

電気情報工学特別講義 第6回

道村唯太

東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻

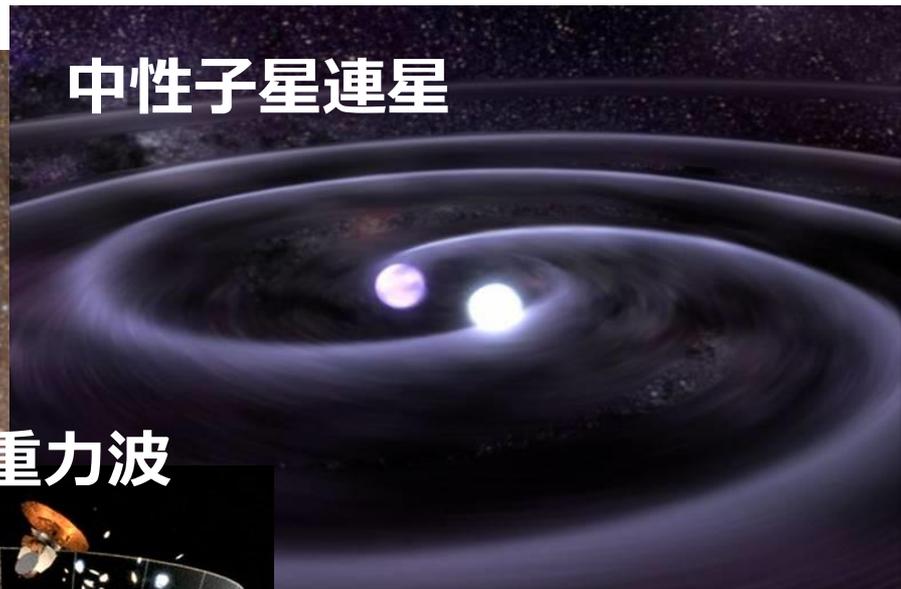
講義スケジュール

- 10月3日(月)
 - 3限 第1回 重力波の初検出について
 - 4限 第2回 重力波望遠鏡KAGRAの紹介
- 10月4日(火)
 - 2限 第3回 干渉計と共振器の原理
 - 3限 第4回 パワースペクトルと伝達関数
 - 4限 第5回 様々な雑音とその低減方法
- 10月5日(水)
 - 2限 第6回 重力波望遠鏡のこれから
 - 3限 第7回 精密測定技術の応用
 - 4限 第8回 「重力波天文学の夜明けとKAGRA」

3日目のレポート

- 重力波観測でどのようなことがわかるかをひとつ取り上げ、簡単にまとめてください
- 名前と学籍番号、実施日を必ず書くこと！

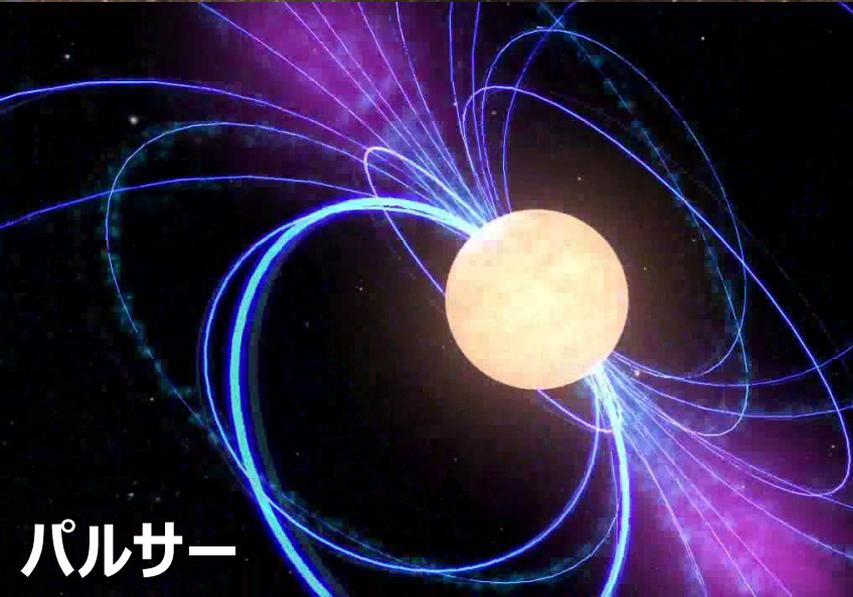
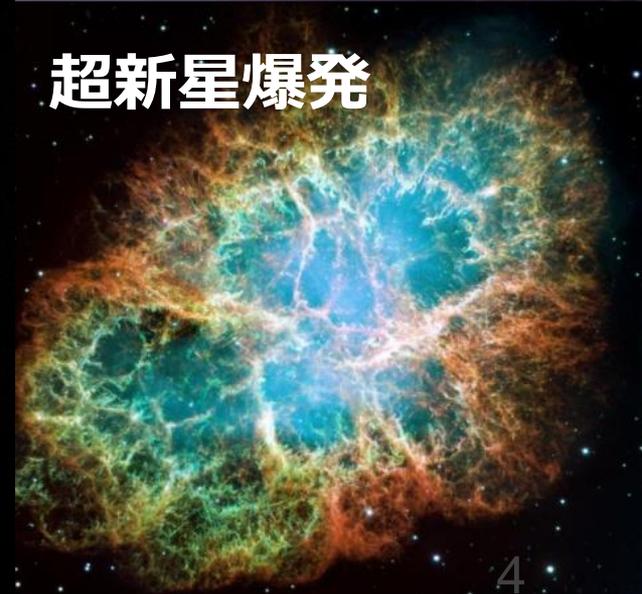
重力波の波源



原始重力波

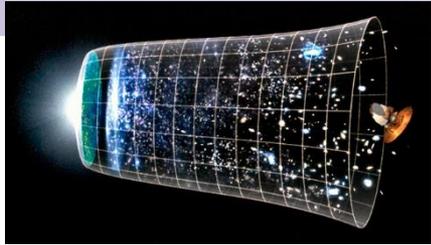


超新星爆発



様々な周波数による観測(重力波)

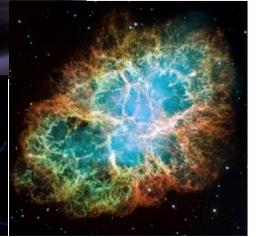
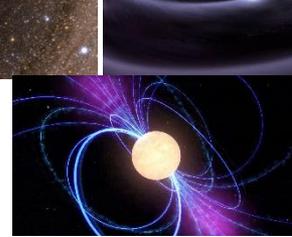
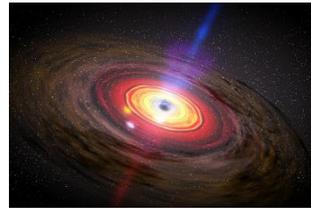
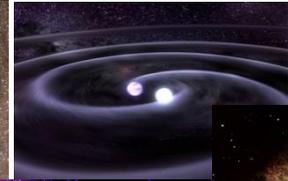
原始重力波



質量大



質量小



周期 宇宙年齢

年

時間

秒

ミリ秒

周波数
Hz

10^{-15}

10^{-12}

10^{-9}

10^{-6}

10^{-3}

1

地上干渉計 10^3

Pulsar timing



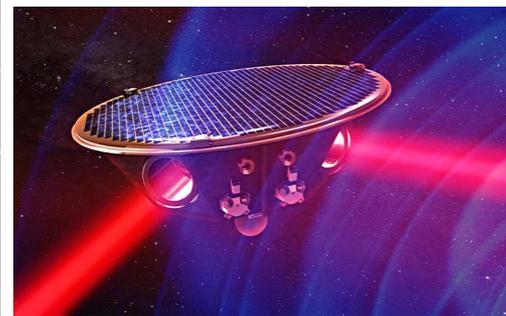
Doppler tracking



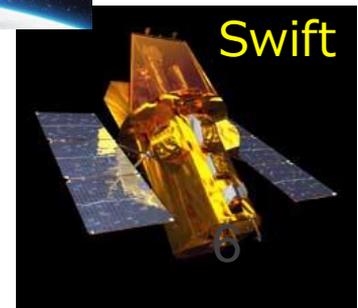
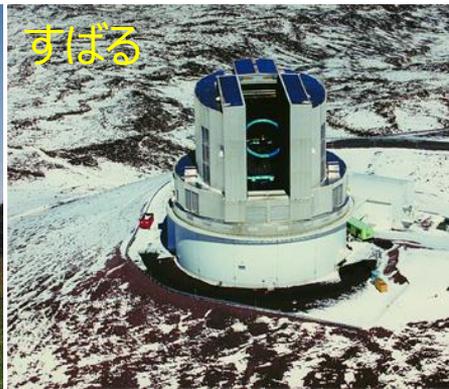
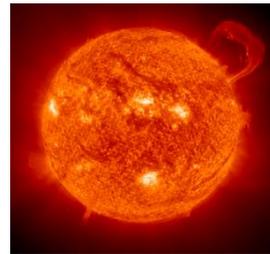
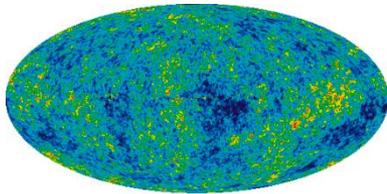
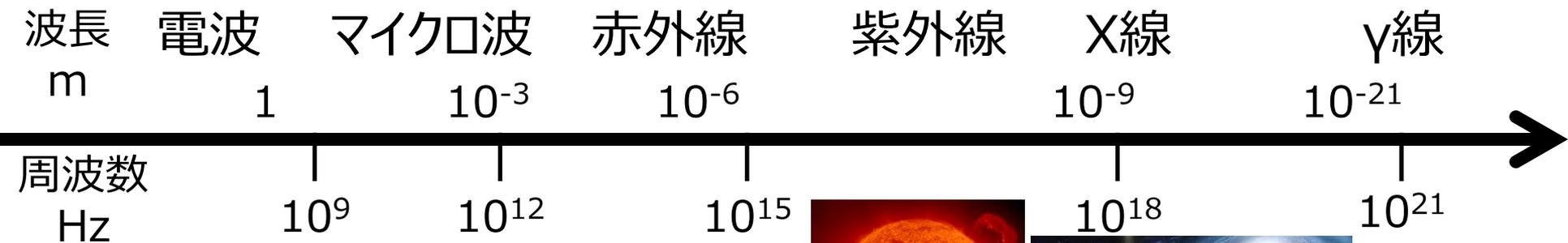
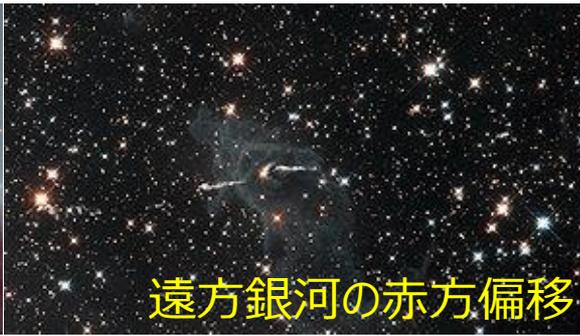
宇宙干渉計

共振型

CMB B-mode

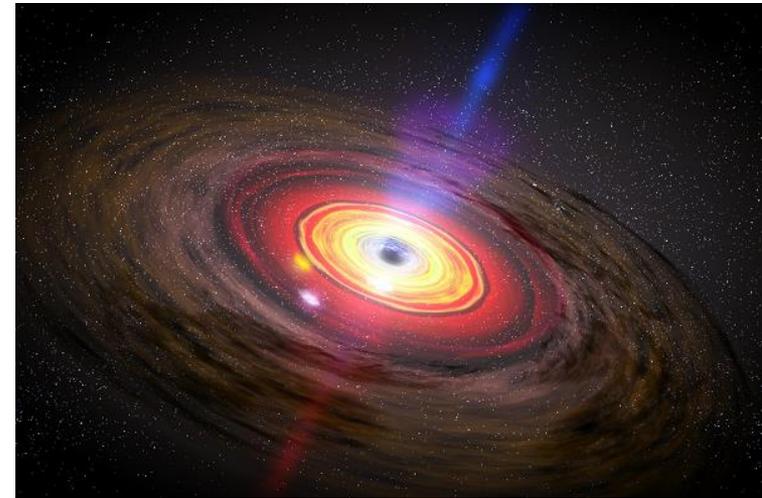


様々な周波数による観測(電磁波)



重力波天文学でわかること

- 原始重力波
インフレーション、宇宙の誕生と進化
- ブラックホール連星
超巨大ブラックホールの形成の謎
- 中性子星連星
高密度核物質の状態方程式
強磁場、強重力場
- 超新星爆発
重元素の起源
- 一般相対性理論の検証、重力理論
- 宇宙膨張の観測(標準音源としての重力波)
- 暗黒物質、未知の天体???



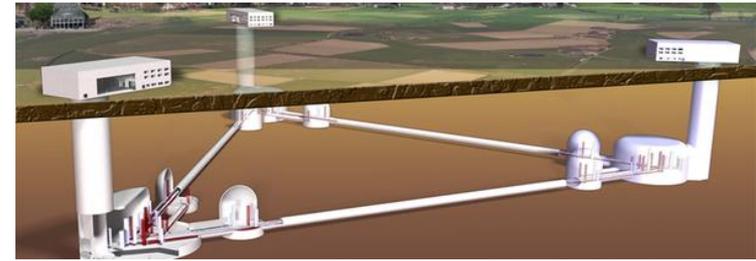
今回のお話

- 重力波望遠鏡のこれから
- 地上重力波望遠鏡
 - Einstein Telescope計画
 - Cosmic Explorer計画
 - 中性子星の状態方程式
- 宇宙重力波望遠鏡
 - eLISA計画
 - LISA Pathfinderの成功
 - DECIGO計画
 - 地上重力波望遠鏡との関係
 - 原始重力波
 - 宇宙膨張の観測



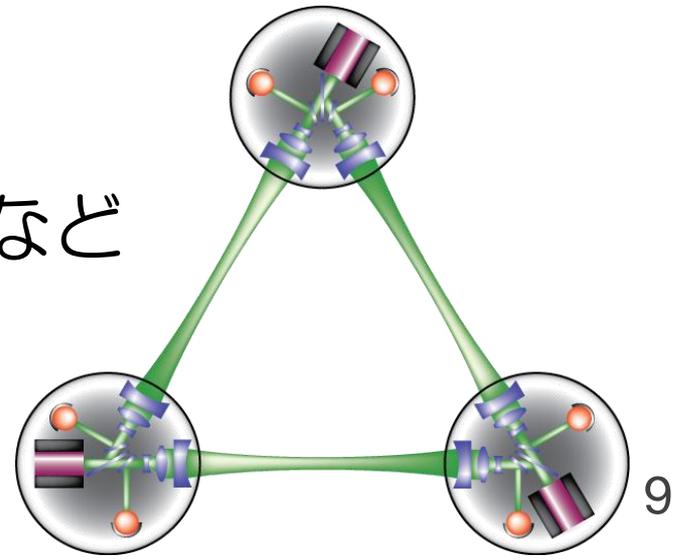
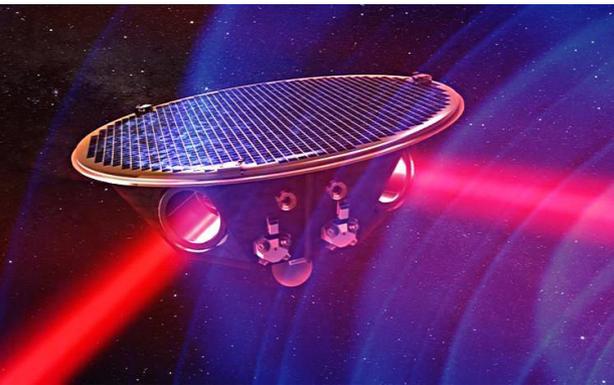
重力波望遠鏡のこれから

