

最終講義

時空のさざ波—重力波を求めて

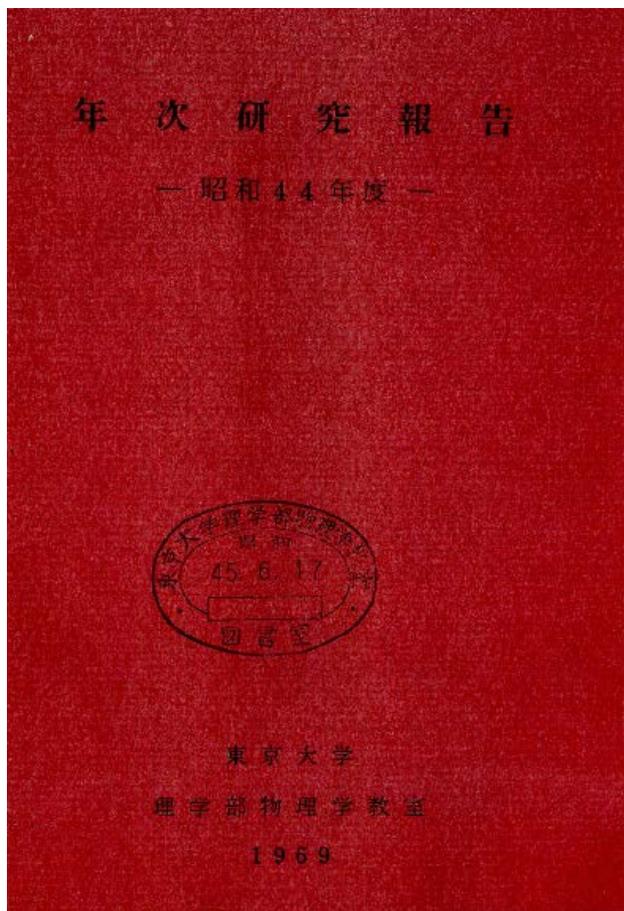
小柴ホール、March 12, 2013

坪野 公夫

東京大学理学系研究科物理学専攻

重力波研究はここから始まった

1969年 物理学教室年次報告



4. 相対論および宇宙論

素粒子論研究室

重力理論

江沢・山口は Weber の重力波検出の報告の信憑性を理論的に確かめる為に、Kepler運動をする2体系より放出される重力波の強度や振動数分布を Einstein 方程式の線型近似のもとに計算した。¹⁾江沢は代表的な天体からの重力波放出の振動数分布を推定し Weber の実験に対する推察を行った。²⁾

報 文

- 1) Z.F.Ezawa and Y.Yamaguchi, "Gravitational Waves Radiated from Two-Body Systems," J.Phys.Soc.Japan 28 No.4 (1970)
- 2) Z.F.Ezawa, "Frequency Spectra of Gravitational Waves in the Universe," J.Phys.Soc.Japan 28 No.6 (1970)

平川研究室

重力波

天体からの重力波の検出を目的とする可聴周波帯域の振動子、増巾器、信号処理装置について信号感度、 S/N 比、指向性などに重点をおいてシステムのデザインを行っている。平面内の四重極振動を使へて指向性を上げること、重力波に対し、対称性の上で活性および不活性な2つのモードの間の反相関を利用して雑音をおとすこと、振動子の冷却により熱雑音のレベルを下げることをねらっている。

報 文

平川浩正：重力波，科学 40(1970)2.

Weberによる「重力波発見」の報告(1969)

VOLUME 22, NUMBER 24

PHYSICAL REV

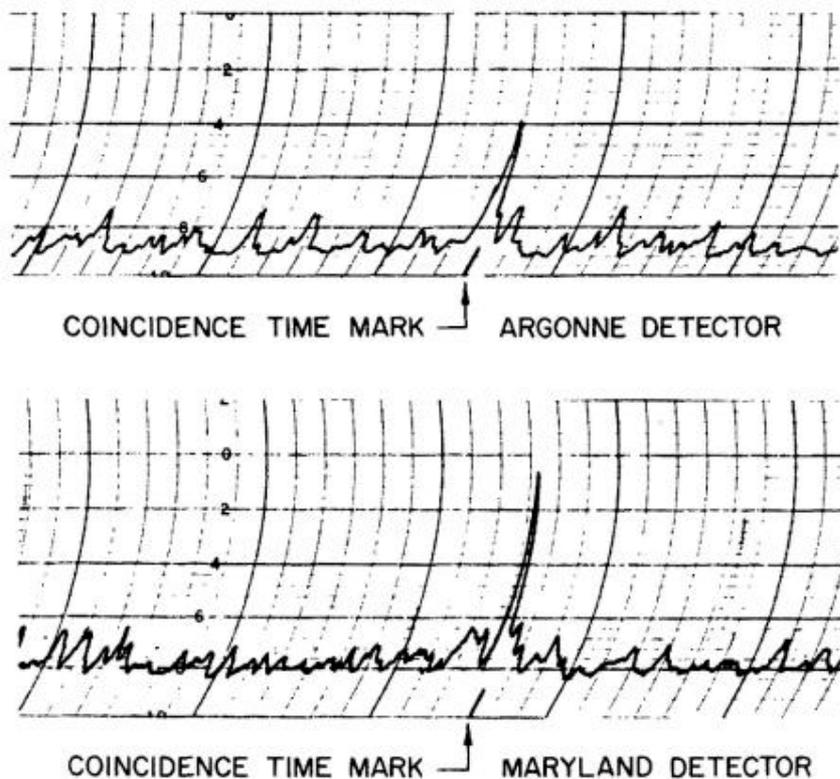


FIG. 2. Argonne National Laboratory and University of Maryland detector coincidence.



メリーランドとアルゴンヌにある2台の重力波検出器に
コインシデンスが現れた J. Weber, Phys. Rev. Lett. 24 (1969)



6・15集会 生が統一行動

大学法案成立は望み薄

文部省が提出した大学法改正案は、衆議院で可決されたものの、参議院で否決された。...

育成方針変えぬ 成田委員長 総評に反論

成田委員長は、総評の育成方針変更案に対し、反論を述べた。...

育成方針の変更は、教育界に大きな影響を及ぼす。...

総評の提議は、育成方針の根本的な変更を意味する。...

防衛二法

防衛二法は、防衛力の増強に資する。...

無理

無理な要求は、国民の負担を増加させる。...

1969年6月17日 朝日新聞朝刊 社説

社説

波乱を含むボンビードー時代の開幕

波乱を含むボンビードー時代の開幕。この時代は、社会の不安定さと変化の激しさを特徴とする。...

「重力波」の存在確認の意義

「重力波」の存在確認の意義。重力波の発見は、物理学の歴史において重要な転機となる。...

重力波の存在確認が 二カ所で同時検出

重力波の存在確認が、二カ所で同時検出された。これは、重力波の存在を強く支持する証拠である。...

「相対性理論」を立証

「相対性理論」を立証。重力波の検出は、相対性理論の予測を立証する重要な証拠である。...



重力波の検出に貢献した研究者の肖像

中国も承認の革命政府

中国も承認の革命政府。中国が革命政府を承認することは、国際情勢に大きな影響を及ぼす。...

本当なら大変な業績

本当なら大変な業績。この発見は、人類の知識の地平を大きく広げる。...



看聽師に側室宿舎を

看聽師に側室宿舎を。この問題は、社会正義と人権保護の観点から重要な意義を持つ。...



安保PR誌に疑問

安保PR誌に疑問。この誌物の内容は、国民の知るべき事実を正確に伝えているのか。...

ショパンの生年月日は

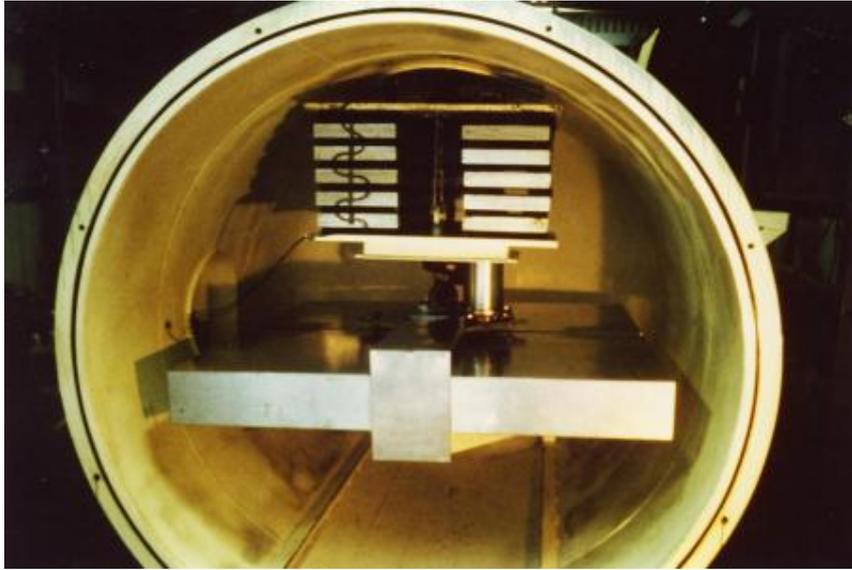
ショパンの生年月日は、1810年2月26日である。...

