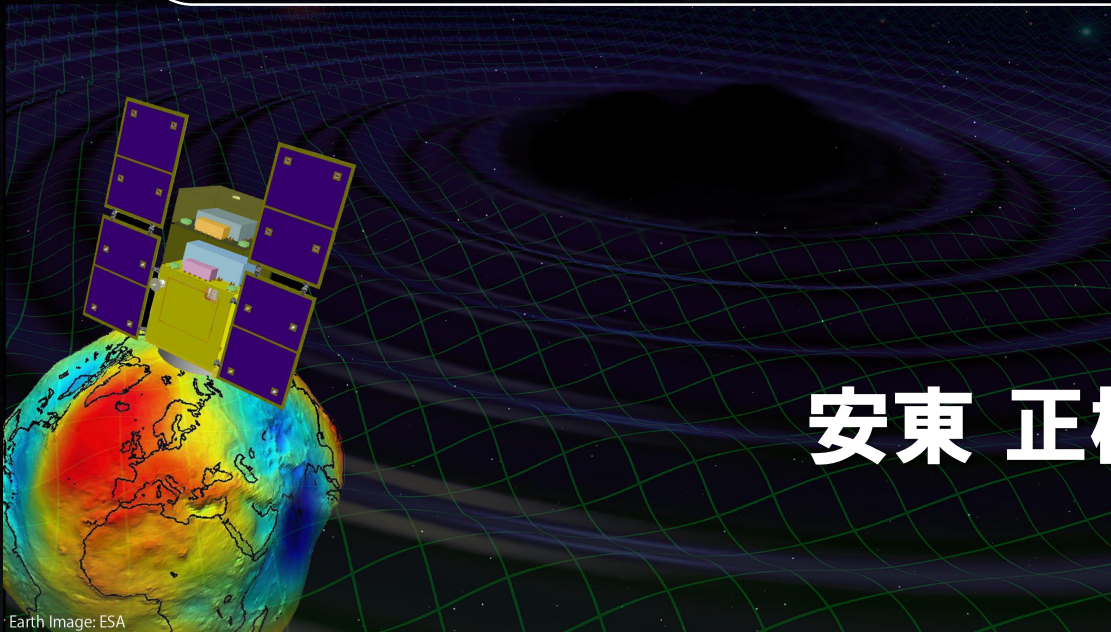


CRC将来計画タウンミーティング

DECIGO Pathfinder



Earth Image: ESA

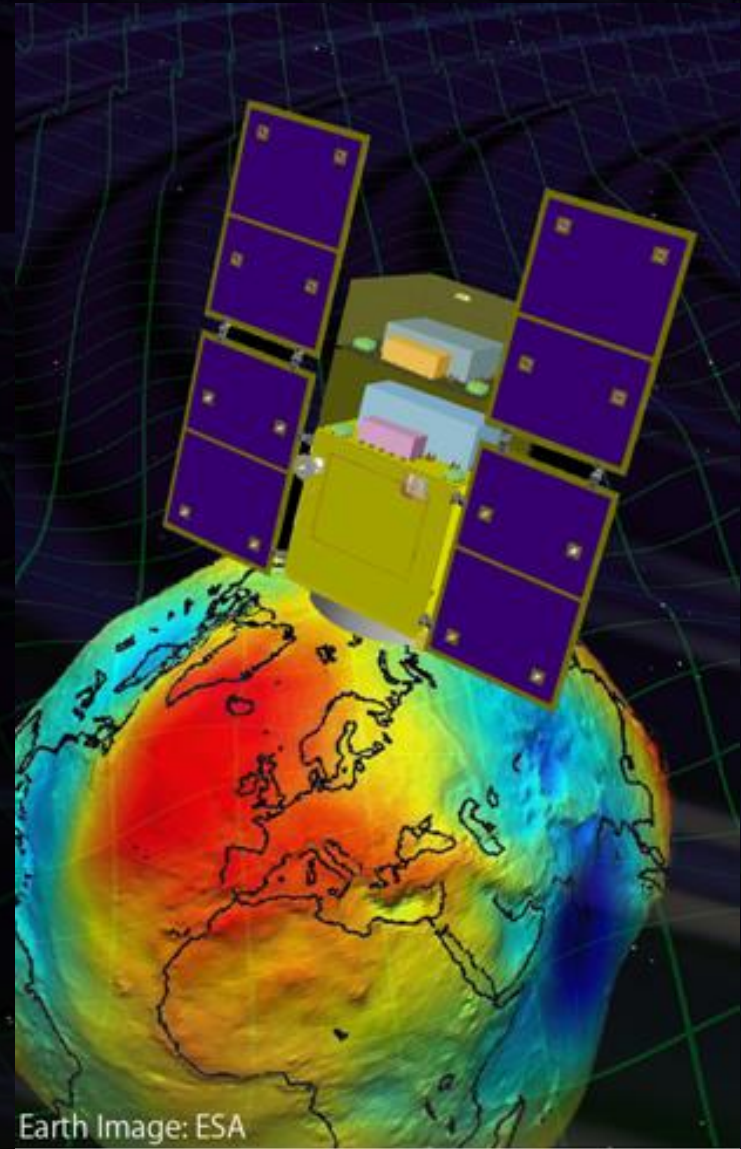
安東 正樹 (東京大学/国立天文台)

DPF WG members



阿久津智忠, 浅田秀樹, 麻生洋一, 新井宏二, 新谷昌人,
安東正樹, 井岡邦仁, 池上健, 石川毅彦, 石崎秀晴, 石
原秀樹, 和泉究, 上田暁俊, 植田憲一, 牛場崇文, 江口
智士, 江尻悠美子, 大河正志, 大原謙一, 大淵喜之, 岡
田健志, 岡田則夫, 奥富弘基, 河島信樹, 川添史子, 河
野功, 川村静児, 神田展行, 木内建太, 國森裕生, 黒田
和明, 黒柳幸子, 小泉宏之, 洪鋒雷, 郡和範, 穀山涉,
苔山圭以子, 古在由秀, 小林史歩, 権藤里奈, 西條統之,
齊藤遼, 坂井真一郎, 阪上雅昭, 阪田紫帆里, 佐合紀親,
佐々木節, 佐藤修一, 佐藤孝, 柴田大, 柴田和憲, 正田
亜八香, 真貝寿明, 末正有, 杉山直, 鈴木理恵子, 瀬戸
直樹, 宗宮健太郎, 祖谷元, 高島健, 高野忠, 高橋走, 高
橋慶太郎, 高橋弘毅, 高橋史宜, 高橋竜太郎, 高森昭光,
田越秀行, 田中貴浩, 田中伸幸, 樽家篤史, 千葉剛, 陳
たん, 辻川信二, 坪野公夫, 鳥居泰男, 中尾憲一, 中澤
知洋, 長野重夫, 中村卓史, 中山宜典, 西澤篤志, 西田
恵里奈, 西山和孝, 丹羽佳人, 沼田健司, 能見大河, 端
山和大, 平林久, 平松尚志, 福嶋美津広, 船木一幸, 細
川瑞彦, 堀澤秀之, 前田恵一, 松原英雄, 松本伸之, 道
村唯太, 宮川治, 三代木伸二, 武者満, 森脇成典, 八木
絢外, 山川宏, 山元一広, 横山順一, 吉田至順, 柳哲文,
若林野花

(2014年2月名簿より)



Earth Image: ESA

- CRCでは、
 - 「CRC将来計画シンポジウム」 (2010年9月16日)
 - 「宇宙線分野の現状と将来計画」 (2011年6月30日)などで、DECIGOについての講演・記載があった。
→ 今回、DECIGOの[前哨衛星DPF](#)の話をする機会を頂いた。

- 宇宙科学をとりまく状況も変化しており、それについても触れたい。

国内重力波観測分野の展望



重力波コミュニティでの議論.

- ・国内の重力波研究分野 JGWC(注1)でのコンセンサス:
「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.

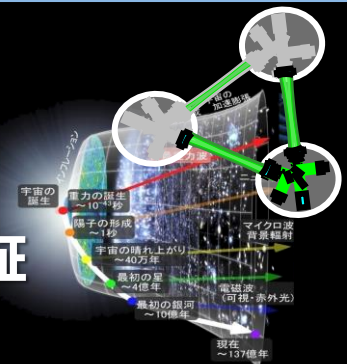
KAGRA : 地上重力波望遠鏡.

- 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: 宇宙における物質起源への知見・宇宙論.
- 電磁波では直接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.



(1) 背景

宇宙重力波望遠鏡 DECIGO



DECIGO (DECI-hertz interferometer
Gravitational wave Observatory)

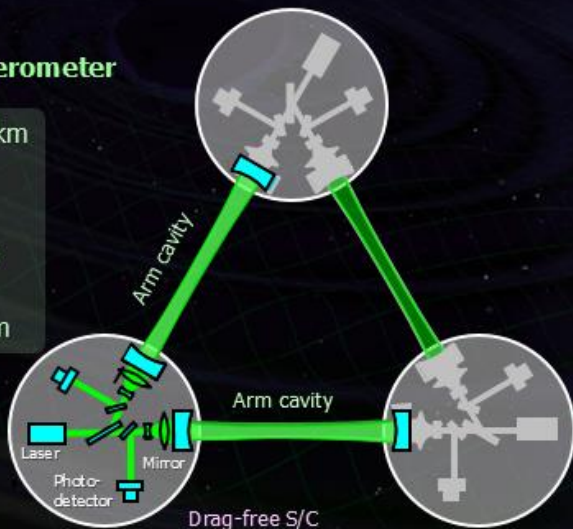
宇宙のはじまりを直接観測する。

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。

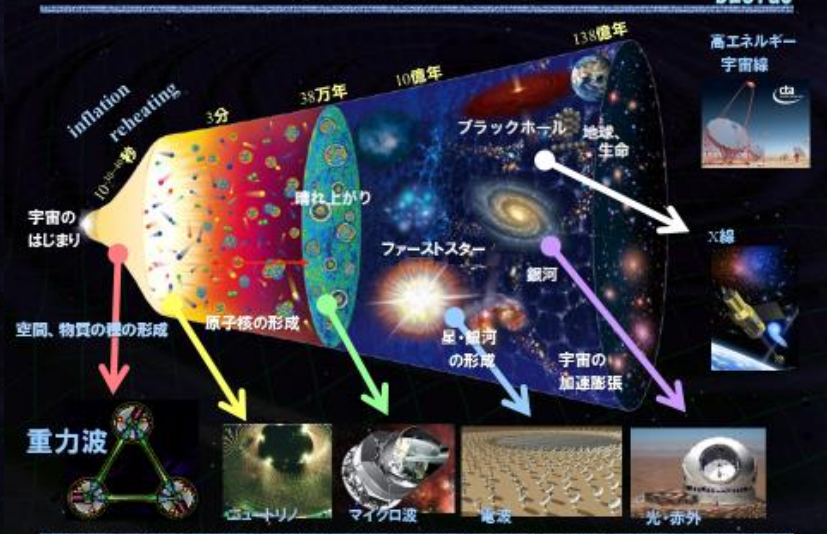
Interferometer Unit:
Differential FP interferometer

