

Ingénierie Système sur LISA

Joseph Martino

Parcours

2009

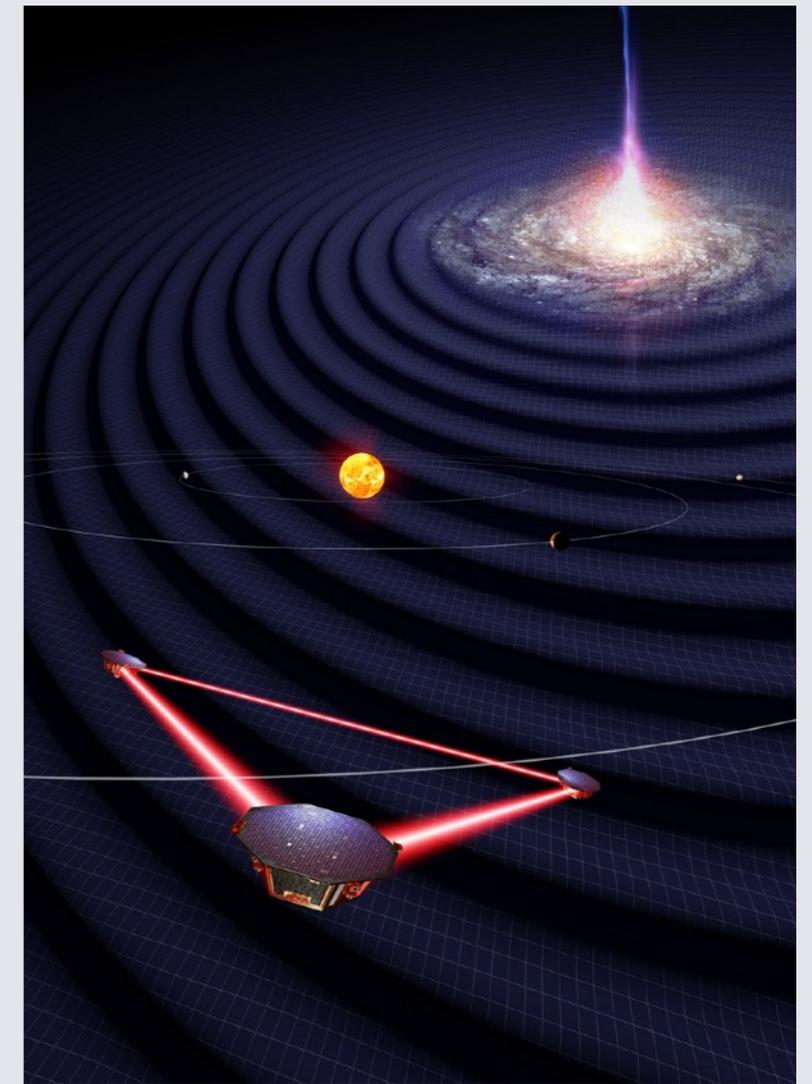
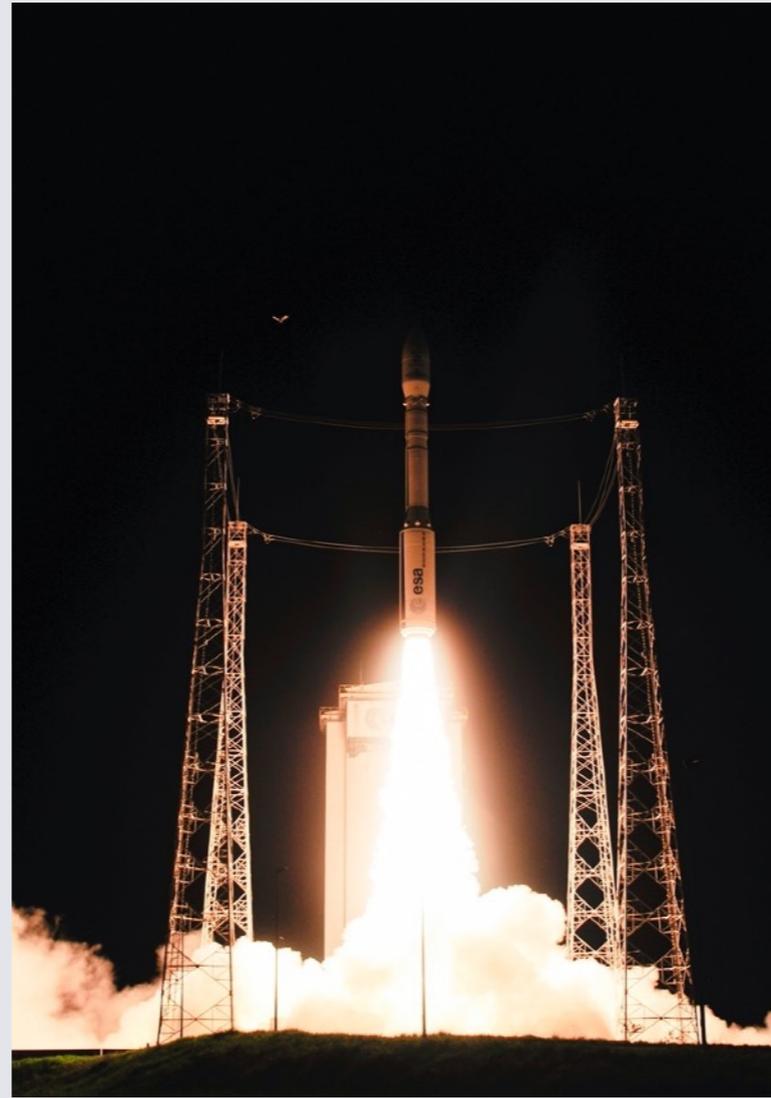
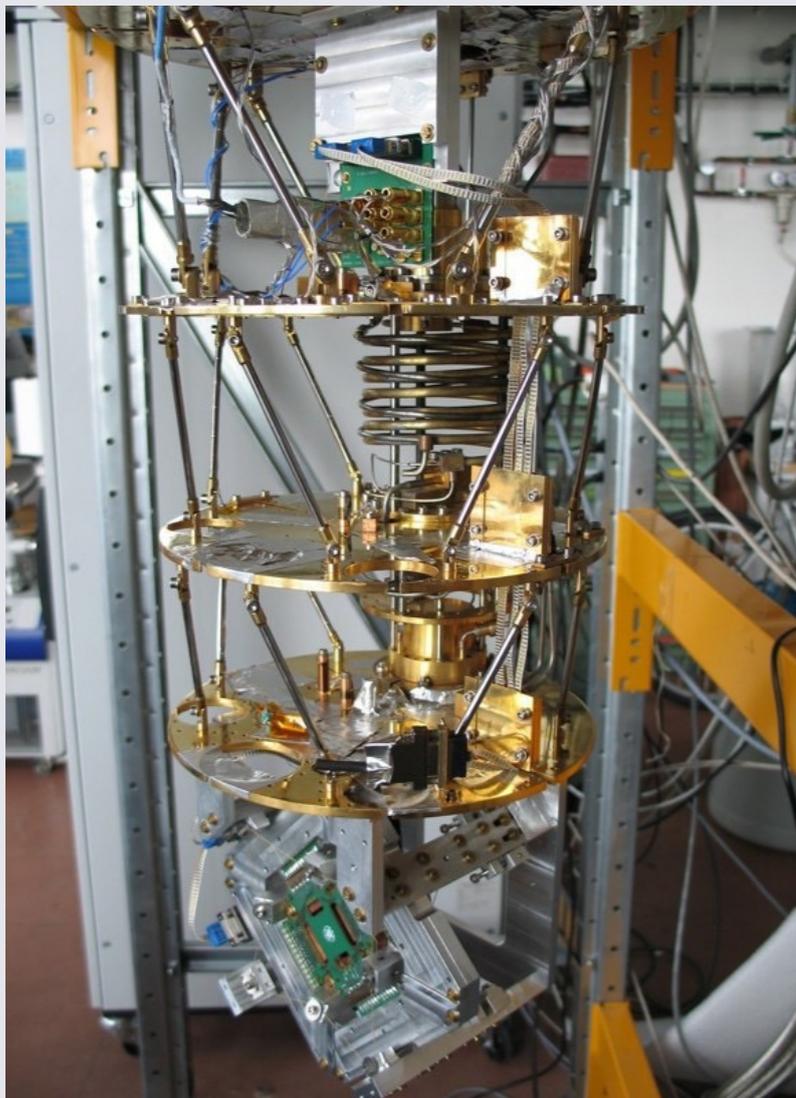
QUBIC - Détecteurs pour le fond diffus cosmologique

2014

LISA Pathfinder

2017

LISA



Parcours

2009

QUBIC - Détecteurs pour le fond diffus cosmologique

2014

LISA Pathfinder

2017

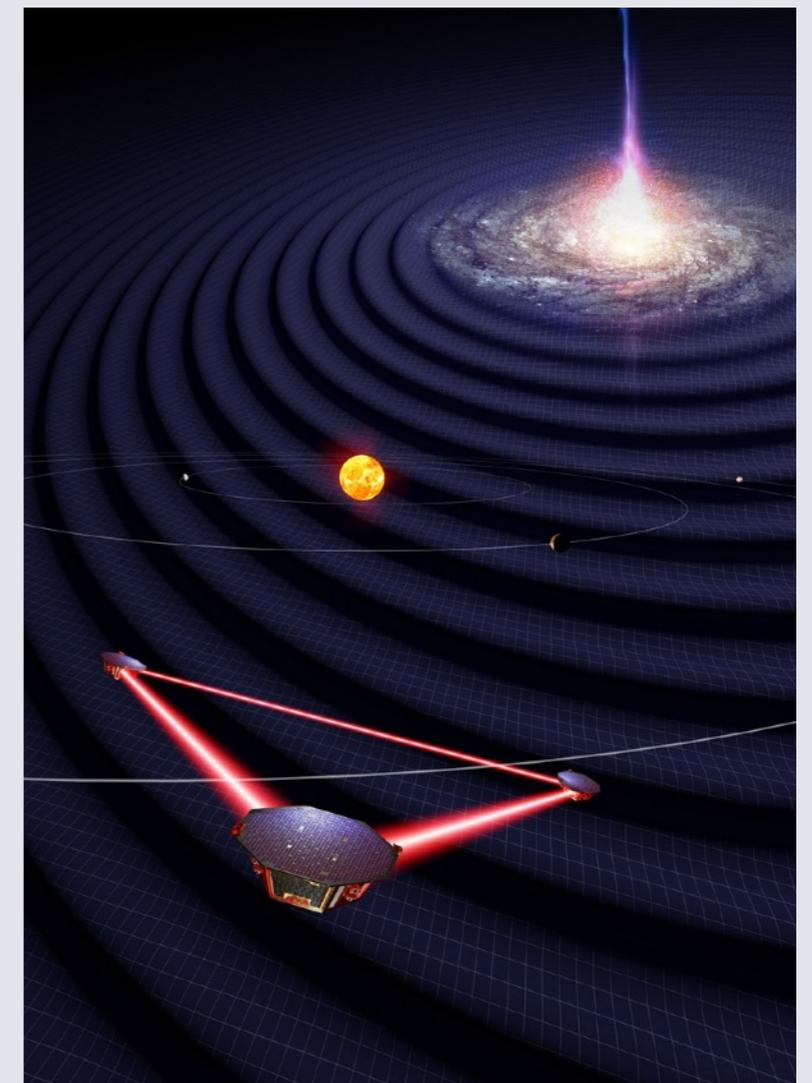
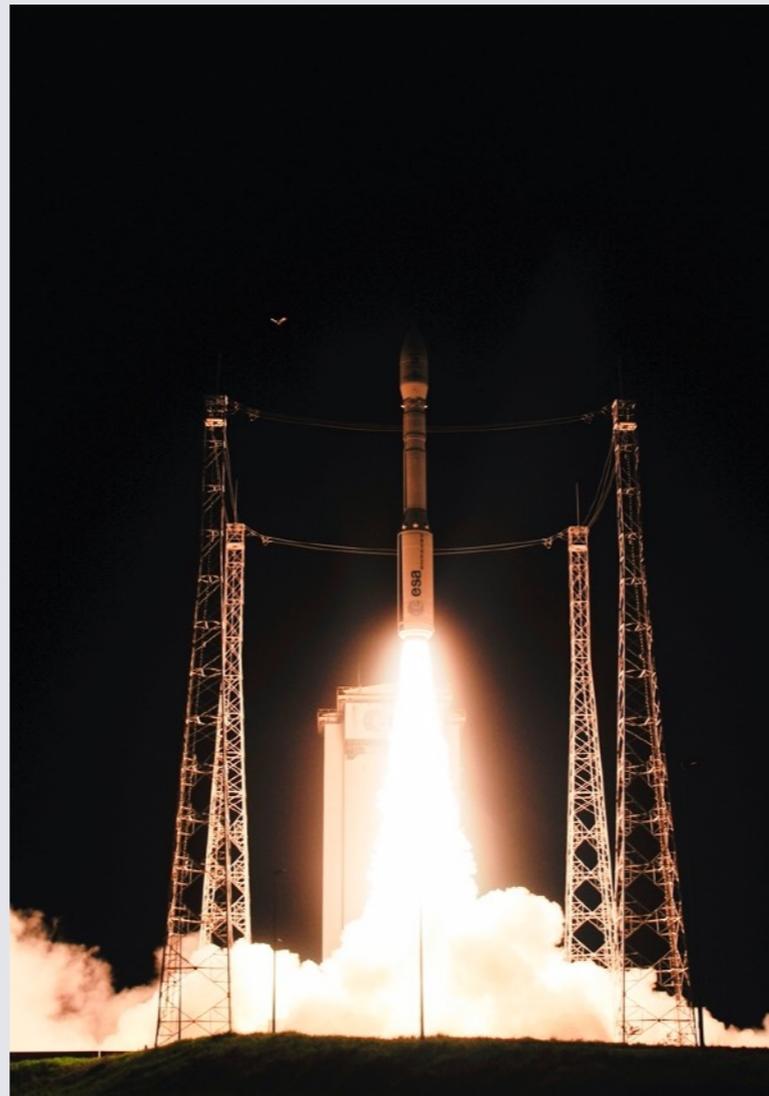
LISA