平川浩正先生と共振型重力波検出器

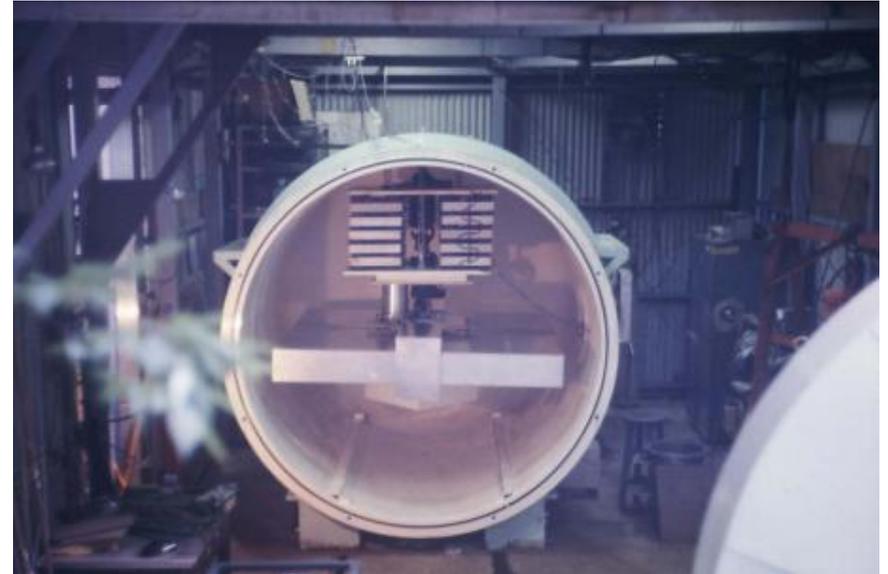


理学部旧1号館中庭のバラック小屋 1971年

Weber実験の追試



2号アンテナ



1号アンテナ

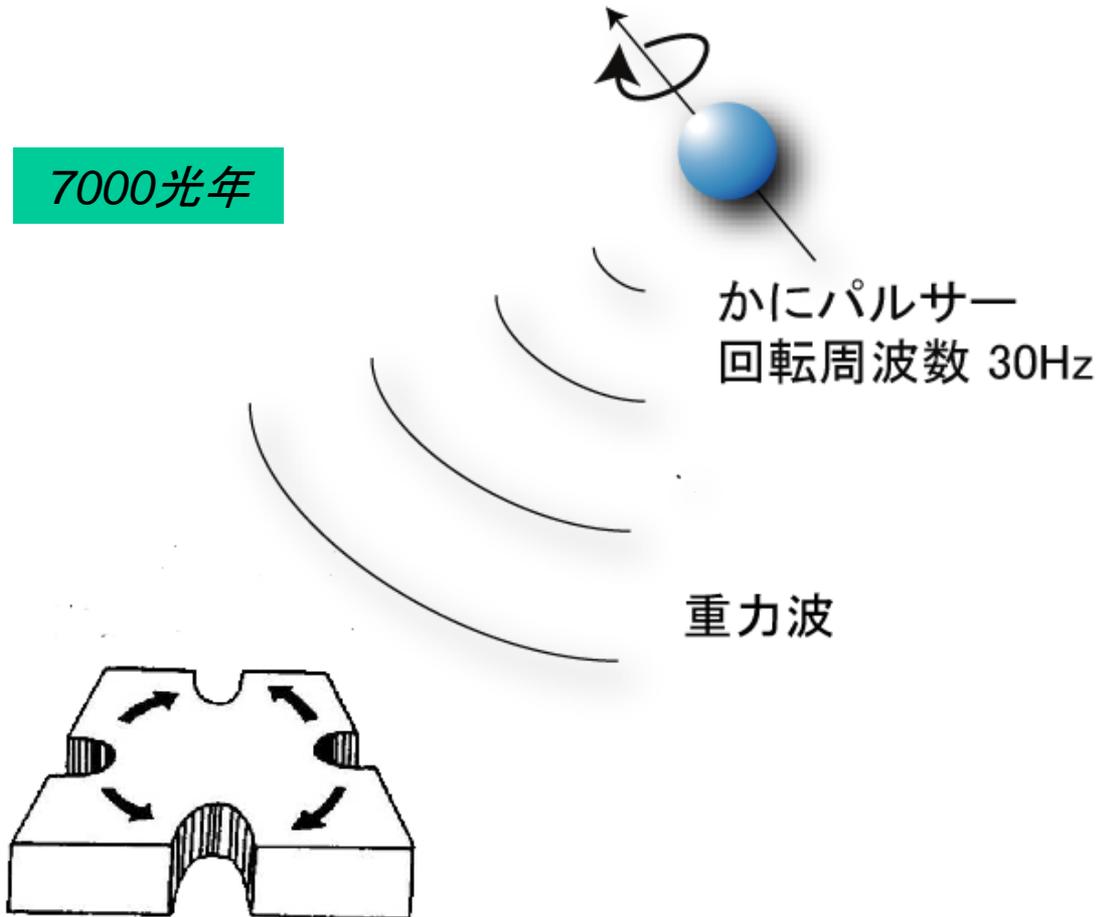
Weber実験 (1660Hz)より1桁低い周波数(145Hz)で観測

➡ Weber イベントは観測できなかった

H. Hirakawa et al, Phys. Rev. Lett. 35 (1975)

かにパルサーからの重力波検出実験

(1974-1993、東京大学理学部)