- **地上**重力波望遠鏡 (10 Hz ~ 1 kHz)
長基線長化(~10 km)、鏡の大型化
コーティングの改良
周波数依存スキューミング



- **宇宙**重力波望遠鏡 (0.1 mHz ~ 10 Hz)
地面振動がない、基線長を**長く**できる
→ 低周波数の重力波

原始重力波、
大質量BH連星など



地上重力波望遠鏡の将来計画

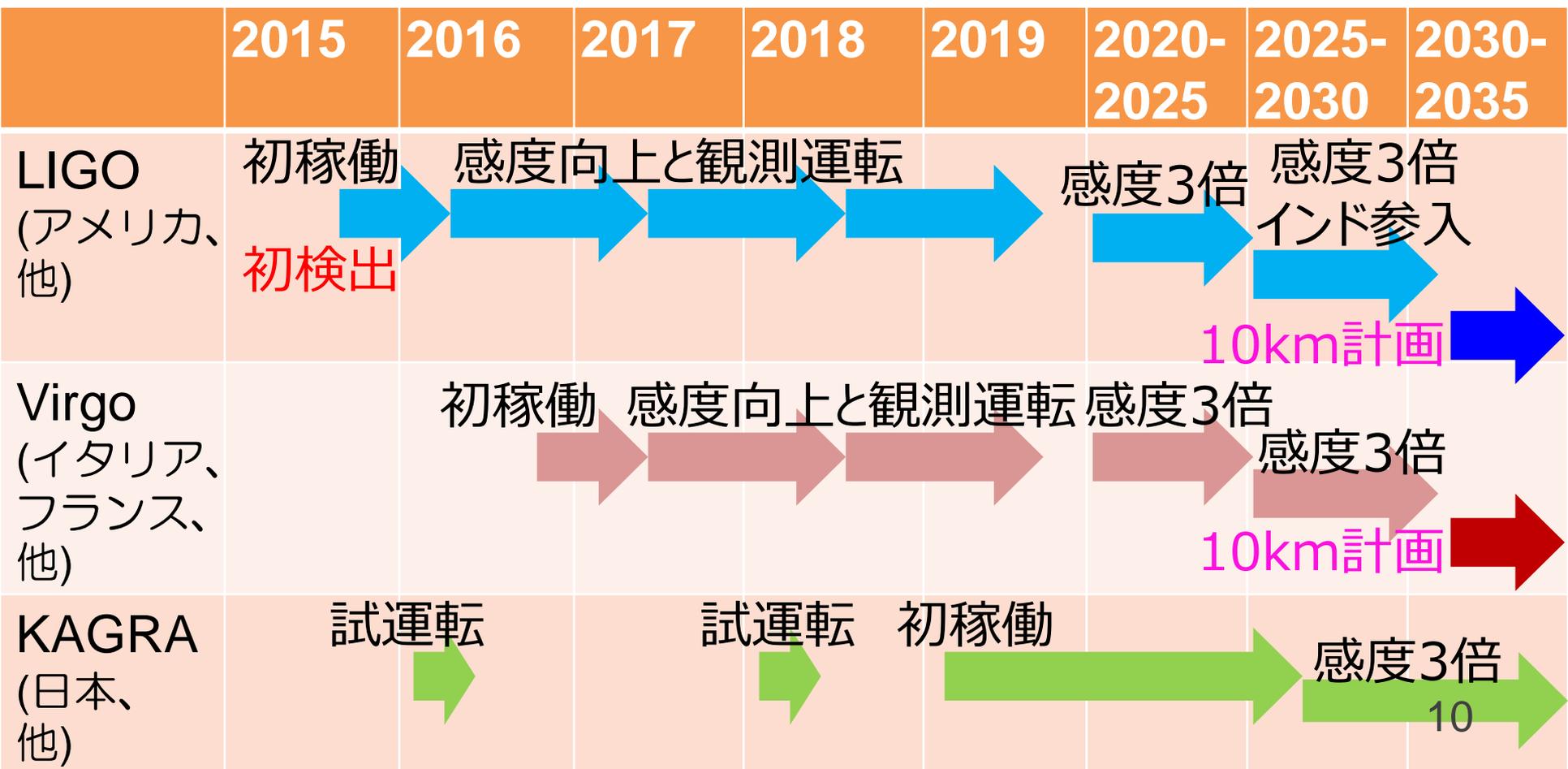
中性子星連星
からの重力波？

超新星爆発
からの重力波？

さらなる
ブラックホール連星の発見？

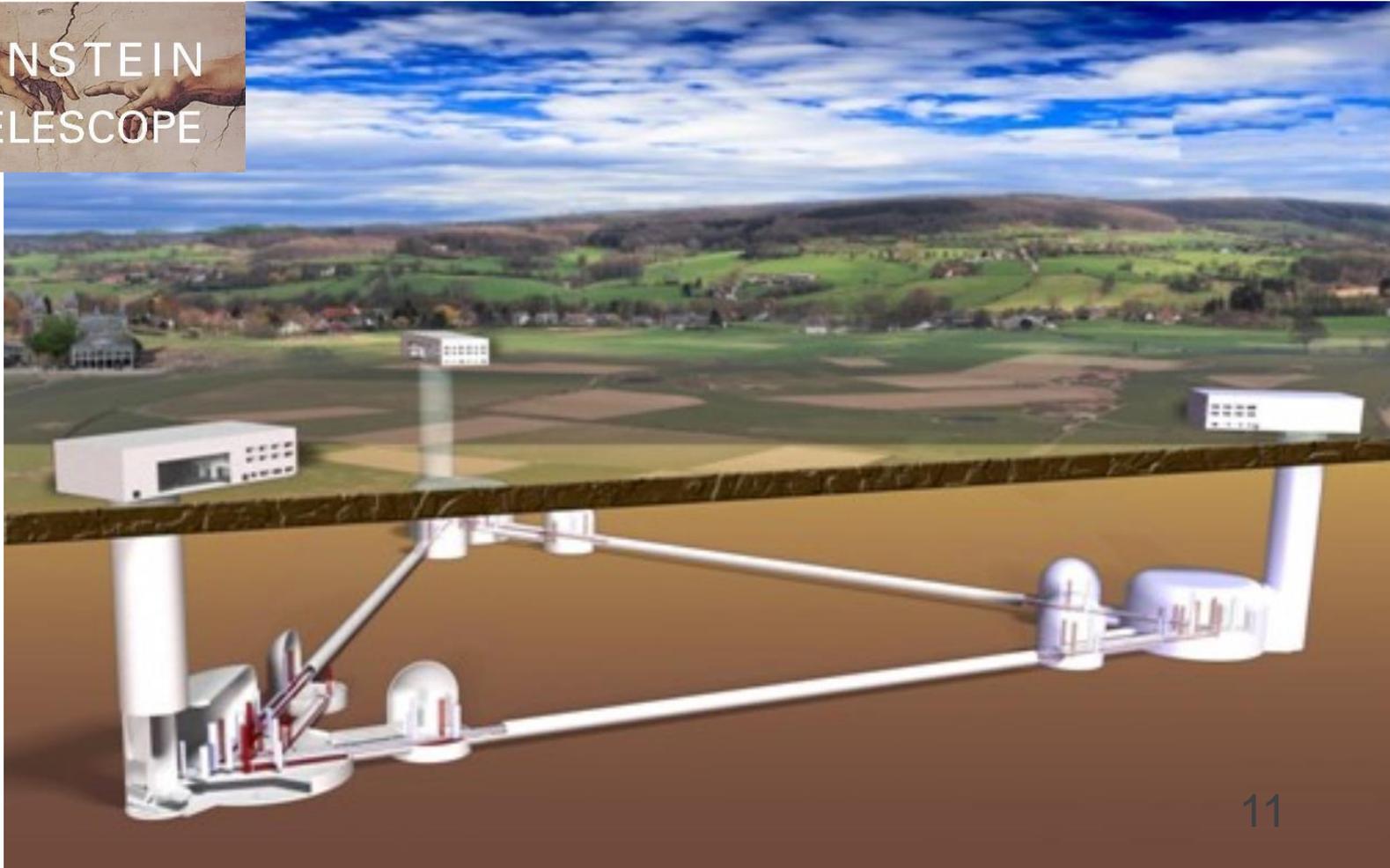
連星の
波源特定？

連星の形成
メカニズム解明？



Einstein Telescope

- 基線長10 km、**地下**、**低温**/常温、200 kg
- 三角形、Xylophone



Einstein Telescope

- 基線長10 km、地下、低温/常温
- 三角形、Xylophone

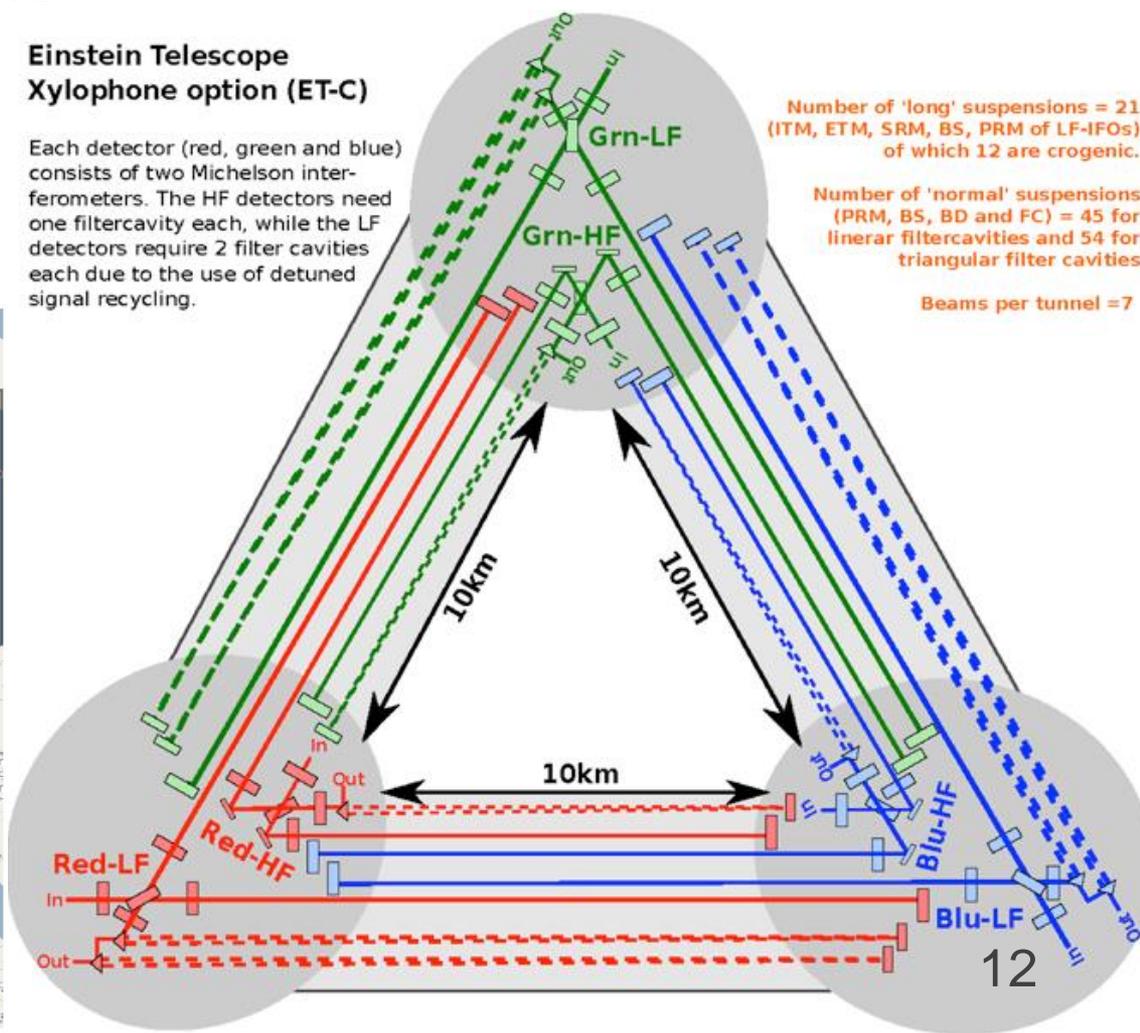


<http://www.et-gw.eu/etdsdocument>



Einstein Telescope Xylophone option (ET-C)

Each detector (red, green and blue) consists of two Michelson interferometers. The HF detectors need one filtercavity each, while the LF detectors require 2 filter cavities each due to the use of detuned signal recycling.



Number of 'long' suspensions = 21 (ITM, ETM, SRM, BS, PRM of LF-IFOs) of which 12 are crogenic.

Number of 'normal' suspensions (PRM, BS, BD and FC) = 45 for linear filtercavities and 54 for triangular filter cavities

Beams per tunnel = 7

ELiTES Project

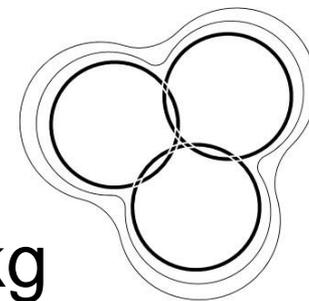
- ET-LCGT Telescopes: Exchange of Scientists
- 低温、地下建設



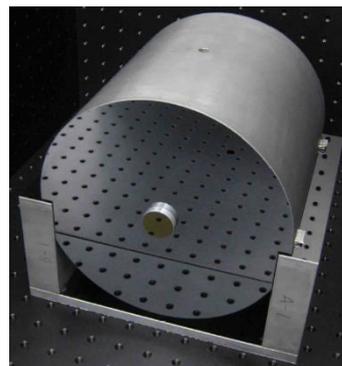
ELiTES



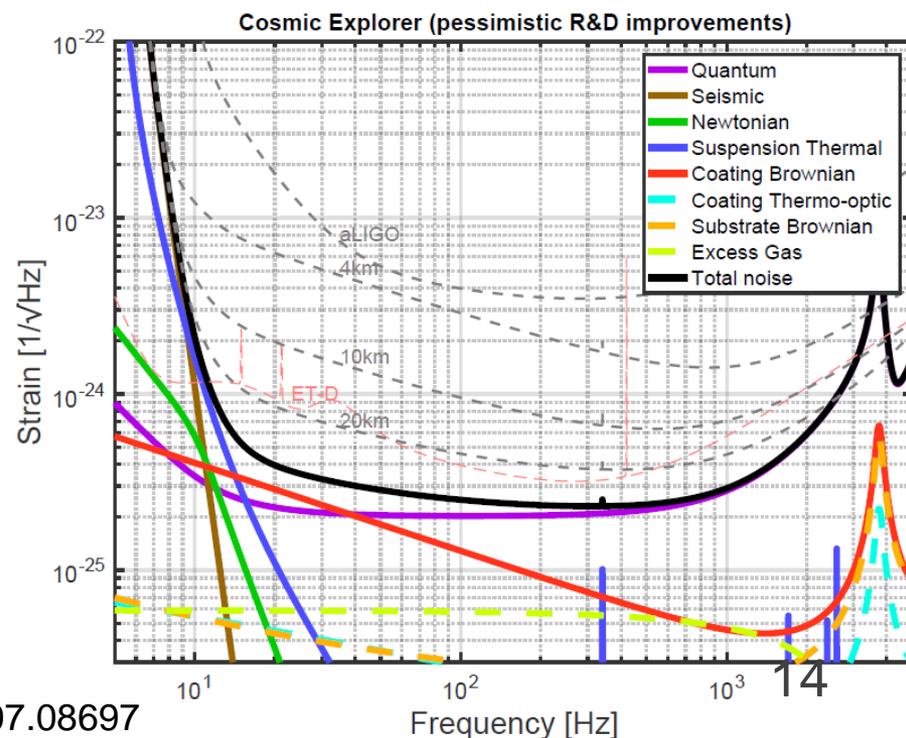
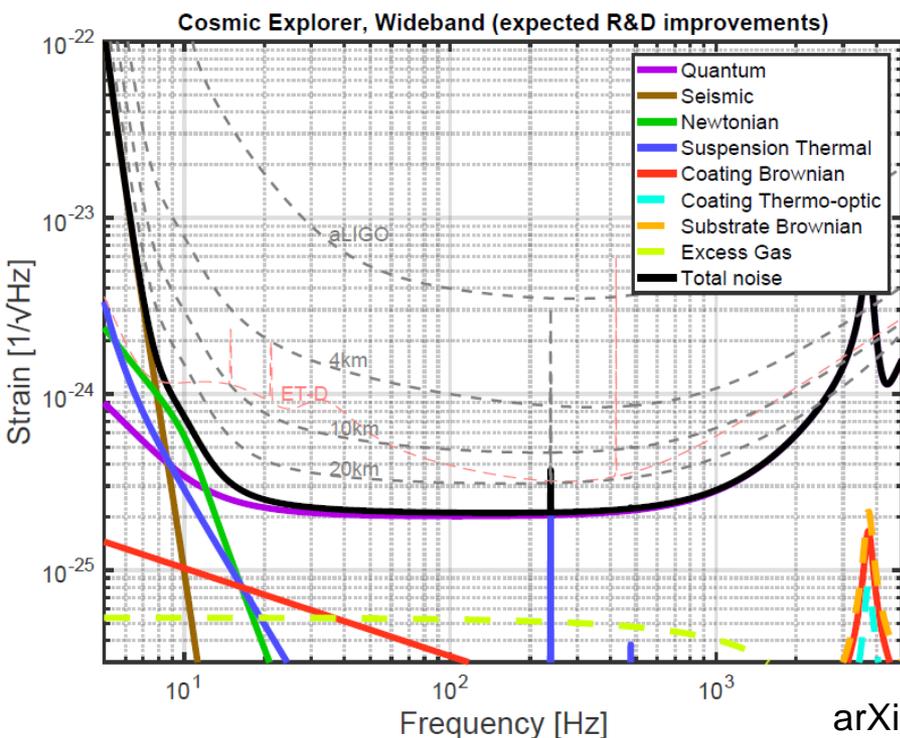
Cosmic Explorer