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



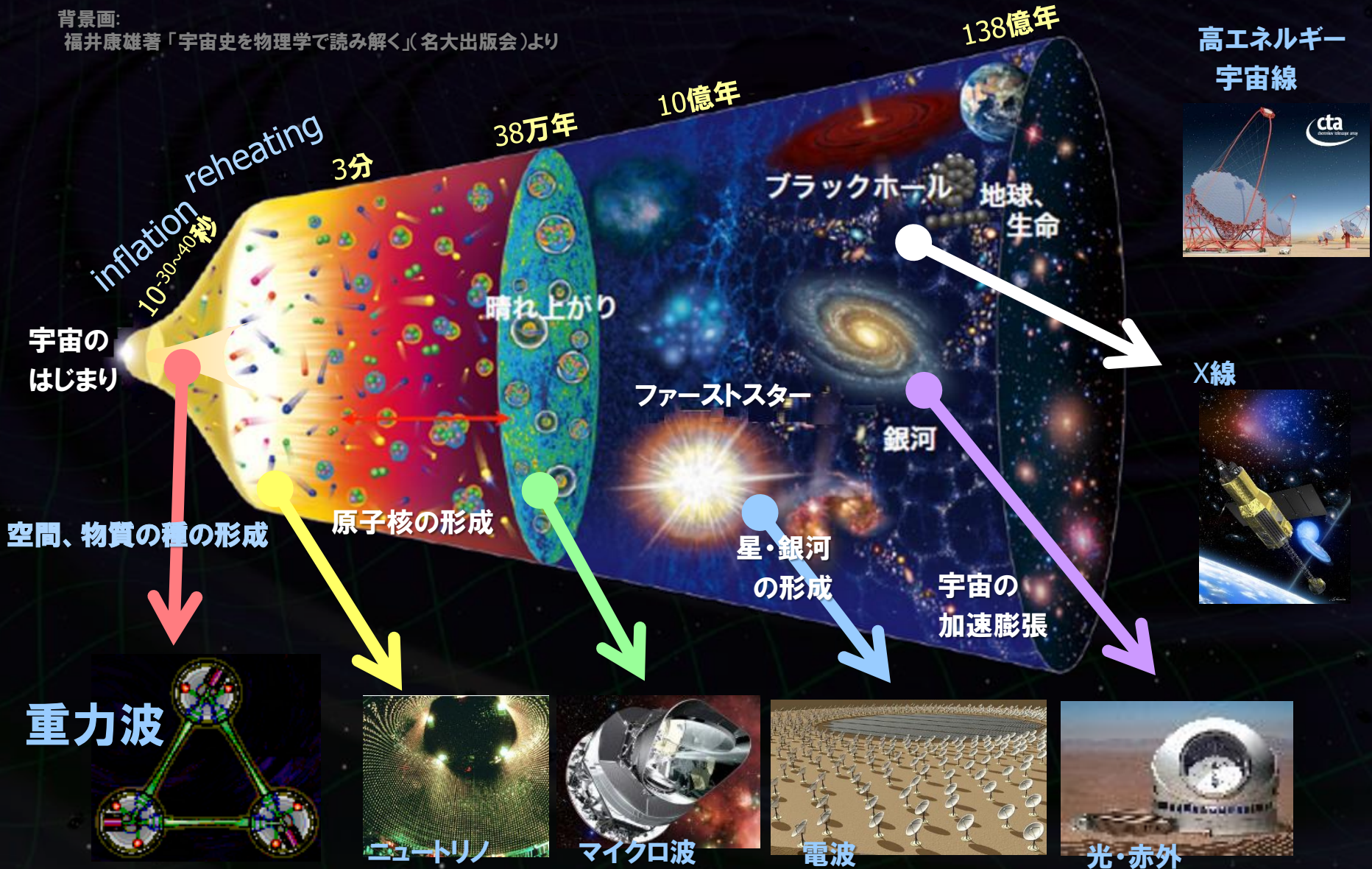
宇宙の誕生と進化



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)