共振型重力波アンテナ
共振周波数 60Hz

共振周波数を調整するための作業



金ヤスリを使ってアンテナの切込みを削る

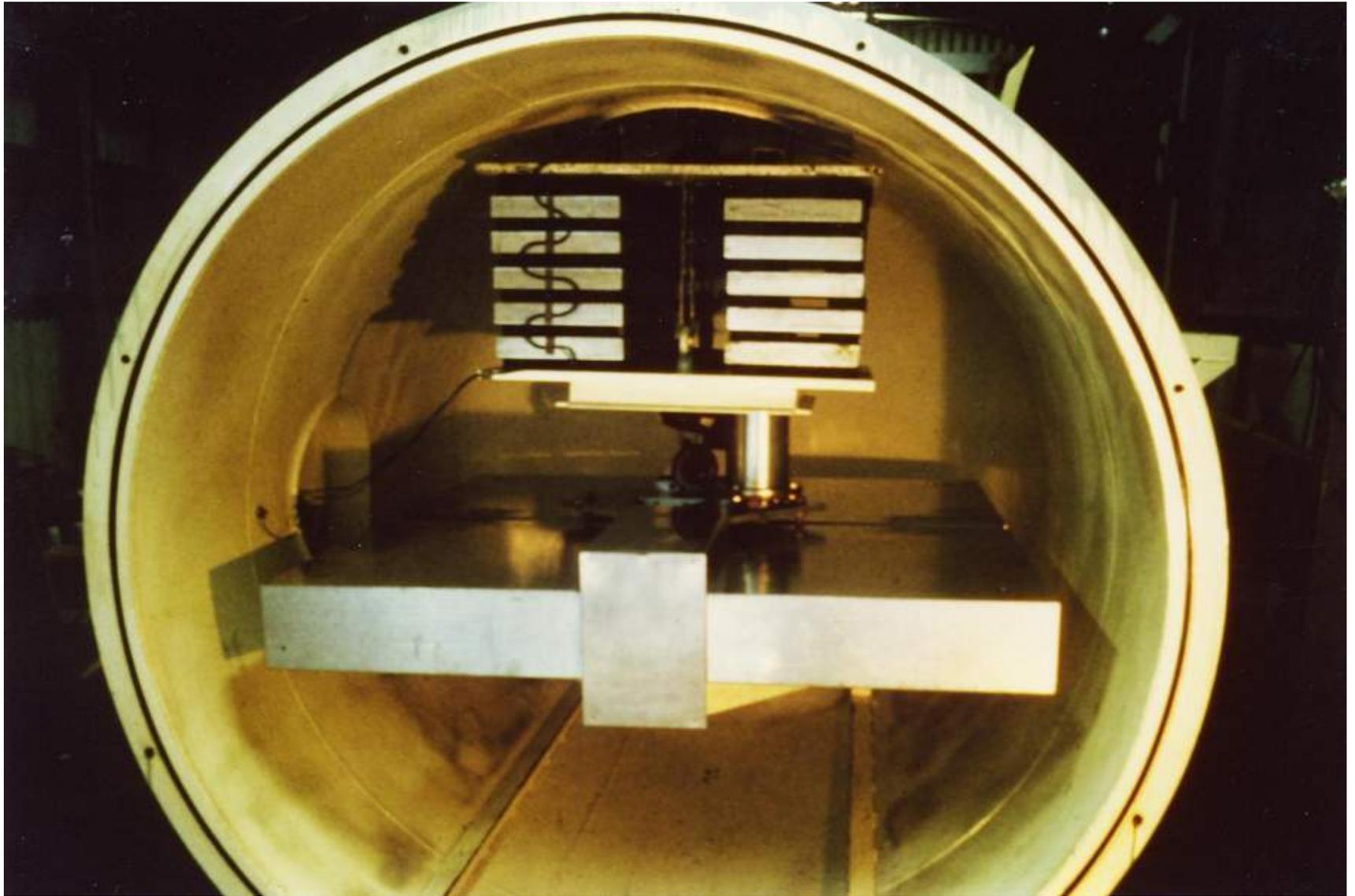


方形型共振型重力波アンテナ (1.4トン)

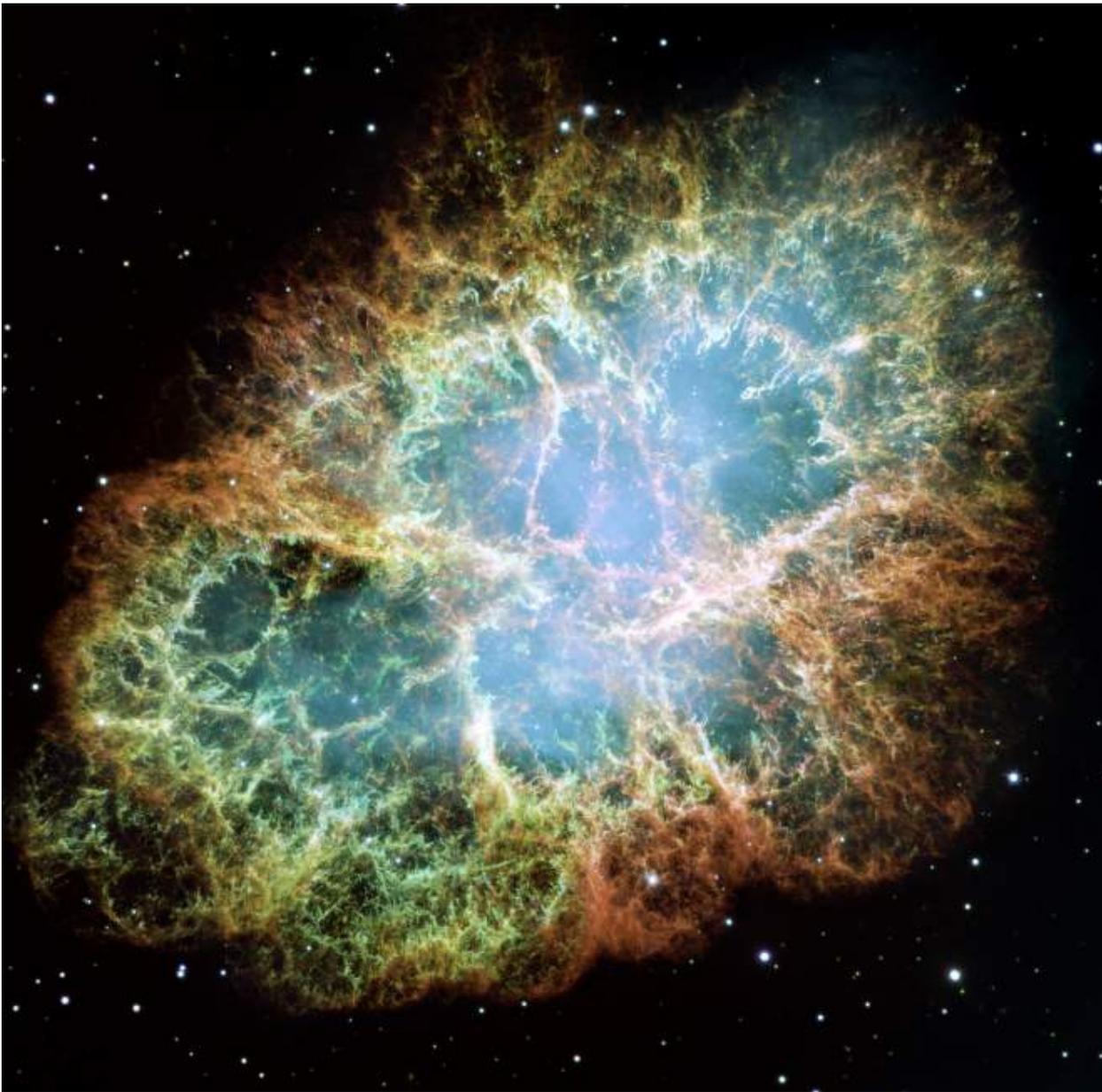
共振周波数を調整するための作業(2)