- 基線長10-40 km、120 K or 常温、320 kg
- 1550 nm or 1064 nm

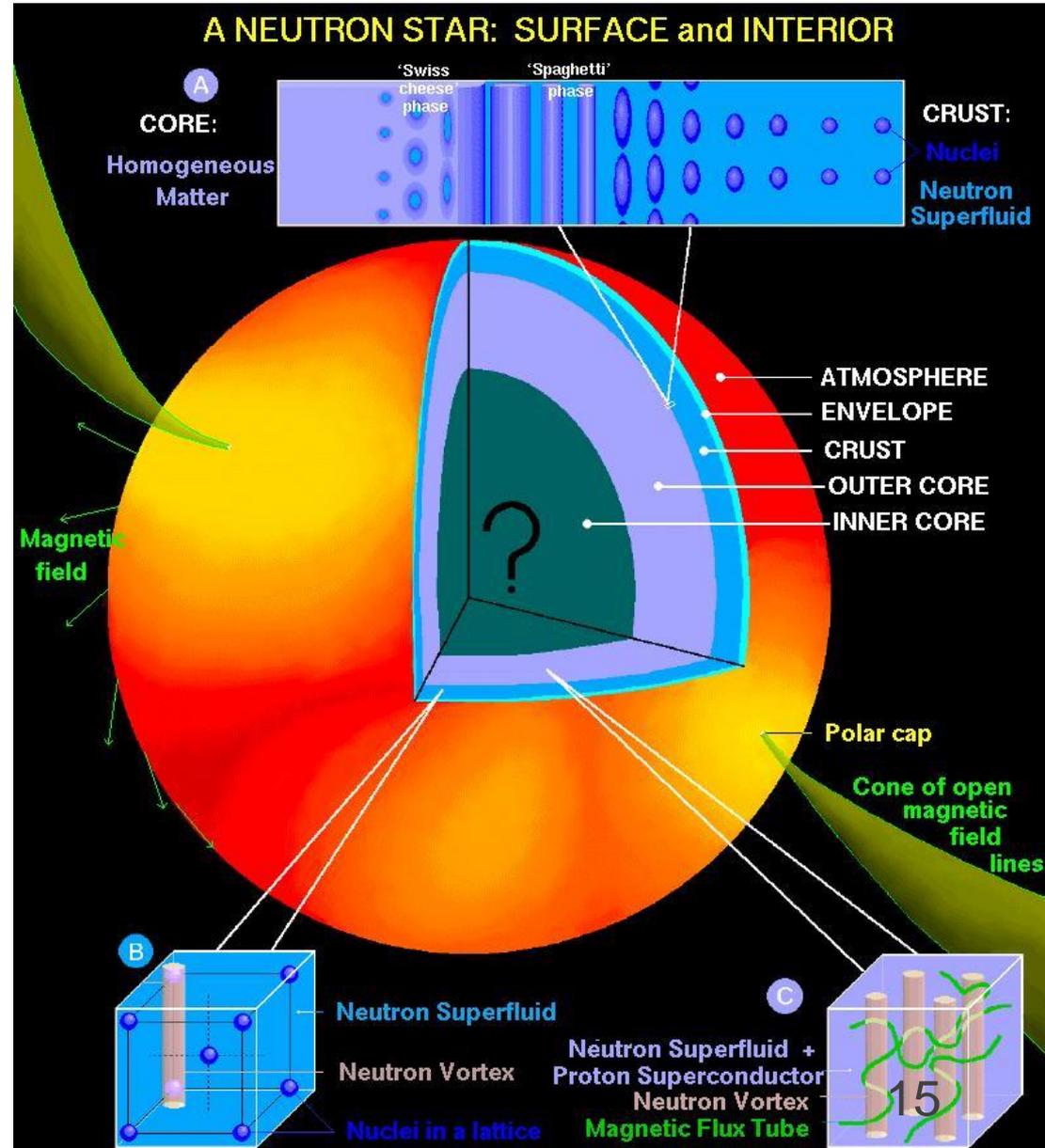
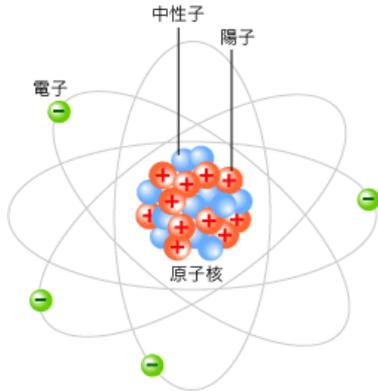


Perfume 6th Tour 2016
COSMIC EXPLORER



中性子星

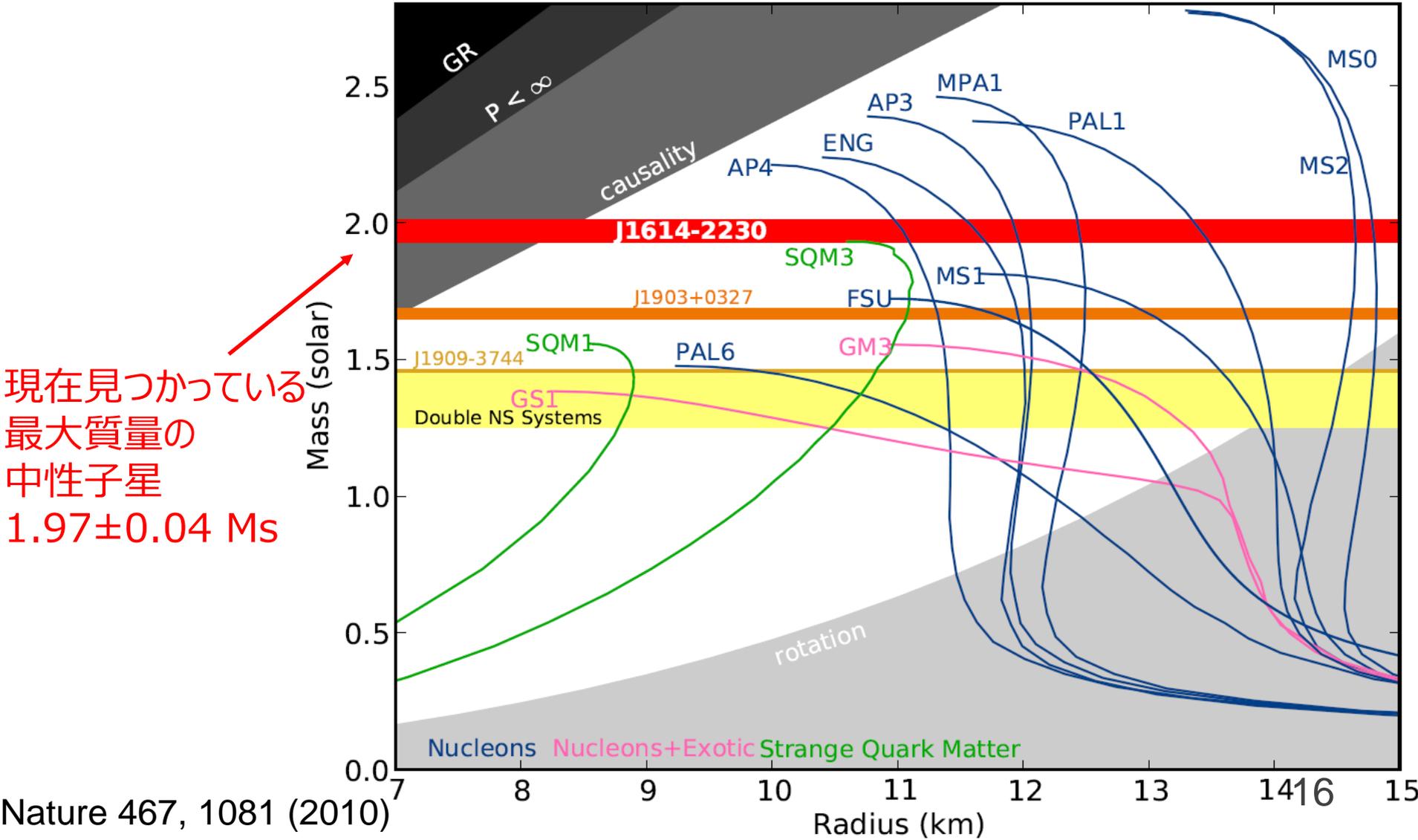
- 太陽質量程度で半径10 km
- 超高密度な原子核
太陽密度の 10^{14} 倍



Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba		72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra		104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo
Lanthanides	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu			
Actinides	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr			

中性子星の状態方程式

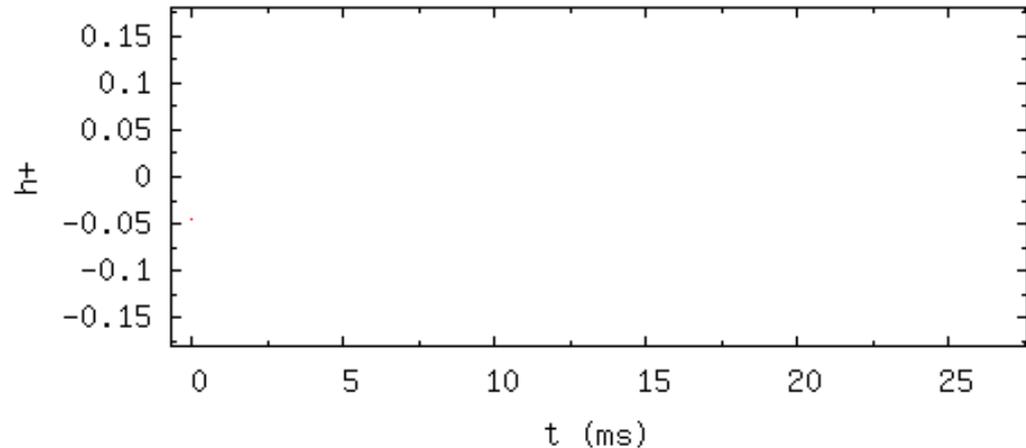
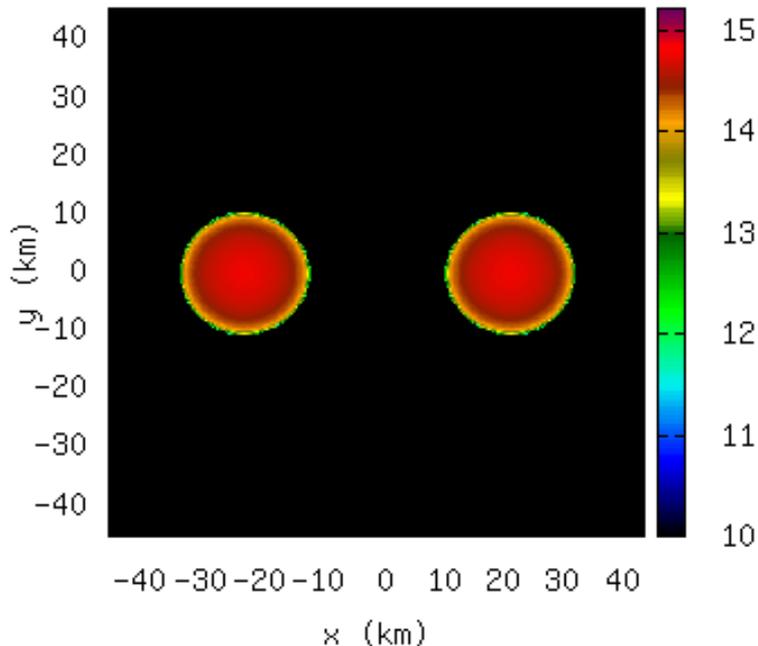
- ほとんどわかっていない



連星中性子星合体シミュレーション

- 状態方程式によって合体の様子が異なる
ブラックホールに崩壊するタイミング

t=0 ms



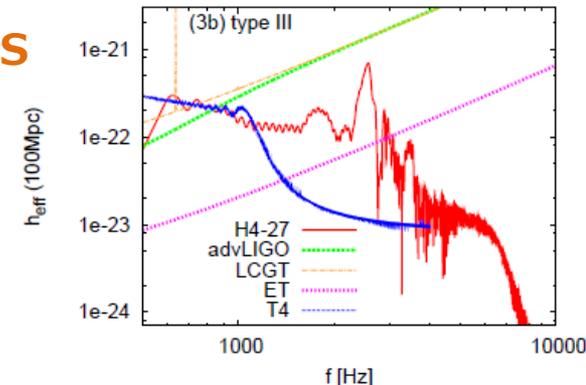
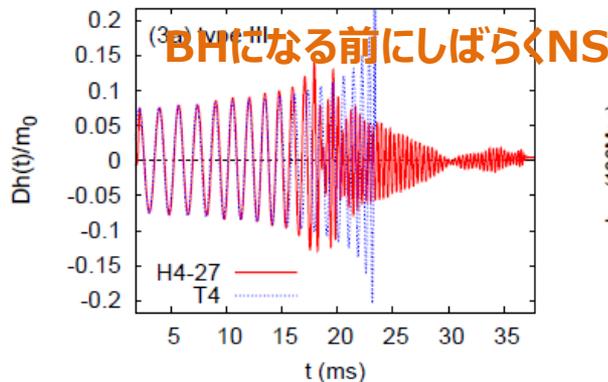
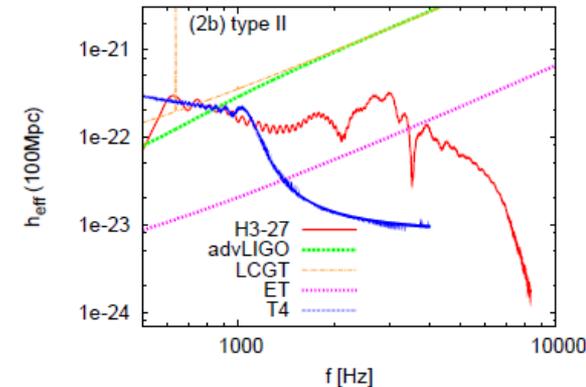
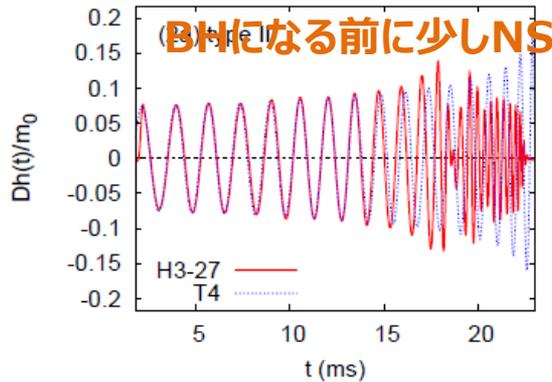
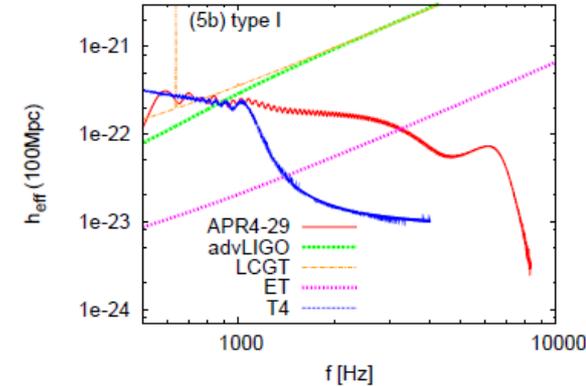
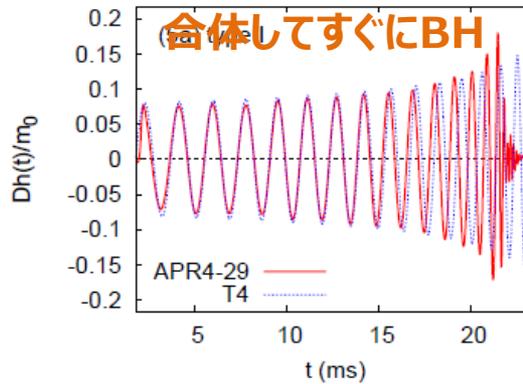
EOS: H4, 1.4 Ms - 1.4 Ms