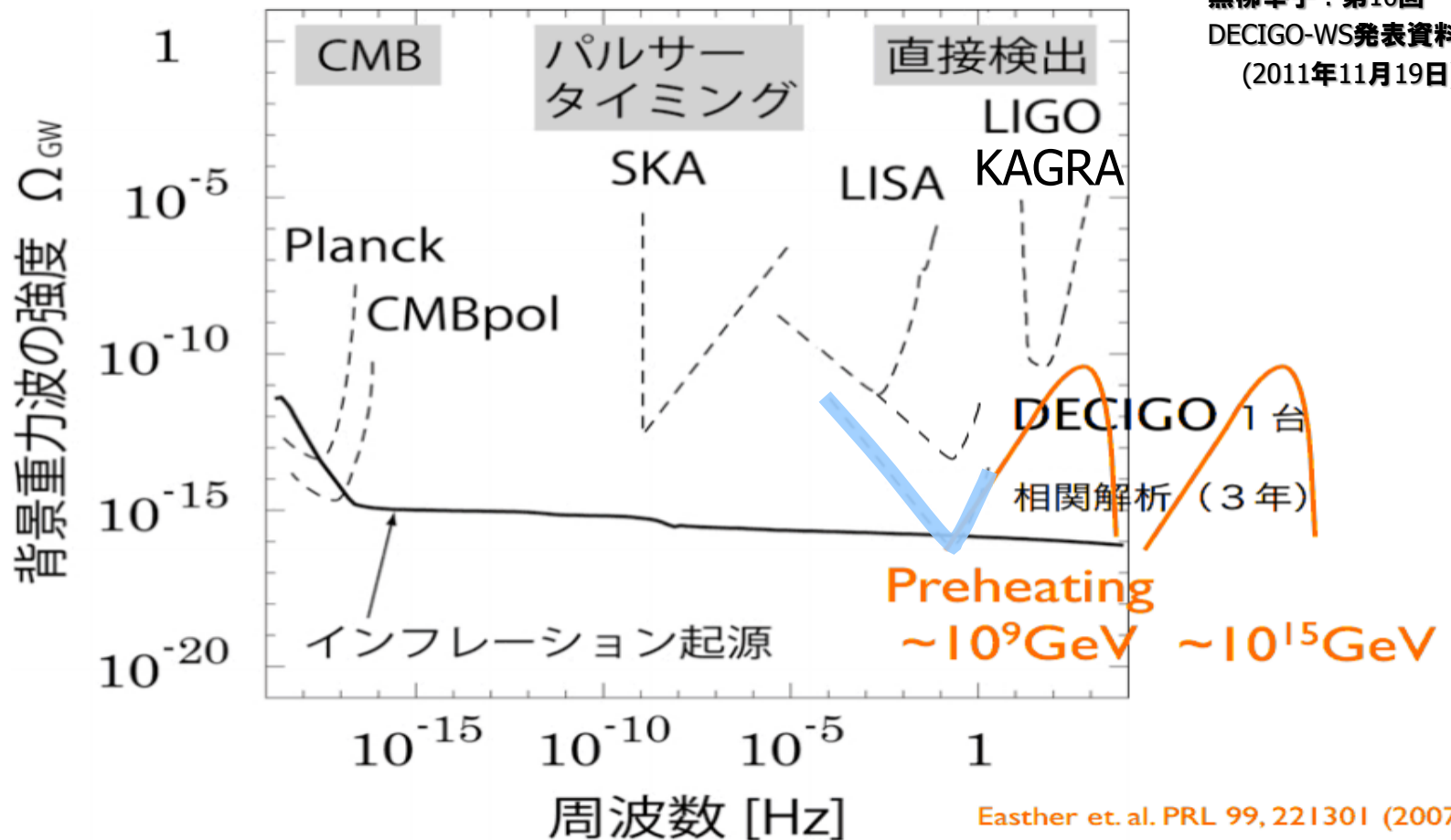
宇宙の誕生と進化

背景画:
福井康雄著「宇宙史を物理学で読み解く」(名大出版会)より



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。
→ 初期に生成された重力波ほど高周波



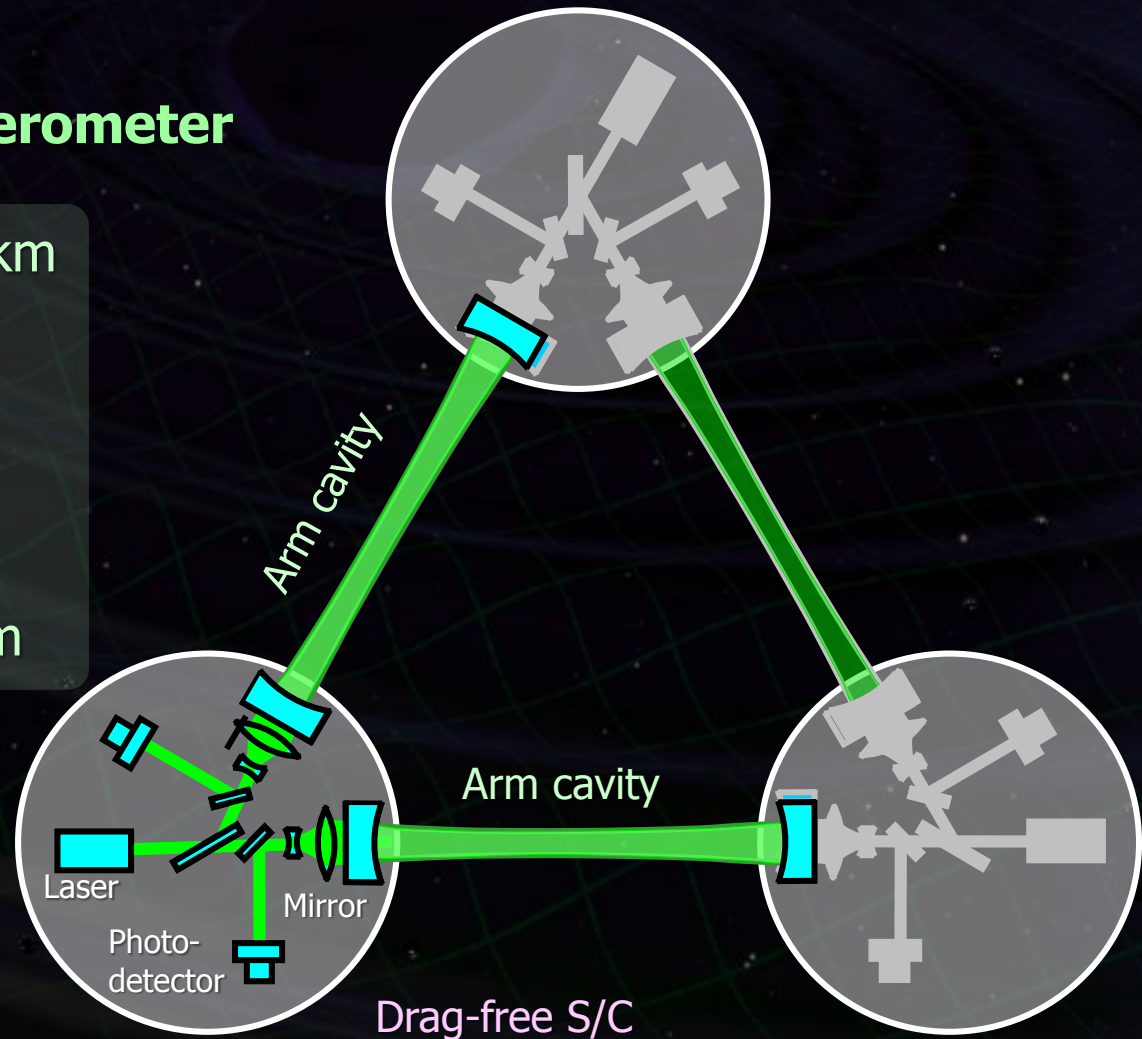
黒柳幸子：第10回
DECIGO-WS発表資料
(2011年11月19日)

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

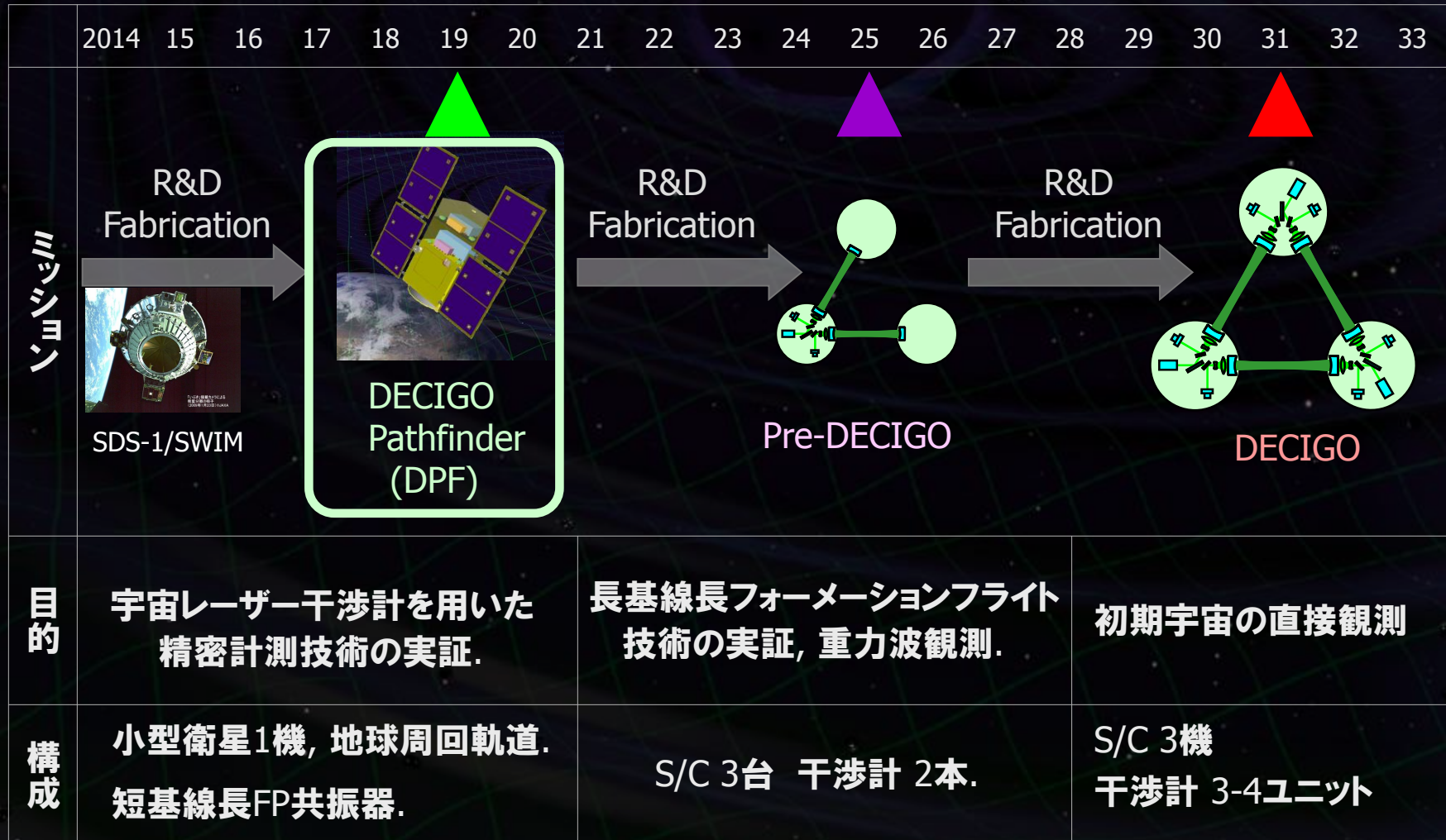
S/C: drag free
3 interferometers



(2) DPFの目的

DECIGO実現へのロードマップ

Figure: S.Kawamura



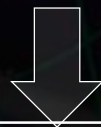
• DECIGOで必要とされる先端技術

(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。

(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。



DPFでは、項目(1)の宇宙実証を目標とする。

DECIGOのための技術実証



	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は全自由度制御を計画。	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 $1 \times 10^{-9}\text{m}/\text{Hz}^{1/2}$.

・長基線長の精密フォーメーションフライト技術.

- 複数の宇宙機を用いたフォーメーションフライト.
- 長基線長での初期補足シーケンス.
- 大口径光学系の宇宙実証.
- 安定軌道(レコード盤軌道)への投入.

・干渉計の感度.

- DPFから, 干渉計感度で2桁の向上が必要.
 - * 複数干渉計による同相雑音除去.
 - * 外来雑音の低減.
- 10Wの高出力レーザー光源.
 - * リソースの問題, 排熱等の実装技術.

・長期間観測運用.

- DPF : 地球周回軌道 ~1年
- DECIGO : レコード盤軌道~5年.

これらは
Pre-DECIGOでの
実証を目指す.

重力波により宇宙を見る

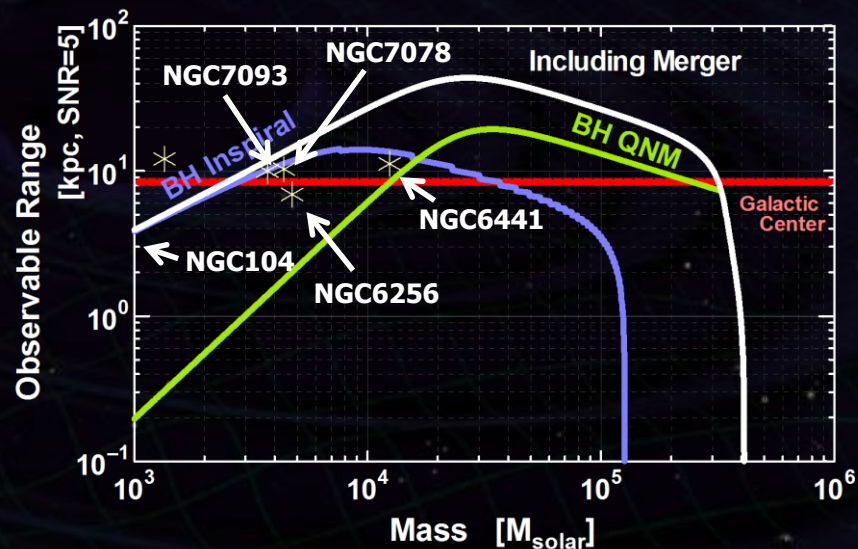
銀河系内のBH連星合体

→ 巨大BH形成への知見.