汗と泥まみれの作業



真空タンク内で防振された60Hz重力波アンテナ

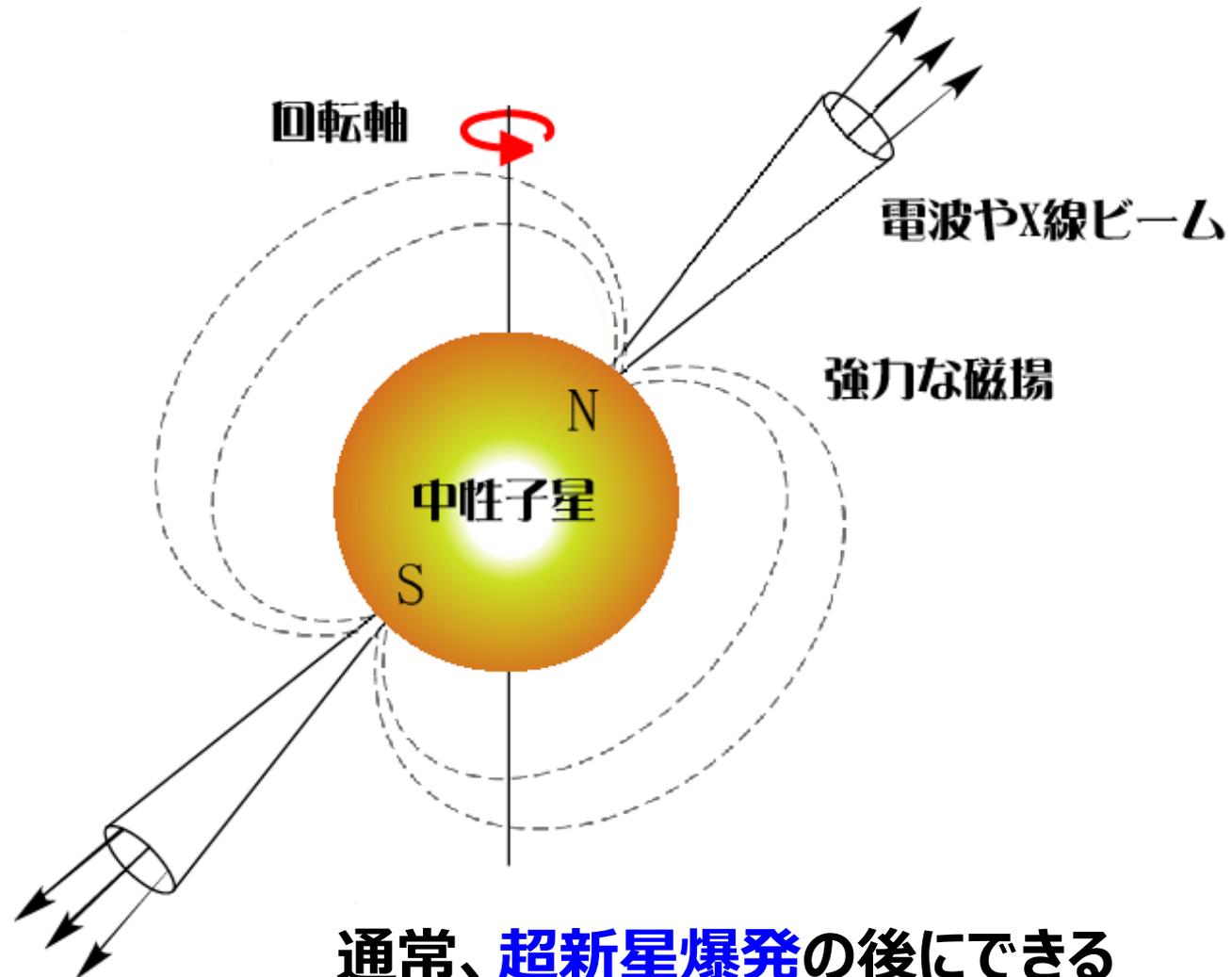


ハッブル宇宙望遠鏡で見た1054年の超新星爆発の残骸、カニ星雲



X線天文衛星チャンドラーがとらえたカニ星雲のパルサー

パルサーは回転する中性子星



藤原定家の「明月記」に残る SN 1054 (カニ星雲) の記述

見南方或去野陣約軍星雲本休備之欽
 須冷泉院天喜二年四月中旬以後丑時客
 星出蓄夜見東方天周星大如歲星
 二條院承方二年四月廿二日し丑亥時客
 登見大徹宮中
 高倉院治承五年六月廿五日庚午戌時客
 星見北方進王良星守傳舍星
 午次許心跡為米更外甘減之中加詞但忠
 典之充田非飼短時極能治之
 常隨治侍之小婢依母病危急行南京地病
 之最中失手臂之便
 九日酉中 朝天暗時

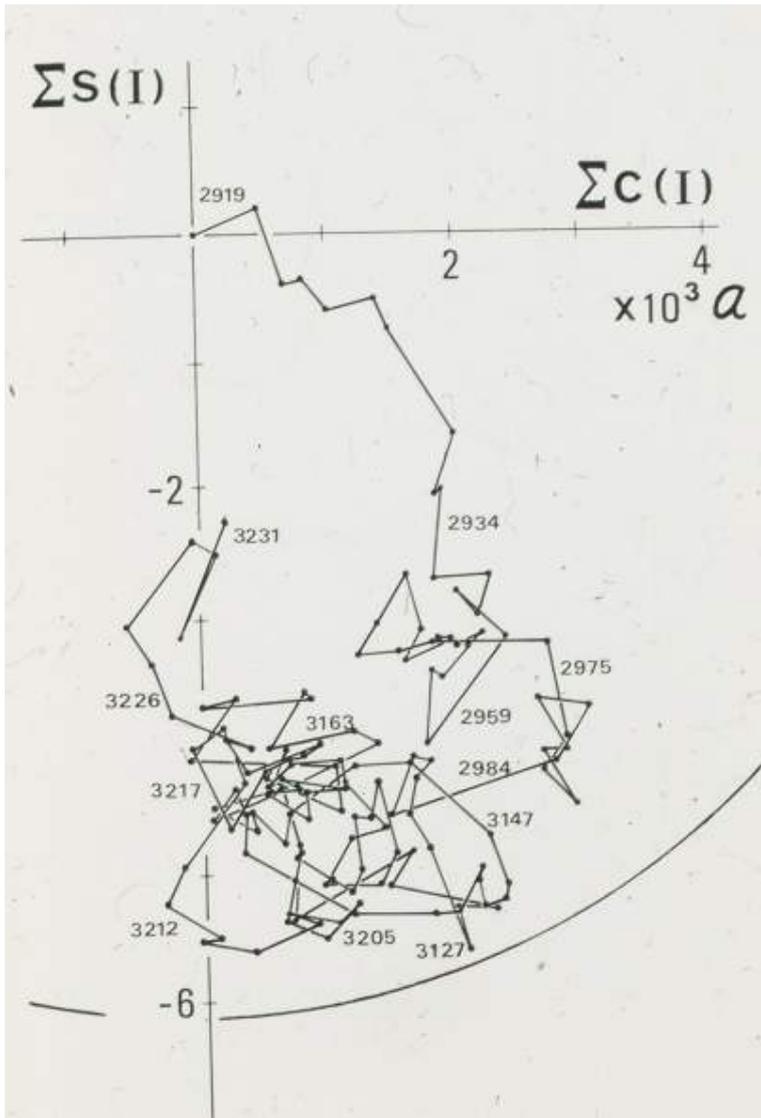
後冷泉院天喜二年四月中旬以後丑時客
 星出蓄參度見東方天周星大如歲星

アマチュア天文家射場保昭氏によって、これがカニ星雲の出現（超新星爆発）の記録であることが判明した

共振型重力波アンテナの高感度化（東大、KEK）



極低温を利用した高感度重力波アンテナ（ねじれ型）



H. Hirakawa, K. Tsubono, M.-K. Fujimoto
Phys. Rev. D **17** (1978)

Crab I 実験のフーリエ解析結果

かにパルサーからの重力波検出実験のまとめ

実験	年	アンテナ質量 (kg)	アンテナ温度 (K)	アンテナQ値	重力波の上限 h
Crab I	1978	400	300	4.5×10^3	1.1×10^{-19}
Crab II	1979	1,400	300	6.4×10^4	8.4×10^{-21}
Crab III	1986	74	4.2	2.0×10^7	1.9×10^{-21}
Crab IV	1993	790	4.2	4.8×10^7	5×10^{-23}

2008年、アメリカのLIGOレーザー干渉計重力波検出器が新たな上限を達成

$$h < 3.4 \times 10^{-25}$$

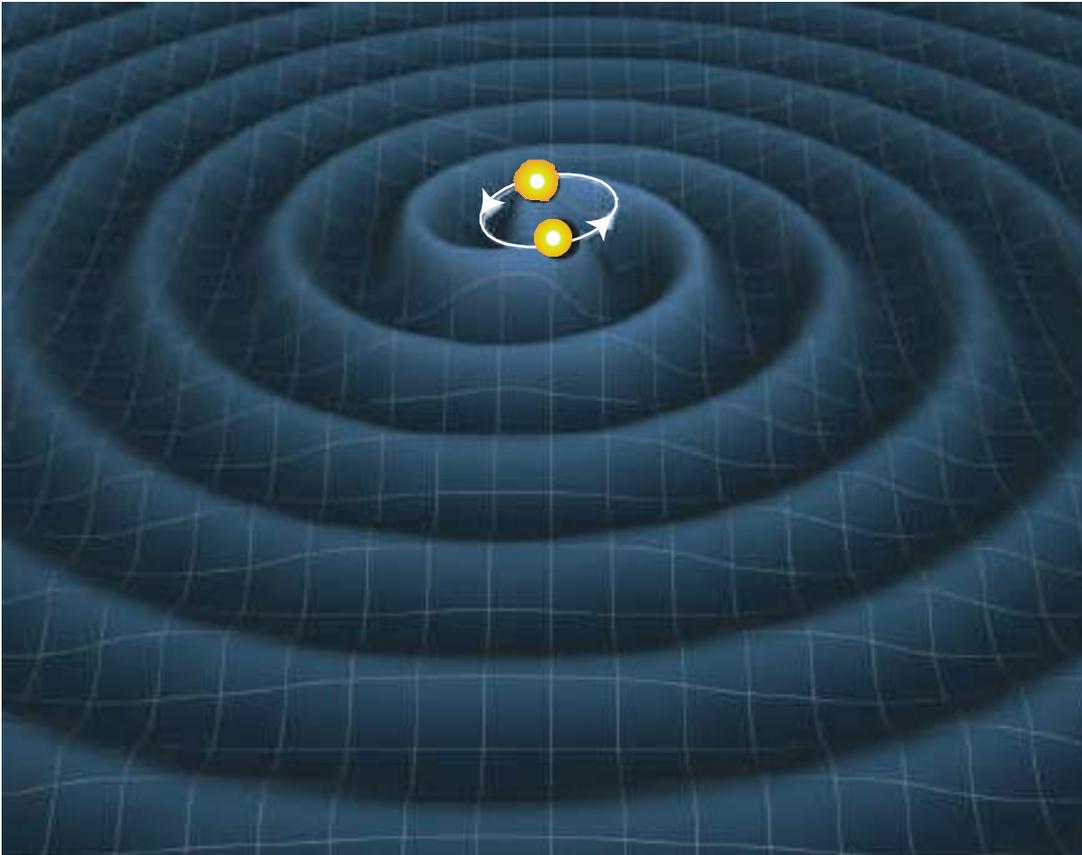
Abbott et al. ApJ Lett. 683 (2008) 45

重力波とはなにか

重力波とは

光の速度で伝搬する時空のひずみ ➡ 時空のさざなみ

(RIPPLE OF THE SPACE-TIME)