Simulation by K. Hotokezaka

<http://www2-tap.scphys.kyoto-u.ac.jp/~hotoke/anime/>

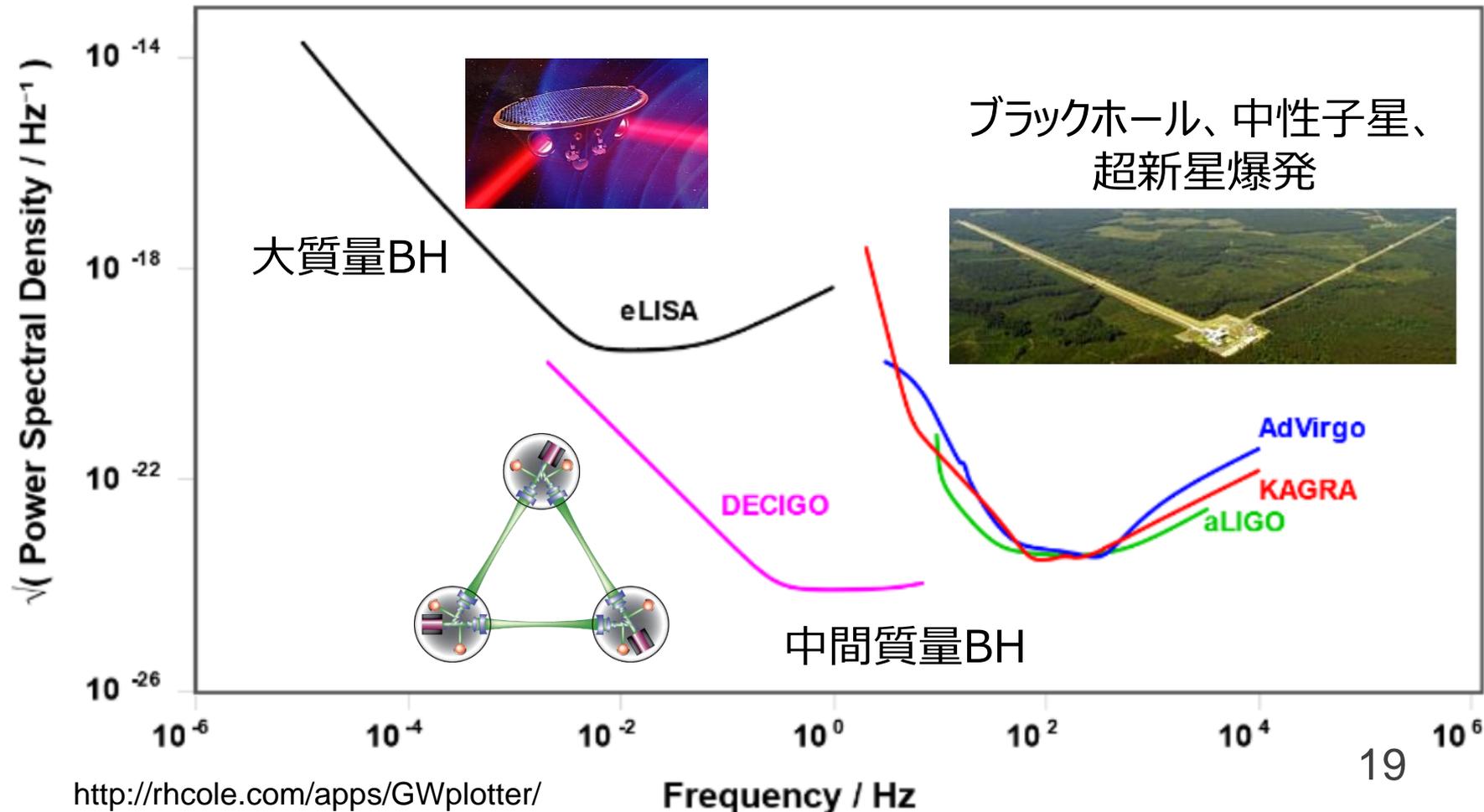
状態方程式とスペクトル

- 中性子星連星
合体の
スペクトルから
状態方程式が
わかる



宇宙重力波望遠鏡

- 地面振動がない、基線長を長くできる
- ヨーロッパのeLISA計画、日本のDECIGO計画

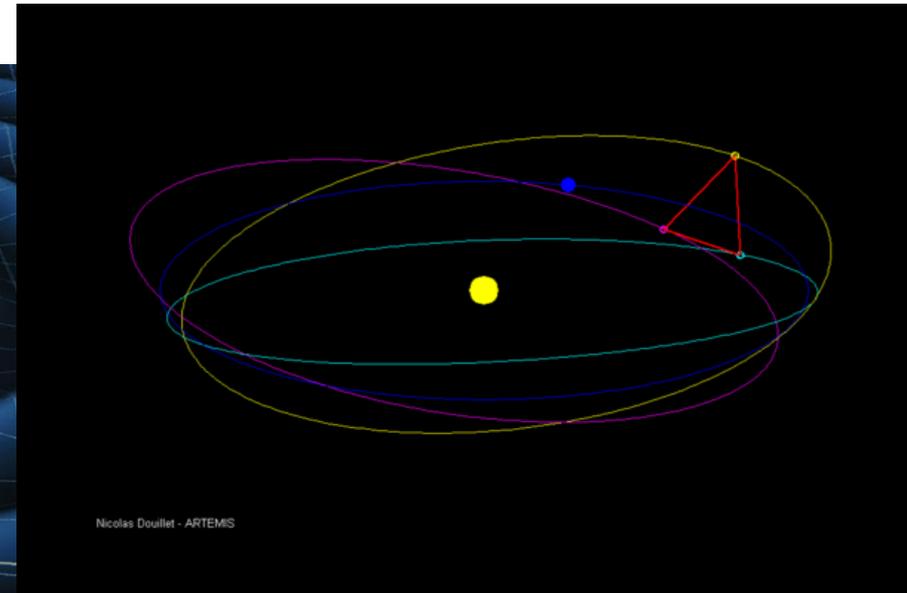
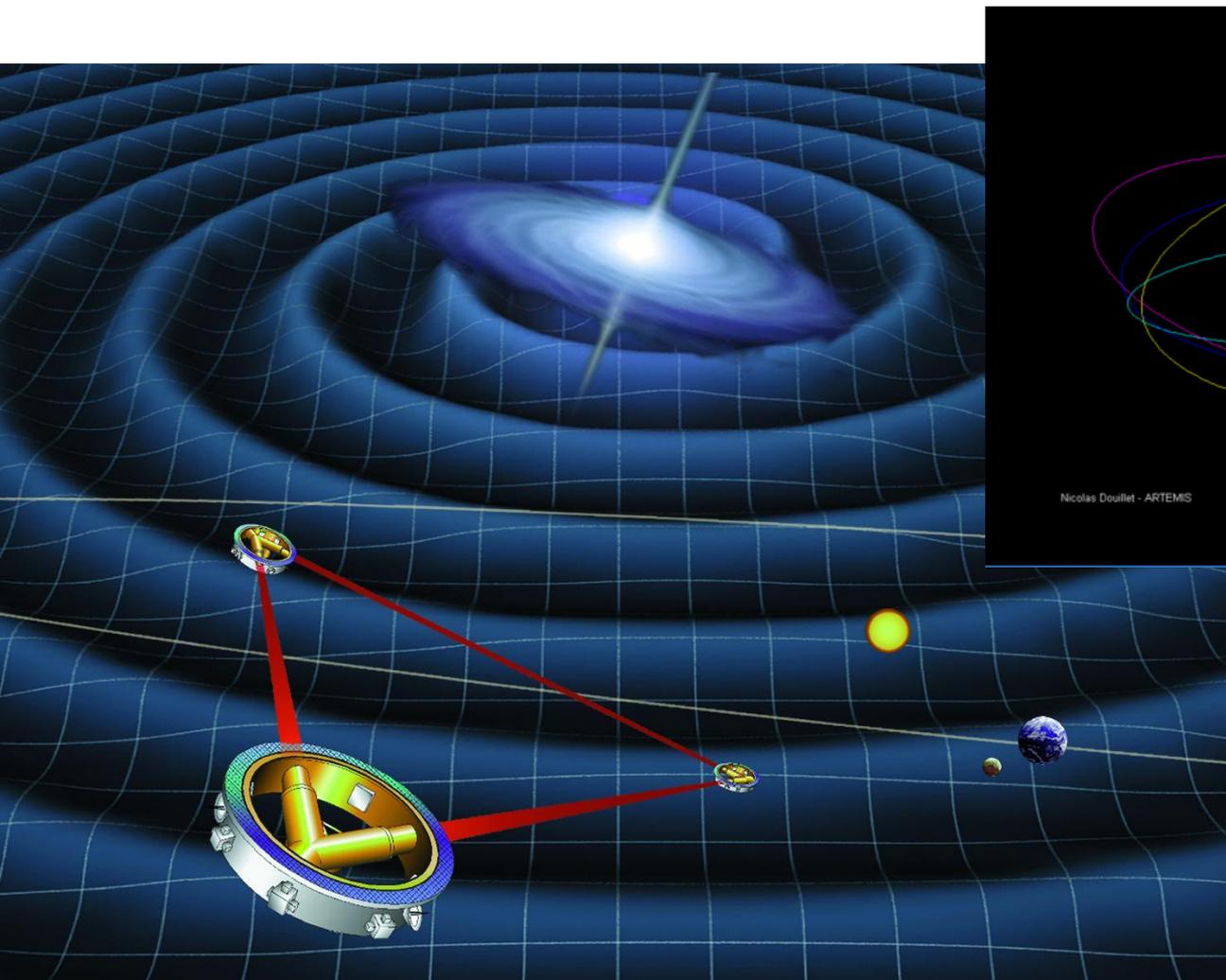


eLISA計画



European Space Agency

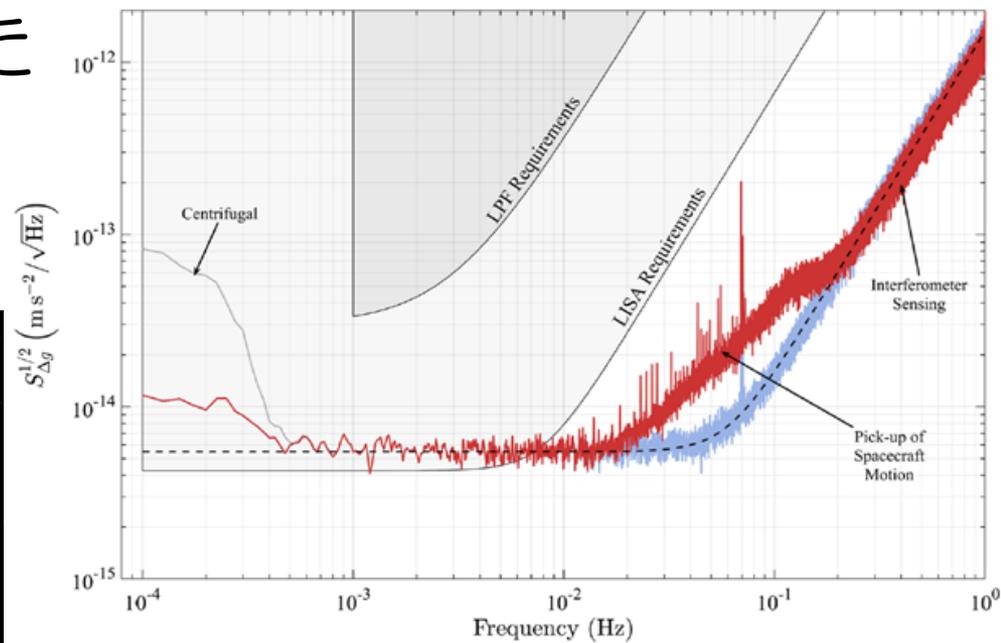
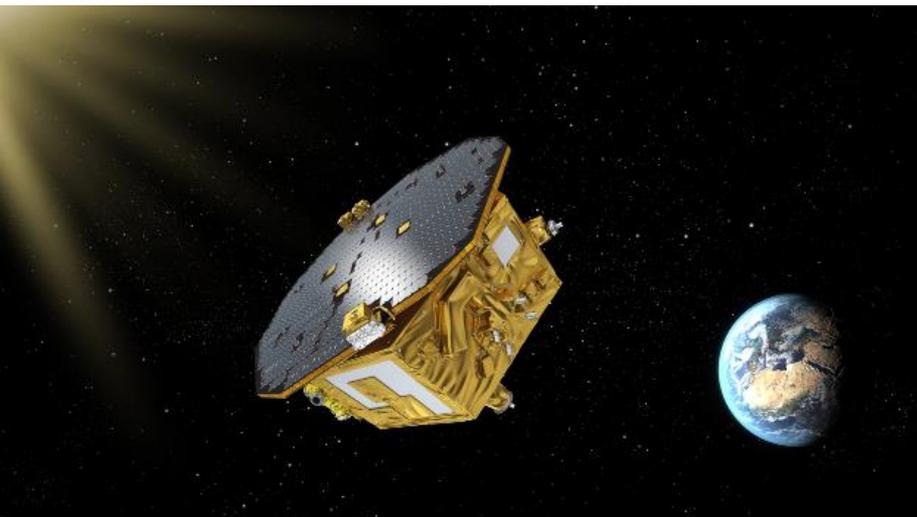
- Evolved Laser Interferometer Space Antenna
元々はNASAとESAの合同(2011年にNASA撤退)



基線長
500万 km
→ 100万 km?
2034年打ち上げ?

2016年のもう1つの重大ニュース

- LISA Pathfinderの**成功**
宇宙重力波望遠鏡LISAの技術実証機
- 2016年6月7日に最初の結果が公開された
- 加速度雑音と変位雑音が
LISAの要求を満たした
→ LISAへ大きな
一歩



M. Armano+, PRL 116, 231101 (2016)

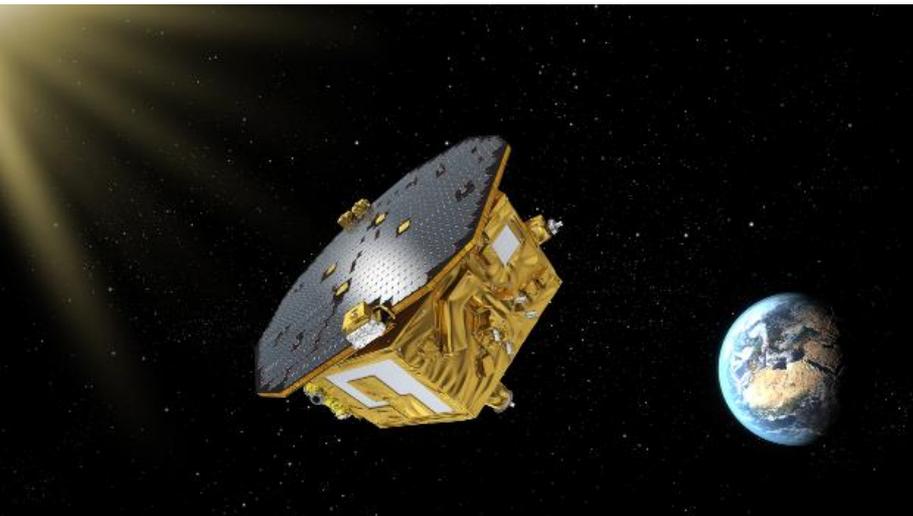
LISA Pathfinder

- 2015年12月3日 打ち上げ成功
- 2016年1月22日 L1に到達
- 2016年2月16日 ドラッグフリー達成
- 2016年3月1日 science mission開始
- 2016年6月7日 最初の結果公開
(2017年5月まで運用)

[http://sci.esa.int/lisa-pathfinder/
56910-lisa-pathfinder-in-space/](http://sci.esa.int/lisa-pathfinder/56910-lisa-pathfinder-in-space/)



[http://spaceflight101.com/lisa-pathfinder/
photos-vega-lights-up-the-night-over-the-
amazon-launching-lisa-pathfinder/](http://spaceflight101.com/lisa-pathfinder/photos-vega-lights-up-the-night-over-the-amazon-launching-lisa-pathfinder/)



European Space Agency

1998年に最初の提案、
2000年に採択、
当初は2006年打ち上げ予定だった

12月3日 打ち上げ @ 仏領ギアナ

1月22日 L1に到達

PRECISION LAB IN SPACE

LISA Pathfinder aims to test whether an intricate experiment consisting of two metal cubes in freefall, isolated from all forces except gravity, can operate in space.

When Pathfinder launches, clamps pin the cubes — which are buried at the heart of the craft — tightly to their housing so that they don't jostle and damage either themselves or other instruments.



Two hours after launch, Pathfinder separates from the launcher and begins to make increasingly elongated ellipses.

Once craft is stable, clamps release the cubes extremely gently; retractable devices position each one exactly at the centre of its housing at a speed of fewer than 5 micrometres per second. (See below).



Around 55 days into the mission, craft arrives in orbit around L-1.

51 days after launch, Pathfinder separates from thrusters.

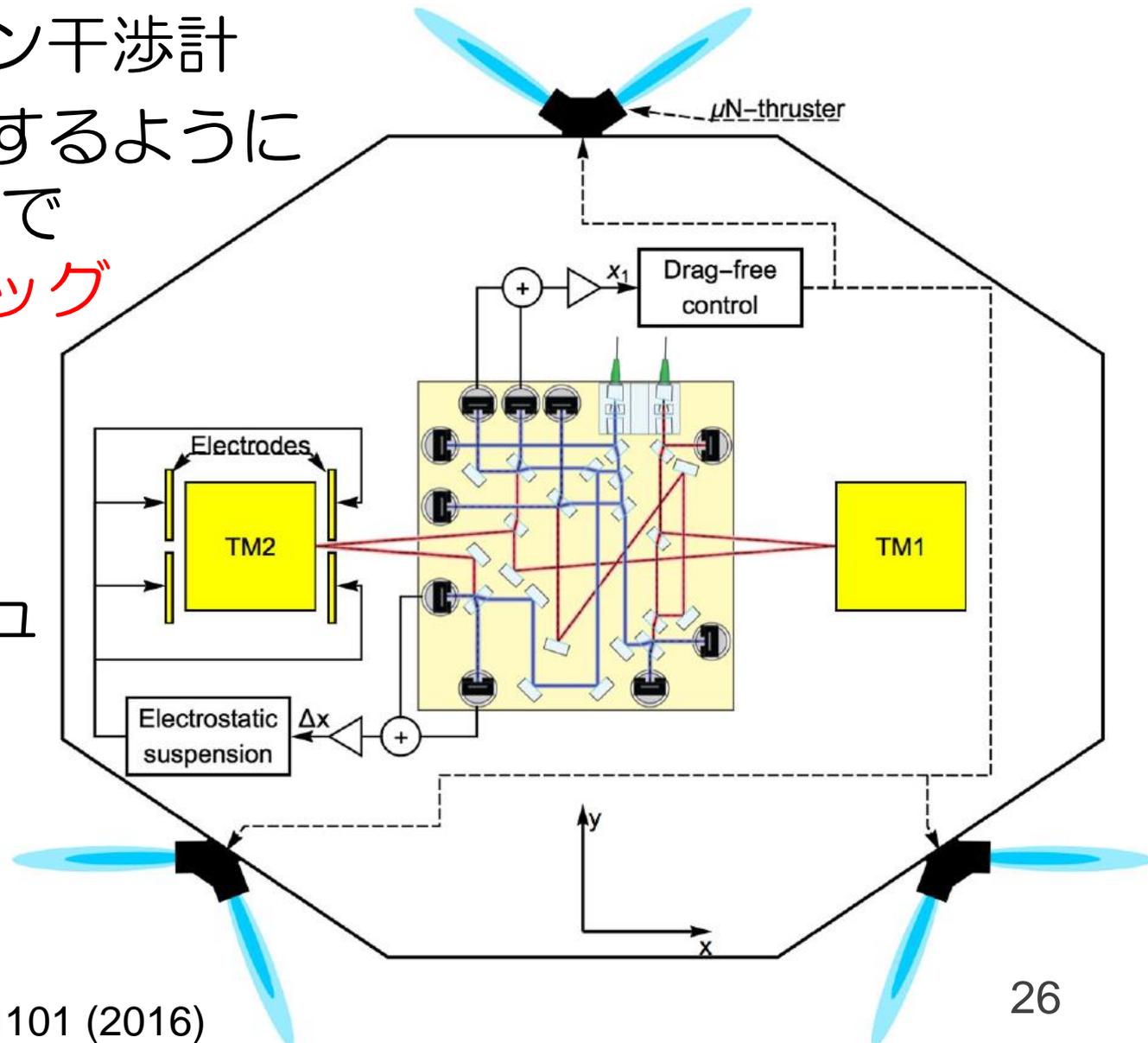
Nine days after launch, Pathfinder makes final a burn, propelling it towards its destination — the stable point L-1, 1.5 million kilometres from Earth.