DPFの感度では

~30個の球状星団を観測可能

独自・野心的なサイエンス



重力で地球を見る

地球重力場の観測

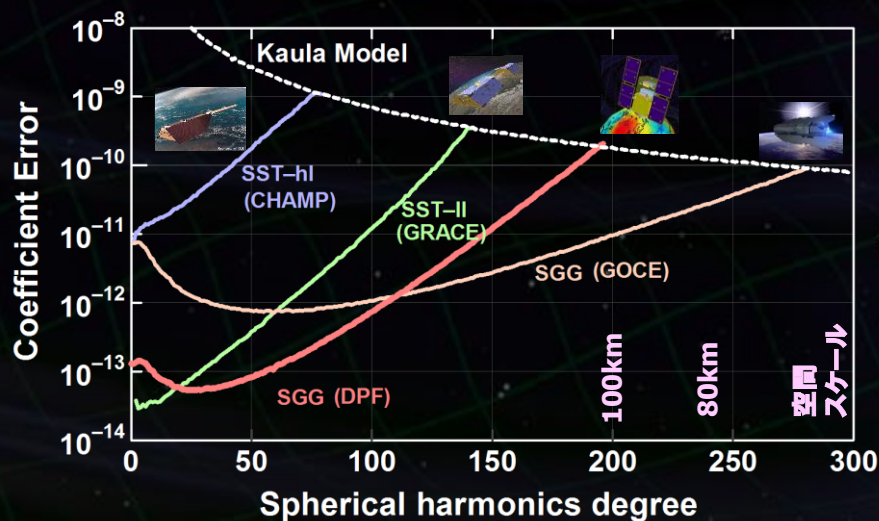
→ 地球形状・地球環境モニタ

他の海外ミッションに匹敵する感度

国際観測網への貢献, 独自の観測

(2012-2016に国際観測網にギャップ)

確実なサイエンス・国際貢献



(3) DPFの概念設計

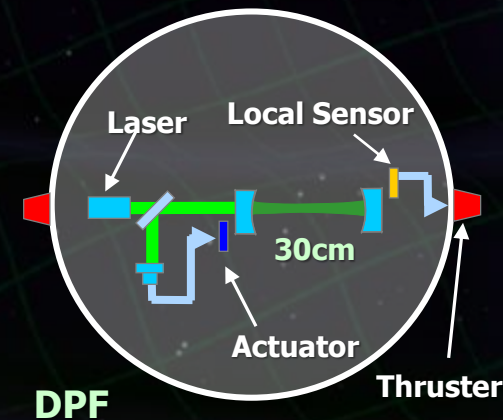
DECIGOパスファインダー (DPF)

- DECIGOの最初の前哨衛星
- DECIGOで必要とされる主要技術のうち、1機の衛星で可能な要素の宇宙実証。



400kg級 衛星一機 500km 地球周回軌道

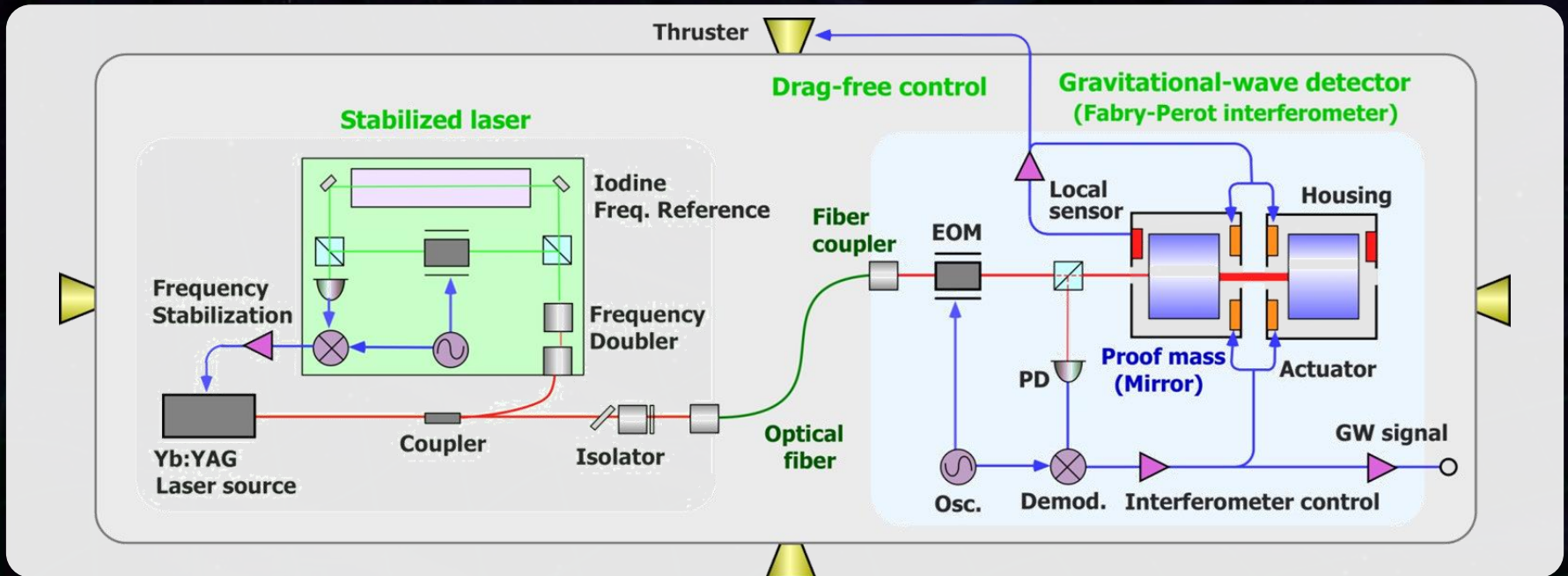
- 基線長30cm干渉計による干渉計技術実証.
- 安定化レーザー光源の動作.
- ドラッグフリーの実現.
- 総合的・連続的な観測運用.



DPFミッション機器構成

ミッション機器重量 : ~200kg
ミッション機器空間 : 95 cm立方

ドラッグフリー
ローカルセンサで相対変動検出
→ スラスタにフィードバック



安定化レーザー光源
Yb:YAGレーザー
出力 25mW
ヨウ素飽和吸収による
周波数安定化

ファブリー・ペロー共振器
フィネス : 100
基線長 : 30cm
試験マス : 質量 数kg
PDH法により信号取得・制御

DPFシステム概要

DPF Payload

Size : 950mm cube
Weight : 220kg
Power : 150W
Data Rate: 800kbps
Mission thruster x10

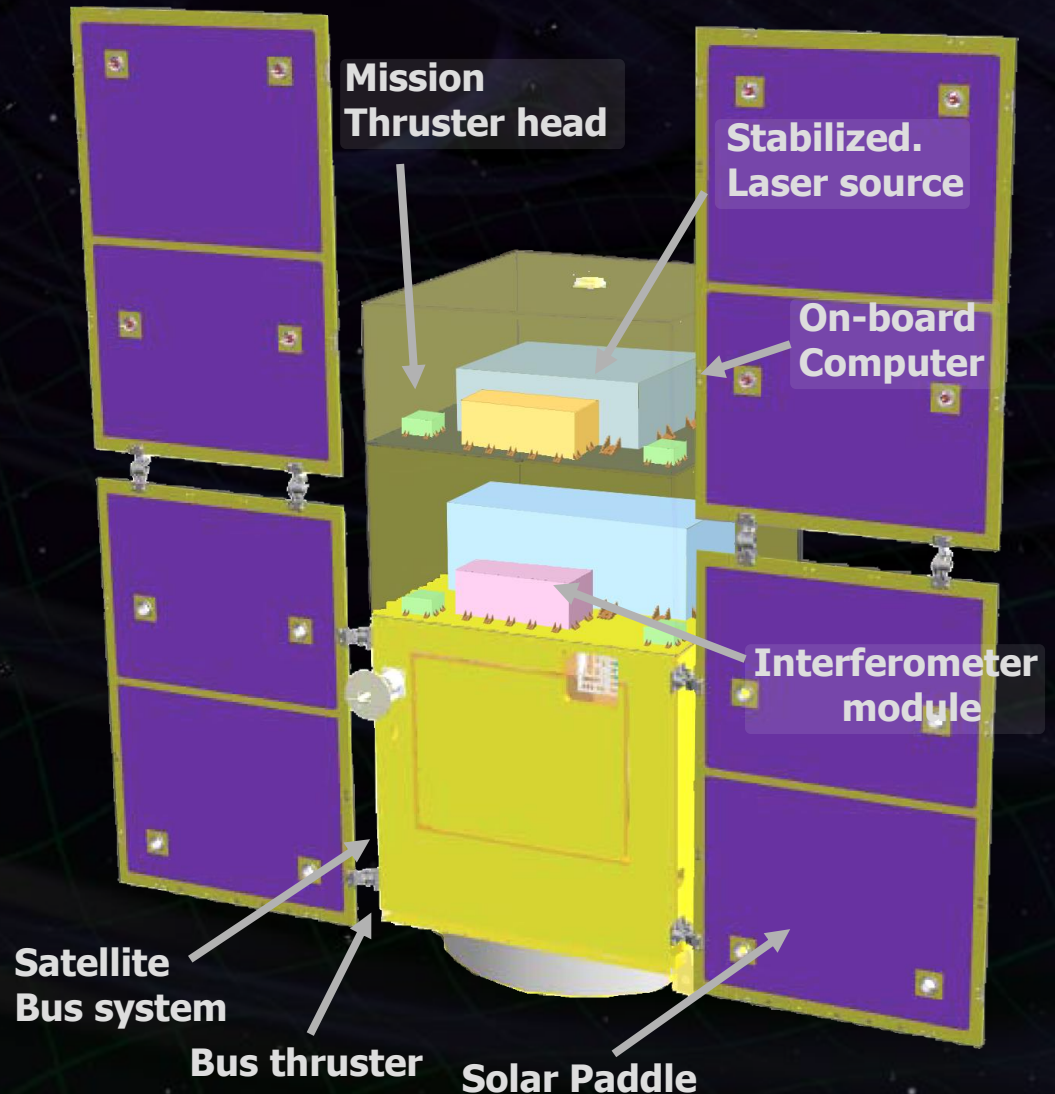
Power Supply
SpW Comm.