Assembler/tester une chaîne complète de détection
Mesurer et modéliser la performance

Cryogénie/physique du solide/
électronique/mécanique
optique

Tout est fait en laboratoire

Petite collaboration.
Organisation projet quasi-inexistante.



Parcours

2009

QUBIC - Détecteurs pour le fond diffus cosmologique

Assembler/tester une chaîne complète de détection
Mesurer et modéliser la performance

*Cryogénie/physique du solide/
électronique/mécanique
optique*

**Tout est fait en
laboratoire**

**Petite collaboration.
Organisation projet
quasi-inexistante.**

2014

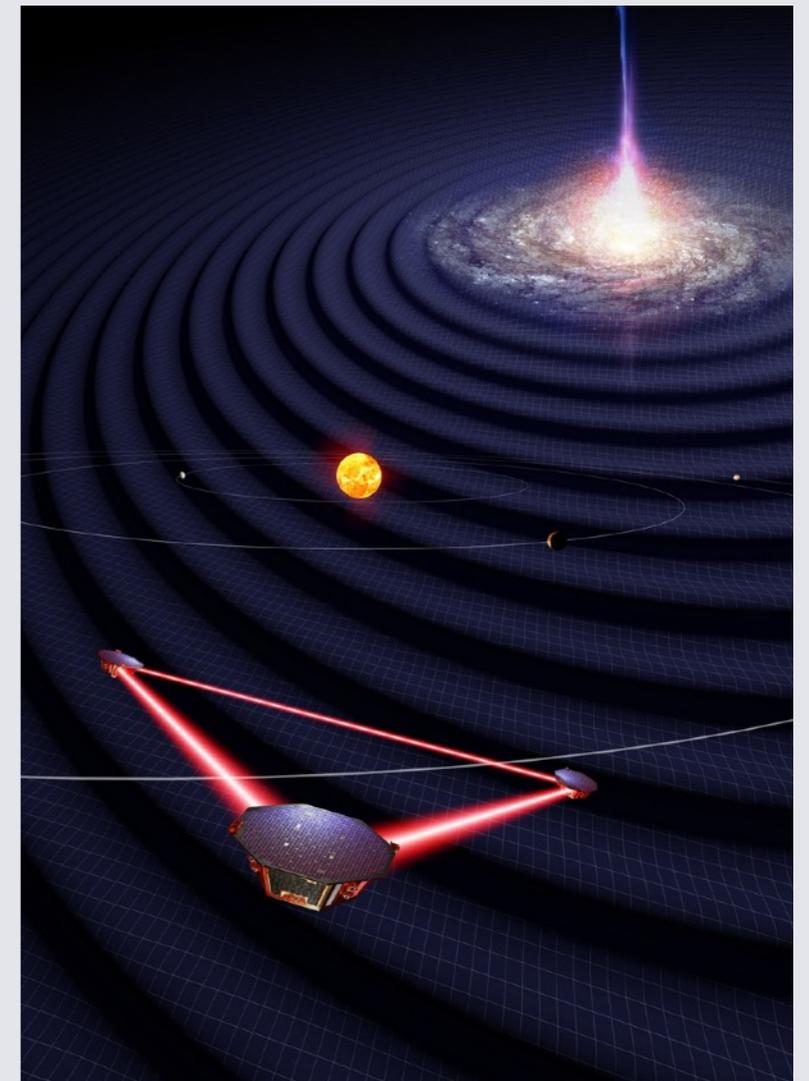
LISA Pathfinder

En charge de la validation des micro propulseurs
Valider et comprendre les performances globales de l'instrument

**Opérations
Enorme support
logistique.
Forte intégration
Agences/Industrie/
Labos**

2017

LISA



Parcours

2009

QUBIC - Détecteurs pour le fond diffus cosmologique

Assembler/tester une chaîne complète de détection
Mesurer et modéliser la performance

*Cryogénie/physique du solide/
électronique/mécanique
optique*

**Tout est fait en
laboratoire
Petite collaboration.
Organisation projet
quasi-inexistante.**

2014

LISA Pathfinder

En charge de la validation
des micro propulseurs
Valider et comprendre les
performances globales de
l'instrument

**Opérations
Enorme support
logistique.
Forte intégration
Agences/Industrie/
Labos**

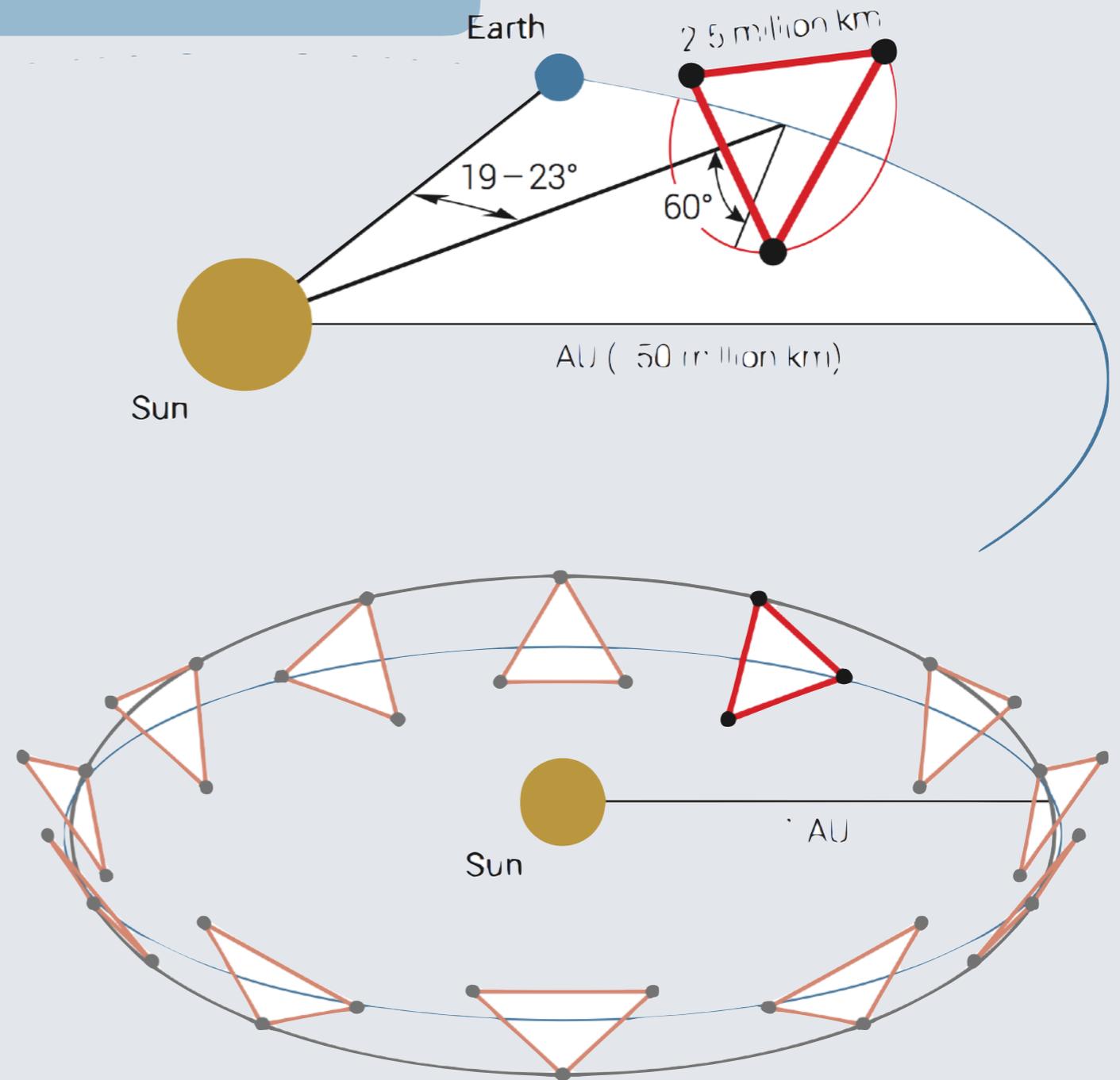
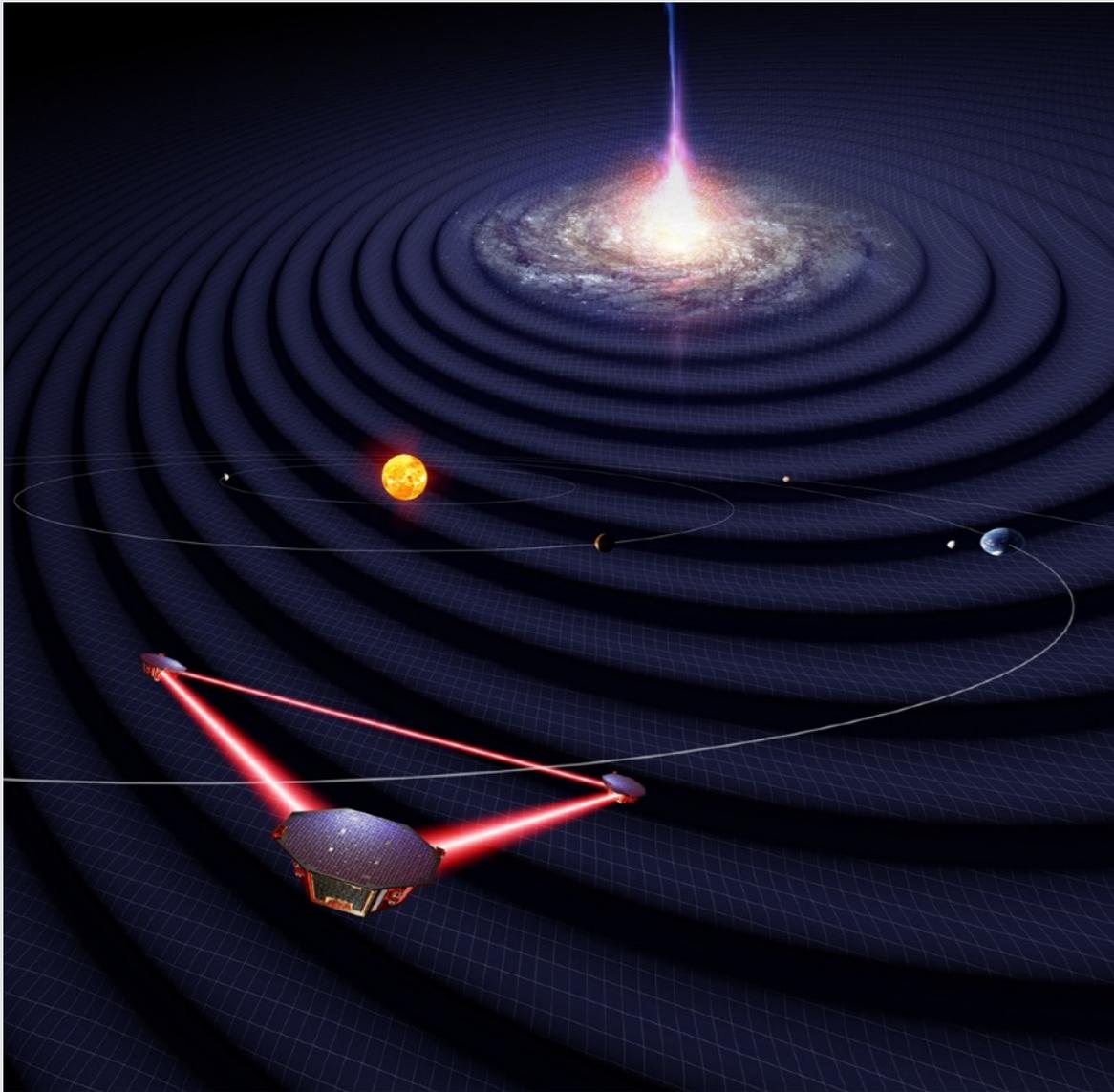
2017