2月16日 ドラッグフリー成功



LISA Pathfinderの中身

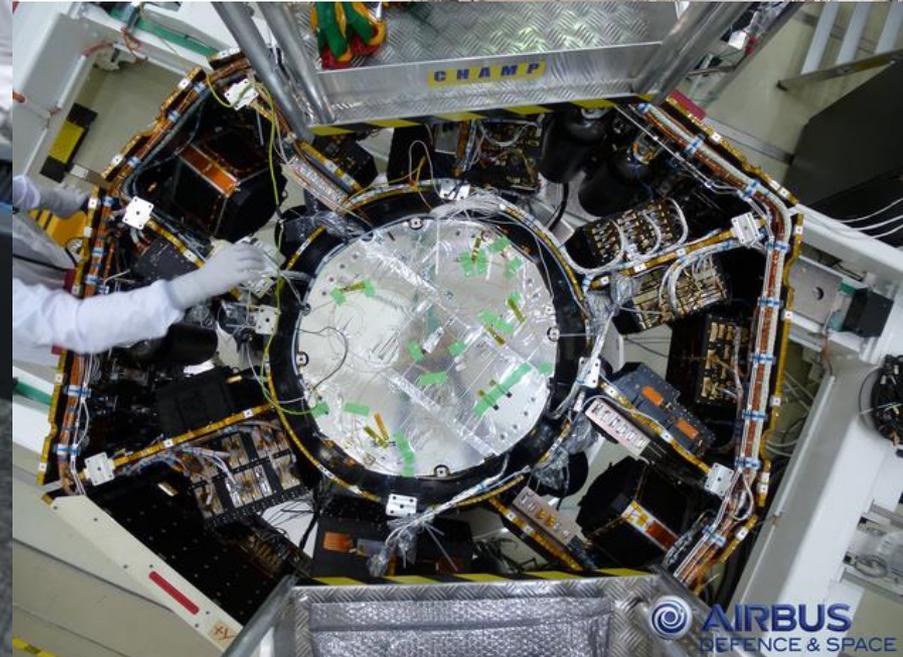
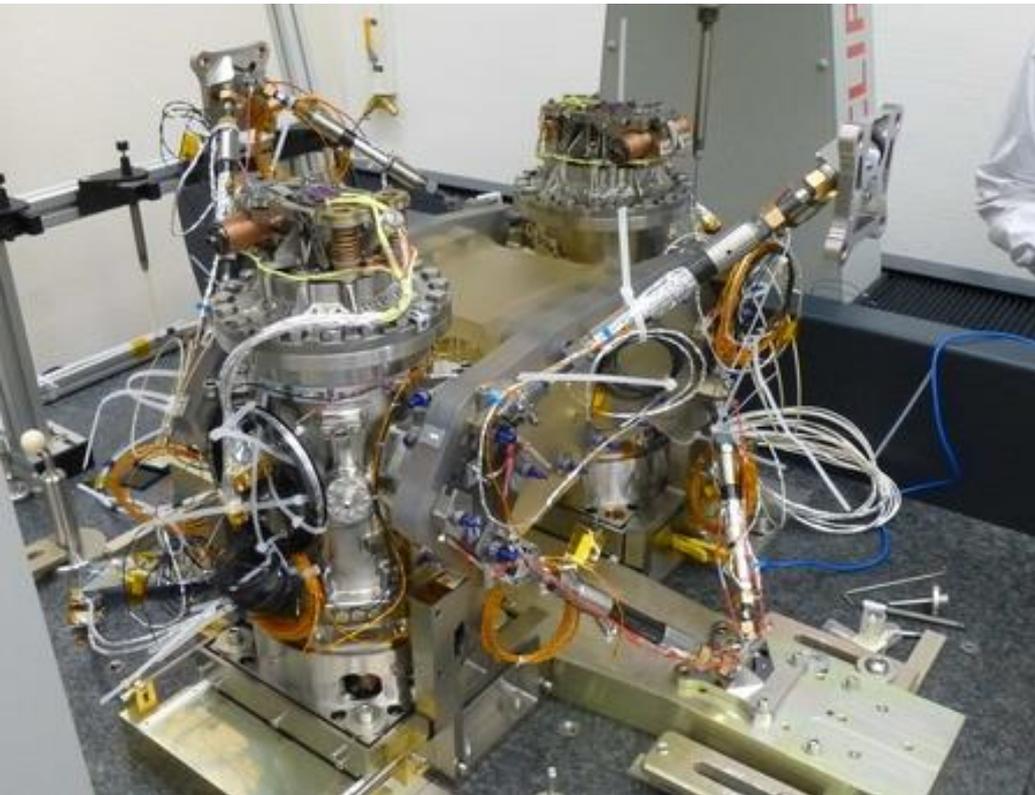
- ヘテロダイン干渉計
- TM1に追従するように μN スラスタで衛星をドラッグフリー制御
- TM1に追従するように静電アクチュエータでTM2を制御



LPFの中身

- LTP: LISA Technology Package
が中心部品

<http://sci.esa.int/lisa-pathfinder/56864-lisa-pathfinder-being-integrated-to-the-vega-launchers-payload-adaptor/>

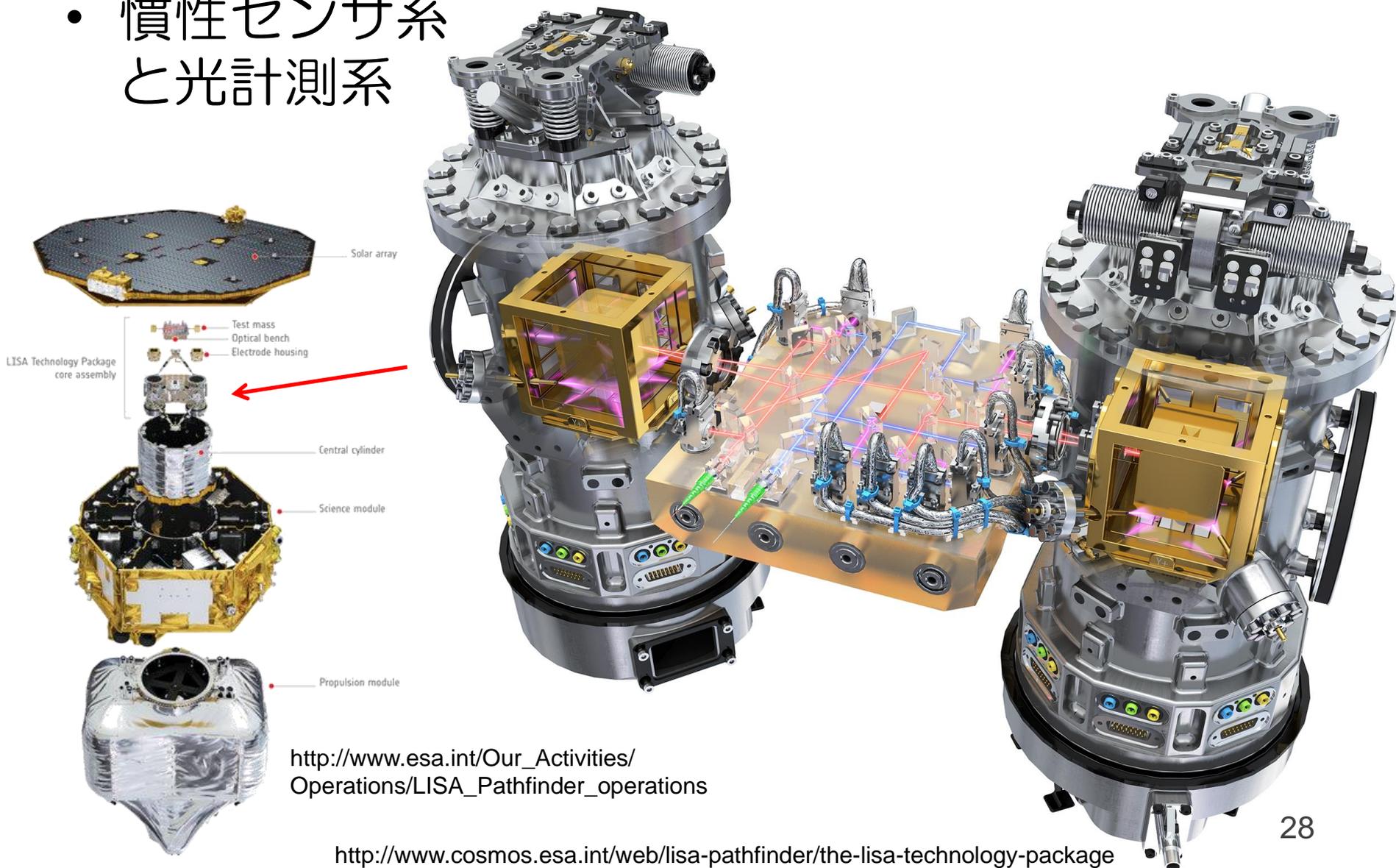


<http://sci.esa.int/lisa-pathfinder/55634-ltp-core-assembly-of-the-lisa-technology-package/>

<http://sci.esa.int/lisa-pathfinder/56025-lisa-technology-package-core-assembly-integration/>

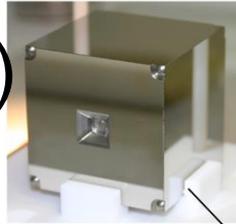
LISA Technology Package

- 慣性センサ系
と光計測系



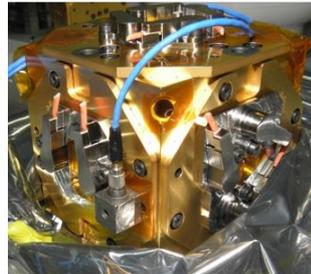
慣性センサ系

- TM(Au-Pt合金)
と極板のついでハウジング



Test Mass

静電センサ/アクチュエータ
静電場遮蔽
TM-極板間隔:
2.9-4 mm



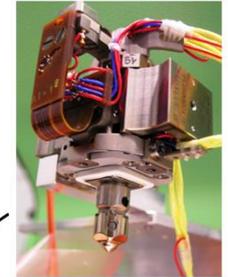
Electrode Housing

- クランプ・
リリース
機構

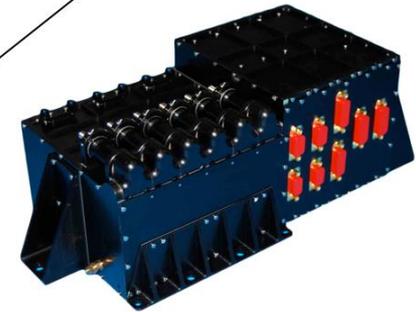
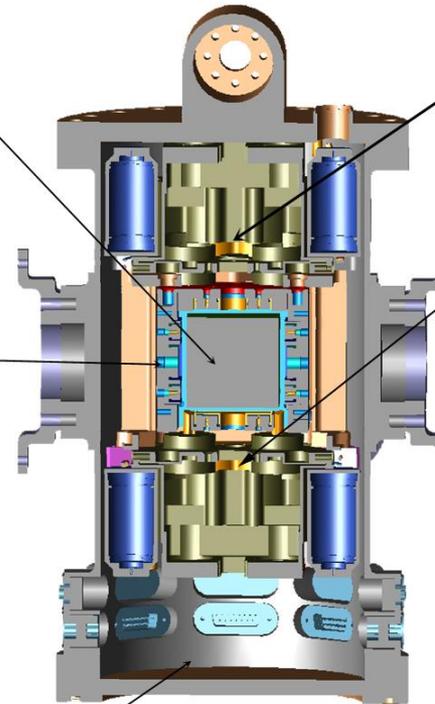
- UV帯電除去
(TMとハウ
ジング両方)



Vacuum Chamber



Grabbing, Position and
Release Mechanism



UV Light Unit

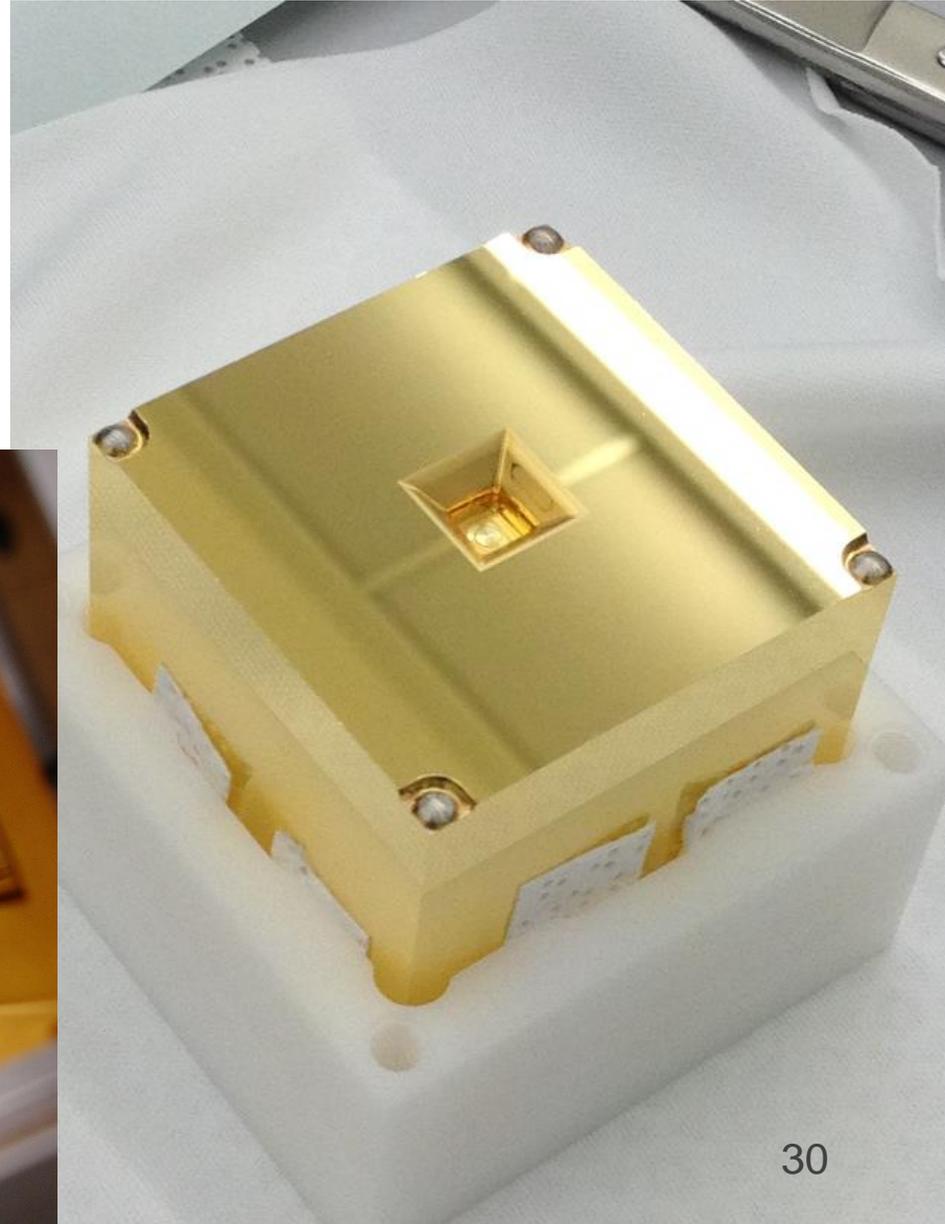


Front End Electronics

ハウジング

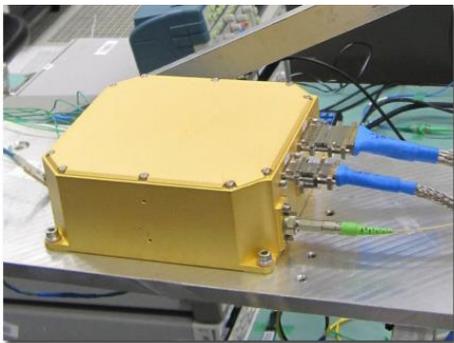
[http://sci.esa.int/lisa-pathfinder/
56868-lisa-pathfinder-test-mass/](http://sci.esa.int/lisa-pathfinder/56868-lisa-pathfinder-test-mass/)

[http://www.esa.int/spaceinimages/Images/
2015/06/LISA_Pathfinder_electrode_housing_box](http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2015/06/LISA_Pathfinder_electrode_housing_box)

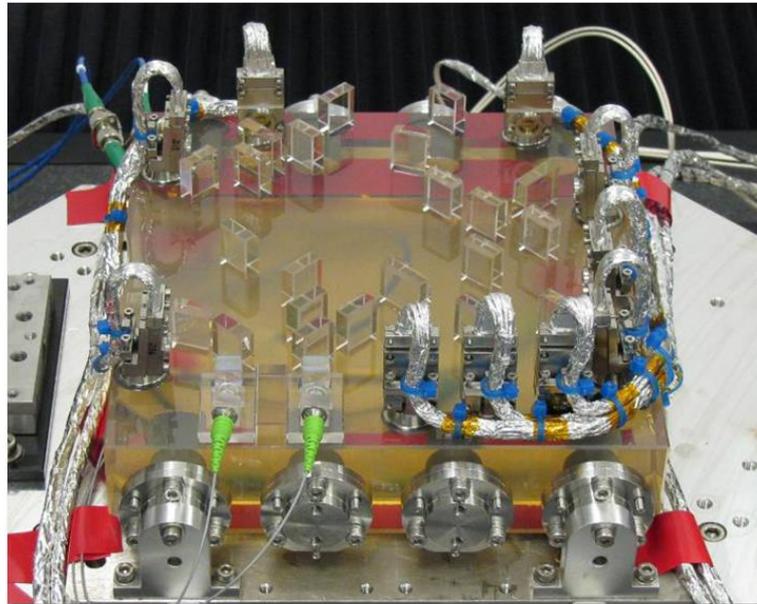


光計測系

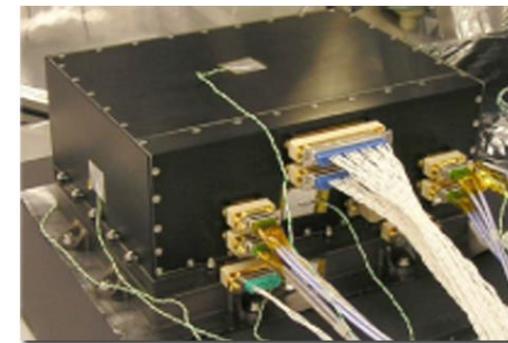
- 35 mW NPR0レーザー、強度/位相変調系、Optical Bench、ビート周波数の位相測定器