Satellite Bus

(‘Standard bus’ system)

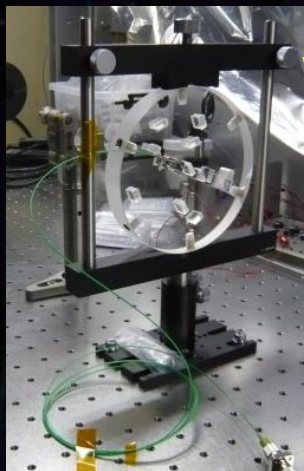
Size :
950x950x1100mm
Weight : 230kg
SAP : 960W
Battery: 50AH
Downlink : 2Mbps
DR: 1GByte
1N Thrusters x 4



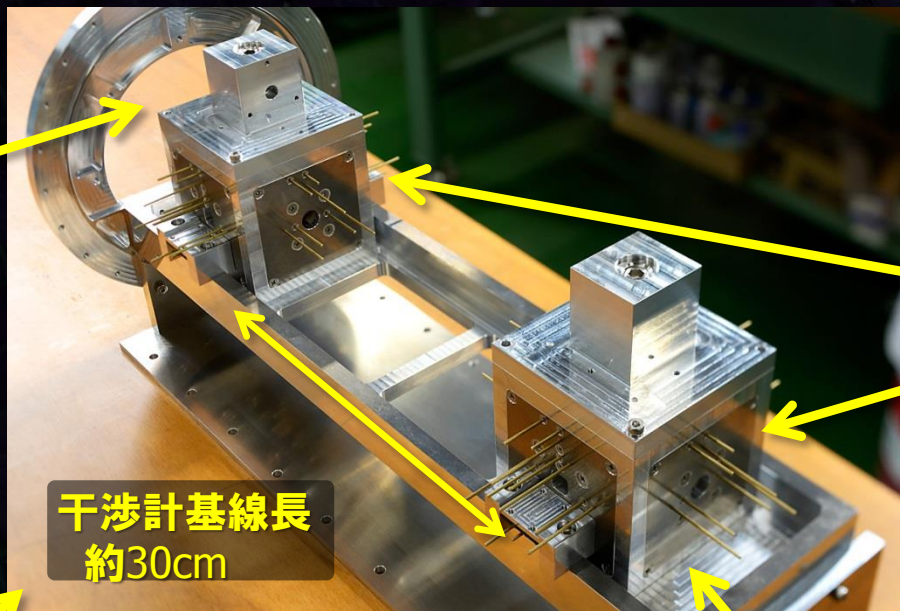
干渉計モジュール

入出射光学系

シリケートボンディングにより一体化



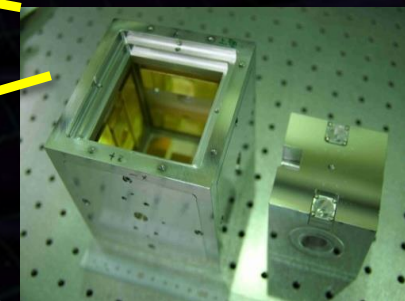
干渉計モジュール



干渉計基線長
約30cm

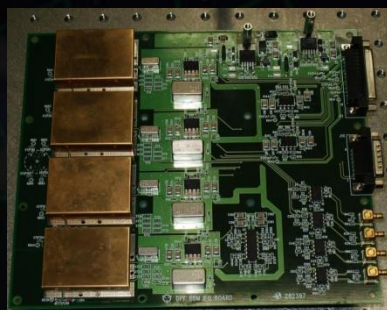
試験マスモジュール

試験マス、静電センサ・アクチュエータ、ローンチロック



4分割RF フォトディテクタ

4分割PD + 復調回路
干渉計基線長・角度の
変動を取得

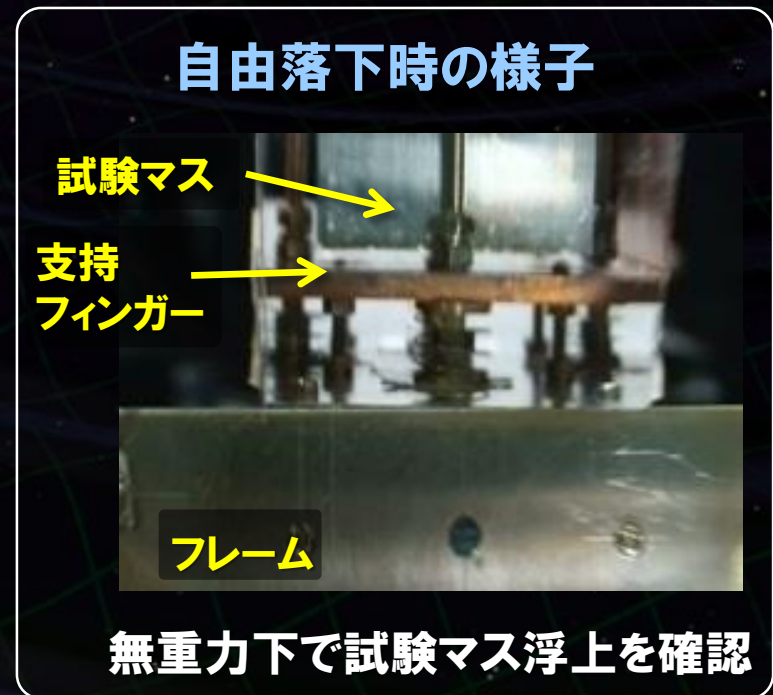
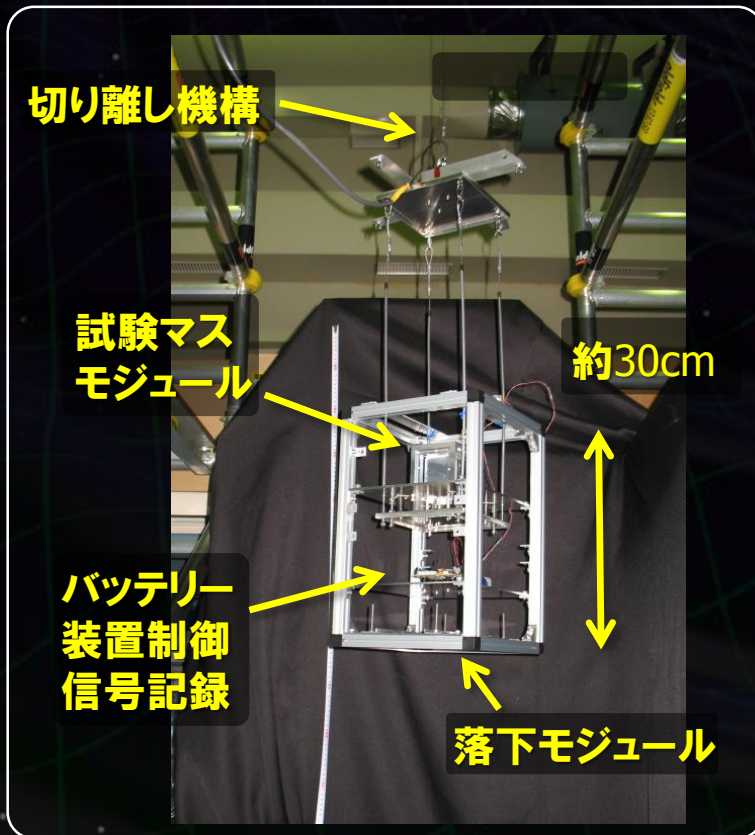


SpW信号処理・ 制御ボード

SpW FPGA +
16bit AD/DA
干渉計の制御



- 無重力下での試験マス制御デモンストレーション (国立天文台)
 - 落下モジュール (構造, 電源, センサ, ロガーなど)
 - ~3m落下設備 (足場, 切り離し機構, クッションなど)



今後, 静電S/Aによる制御をめざす.

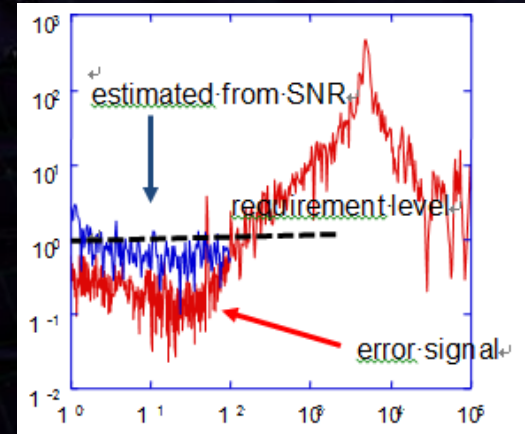
周波数安定化モジュール

・周波数安定化モジュールBBM1 (~2011, 電通大)