LISA

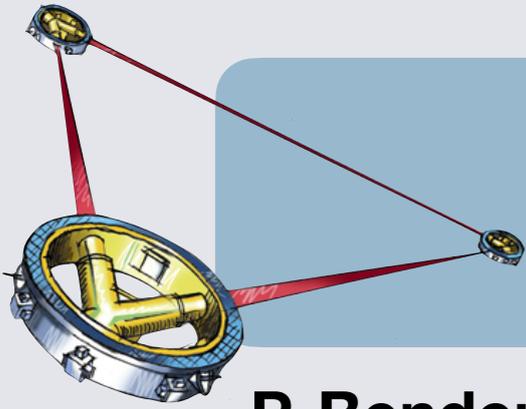
Budget de bruit,
« performance
management »,
spécifications

**Mission Large
Organisation en
construction.
Rôle et interface en cours
de définition.**

LISA détecteur d'ondes gravitationnelles



- 3 Satellites identiques séparés de 2.5 Millions km
- Orbite Héliocentrique (50millions km de la terre)
- Six liens lasers - variation de distance de $\sim \text{pm} \sqrt{\text{Hz}}$ sur une bande de fréquence $20\mu\text{Hz} - 1\text{Hz}$



LISA : un long historique

P. Bender, C Misner, R. Pound, R. Weiss: Sub-Panel on relativity and gravitation, Management and Operations Working Group for Shuttle Astronomy.

1974

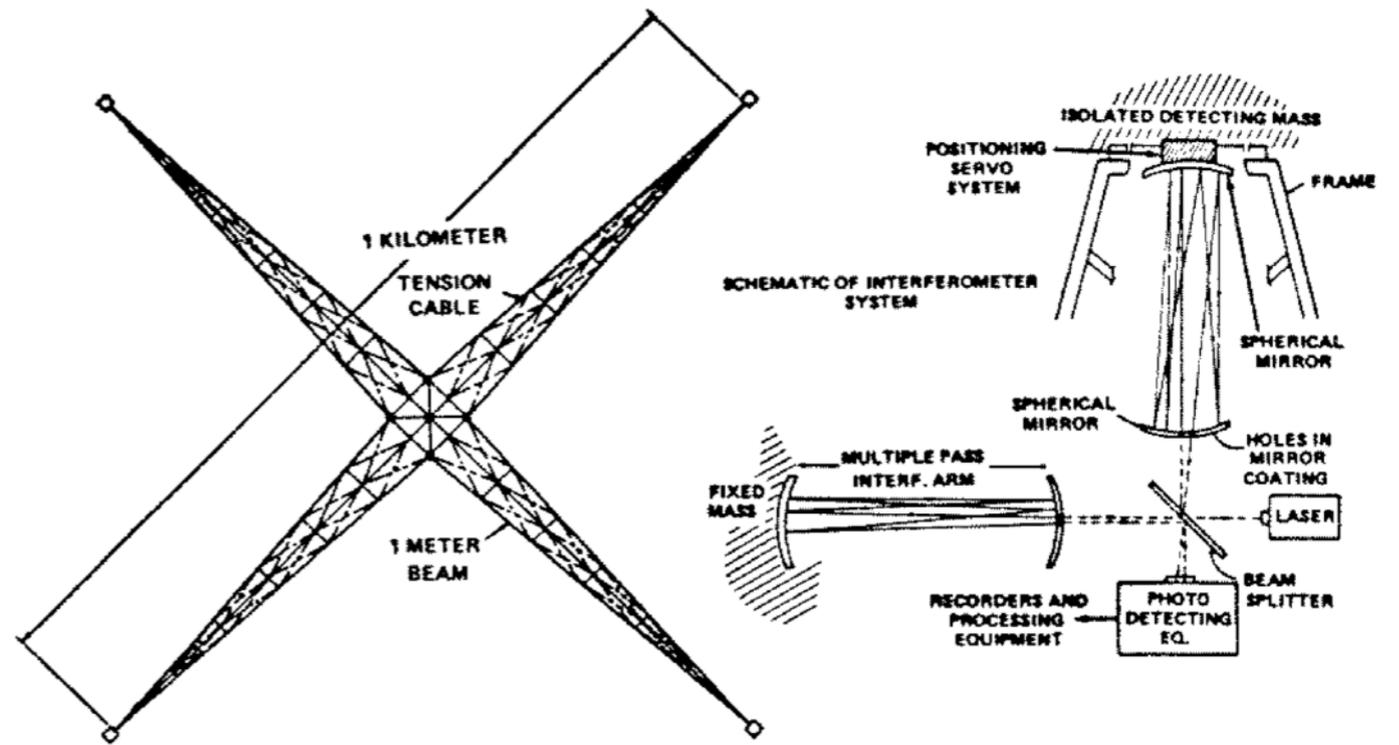
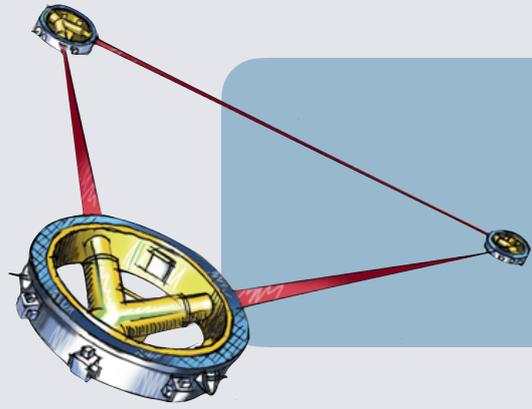
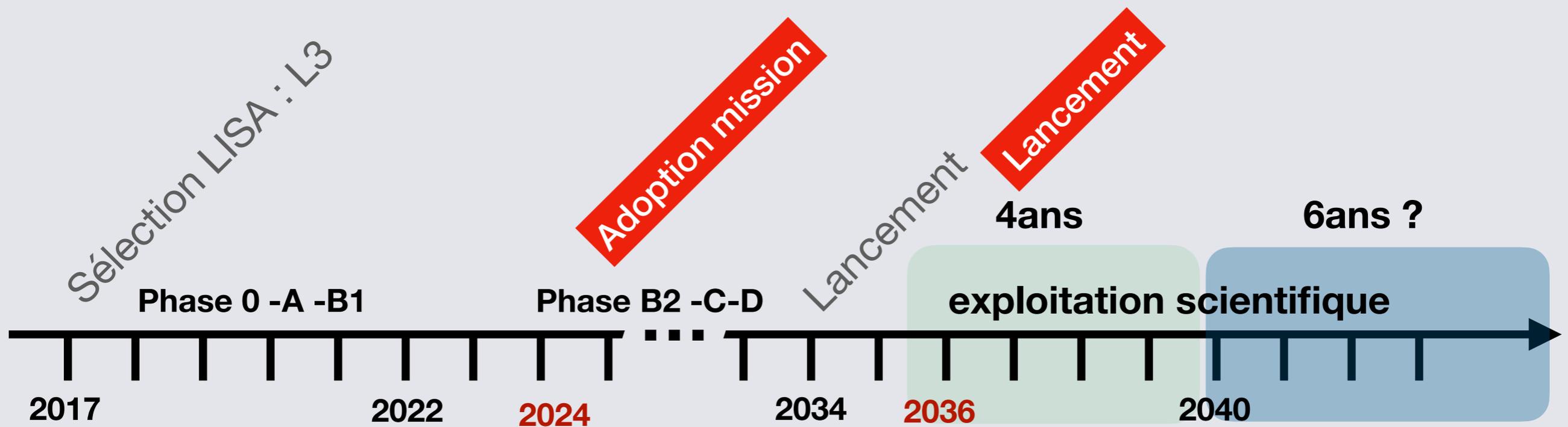


Figure 2.3 Conceptual design of the Gravitational Wave Interferometer (GWI). Left: GWI structure after deployment in low-Earth orbit. Right: Schematic of the interferometer system.