アインシュタインによって、重力とは時間と空間（時空）の曲り（ひずみ）であることがわかった。

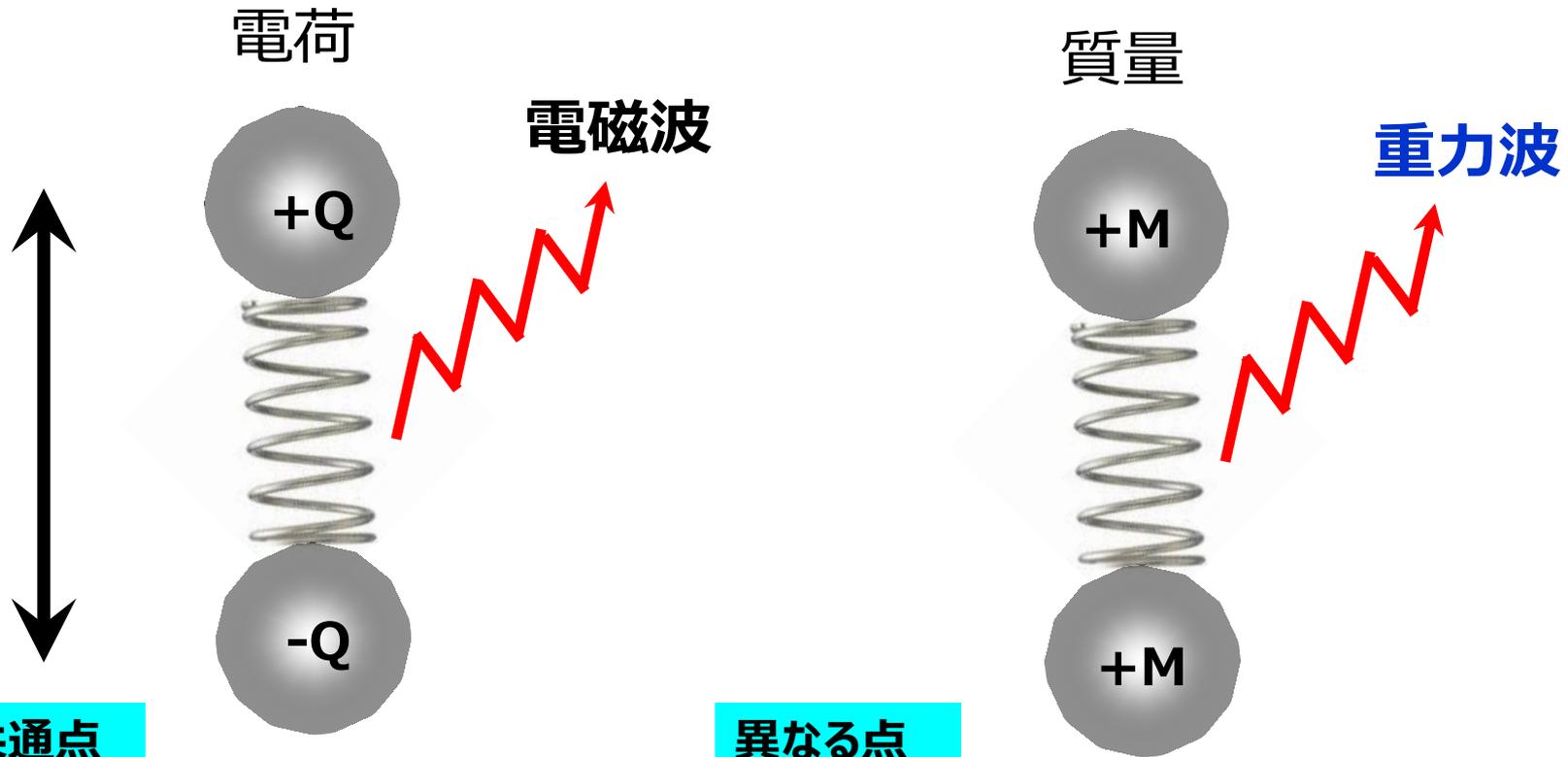
重力源が時間的に変化すると、このひずみも時間的に変化して四方八方に広がっていく。

➡ **重力波**

重力波研究の歴史

- 1916年 **アインシュタイン**
一般相対性理論から重力波を導く
- 1974年～ **ハルス&テイラー**
連星パルサーの観測により**間接的**に重力波の存在を証明
(1993年ノーベル物理学賞)
- 2000年～ **レーザー干渉計**を用いた本格的
重力波観測が始まる
- ～現在 **未だ直接検出**はされず

重力波と電磁波の発生



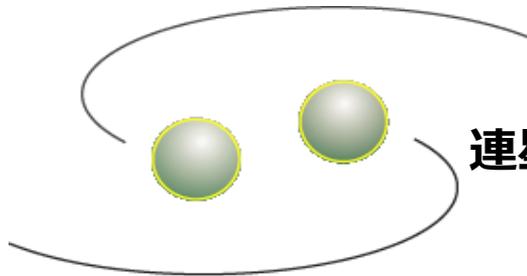
共通点

- 横波
- 2つの偏波
- 光速で伝搬
- エネルギーを運ぶ

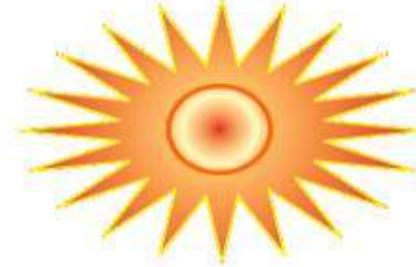
異なる点

- 電磁波は双極子放射から、重力波は4重極放射から
- 重力波は電磁波に比べて相互作用が極めて弱い

重力波研究のめざすこと



連星中性子星の合体



超新星爆発

重力波で何がわかるのか

1. 強い重力場における**相対論の検証**
2. **ブラックホール**生成の瞬間を見る
3. **中性子星、ガンマ線バースト**等の知見
4. 究極的には、宇宙の誕生（**ビッグバン**）直後を見る

重力波の源

- **バースト重力波**
 - 連星中性子星の合体
 - ブラックホール連星の合体
 - 超新星爆発
- **連続重力波**
 - パルサーの回転、振動
 - 連星中性子星の公転運動
- **背景重力波**
 - インフレーション起源
 - Cosmic string (宇宙紐)