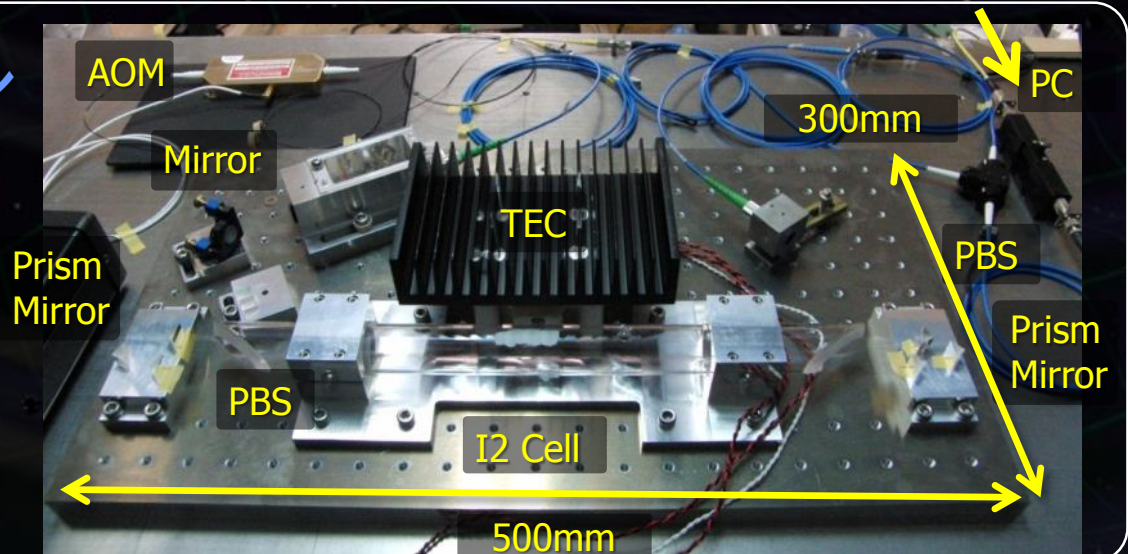
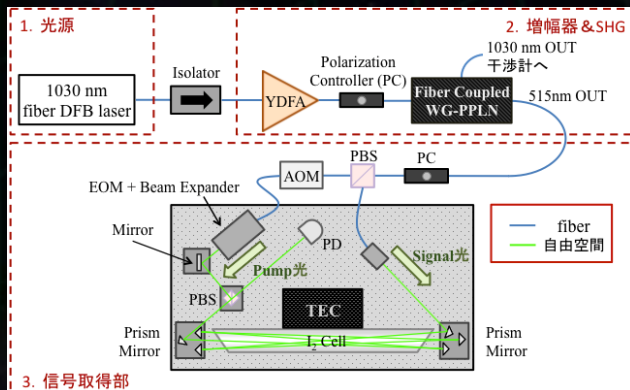
- ヨウ素セルを用いた周波数安定化.
- 安定度要求 ($0.5 \text{ Hz}/\text{Hz}^{1/2}$)を満たす.

・周波数安定化モジュールBBM2 (電通大)

- ファイバ素子を用い, 小型・軽量・堅牢化.
- SpWデジタル制御ボードによる動作.



レーザー周波数安定化モジュール

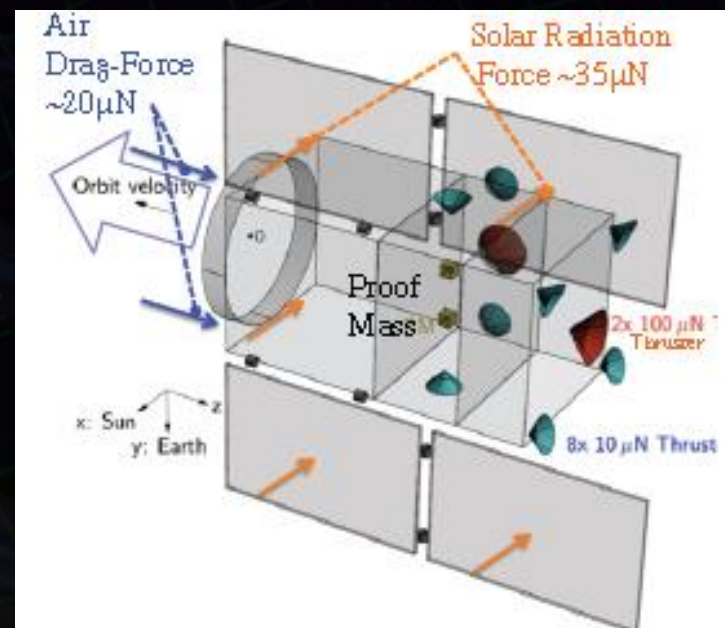


・ミッションスラスト構成

- 準定常成分 **100 μN スラスト 2台**
大気ドラッグ, 太陽輻射圧
- 変動成分 **10 μN スラスト 8台**
大気圧変動, 太陽輻射変動

ミッションスラスト仕様

推力	0.5-100 μN x2 (可変) 0.5-10 μN x 8 (可変)
分解能	0.1 μN
推力雑音	0.1 $\mu\text{N}/\text{Hz}^{1/2}$
制御応答	>10Hz
Isp	TBD
電力・質量	<40W, <40kg
運用寿命	4,300 時間



SWIMによる宇宙実証

DECTGO

Photo:
JAXA

SDS-1搭載のSWIM (Space wire demonstration module)

2009年1月打ち上げ, 2010年9月運用停止

⇒ 世界で最初の 宇宙重力波検出器



「いぶき」搭載カメラによる
衛星分離の様子
(2009年1月23日) ©JAXA

SpaceCube2: Space-qualified Computer

CPU: HR5000
(64bit, 33MHz)

System Memory:
2MB Flash Memory
4MB Burst SRAM
4MB Asynch. SRAM

Data Recorder:
1GB SDRAM
1GB Flash Memory
SpW: 3ch

Size: 71 x 221 x 171
Weight: 1.9 kg
Power: 7W



Photo by JAXA

SWIM_{μv} : User Module

Processor test board
GW+Acc. sensor

FPGA board

DAC 16bit x 8 ch

ADC 16bit x 4 ch

→ 32 ch by MPX

Torsion Antenna x2

~47g test mass

Data Rate : 380kbps
Size: 124 x 224 x 174
Weight: 3.5 kg
Power: ~7W

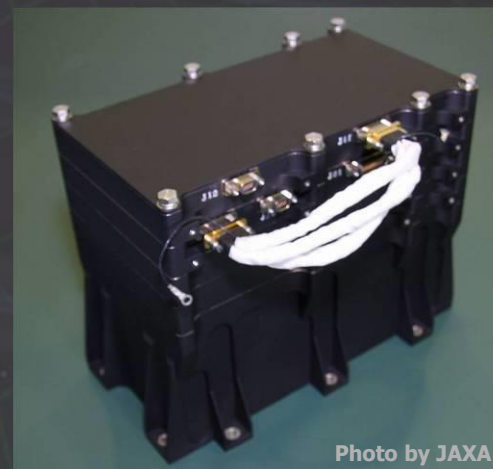


Photo by JAXA

SDS-1
Bus System

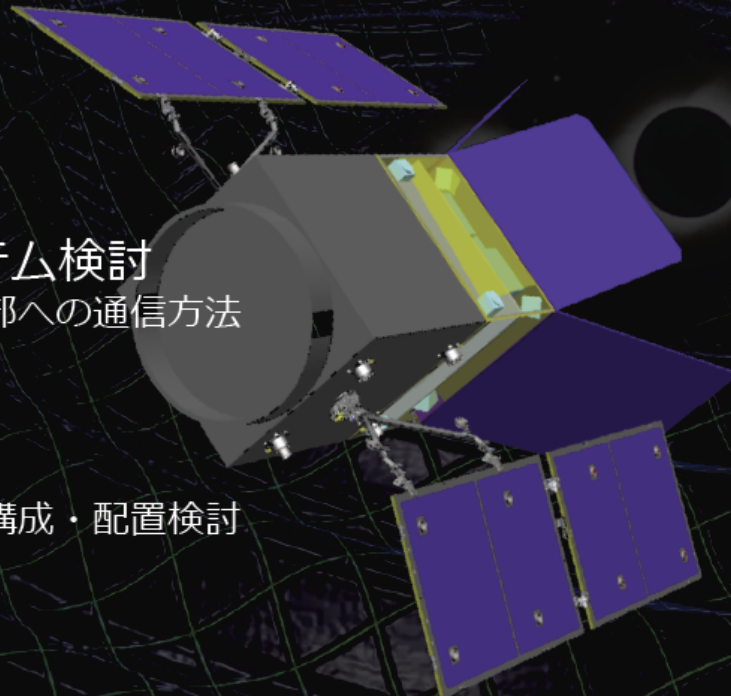
Power +28V
RS422 for CMD/TLM
GPS signal

Power ±15V, +5V
SpW x2 for CMD/TLM

DPFシステム概念検討（これまで）

補足

©NEC



熱設計検討

- 熱的要求条件
- 設計方針
- 排熱検討

SpW信号処理系システム検討

- バス部からミッション部への通信方法

受動安定姿勢の検討

- 日照時安定姿勢の改善
- ミッションスラスタの構成・配置検討

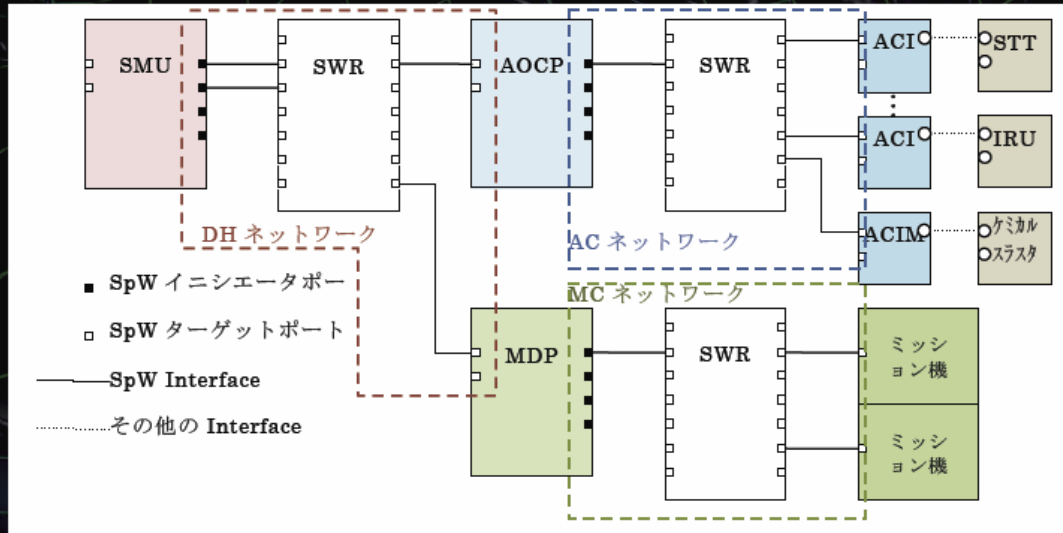
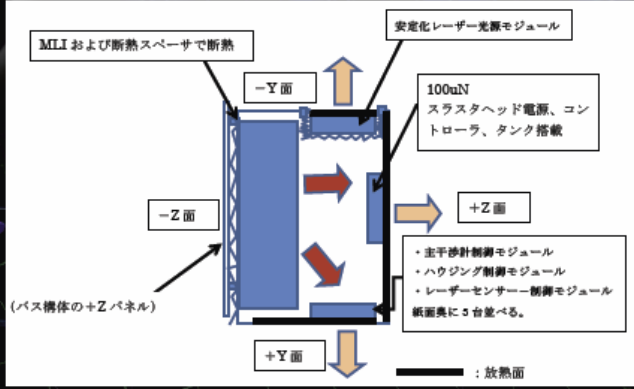