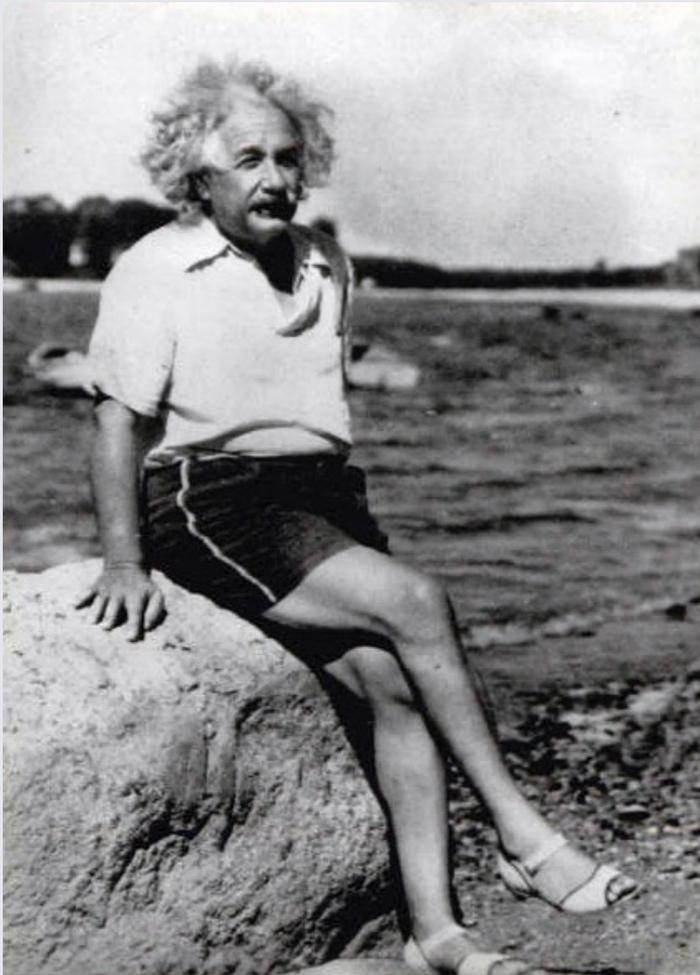


LISA : un long historique

- 1974 : Première étude NASA
- 1993 : Proposal ESA/NASA - 4 satellites / chute libre
- 1997/1998 : Etudes LISA - 3 satellites
- **2005 : Début LISA France - Pierre Binetruy**
- 2011 : Projet Européen NGO - Retrait de la NASA
- 2013 : Sélection du thème l'Univers Gravitationnel



Un peu de Science

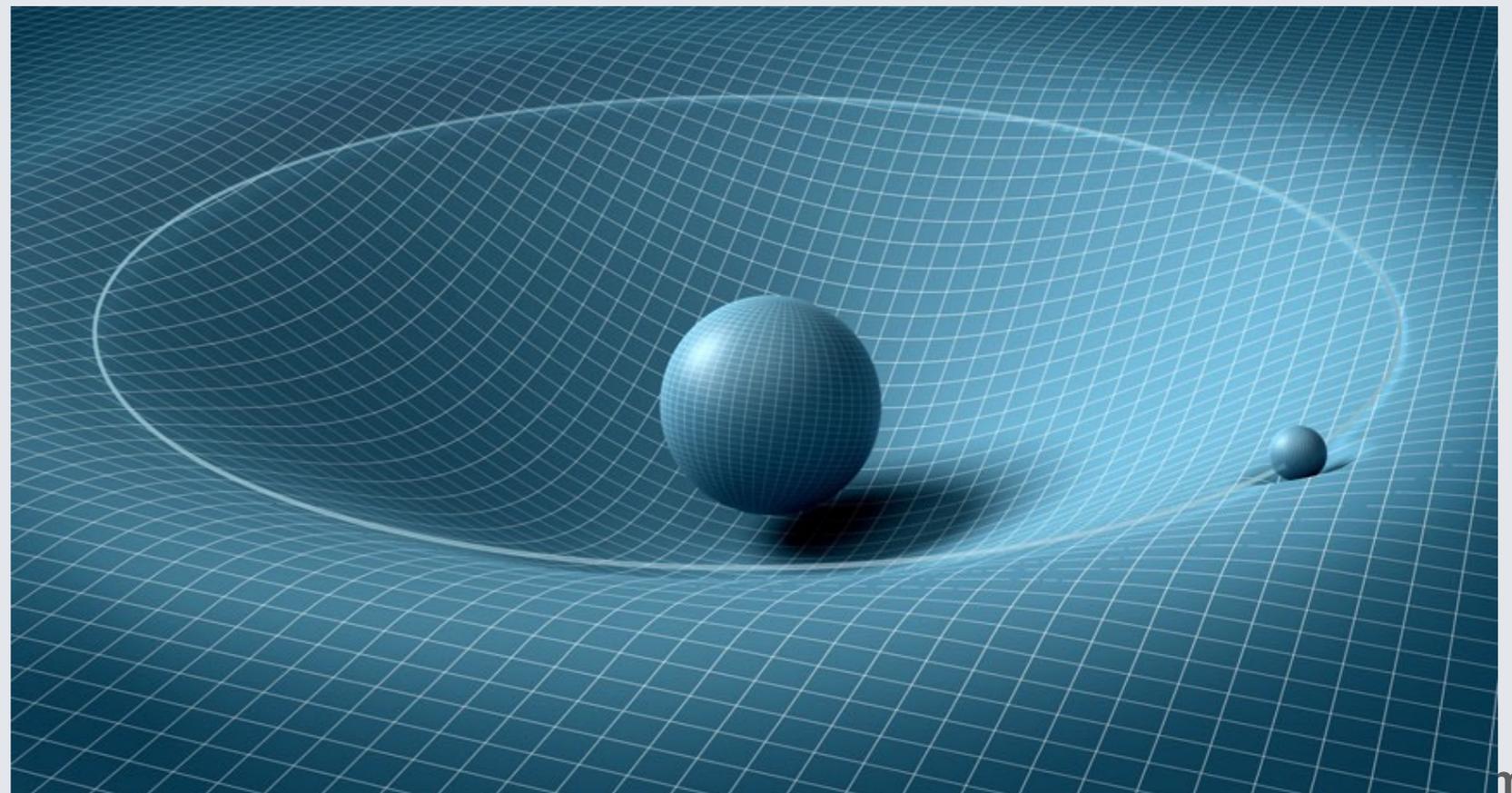


1915 : Relativité Générale

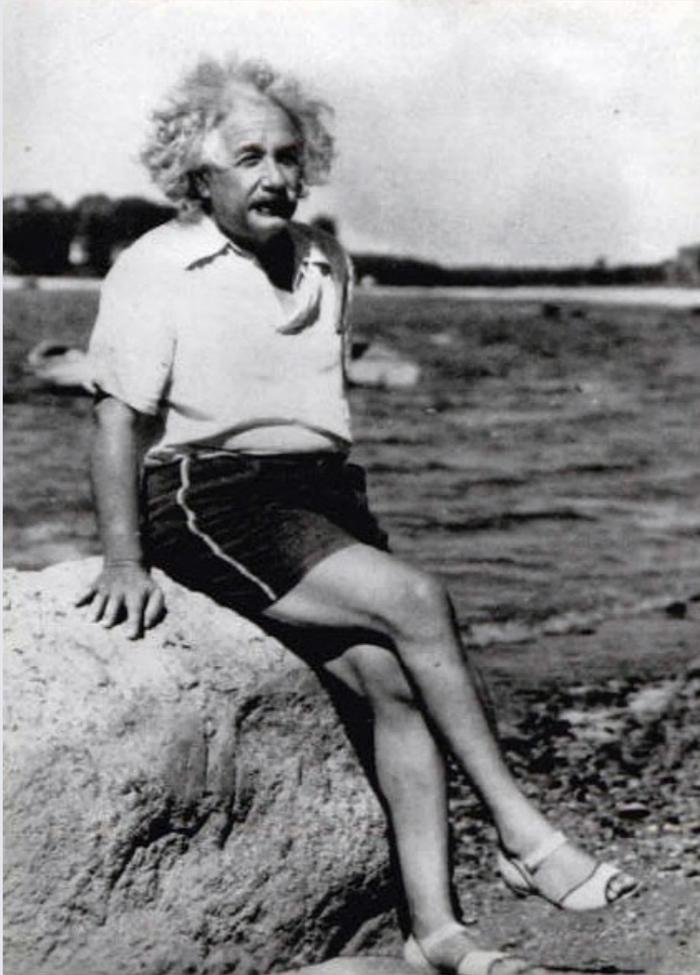
“Matter tells spacetime how to curve;

Spacetime tells matter how to move.”

John Wheeler



Un peu de Science



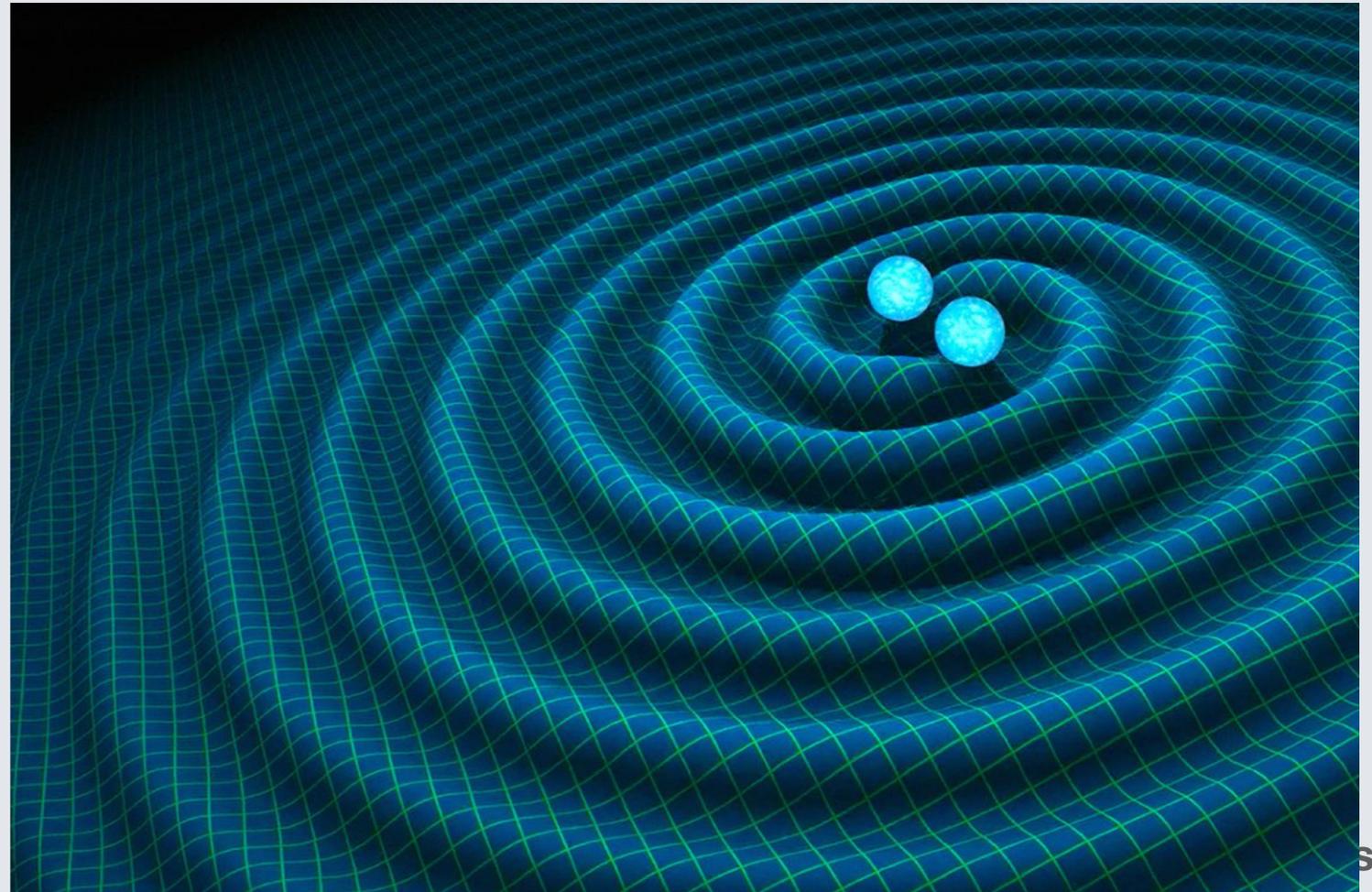
On 25 November 1915, Albert Einstein held his seminal lecture before the Prussian Academy of Sciences in Berlin, which ended with the words: “Thus, the general theory of relativity as a logical edifice has finally been completed.”