レーザー干渉計重力波検出器

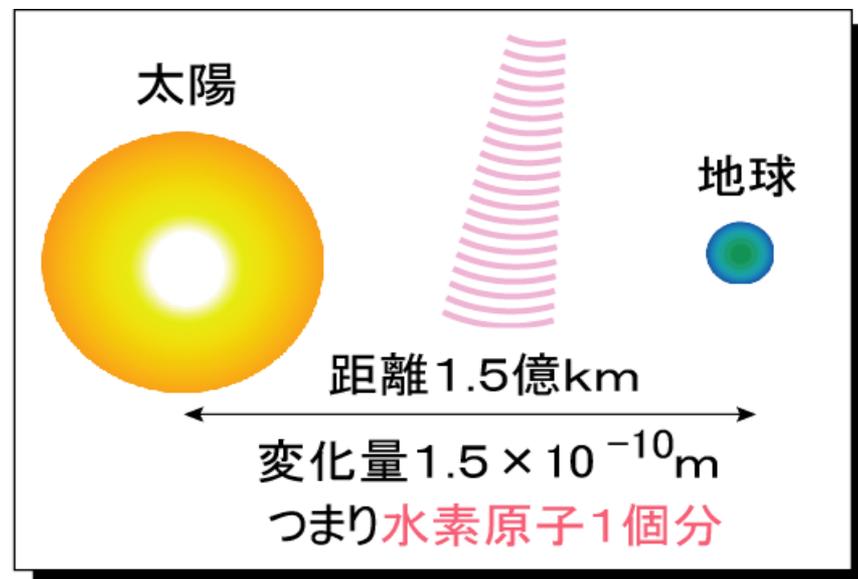
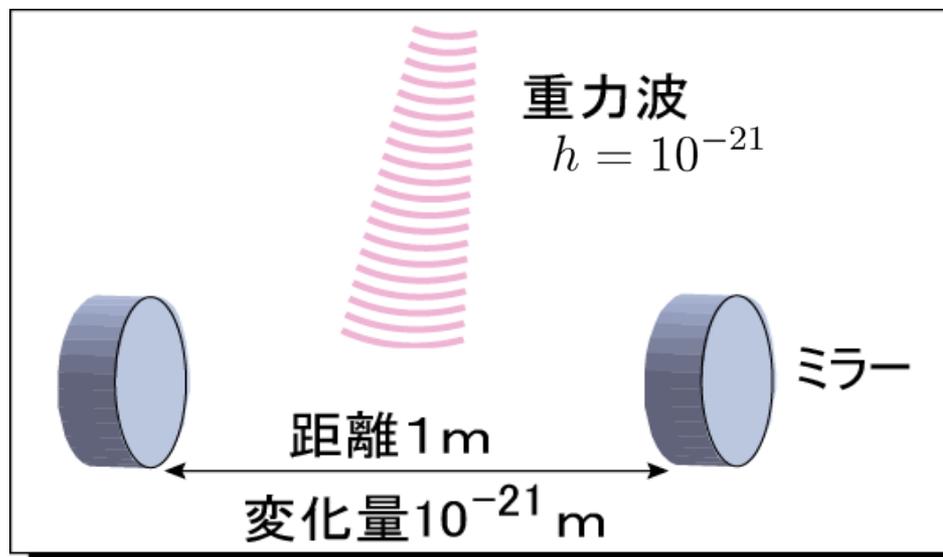
重力波検出の方法

重力波の効果：2点間の距離の変化

重力波の振幅： h =空間のひずみ量であり無次元

振幅 h の重力波によって、長さ l の距離が Δl だけ変化する

$$\Delta l = hl$$



最大基線長：宇宙

$h = 10^{-26}$ の連続重力波が宇宙に入射したとしても

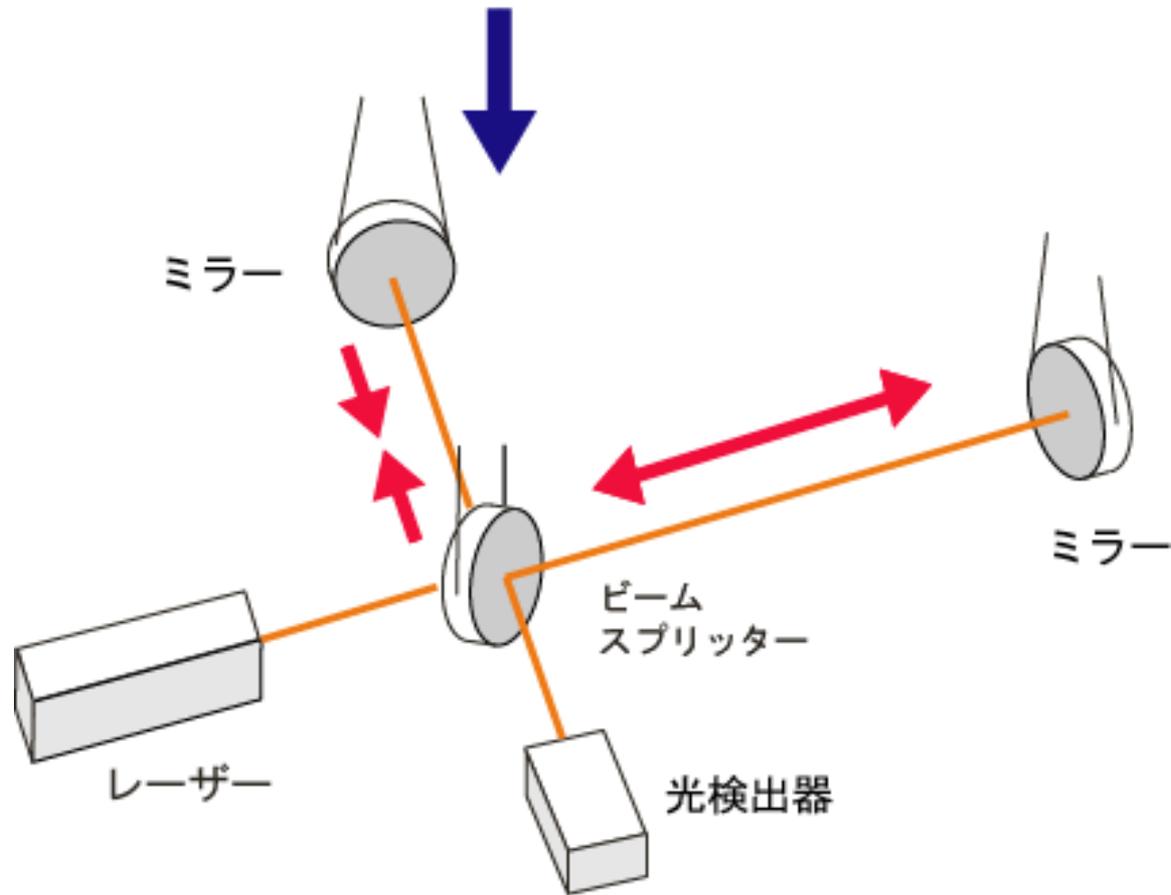
宇宙の大きさ ≈ 137 億光年

$\approx 1.3 \times 10^{26}$ m

宇宙の大きさが 1m 程度伸び縮みするだけである

重力波検出  **極限的計測技術**を必要とする

重力波



光の干渉の変化を見る

レーザー干渉計重力波検出器

本郷3mレーザー干渉計重力波検出器



構想：坪野 設計：三尾 組立：河邊

3m干渉計を用いて干渉計技術の基礎技術を開発

- K. Kawabe, et al, Appl. Phys. B 62 (1996)
FPM型干渉計の実現
- M. Ando, et al, Phys. Lett. A 248 (1998)
リサイクリング技術の確立
- K. Arai, et al, Phys. Lett. A 273 (2000)
新しい変調復調法の提案

TAMAプロジェクト 1995-



基線長300mレーザー干渉計

TAMA300重力波検出器
(国立天文台三鷹)



TAMA300センタールーム 30

TAMA地下施設の建設



国立天文台三鷹キャンパス

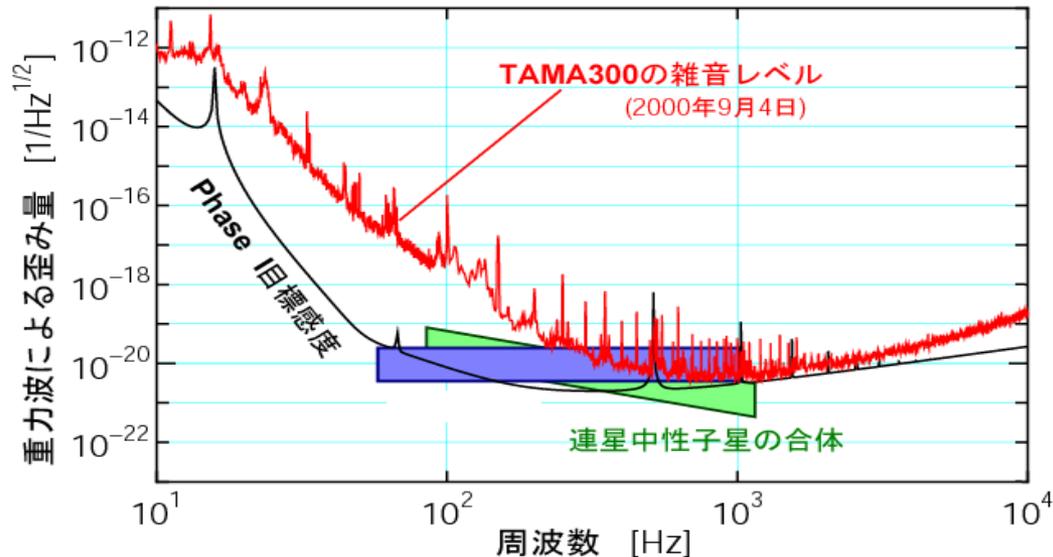
TAMA300レーザー干渉計



- 国立天文台
- 東京大学
- 電気通信大学
- KEK
- ...