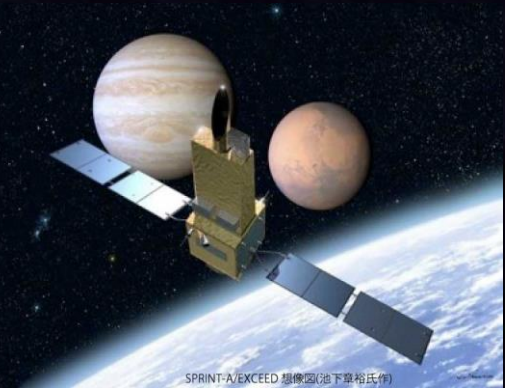
表 2-3 バス機器許容温度および発生熱量

搭載パネル	機器名称	動作時許容温度	発熱(定常観測+伝送)	備考
+X 独立熱制御	BAT-L	20 ~ 30	-	-
	BAT-H	20 ~ 30	-	-
-X	SWR2	-25 ~ 50	10.3	SPRINT-A ODR設計値
	PCU	-30 ~ 60	17.2	SPRINT-A ODR設計値
	ACSDN	-30 ~ 50	3.5	SPRINT-A ODR設計値
	ACIRM	-30 ~ 50	9.5	SPRINT-A ODR設計値
	ACANA	-30 ~ 50	10.5	SPRINT-A ODR設計値
	HCE	-20 ~ 50	9.6	SPRINT-A ODR設計値
	-Xパネル合計		60.6	
+Y	APR	-25 ~ 65	68	SPRINT-A ODR設計値
	ACSTS	-30 ~ 50	7	SPRINT-A ODR設計値
	SWR1	-25 ~ 50	10.3	SPRINT-A ODR設計値
	SBD	-30 ~ 60	11	SPRINT-A ODR設計値
	SADM	-30 ~ 60	1.5	SPRINT-A ODR設計値
	+Yパネル合計		97.8	
-Y	S-TRP-A	-20 ~ 55	10	SPRINT-A ODR設計値
	S-TRP-B	-20 ~ 55	27.6	SPRINT-A ODR設計値
	AOCP-B	-25 ~ 50	1	SPRINT-A ODR設計値
	AOCP-A	-25 ~ 50	13	SPRINT-A ODR設計値
	SMU	-25 ~ 50	19	SPRINT-A ODR設計値
	TCIM	-30 ~ 50	14	SPRINT-A ODR設計値
	DR	-25 ~ 55	6.5	SPRINT-A ODR設計値
	SADM	-30 ~ 60	1.5	SPRINT-A ODR設計値
	SBD	-30 ~ 60	11	SPRINT-A ODR設計値
	-Yパネル合計		103.6	
+Z	FOG	-10 ~ 50	6.9	IKAROS機載品
	S-SW	-20 ~ 50	0.2	SPRINT-A ODR設計値
	S-DIP1	-20 ~ 55	0.1	SPRINT-A ODR設計値
	S-DIP2	-20 ~ 55	0.1	SPRINT-A ODR設計値
	GAS	-30 ~ 60	1.0	SPRINT-A ODR設計値
	S-HYB	-20 ~ 55	1.6	SPRINT-A ODR設計値
	ミッション側からの熱入力		20	規定
	+Zパネル合計		29.9	
-Z	RCS用ヒータ		5.2	ASNARC実績
	-Zパネル合計		5.2	
+Z 独立熱制御	STT	-30 ~ 60	7.2	SPRINT-A ODR設計値
	バス合計		304.3	

(4) ミッションの状況

JAXAの小型科学衛星シリーズ

標準衛星バス + イプシロンロケットを利用して
比較的高頻度で 小型科学衛星 を打ち上げる計画



小型科学衛星1号機 SPRINT-A/EXCEED

1号機 ひさき (SPRINT-A) (2013年)

UV望遠鏡による惑星観測

2号機 ERG (SPRINT-B) (~2015年)

地球周辺の磁気圏観測



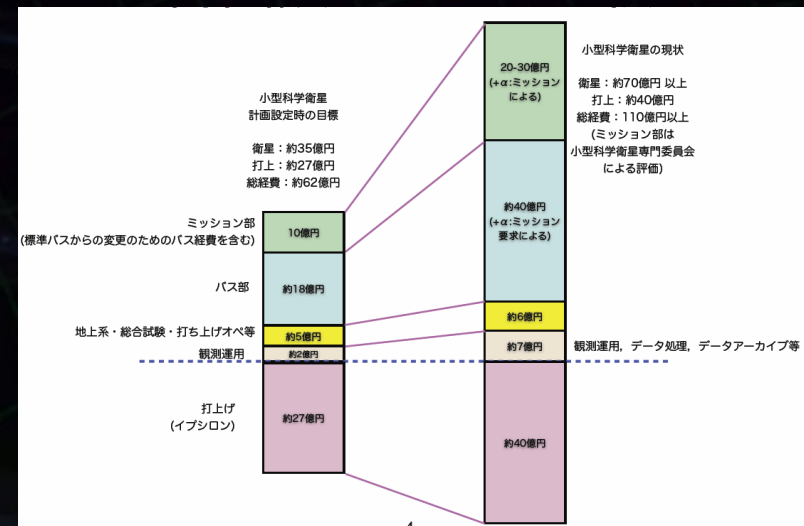
DPF: 小型科学衛星3号機 を目指していた
宇宙分野における新しいサイエンスの
可能性として評価.



Epsilon Rocket Booster
Photo by JAXA

小型科学衛星シリーズ

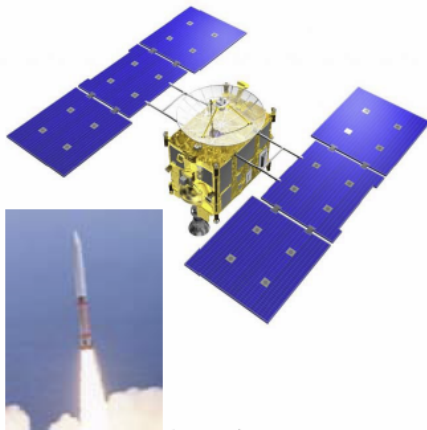
- ・小型科学衛星シリーズの位置づけが見直された。
 - 小型科学衛星プログラムは「**特徴ある宇宙科学ミッションを迅速かつ高頻度を実現する**」目的で進められた。
 - しかし、2011年にERG（小型科学衛星2号機）の想定資金からの大幅超過をきっかけとして、**小型科学衛星シリーズとしてのプロジェクトは Termination された。**
 - 小型科学衛星専門委員会によるコスト評価、および、SE推進室の評価。
 - 検討中のWGのミッション実現には、**マージン無しで70から120億円の衛星コスト**（当初想定1.7から3.4倍）が必要であることが示唆された。
 - これまで：ミッション部 10億円以内
 - 今後 ミッション部 20~30+a億円.



内閣府・宇宙政策委員会・宇宙科学・探査部会 資料より (2013年9月19日)

Ⅲ. 今後の宇宙科学・探査プロジェクトの推進方策

宇宙科学における宇宙理工学各分野の今後のプロジェクト実行の戦略に基づき、厳しいリソース制約の中、従来目指してきた大型化の実現よりも、中型以下の規模をメインストリームとし、中型(H2クラスで打ち上げを想定)、小型(イプシロンで打ち上げを想定)、および多様な小規模プロジェクトの3クラスのカテゴリーに分けて実施する。



2000年代前半までの
典型的な科学衛星ミッション
M-Vロケットによる打ち上げ

戦略的に実施する中型計画(300億程度)
世界第一級の成果創出を目指し、各分野のフラッグ
シップ的なミッションを日本がリーダーとして実施する。
多様な形態の国際協力を前提。

公募型小型計画(100-150億規模)
高頻度な成果創出を目指し、機動的かつ挑戦的に実施
する小型ミッション。地球周回/深宇宙ミッションを機動的
に実施。現行小型衛星計画から得られた経験等を活か
し、衛星・探査機の高度化による軽量高機能化に取り組
む。等価な規模の多様なプロジェクトも含む。

多様な小規模プロジェクト群(10億/年程度)
海外ミッションへのジュニアパートナーとしての参加、海外
も含めた衛星・小型ロケット・気球など飛翔機会への参
加、小型飛翔機会の創出、ISSを利用した科学研究など、
多様な機会を最大に活用し成果創出を最大化する。

イプシロン搭載宇宙科学ミッション 提案募集 DECIGO

- 2013年12月「**イプシロン搭載宇宙科学ミッション**」の募集開始。
→ **締め切り 2014年2月末.**

• 応募状況

- **宇宙理学委員会**：4ミッション
高エネルギー天文, 光赤外, 重力波, 月探査.
- **宇宙工学委員会**：3ミッション
月着陸, 深宇宙探査, 太陽発電衛星.