“Matter tells spacetime how to curve;

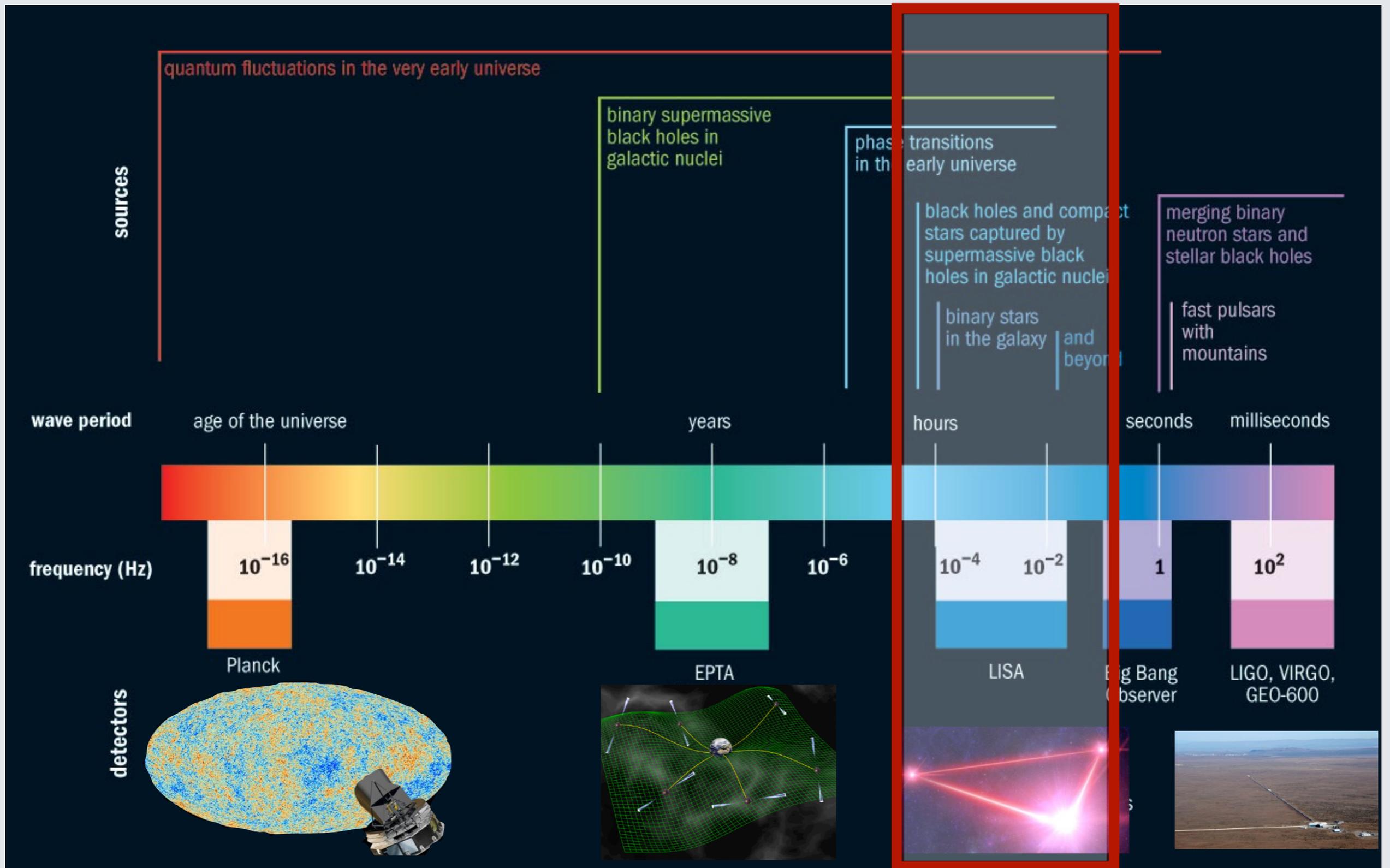
Spacetime tells matter how to move.”

John Wheeler

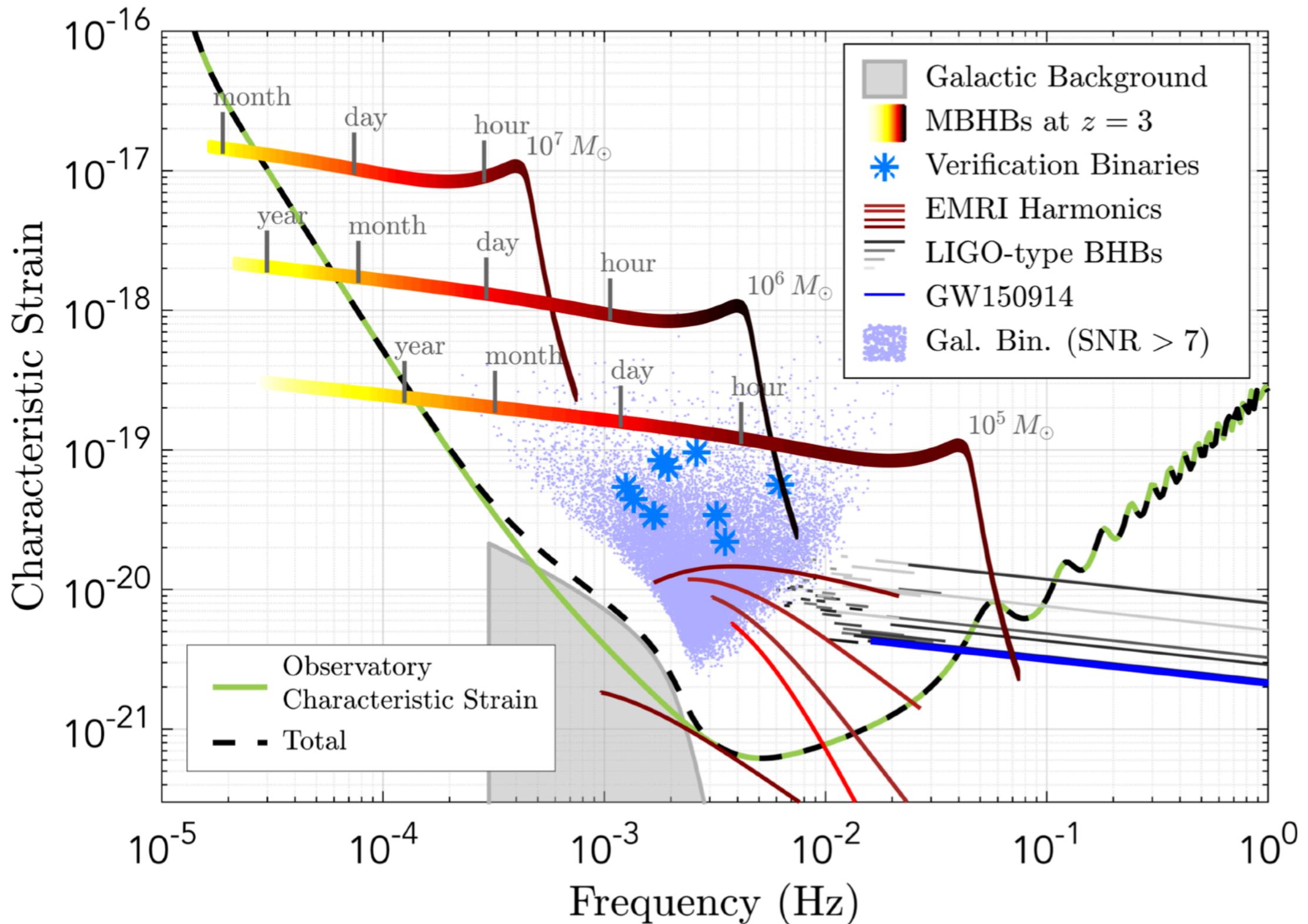
The first direct observation of gravitational waves was made on 14 September 2015