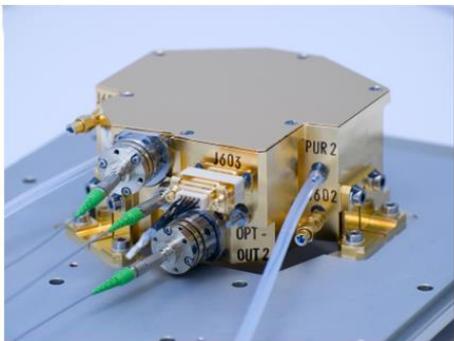
**Reference Laser Unit
(Tesat)**



**Optical Bench Interferometer
(University of Glasgow)**



**Phasemeter
(University of Birmingham)**



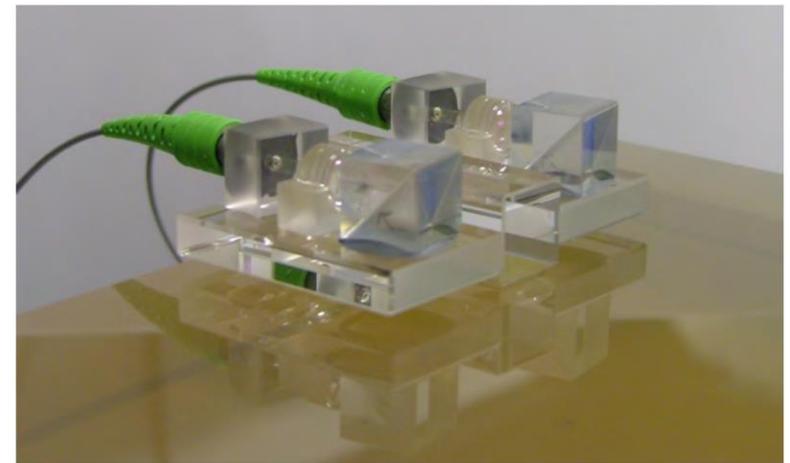
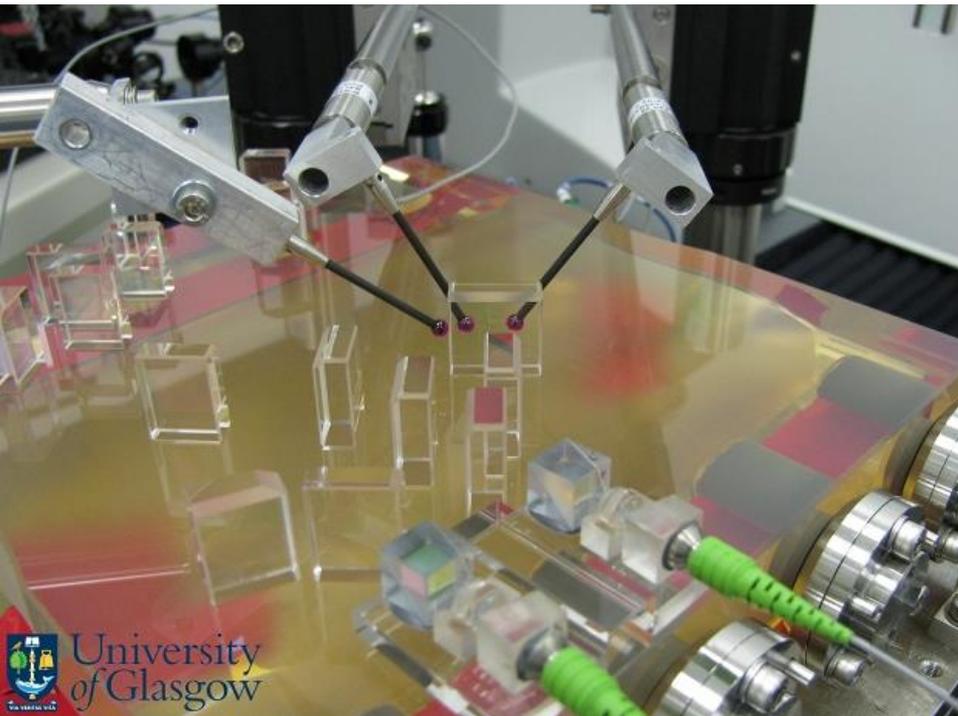
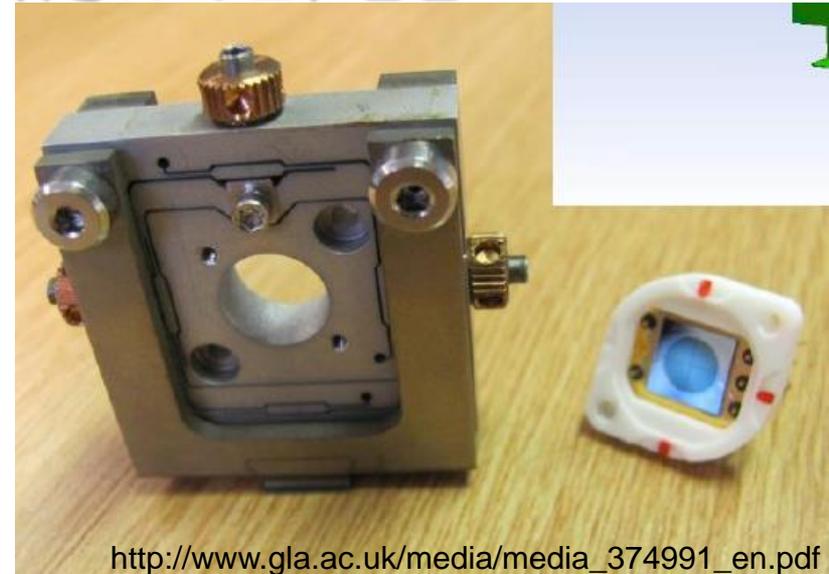
**Laser Modulator
(APC/RUAG)**



**Data Management Unit
(IEEC/NTE)³¹**

Optical Bench構成部品

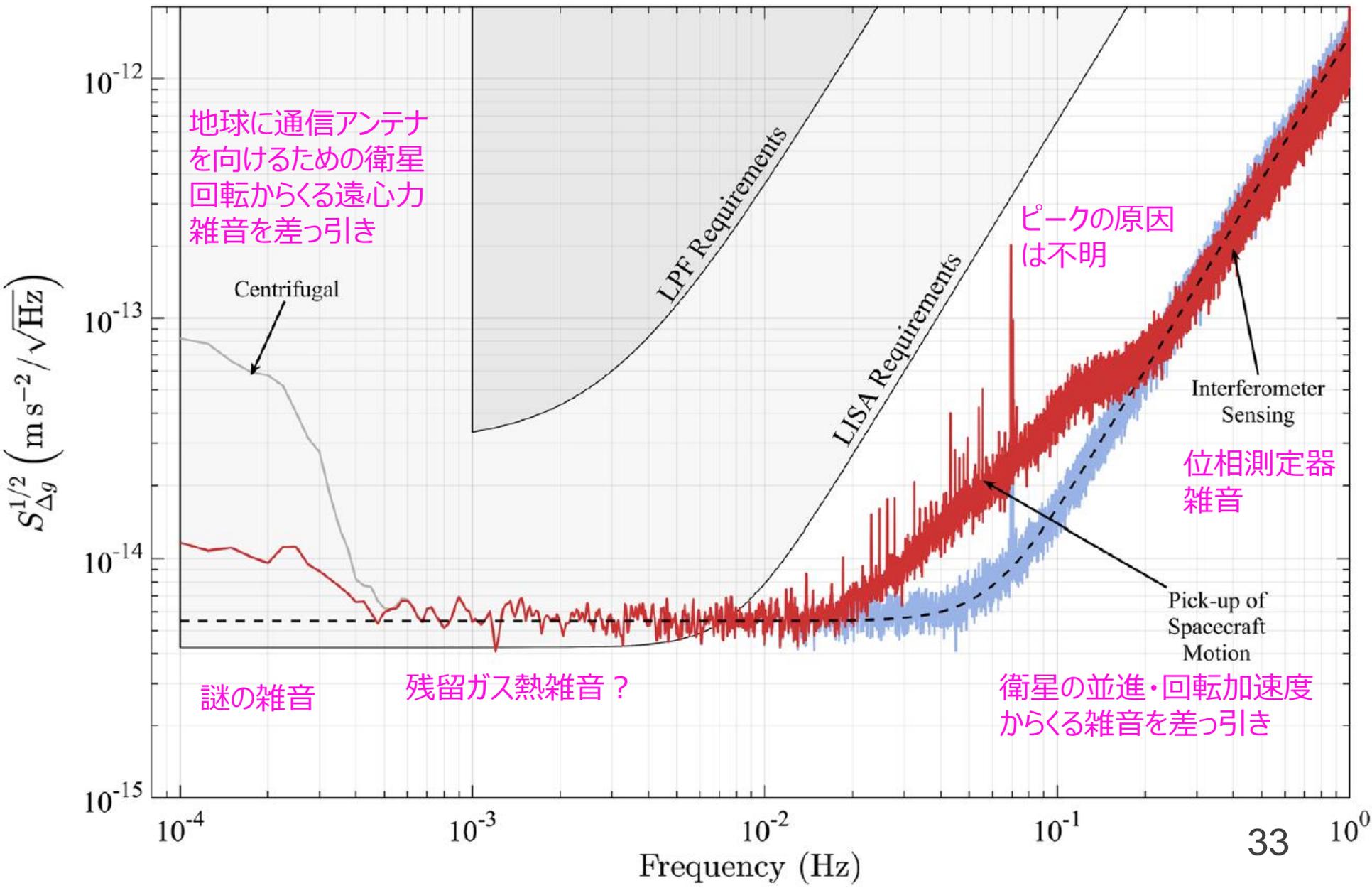
- 光検出器はQPD(InGaAS)でアライメントもモニタ



J. Bogenstahl PhD thesis (University of Glasgow, 2010)

Figure 5.1: Photograph of the fibre injector qualification model pair bonded onto the post on the prototype LTP optical bench.

LISA Pathfinderの最初の結果



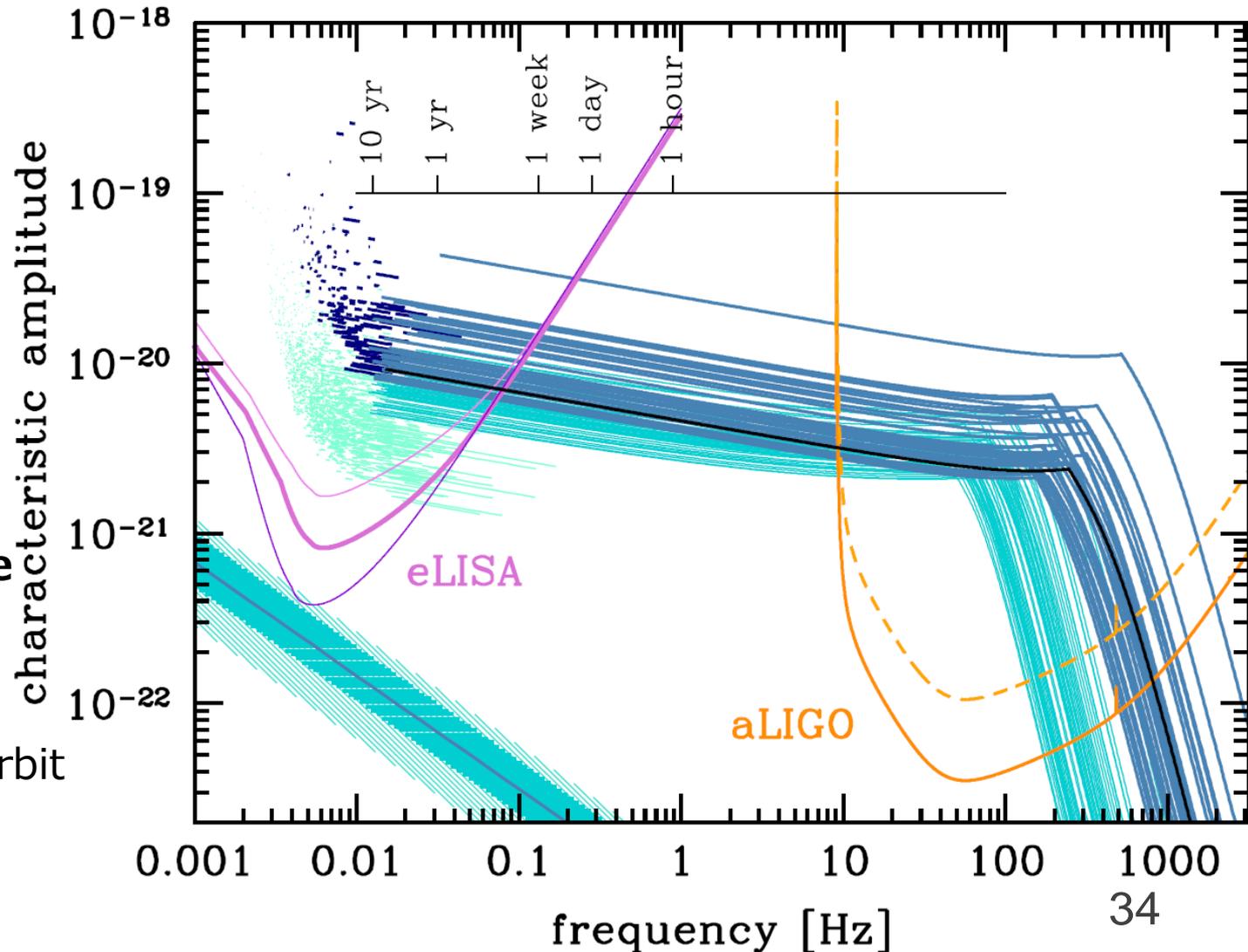
eLISAと地上重力波望遠鏡

- 地上重力波望遠鏡が検出する10年以内前に検出できる
- eLISAを強力に後押し

eLISA Perspective

2016 Call for L3
2017 Proposal
2023 Launch as L3
+ 14 month to orbit
早まる可能性も？
NASA戻ってくるかも？

PRL 116, 231102 (2016)



重力実験の歴史



→ INVESTIGATING GRAVITY

1589

GALILEO GALILEI

The acceleration of falling bodies is independent of their mass and composition



1687

ISAAC NEWTON

Universal law of gravity: the gravitational force between two bodies is directly proportional to their mass and inversely proportional to the square of their distance



1798

HENRY CAVENDISH

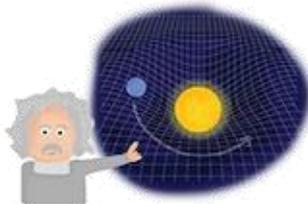
Torsion balance experiment to measure gravity in the laboratory. The results were later used to estimate the gravitational constant.



1915

ALBERT EINSTEIN

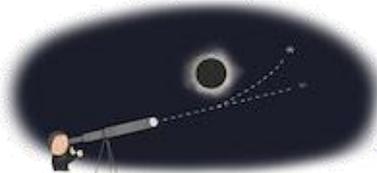
General theory of relativity: gravity as the interaction between massive bodies and the structure of spacetime



1919

ARTHUR EDDINGTON

First measurement, during a solar eclipse, of the deflection of light from background stars caused by the Sun, matching the amount predicted by general relativity.



.esa.int



1959

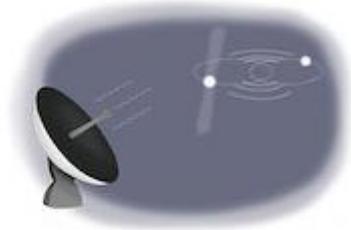
R. POUND & G. A. REBKA

First measurement of gravitational redshift, the frequency shift of light as it travels through the gravitational field of Earth, as predicted by general relativity.

1974

R. HULSE & J. TAYLOR

Discovery of the first pulsar in a binary system. After four years, Taylor and collaborators observed a feeble speed-up of the system: the first, indirect detection of gravitational waves.



2004-2005

GRAVITY PROBE B

Confirmation of two predictions from general relativity: the curvature of spacetime around Earth, and the 'dragging' of spacetime by Earth's rotation.



2016

ADVANCED LIGO

First direct detection of gravitational waves emitted by a pair of merging black holes.



LISA PATHFINDER

Testing technology for space-based observation of gravitational waves.