TAMAの成果

世界最高感度を達成！（2000年9月）



2000年から2002年まで世界最高感度を誇る

- **M. Ando**, et al. : **Stable Operation of a 300-m Laser Interferometer** with Sufficient Sensitivity to Detect Gravitational-Wave Events within Our Galaxy, Phys. Rev. Lett. 86 (2001) .
- H. Tagoshi, et al. : The First Search of Gravitational Waves from **Inspiring Compact Binaries** using TAMA300 data, Phys. Rev. D63 (2001) .
- **M. Ando**, et al. : **Analysis for burst gravitational waves** with TAMA300 data, Class. Quantum Grav. 21 (2004) .
- B. Abbott et al.: Upper limits from **the LIGO and TAMA detectors** on the rate of **gravitational-wave bursts**, Phys. Rev. D 72 (2005).
- B. Abbott et al.: **Joint LIGO and TAMA300 search** for gravitational waves from **inspiralling neutron star binaries**, Phys. Rev. D 73 (2006).

レーザー干渉計に関する技術開発

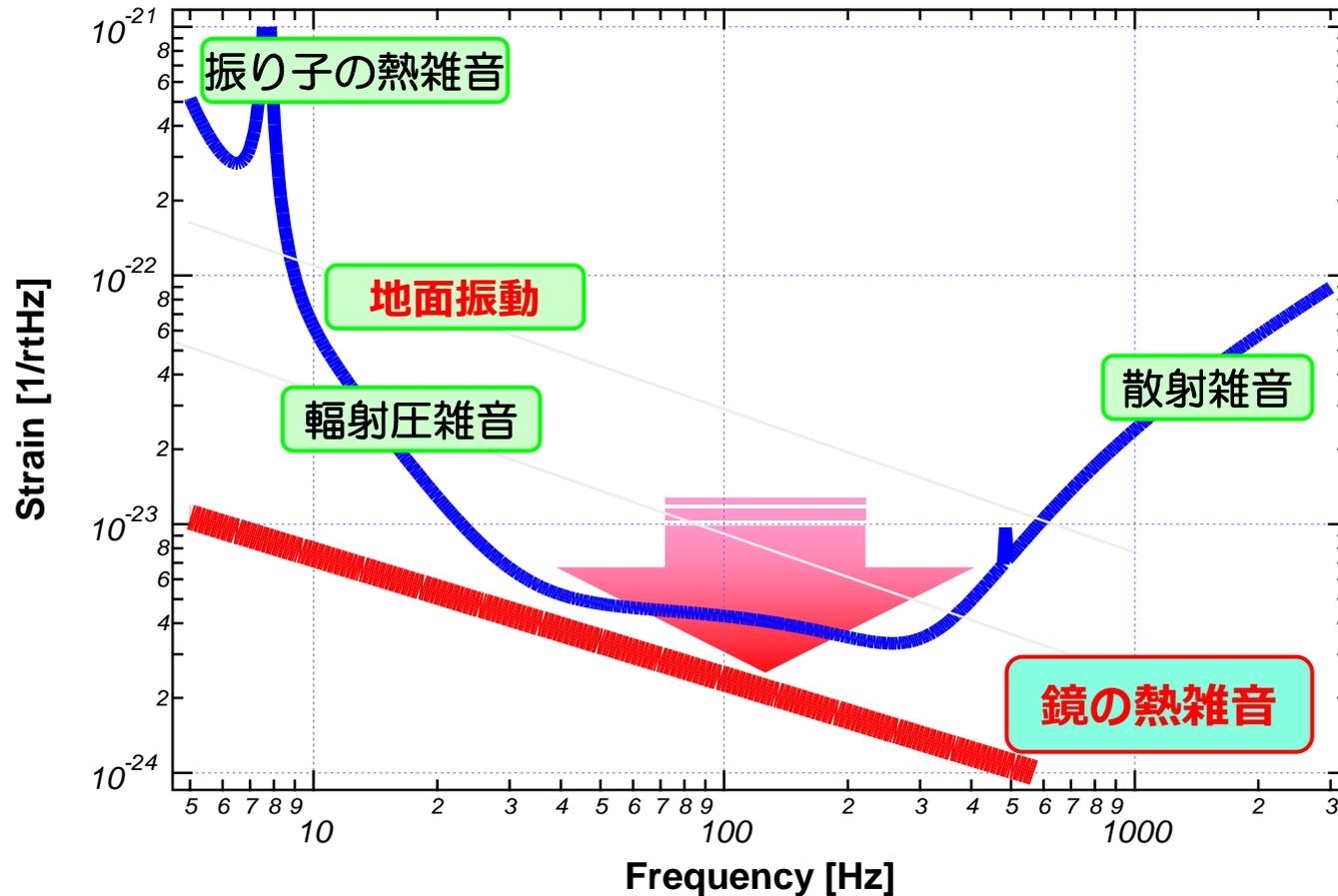
博士論文

- 1991年 **A. Mizutani**
レーザー干渉計を用いた共振型重力波検出器の開発
- 1994年 **M. Araya**
Optical Mode Cleaner for the Interferometric Gravitational Wave Detector
モードクリーナーの基礎技術開発
- 1997年 **N. Kondo**
Disk-type resonant antenna with a laser transducer for monitoring gravitational waves
共振型アンテナにレーザー干渉計を実装
- 1999年 **K. Tochikubo**
Development of 300-m Fabry-Perot cavity with automatic alignment control
TAMAに自動アライメント装置を導入

その他

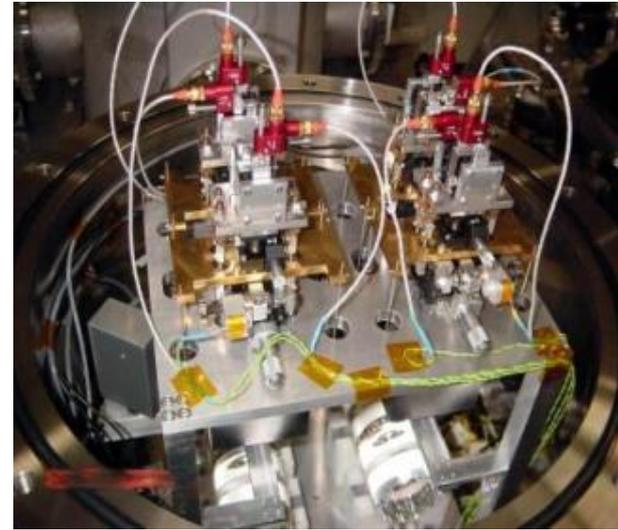
- K. Tsubono and **S. Moriwaki**, Jpn. J. Appl. Phys. 31 (1992)
Nd:YAGレーザーの強度安定化

レーザー干渉計の感度は何で決まるのか

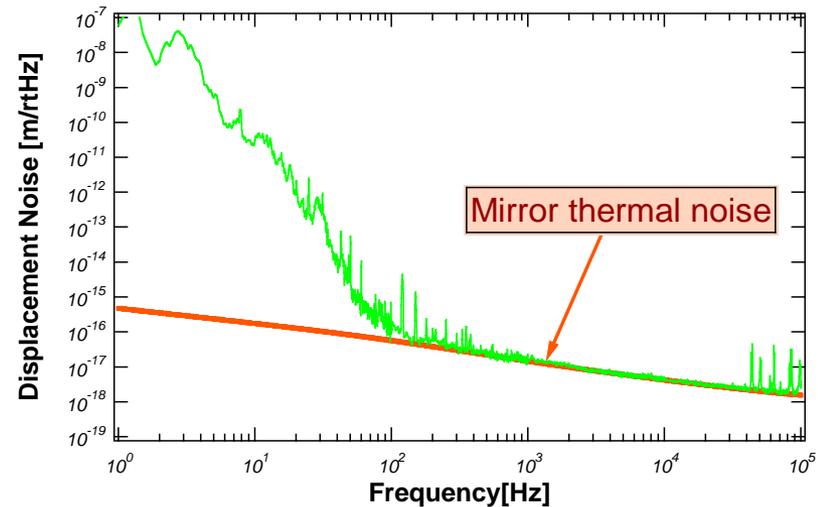
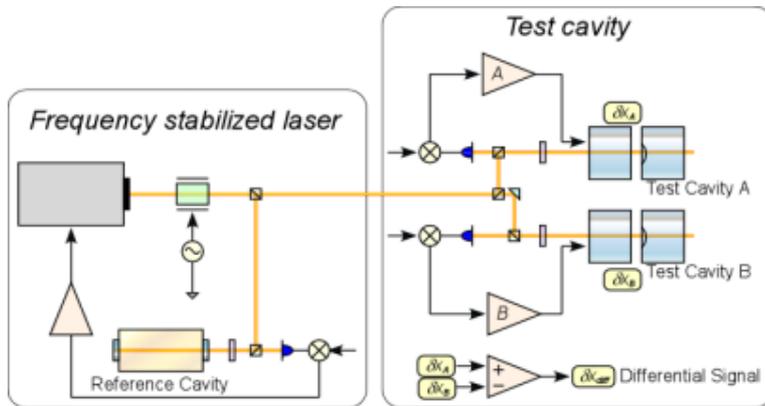