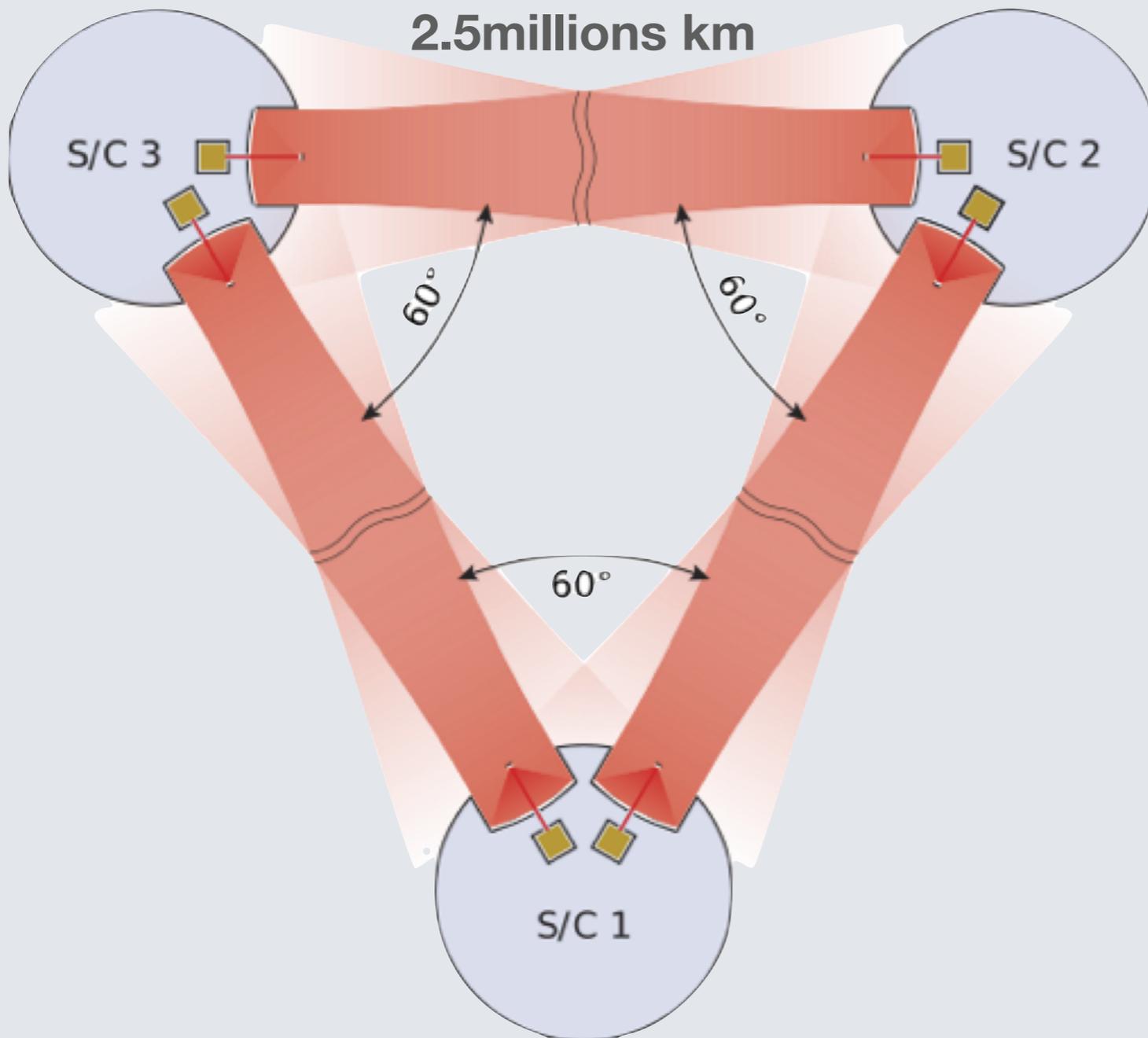
Gravitational Wave Spectrum



Strain Sensitivity



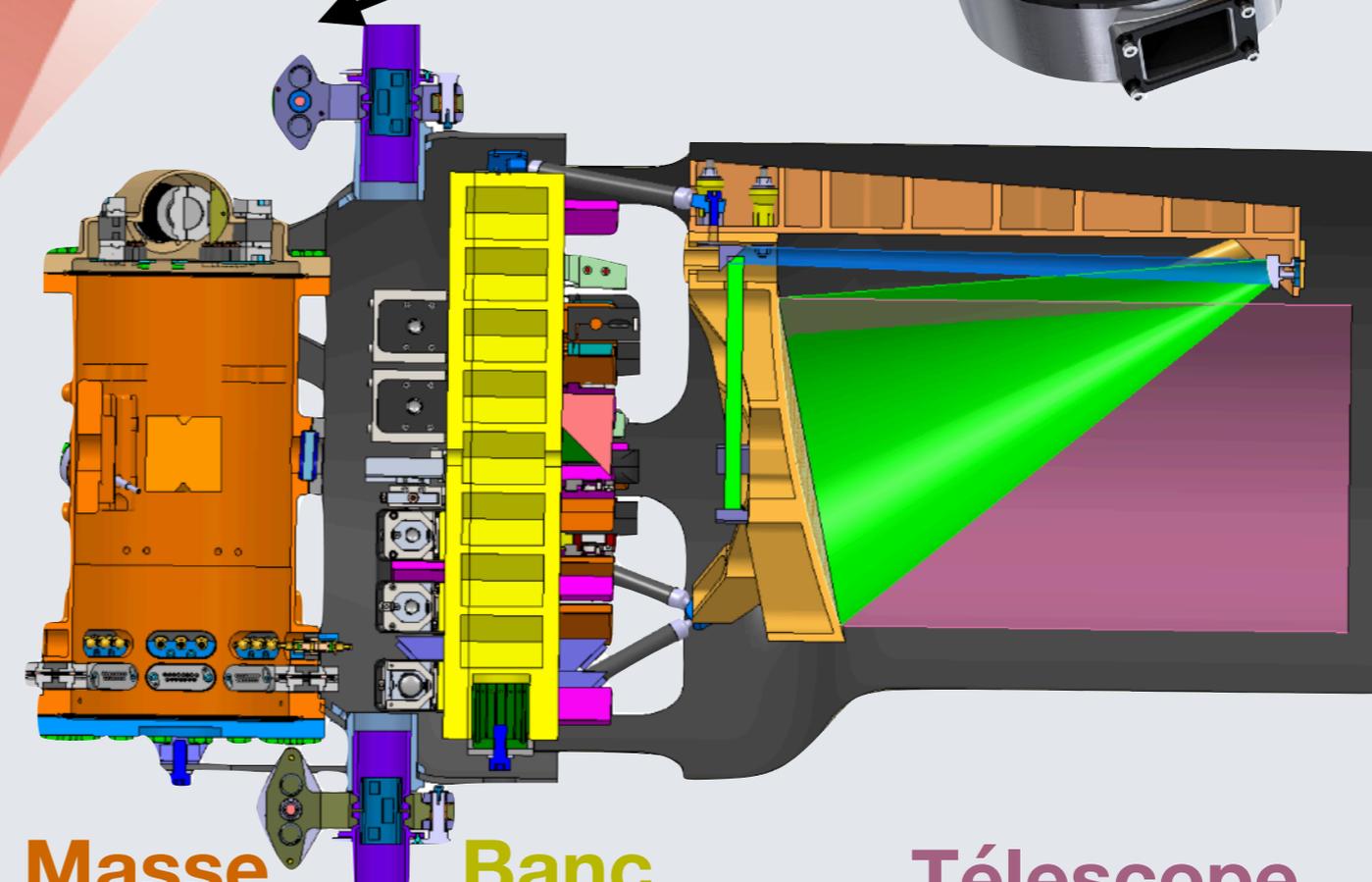
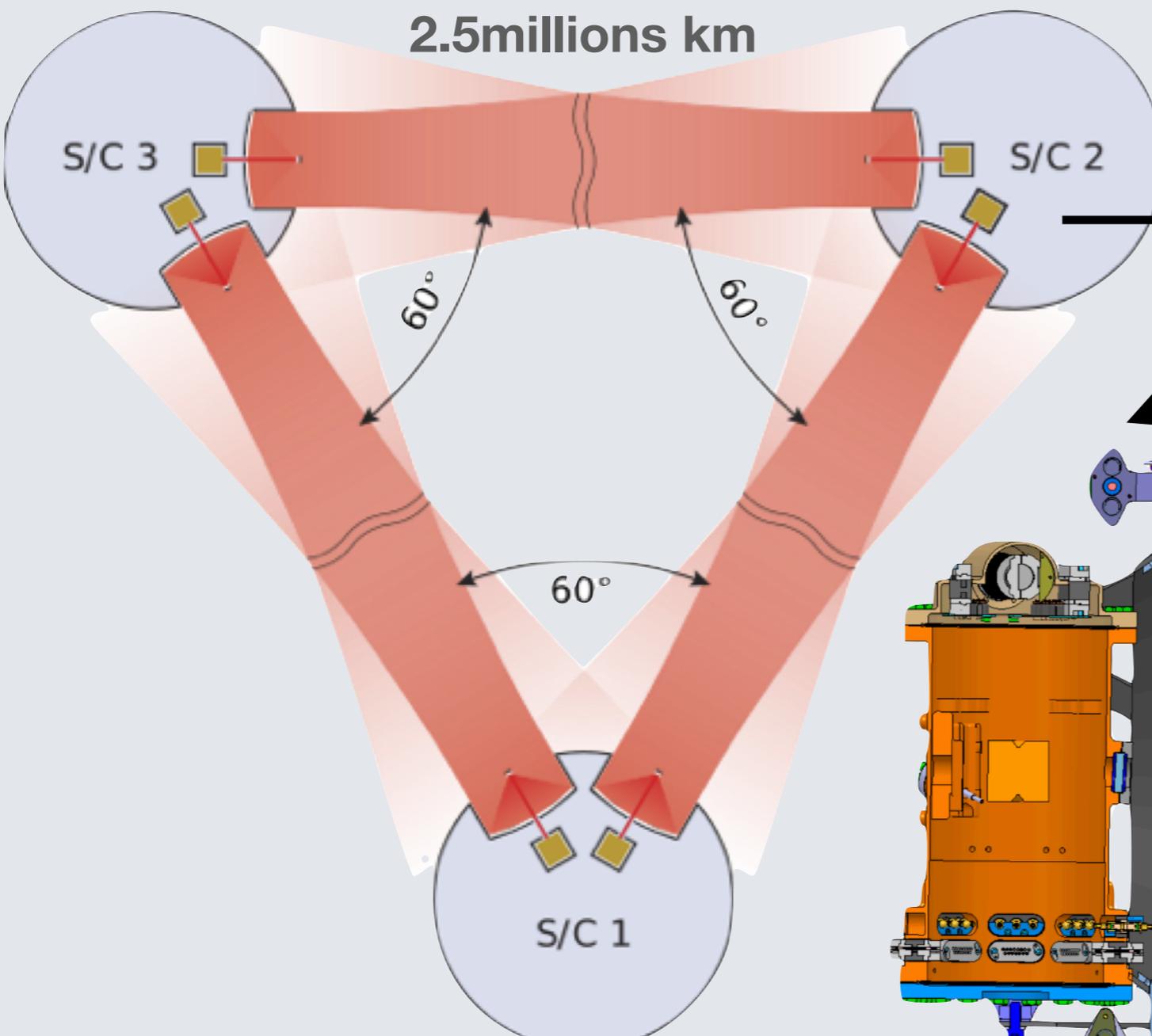
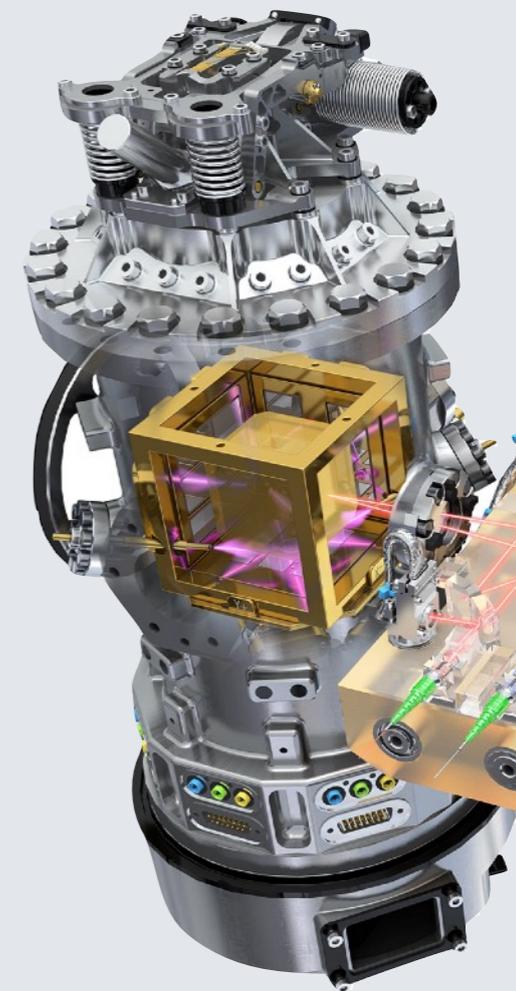
LISA : mesure



- Masses Tests = miroirs
- Or/platine 2kg - 4cm
- 2 masses par Satellite



LISA : mesure



**Masse
test**

**Banc
Optique**

Télescope

Contexte de la Mission LISA

1. Mission Large de l'ESA (partenaire NASA): spatial ~ 2Milliards
2. Mission très intégrée - Performances/fonctionnalités plateforme/charge utile interdépendante. L'instrument, c'est la constellation.
3. Performance vol non atteignable au sol à cause du bruit sismique.
4. Mission découverte:
 - Cas scientifique est une cible mouvante.
 - Instrument nouveau que partiellement testé en vol (LISA Pathfinder)
5. Mini-série.
6. Reconstruction des Interféromètres au sol. La validation de la performance ne peut être faites qu'après des étapes de post-processing sol. Forte interface segment sol/vol.