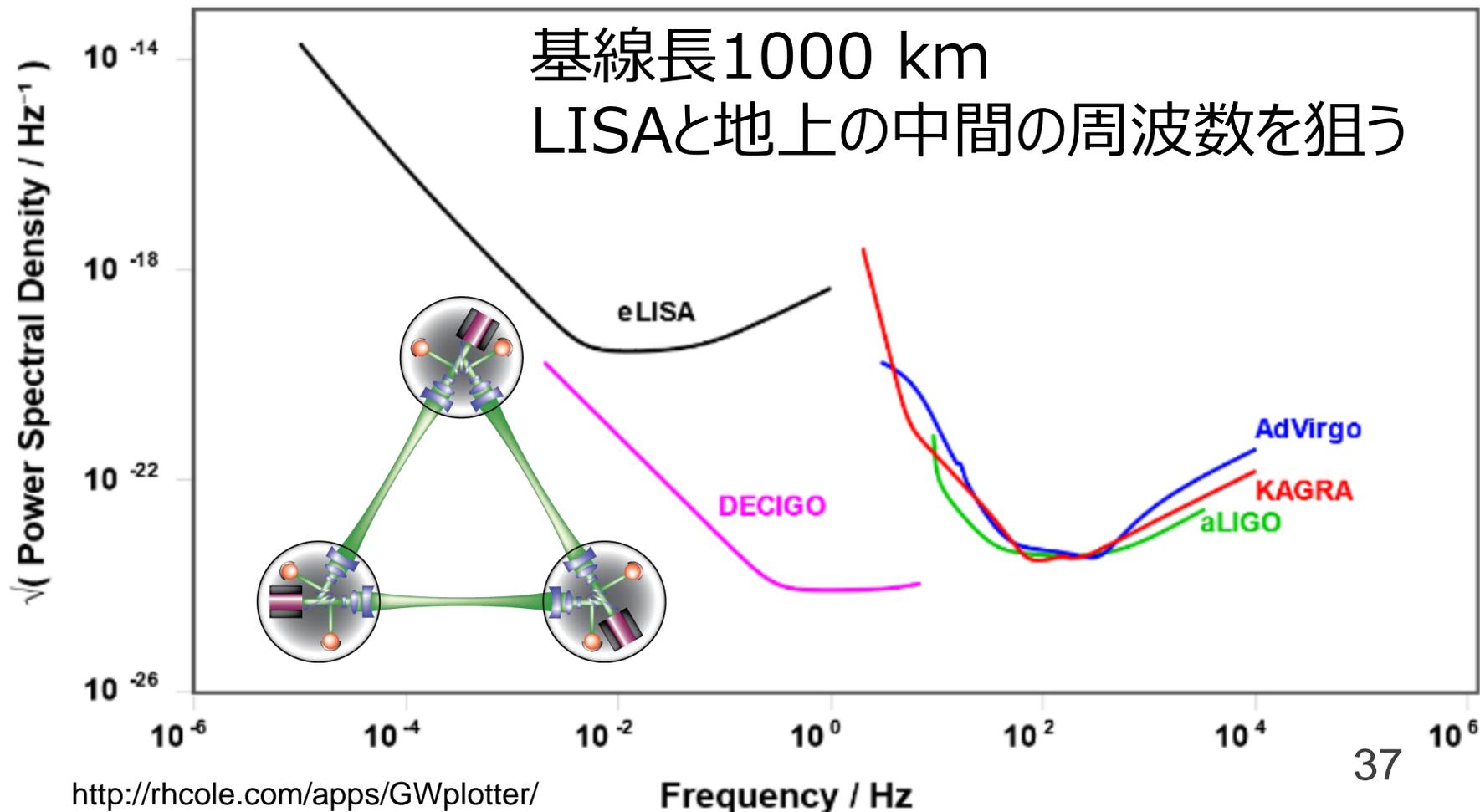
European Space Agency

自由落下実験(等価原理の検証)



DECIGO計画

- Deci-hertz Interferometer Gravitational wave Observatory (decide and go)



LISAとの違い

- eLISA

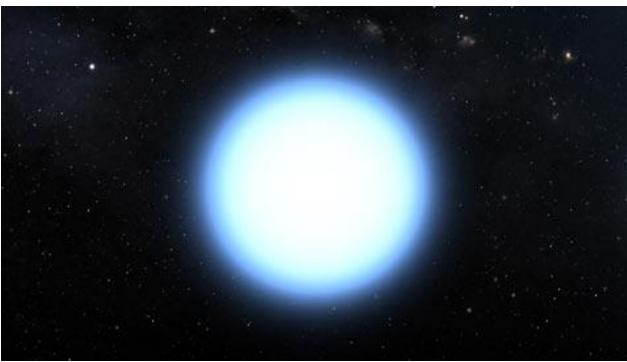
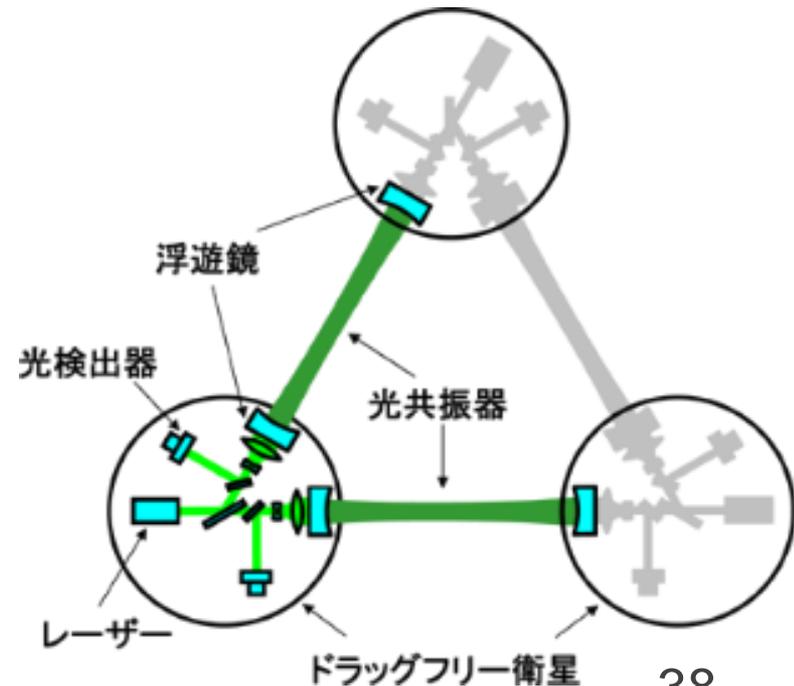
基線長500万 km、Michelson干渉計
大質量ブラックホール



- DECIGO

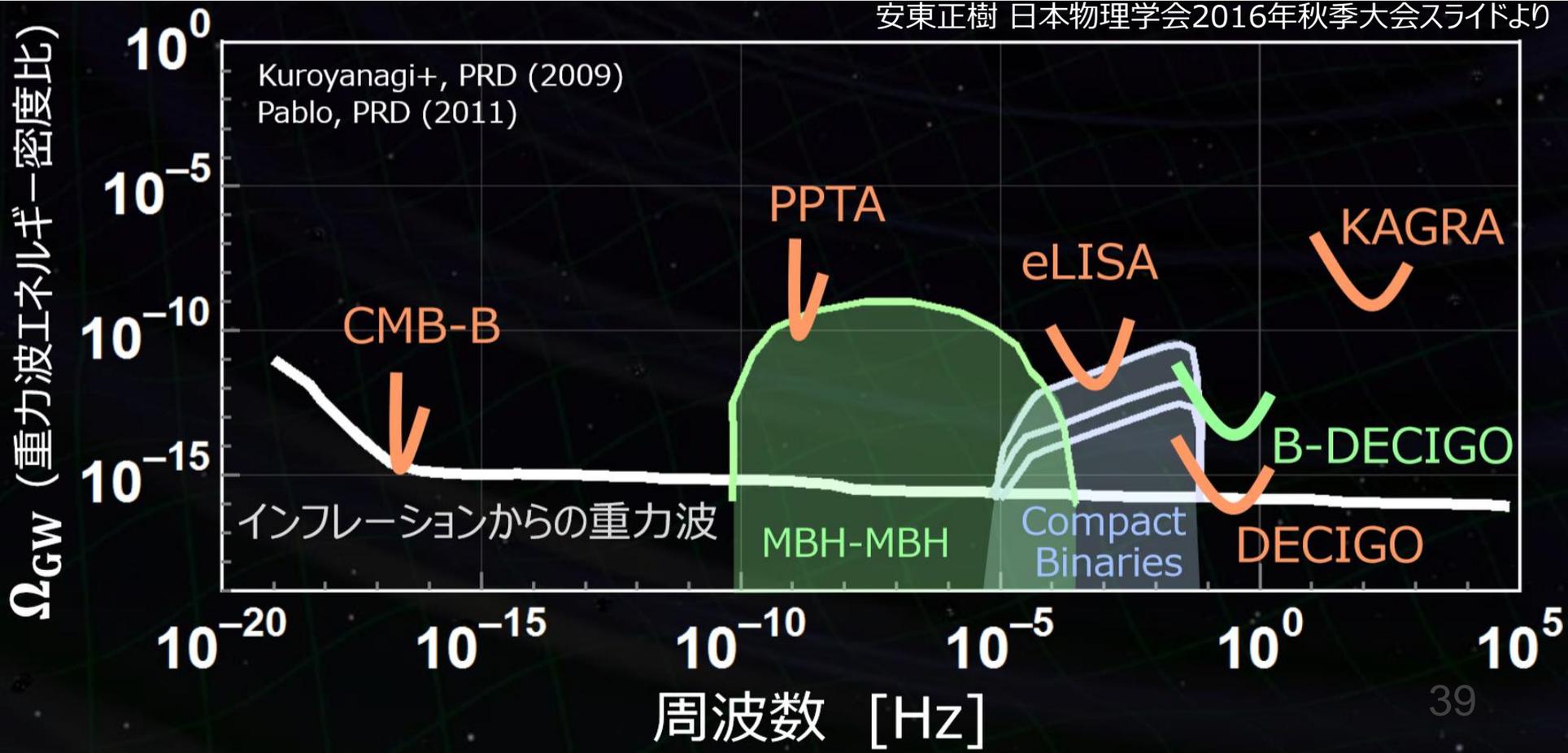
基線長1000 km、Fabry-Pérot干渉計
中間質量ブラックホール
原始重力波

白色矮星連星などの
前景重力波雑音がない



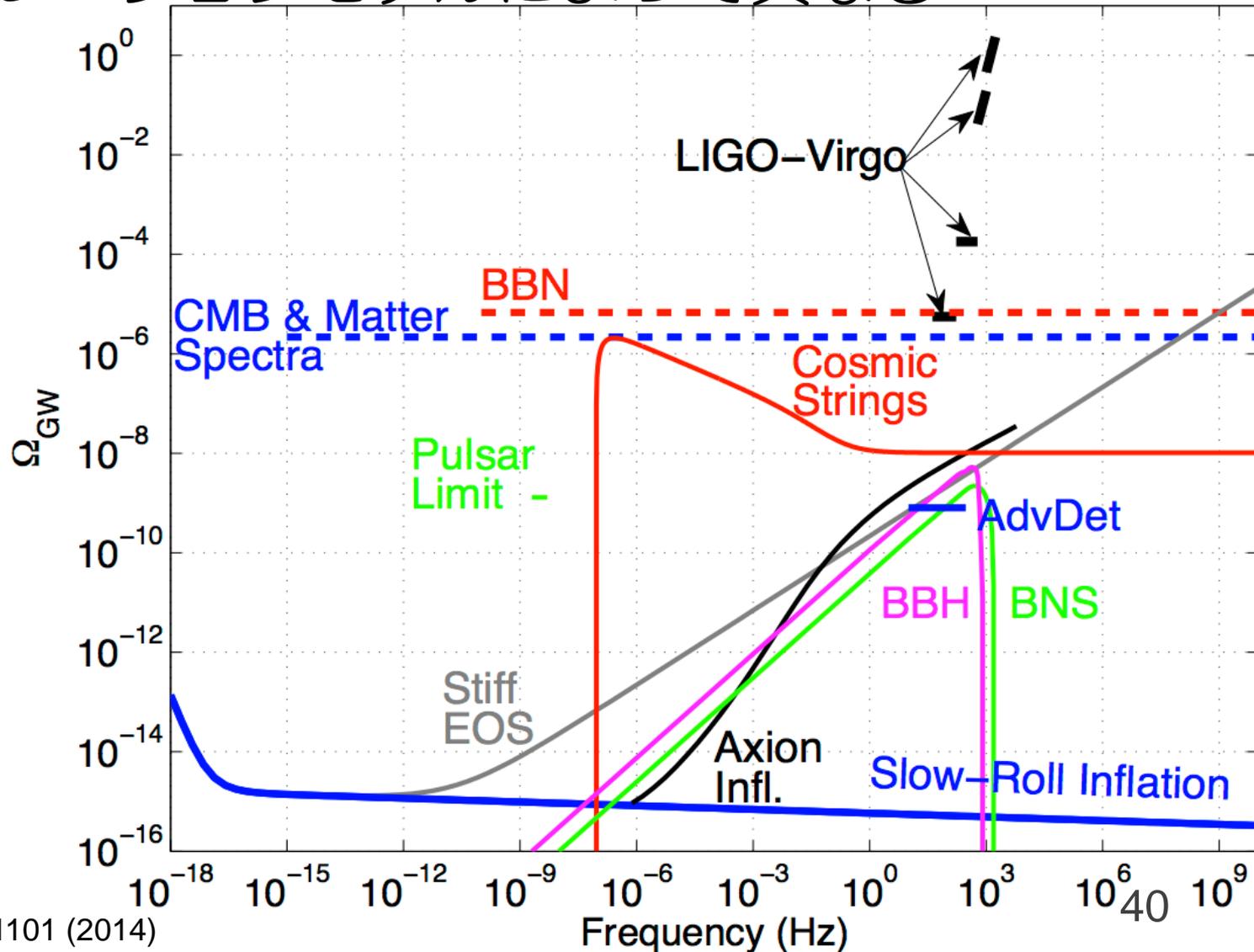
DECIGOによる原始重力波観測

- DECIGOは原始重力波の観測に適している
- スペクトルの形から宇宙の歴史がわかる



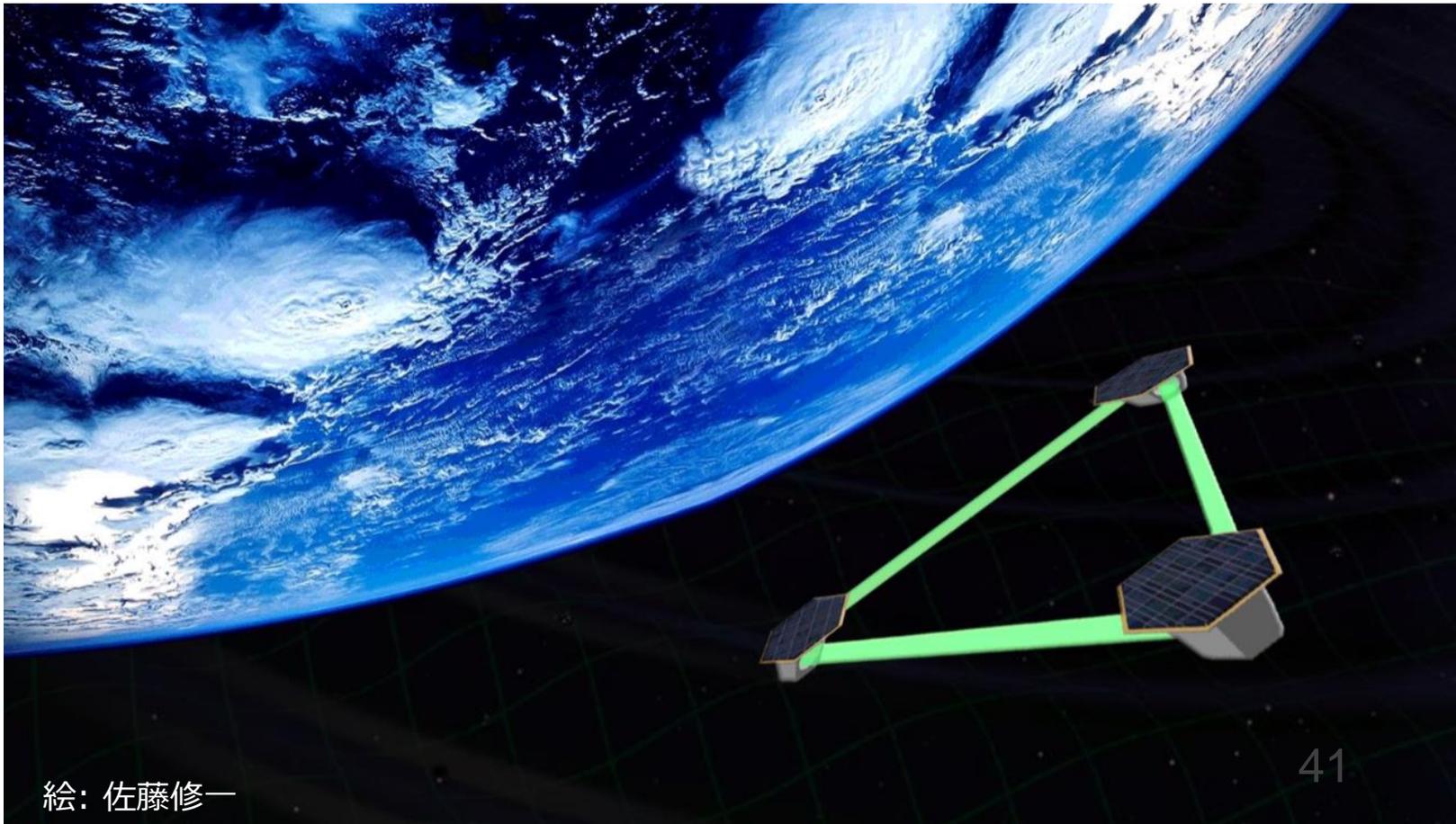
原始重力波のスペクトル

- インフレーションモデルによって異なる



B-DECIGO

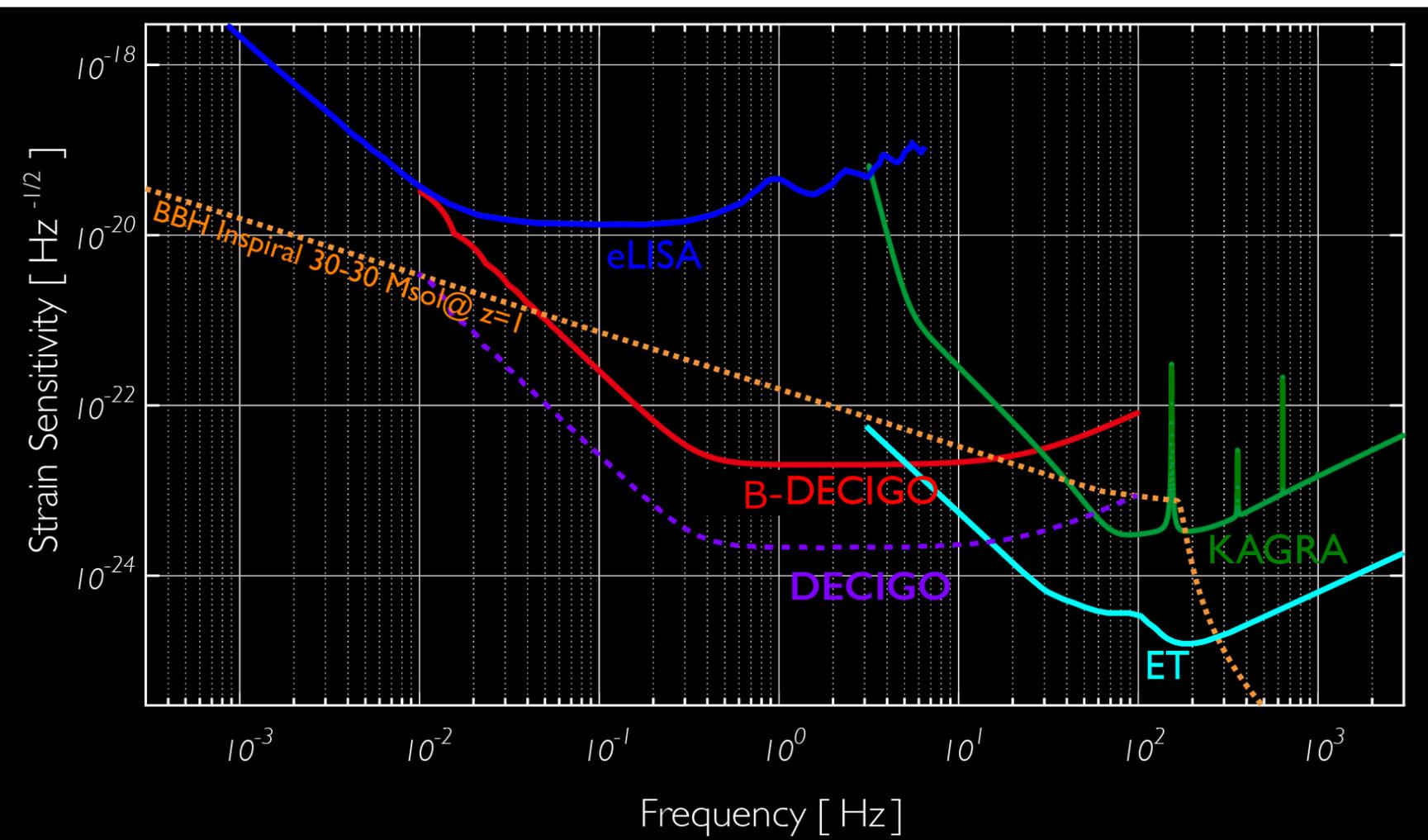
- DECIGOの前段階
- 基線長100 km、地球周回軌道
- 2020年代の打ち上げを目指す



