.

Require accurate waveform
→ $\Delta m/m < \sim 10^{-7} \%$

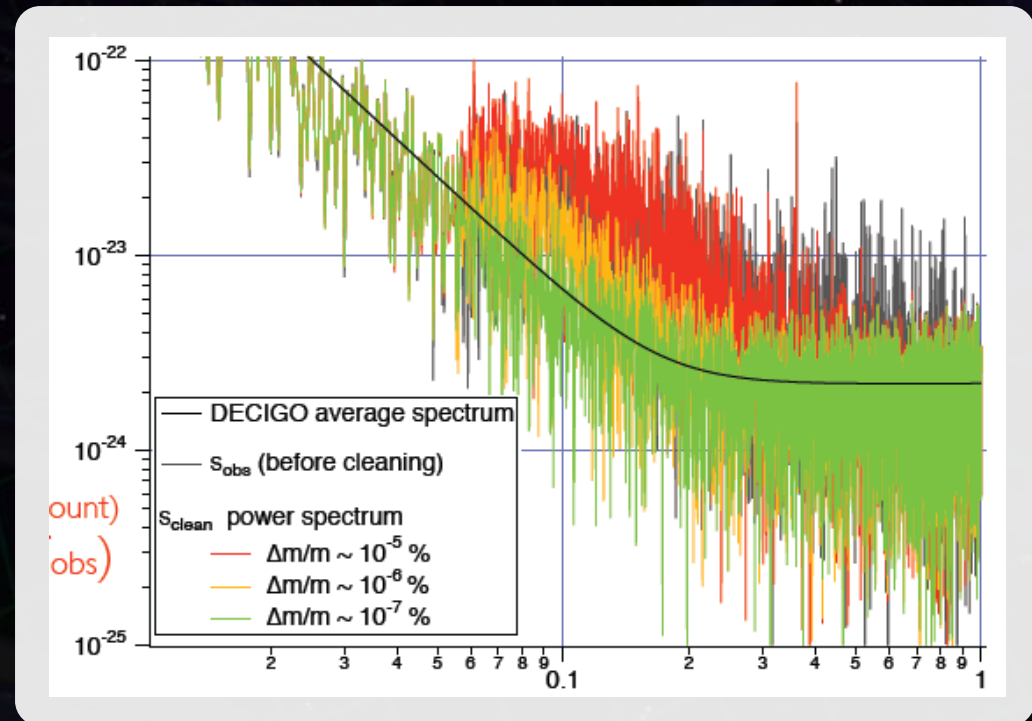
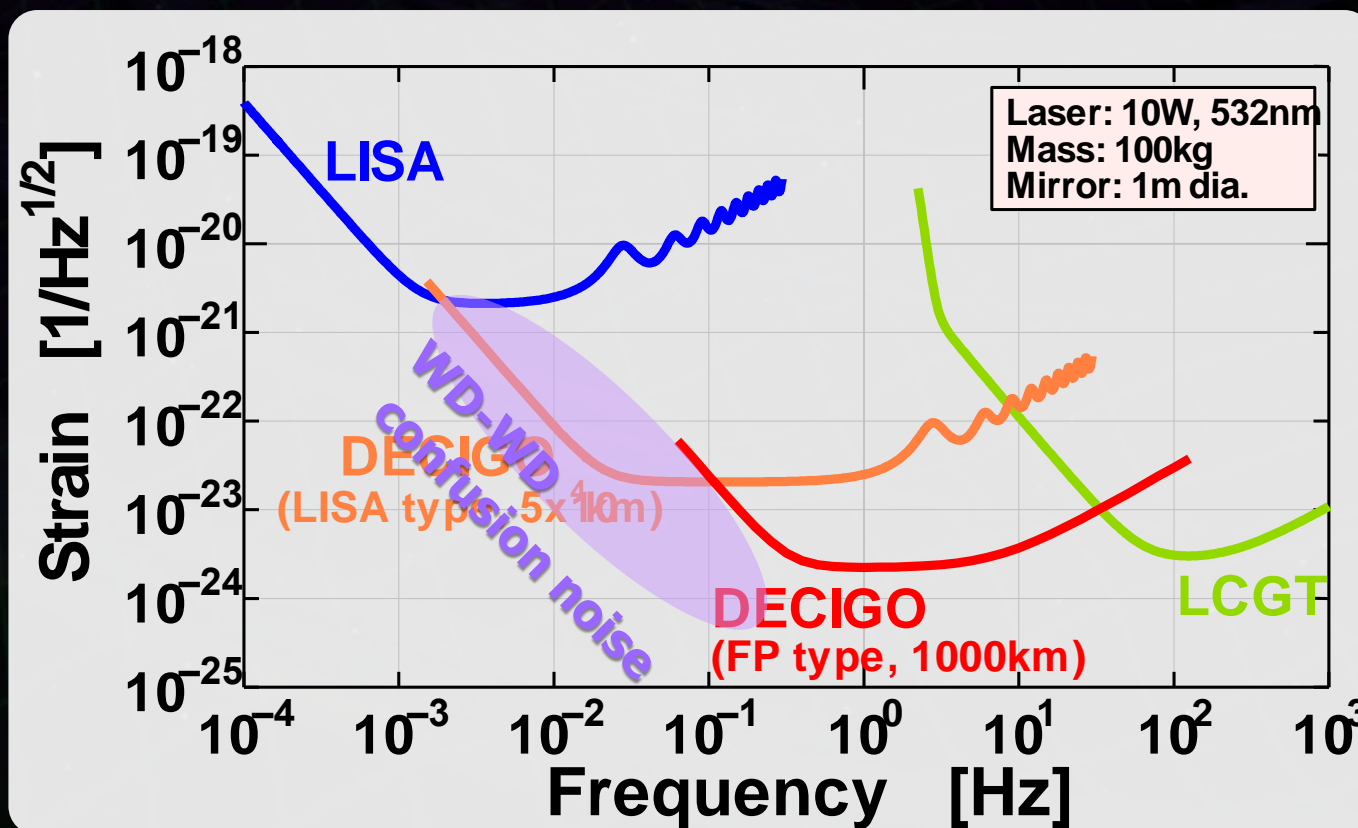