Adoption

Phase 0

Mission analysis and identification

2017

Sélection

Phase A

Feasibility

2018

2 competitive
Primes Industry

Phase B

Preliminary Definition

2021

2024 adoption

Phase C

Detailed Definition

Phase D

Qualification and Production

Phase E

Utilisation

Phase F

Disposal

- Construction and operation are funded.
- Contributors identified
- Signature of MLA
- Requirements documents for each subsystem
- Preliminary Design
- Critical System at TRL 5/6
- At the end put under configuration control

Requirements - Proposal LISA to ESA 2017

LISA Laser Interferometer Space Antenna

Parameter	Value	Driver or Justification
Nominal mission duration	4 years	Duration of the main mission needed to satisfy the science case
Extended mission duration	10 years	Improved parameter determination
Orbits	3 heliocentric orbits	Minimise perturbations
Transfer time	< 18 months	Minimise time before start of operations
Range to Earth	50-65 Gm	Minimise orbital perturbations without restricting communications
Arm length	2.5 Gm	Resolvability of light objects
Number of Links	6 links/3 arms	Polarisation sensitivity and redundancy
Measurement Bandwidth	Req: $100 \mu\text{Hz} \leq f \leq 0.1 \text{ Hz}$ Goal: $20 \mu\text{Hz} \leq f \leq 1 \text{ Hz}$	Detection of MBHBs at low frequencies, detection of SOBHBs at high frequencies.
S/C Power Requirements	$\leq 760 \text{ W}$	Based on concept design, at End of Life
Laser Power	2 W (out of the fiber)	Interferometer noise
Telescope Diameter	30 cm	Interferometer noise
System wavefront quality	$\lambda/20 \text{ RMS}$	Interferometer noise and jitter coupling
Data latency	< 1 day	Detection of light objects before merger
Communication Needs	334 MB/day	3.3 Hz data rate for 1 Hz bandwidth
Relative timing	$\leq 1 \text{ ns}$	Required for Time Delay Interferometry
Absolute timing	$\leq 3 \text{ ns}$	Required for Time Delay Interferometry
Phase measurement bandwidth	5-25 MHz	Phasemeter read-out noise
S/C jitter $\delta x, \delta y, \delta z$	$\leq 5 \text{ nm}/\sqrt{\text{Hz}}$ [white]	Test mass acceleration noise and IFO cross coupling
S/C jitter $\delta \theta, \delta \eta, \delta \phi$	$\leq 10 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}\sqrt{1 + (3 \text{ mHz}/f)^4}$	Minimise coupling of S/C jitter to interferometer readout
S/C DC mispointing	$\leq 10 \text{ nrad}$	Minimise coupling of S/C jitter
Temperature stability of core payload	$\leq 10^{-7} \text{ K}/\sqrt{\text{Hz}}\sqrt{1 + (10 \text{ mHz}/f)^4}$	Pathlength noise for the optical bench and telescope
Temperature stability in GRS	$\leq 10^{-4} \text{ K}/\sqrt{\text{Hz}}$ at 10^{-4} Hz	Gas pressure noise on TM
Magnetic Field at GRS	$\leq 10 \mu\text{T DC}$ and $\leq 650 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$	Test mass acceleration noise
Magnetic Field Gradient at GRS	$\leq 5 \mu\text{T/m DC}$ and $\leq 250 \text{ nT/m}/\sqrt{\text{Hz}}$	Test mass acceleration noise
DC S/C induced torque on TM	$\leq 1 \text{ nrad/s}^2$	Test mass acceleration noise
DC S/C induced differential force	$\leq 1 \text{ nm/s}^2$	Test mass acceleration noise
Charge accumulation on TM	$\leq 10^7 e^-$	Test mass acceleration noise
Maximum pressure within GRS	$\leq 1 \mu\text{Pa}$	Test mass acceleration noise

Hierarchie des docs de specs ESA

Science Requirement Document

Science level noise below
Have the capability to detect the inspiral of MBHBs in the interval between a few $10^2 M_{\odot}$ and a few $10^5 M_{\odot}$ in the source frame, and formation redshifts between $z = 10$ and $z = 15$.

Modèle de Performance et Budget d'erreur

Mission Requirement Document

Mission level noise below
Measurement bandwidth
Arm Length

Space Segment Requirement Document

Science Ground Segment Requirement Document

Stabilité de la plateforme
Data rate
Equilibrage gravitationnel
Mesure du temps/datation

Correction du bruit laser
Correction des mouvements de la plateforme
Correction des bruits d'horloges

Telescope Interface Requirement Document (IRD)

Interferometric Detection System (IRD)

Chaque document de specs correspond à une grosse feuille excel avec 100 à 300 items (requirements performance/fonctionnels/interface/environnements etc...)

Gravitational Reference Sensor (IRD)

Laser (IRD)

Phase A: aider à l'établissement des spécifications

- 63 input noises
- 122 input parameters
- ~ 60 models

INPUTS

Noises

Parameters

Constants

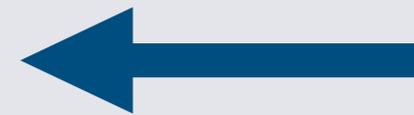
Sub-systems noises
and parameters.
Environnement

Modèles Quasi-analytique de l'instrument

Shot Noise
Chain Noise
TTL

Brownian Noise
Actuation Noise
Modulation error
etc....

Allocation

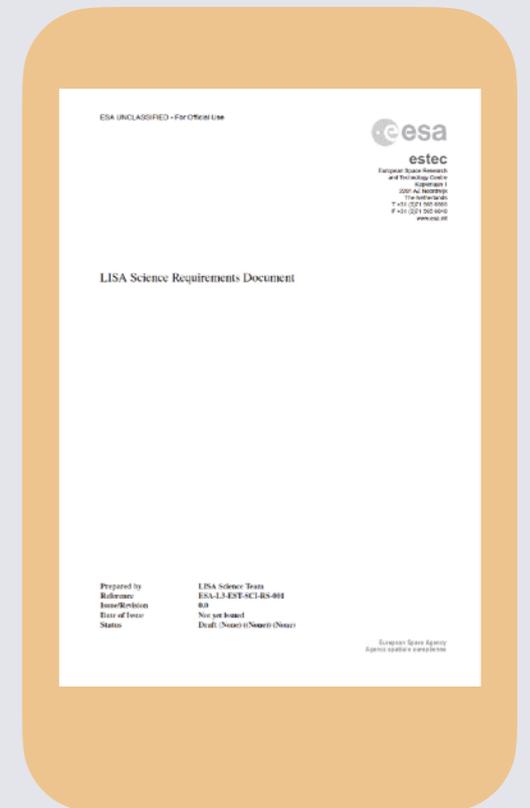


MBE: Model
Based
Estimate

Configuration

Requirements
Current Best Estimate
Worst case
Optimum
etc...

OUTPUTS



TDI Constellation
noise

Structure: Test Mass IFO Electronic Noise

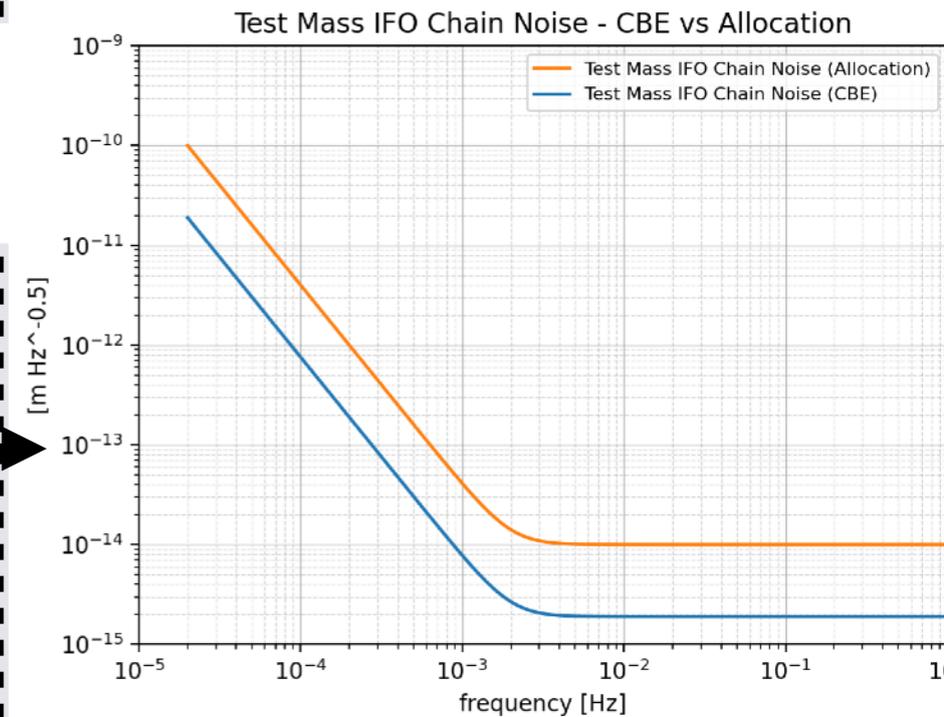
INPUTS

MODEL

PRODUCTS

Derived Noise

$$\tilde{S}_{\text{TMI,Chain}} = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{\tilde{S}_{I_{\text{seg,el}}} \sqrt{N_{\text{Seg,Loc}} \cdot N_{\text{PD,Loc}}}}{R_{\text{PD}} \epsilon_{\text{Carr}} \sqrt{2\eta_{\text{het,Loc}} P_{\text{LO,TM}} P_{\text{TX,TM}}}}$$



```

'Noises' :
  • TMI equivalent input current noise density of the electronics [A Hz^-0.5]
    description : Equivalent input current noise density of the QPD electronics in the Test
    comments : The noise shape is constrained to meet the DWS noise requirements. Current p
    combination with low-capacitance photodiodes (3.5 pF per segment) already feature a mod
    pA/sqrt(Hz).
    tagname : QPR-010 (2)
    varname : s_I_seg_el_tmi

'Derived Parameters' :
  • Carrier Efficiency []
    description : Set the portion of power in the main carrier signal
    comments : To Be Confirmed: Sum of Power for sideband modulation (17%) LH.Reg.Opt.115
    Modulation 2%LH.Reg.Opt.120.
    tagname : PERFP-0241
    varname : eps_car

  • LO power at the Main Test Mass IFO [W]
    description : Local Oscillator power at the main photo-receivers of the TM IFO
    comments : None
    tagname : PERFP-0516
    varname : P_LO_TMI

  • Tx power at the Main Test Mass IFO [W]
    description : TX-beam fraction impinging at the main photo-receivers of the Test Mass I
    comments : None
    tagname : PERFP-0515
    varname : P_TX_TMI

'Parameters' :
  • lambda = 1.0645e-06 [[m]]
    description : Laser Centre Wavelength
    comments :
    documentation : AD23_LASER_ESA-LISA-EST-PL-RS-009_ilr0
    tagname : LH.Reg.Opt.10

  • N_pd_TM = 2.0 [[]]
    description : Number of active photoreceivers for the TM IFO
    comments : Cold Redundancy
    documentation : LISA-UKOB-INST-RP-005, Optical Bench Design Report
    tagname : PERFP-0405

  • N_seg_TM = 4.0 [[]]
    description : Number of segments per photoreceiver in the TM interferometer
    comments :
    documentation : LISA-LCST-INST-IF-001 i1.1 QPR Interface Description Document
    tagname : PERFP-0420

  • R_pd = 0.69 [[A W^-1]]
    description : QPD Quantum Efficiency
    comments :
    documentation : SRON-LISA-QPR-RP-0001_TRL6_Design_Report_vs1.00
    tagname : QPD-010

  • HE_loc = 0.82 [[]]
    description : Heterodyne Efficiency in Test Mass and Reference IFO
    comments :
    documentation : LISA-UKOB-INST-TN-004-i2.2, LISA TTL and Optical Alignment An
    tagname : PERFP-0320
    
```

Phase A: aider à l'établissement des spécifications

- 63 input noises
- 122 input parameters
- ~ 60 models

INPUTS

Noises

Parameters

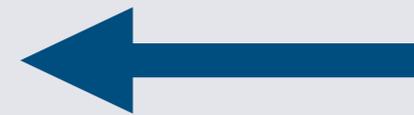
Constants

Sub-systems noises
and parameters.
Environnement

Modèles Quasi-analytique de l'instrument

Shot Noise
Chain Noise
TTL
Brownian Noise
Actuation Noise
Modulation error
etc....