平成25年12月27日

宇宙理学委員会研究班員

宇宙工学委員会研究班員 各位

宇宙航空研究開発機構

宇宙科学研究所

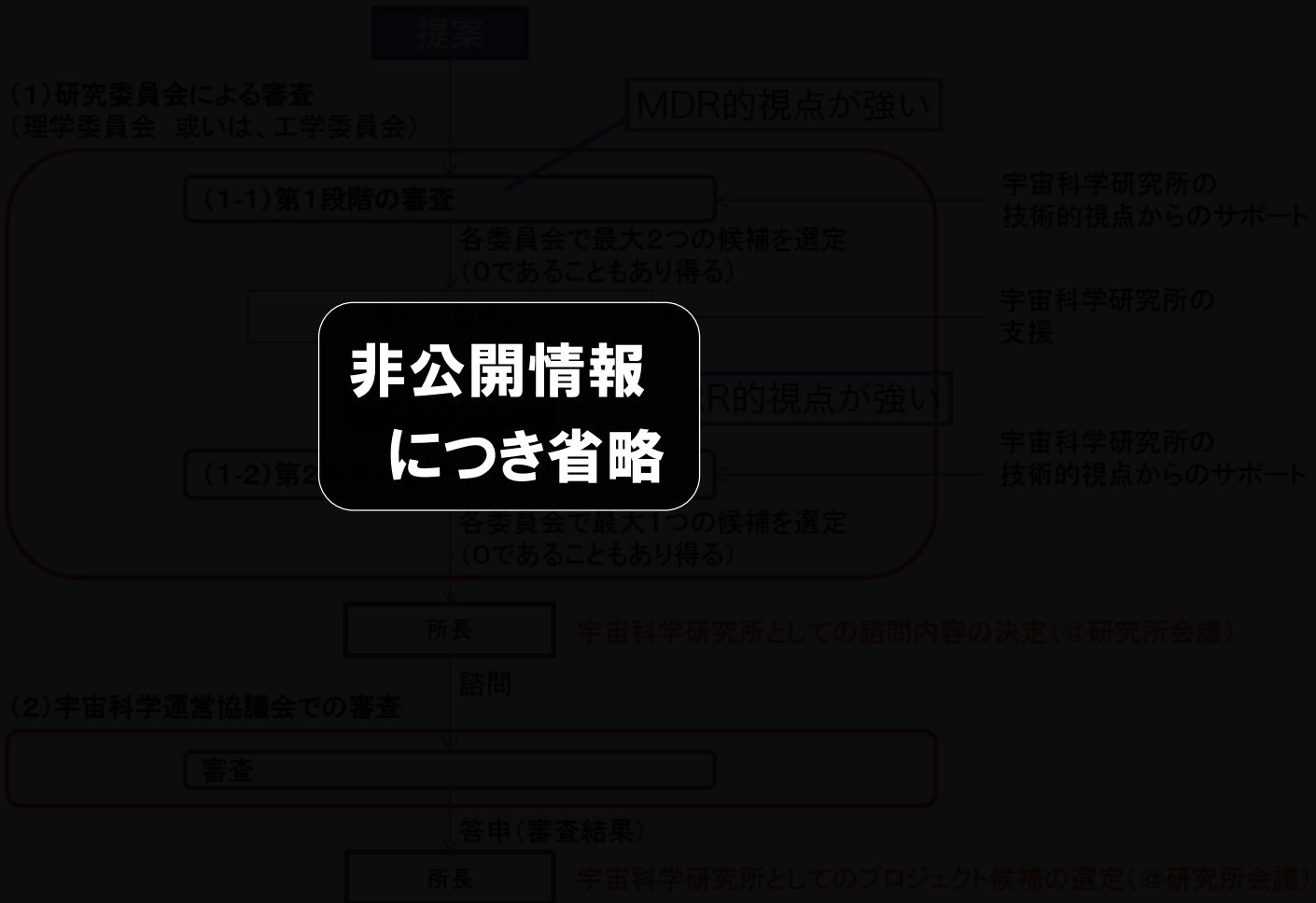
所長 常田 佐久

2013(平成25)年度イプシロン搭載宇宙科学ミッション の提案募集

宇宙科学研究所は、宇宙科学に係る学術研究に関する我が国の中核的な研究拠点として、大学共同利用システムの制度に基づき、これまで様々な科学衛星・科学探査機プロジェクトや観測ロケットおよび大気球実験を実施してきました。2006年度にJAXAのイプシロンロケットと連動する小型科学衛星シリーズの検討を開始し、その一号機であるSPRINT-A「ひさぎ」が軌道投入されました。また、その二号機である ERG 衛星も PDR を終了し、EM開発や観測系の構造モデル・熱モデルによる検証が行われています。しかし、小型科学衛星シリーズとして想定した資金規模からの ERG 総資金の大幅な逸脱によりシリーズとしての小型科学衛星の実施は中止せざるを得なくなりました。そのような事態に至ってしまった要因は複数の組織によって分析され、それに基づいて宇宙科学研究所に対する提言がなされました。宇宙科学研究所では提言を踏まえたアクションプランを実行しているところです。その一方で、宇宙理学委員会・宇宙工学委員会を中心として今後20年を見据えた宇宙科学のロードマップ策定作業が進んでおり、小型科学衛星の成果を活用しつつイプシロンロケット（今後、開発が進むと想定される高度化イプシロンを含む）を最大限利用した公募型小型計画が宇宙科学研究推進の3つの柱の一つとして定義されようとしています。これらの状況を踏まえ、宇宙理学委員会・宇宙工学委員会を

ミッション選定の流れ

H25年度イプシロン搭載宇宙科学ミッション プロジェクト候補の選定プロセス



**非公開情報
につき省略**

第42回宇宙理学委員会資料より

DECIGO組織



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)

Design phase

DECIGO パスファインダー
リーダー: 安東 (東大理)

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)

•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

• KAGRAとDECIGOの関係.

- 重力波を用いる、という手段は同じだが、違いも多い.
 - * 目指すサイエンス (高エネルギー天体現象 / 宇宙論).
 - * 実現時期 (2017年 / 2030年).
 - * 根幹となる技術 (試験マス支持, レーザー光源, 衛星技術).
 - * 開発体制.
- JGWCの合意 : まずKAGRAで初検出を実現し, DECIGOで展開する.

• 宇宙科学分野を取り巻く状況の変化.

- JAXA 宇宙科学ロードマップの策定. 各分野の将来計画の議論.
- 宇宙線分野に関係するのは、EUSO, DECIGOなど.

私見

長期的視野に立って、

宇宙線/重力波コミュニティの裾野の拡大と発展を目指すべき.

まとめ

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。



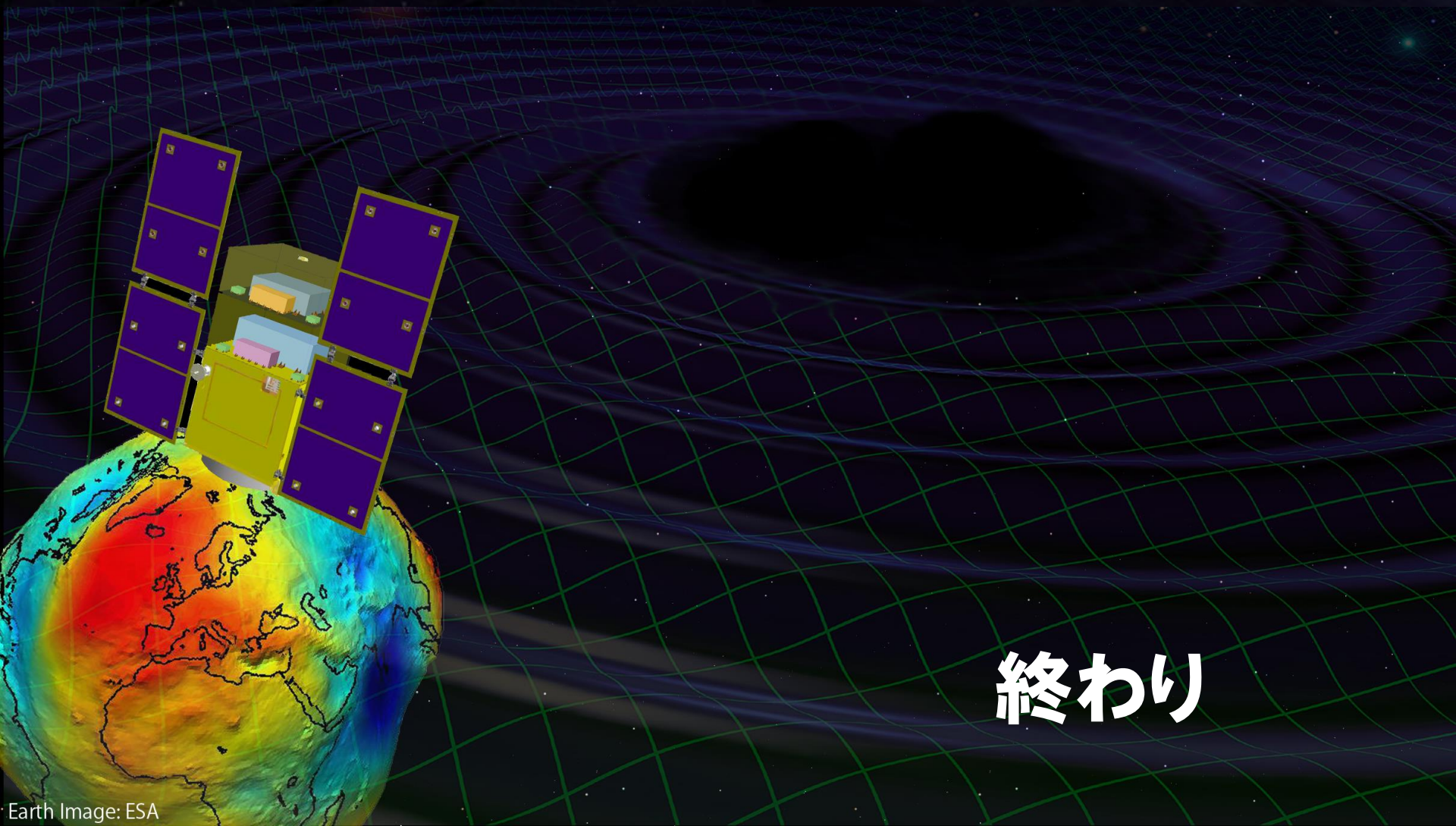
イプシロン搭載小型ミッション としての実現を目指す。

小型衛星 1機 (重量 400kg)

地球周回軌道 (高度 500km)

打ち上げ目標 2019年。

Earth Image: ESA



終わり

Earth Image: ESA