B-DECIGOの感度

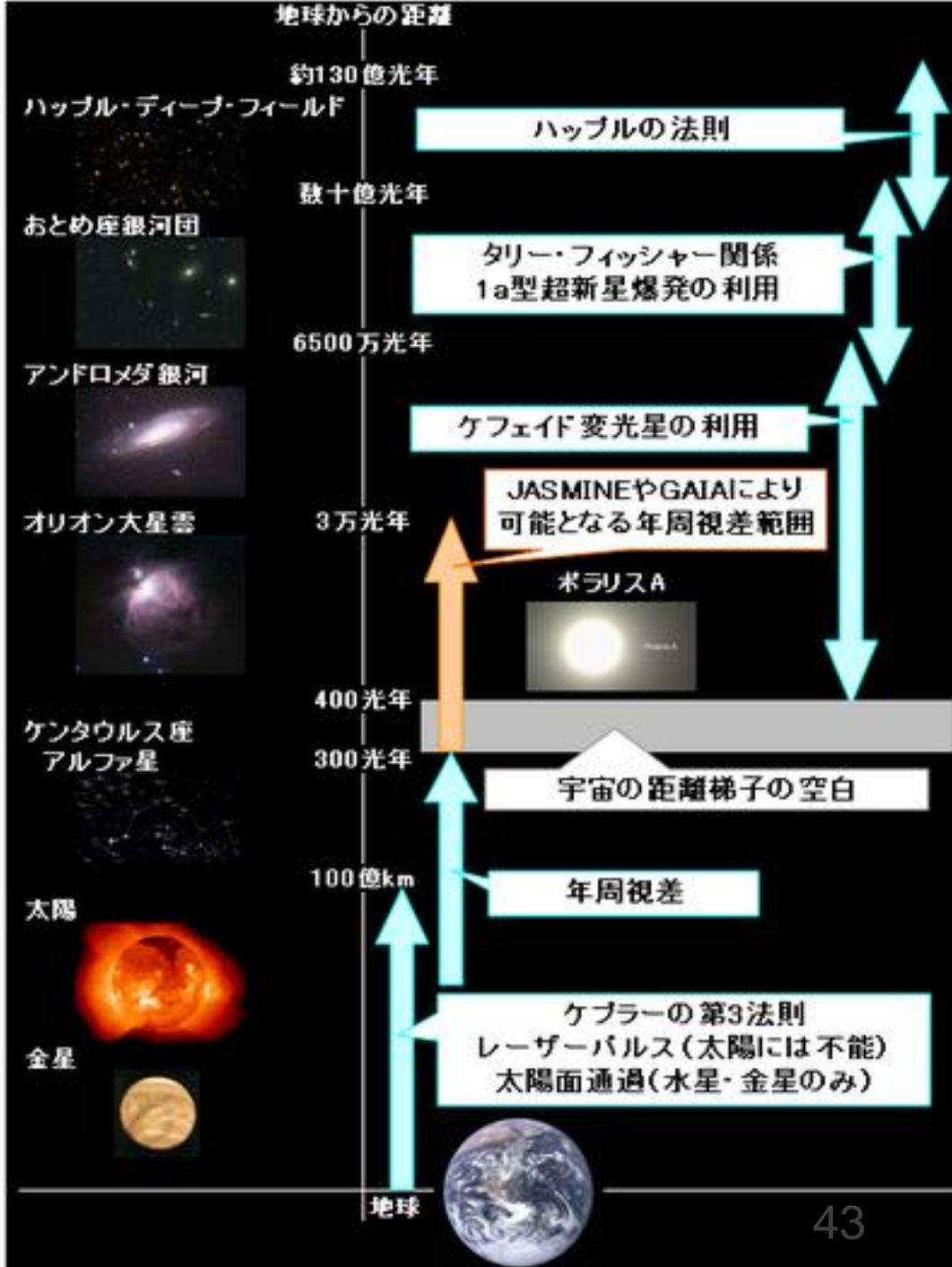
- GW150914のような連星ブラックホールの起源に迫れる

Prog. Theor. Exp. Phys. 093E01



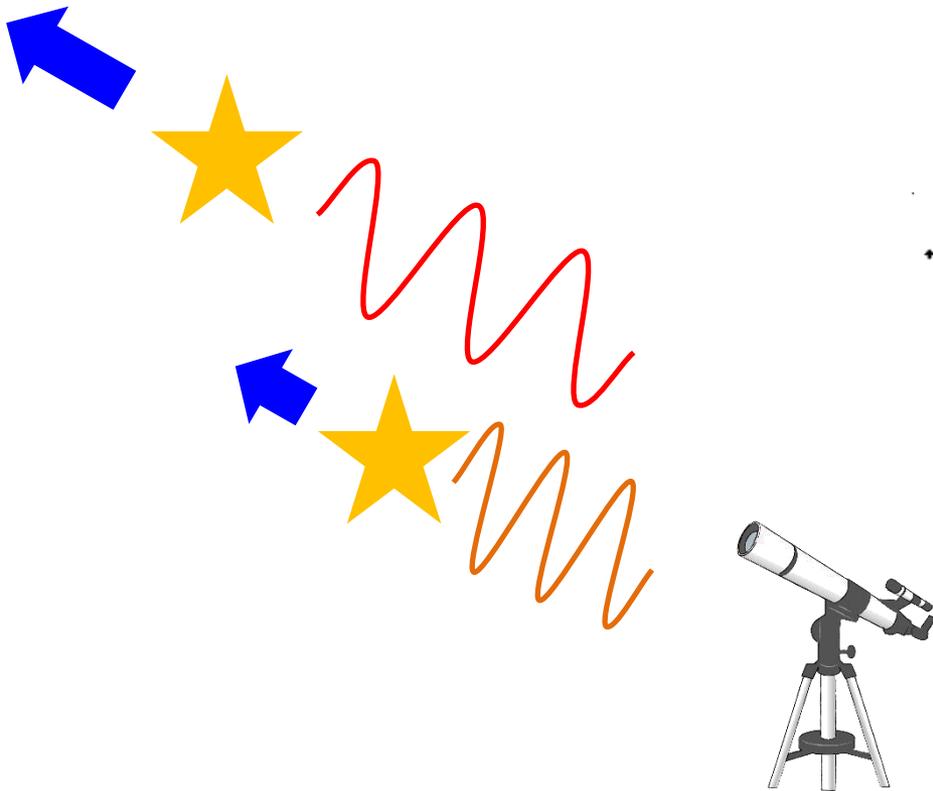
宇宙の距離梯子

- ふうつう、天体までの距離を測定するのは難しい
絶対等級
みかけの明るさ
- 重力波だと
距離が直接わかる！

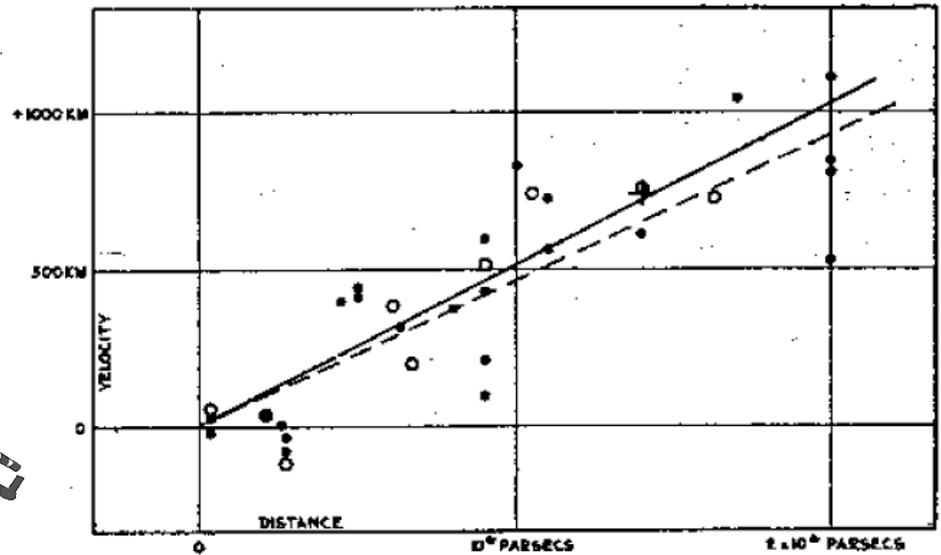


宇宙膨張

- 1929年 Edwin P. Hubble
遠くの銀河ほど早く遠ざかっている
(ハッブルの法則)
→ 宇宙膨張の発見



Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.



宇宙膨張

- 今の宇宙



宇宙膨張

- 将来の宇宙(拡大コピー)



宇宙膨張

- 重ねると？



宇宙の加速膨張

- 1998年 遠方超新星の観測による加速膨張の発見
超新星爆発はほぼ同じ明るさ
→ 距離がわかる



2011年ノーベル賞



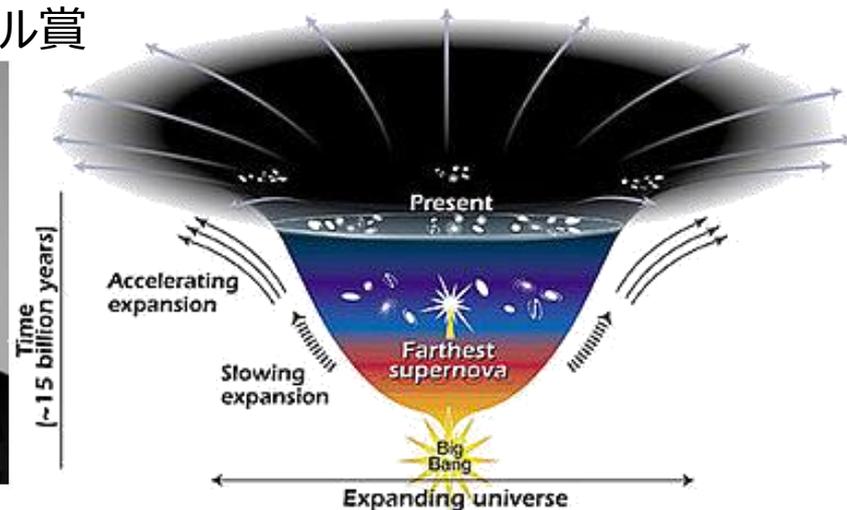
Photo: U. Montan
Saul Perlmutter
Prize share: 1/2



Photo: U. Montan
Brian P. Schmidt
Prize share: 1/4



Photo: U. Montan
Adam G. Riess
Prize share: 1/4

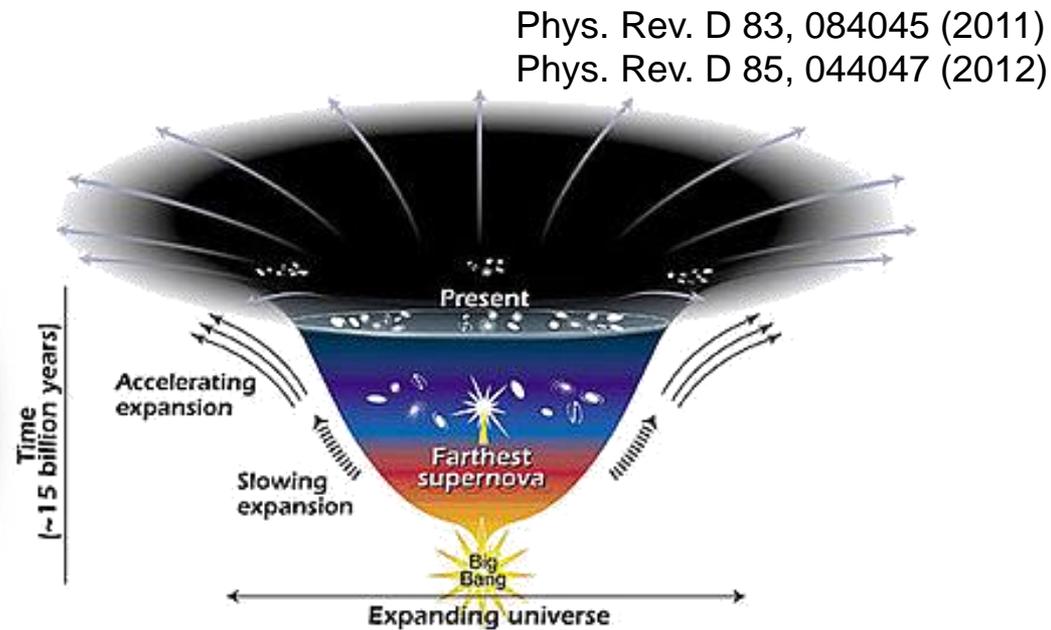
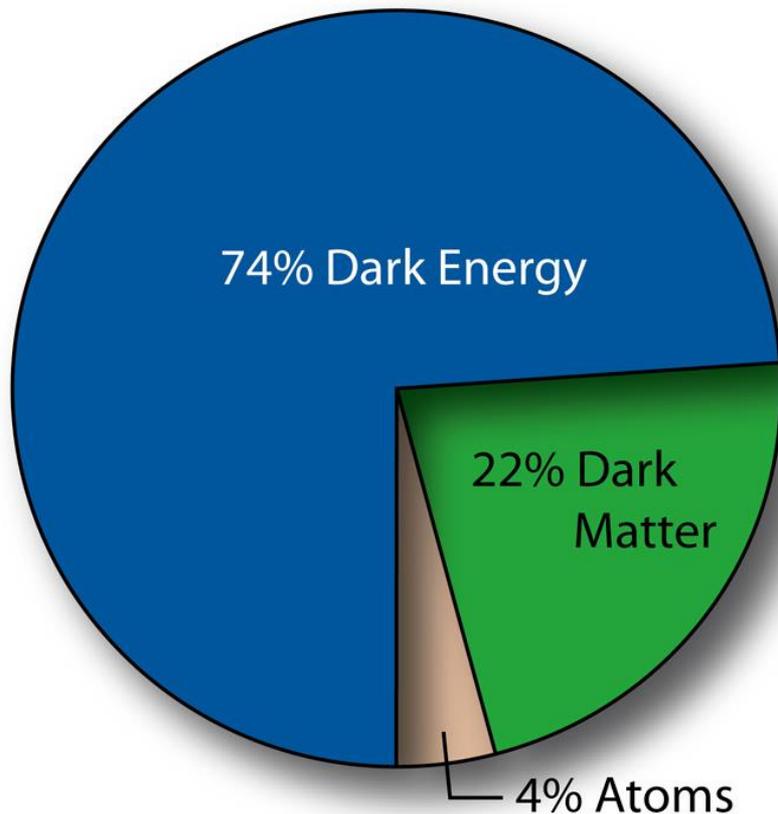


This diagram reveals changes in the rate of expansion since the universe's birth 15 billion years ago. The more shallow the curve, the faster the rate of expansion. The curve changes noticeably about 7.5 billion years ago, when objects in the universe began flying apart at a faster rate. Astronomers theorize that the faster expansion rate is due to a mysterious, dark force that is pushing galaxies apart.

The Nobel Prize in Physics 2011 was divided, one half awarded to Saul Perlmutter, the other half jointly to Brian P. Schmidt and Adam G. Riess "for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae".

重力波による宇宙膨張の観測

- 中性子星連星からの重力波で距離がわかる
- 母銀河がわかれば赤方偏移がわかる(電磁波観測)
 - **宇宙加速膨張**が確認できる
 - (重力波の位相を詳しく調べれば電磁波観測も不要)



This diagram reveals changes in the rate of expansion since the universe's birth 15 billion years ago. The more shallow the curve, the faster the rate of expansion. The curve changes noticeably about 7.5 billion years ago, when objects in the universe began flying apart at a faster rate. Astronomers theorize that the faster expansion rate is due to a mysterious, dark force that is pushing galaxies apart.

第6回まとめ

- 様々な周波数での重力波観測が重要
- 地上重力波望遠鏡(10 Hz ~ 1 kHz)
10 kmスケールの大型化計画
Einstein Telescope、Cosmic Explorer
中性子星の状態方程式
- 宇宙重力波望遠鏡eLISA計画(0.1 mHz ~ 100 mHz)
重力波の初検出とLISA Pathfinderの成功で
世界は変わった！
- 宇宙重力波望遠鏡DECIGO計画(0.1 Hz ~ 10 Hz)
原始重力波の観測に有利
宇宙膨張の観測