Fig: N. Kanda

Transponder type vs Direct-reflection type

Compare : Sensitivity curves and Expected Sciences

⇒ Decisive factor: Binary confusion noise



天文学・宇宙物理学は何を目指している？

- 天体や天文現象、宇宙のことを調べ、理解すること。
- 私たちの頭上にある 月・惑星・恒星から遠くの銀河などを対象にする。

- 宇宙の誕生と成り立ちを知る。
- 極限状態の物理を知る。
- 地球・生命の誕生と歴史を知る。

→ 重力波観測は、これらに貢献する可能性!

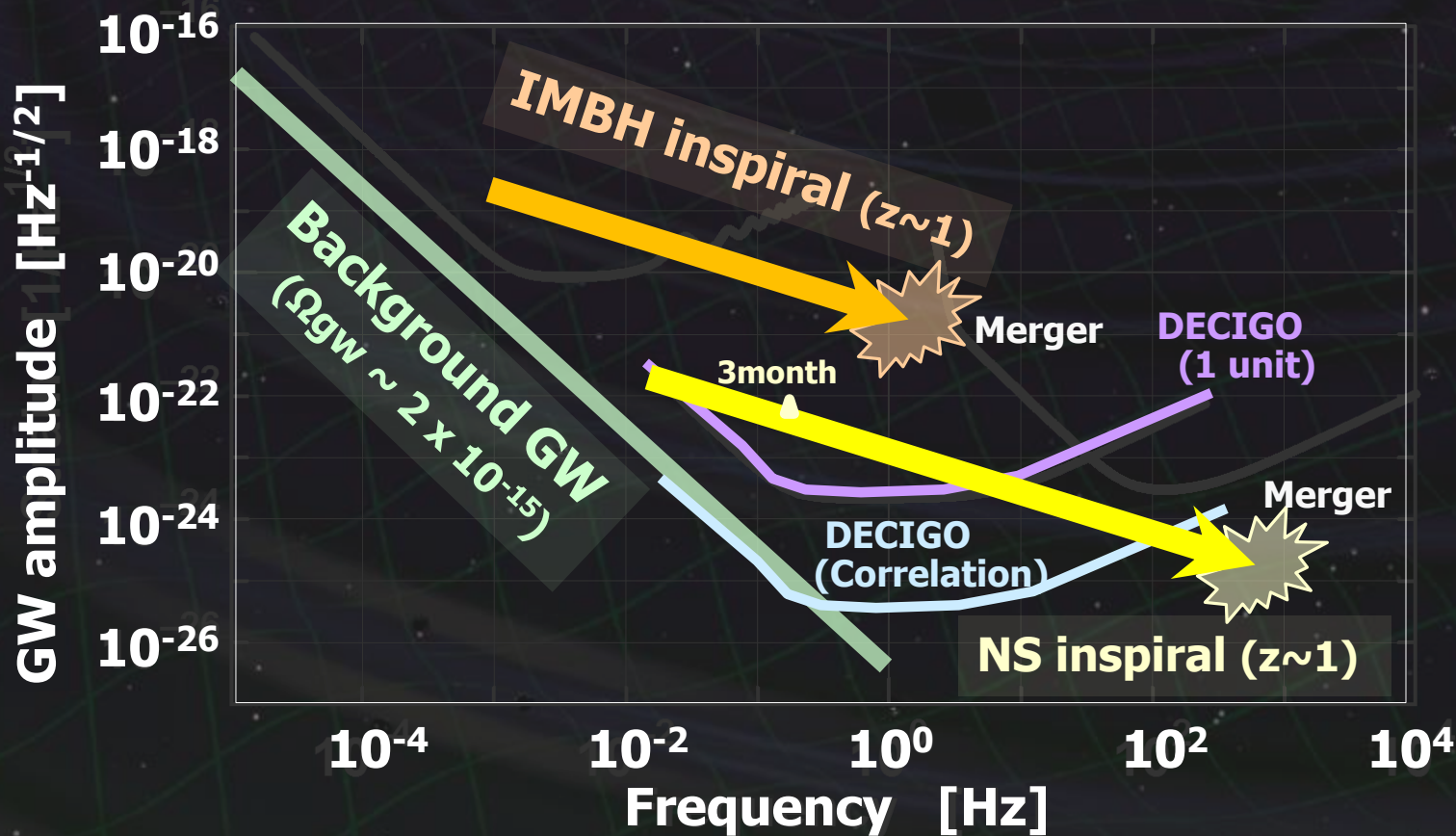
補足: DECIGOの観測対象

補足

中間質量BH 連星の合体
中性子星 連星の合体
宇宙背景重力波



宇宙の成り立ちと進化
銀河・超巨大BHの形成