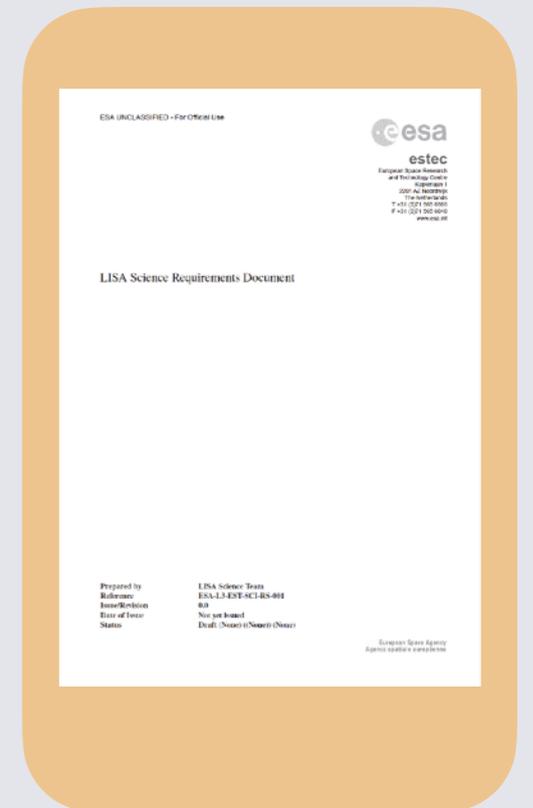
Allocation



MBE: Model
Based
Estimate

Configuration
Requirements
Current Best Estimate
Worst case
Optimum
etc...

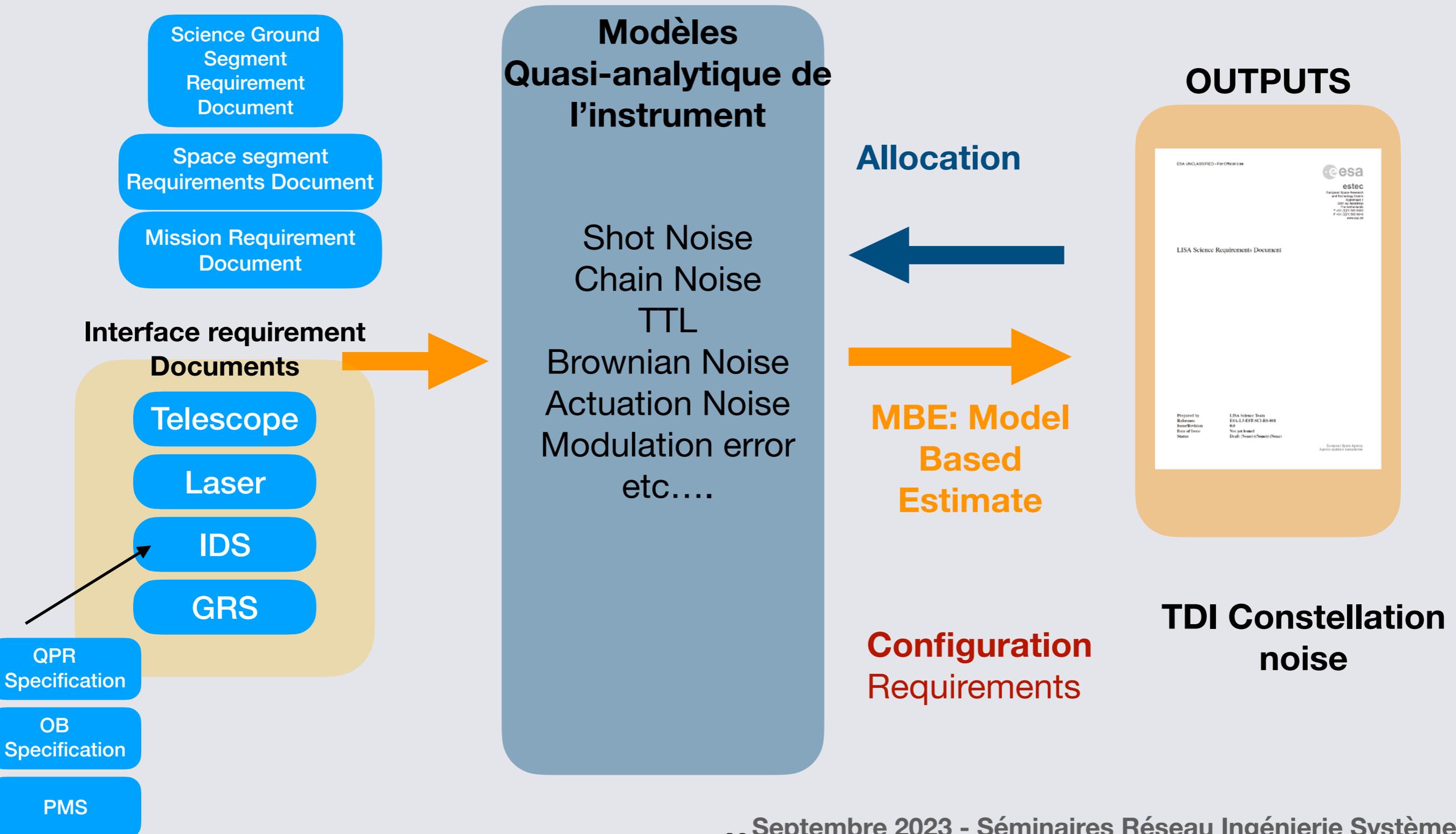
OUTPUTS



TDI Constellation
noise

Phase B1: tracer les spécifications et s'assurer de leur cohérence

- 63 input noises
- 122 input parameters
- ~ 60 models



Phase A : Faisabilité

- Alimenter les modèles avec des entrées réalistes (mesures démonstrateur/pire cas/héritage LISA Pathfinder etc...).
- Développer des modèles plus réalistes
- Montrer que la mission est faisable.
- Proposer des spécifications
- Première analyse de risque performance

Phase B1 : Design Préliminaire

- L'ESA a structuré sa hiérarchie des spécifications en fonction du projet.
- Chaque spécification est « challengée » (cout, commitments des partis pris)
- Mapping des spécifications - décomposition des modèles (au prix parfois de la physique)
- Plan de vérification
- Montrer que les specs sont cohérentes
- Montrer les points de tensions/analyse de risques

Exemple ~~et Outil~~

Trade off Projet : Laser Radiation Pressure



Puissance
optique (IDS)

Fluctuation
d'amplitude du
Laser (laser - NASA)

$$S_g^{LASER} \approx \left(\frac{2P_{TM}}{m_{TMC}} \right)^2 S_{RIN,InBand}$$

Bruit d'accélération
du laser.
(System Space
Segment ESA/
Prime)

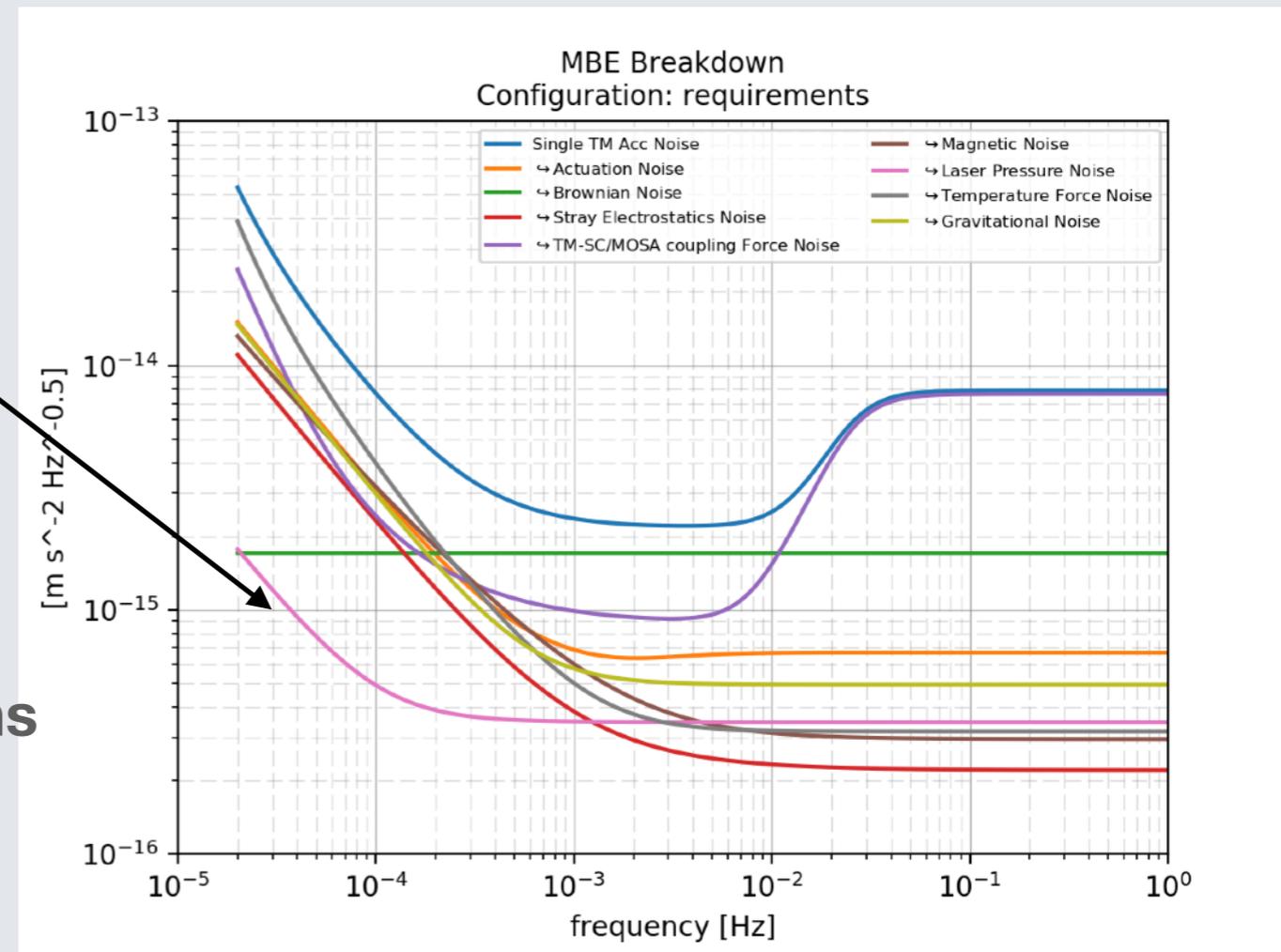
Masse Test
Mass (GRS)

Trade off Projet : Laser Radiation Pressure



Demande de révision de la spécification NASA car le test est trop compliqué au sol (stabilité thermique)

- On relâche la specs en sachant pertinemment que ca sera mieux en vol.
- Mais pas autant que demandé. Le but: prendre en compte les effets de corrélations au niveau constellation en marge systeme.



Conclusion

- Un petit aspect de l'Ingénierie système - orientés performance mission sur une mission large et en phase amont.
- Fixer une baseline science et instrument. Système qui se rigidifie.
- Ecriture des specs (dépendance/tracabilité/risque/marge/vérification/« détails »). Tout est une question d'équilibre comme en musique.
- Sur les gros projet on suit le cycle en V. Ce qui ne veut pas dire qu'à l'intérieur de chaque phase on n'est pas « agile ».
- Dialogue permanent bottom/up Top/down. L'aspect hiérarchique n'apparaît qu'à la fin.