補足: Arm length

補足

Cavity arm length : Limited by diffraction loss

Effective reflectivity ($TEM_{00} \rightarrow TEM_{00}$)

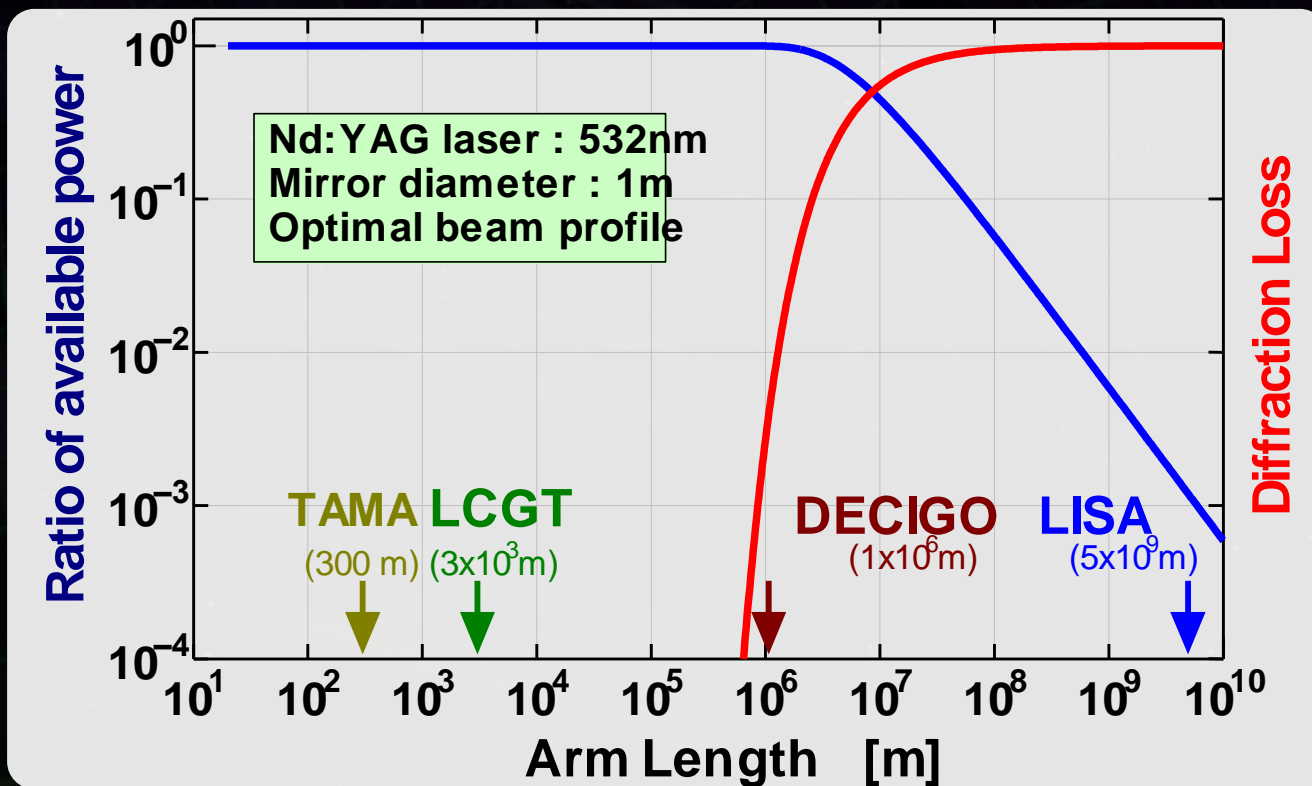
Laser wavelength : 532nm

Mirror diameter: 1m

Optimal beam size



1000 km
is almost max.



候補軌道:

太陽周回のレコード盤軌道

相対加速度 $4 \times 10^{-12} \text{ m/s}^2$
(鏡への制御力 $\sim 10^{-9} \text{ N}$)

干渉計配置

4つの干渉計ユニット

- 2 overlapped units → 相関解析
- 2 separated units → 重力波源の同定