レーザー干渉計重力波検出器の感度

鏡の熱雑音の研究



周波数安定化されたレーザーで光共振器(Test cavity)の鏡の熱雑音を測定

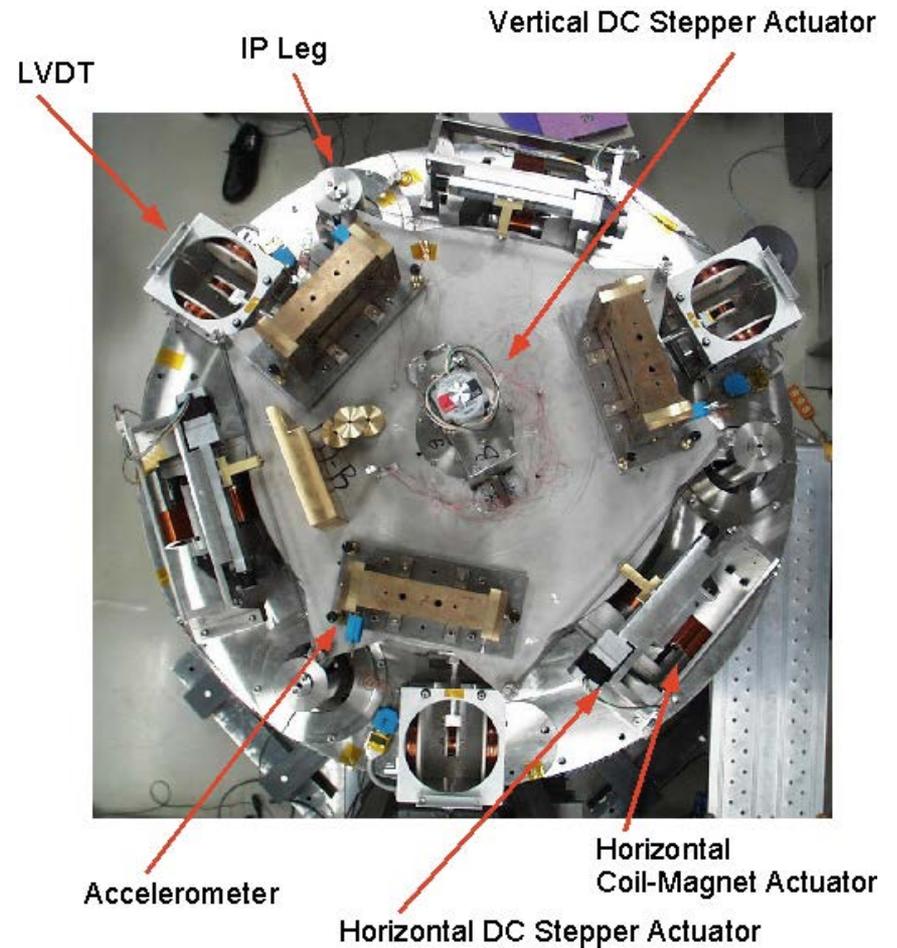


- **K. Numata**, et al, Phys. Rev. Lett. 91 (2003)
世界初となる熱雑音の広帯域測定を実現

鏡の熱雑音の研究(2)

- **N. Ohishi**, et al, Phys. Lett. A 266 (2000)
機械コンダクタンス測定による熱雑音の推定法
- **K. Yamamoto**, et al, Phys. Lett. A 321 (2004)
非一様分布散逸による熱雑音の研究
- **K. Yamamoto**, et al, Phys. Rev. D 75 (2007)
熱雑音推定のための新しいモード展開法の提案

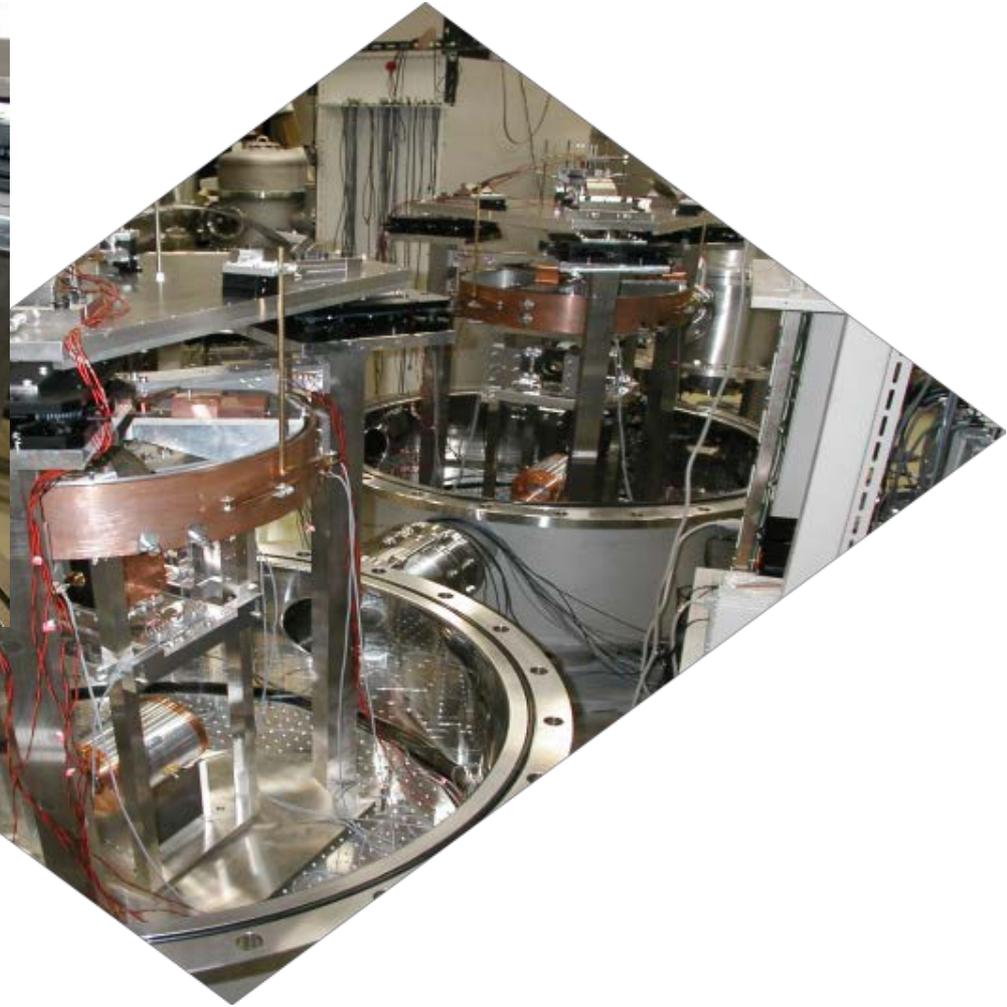
地面振動からの防振 SAS



新しい低周波防振系SASの開発

- **A. Takamori** et al, Class. Quantum Grav. 19 (2002)

低周波防振系の開発 SPI



- **Y. Aso**, et al, Phys. Lett. A 327 (2004)
suspension-point interferometer (SPI)の開発

大型低温レーザー干渉計KAGRA



世界の主なレーザー干渉計重力波検出器

LIGO 4kmレーザー干渉計



2010年日本のKAGRA計画スタート！



大型低温重力波望遠鏡KAGRA

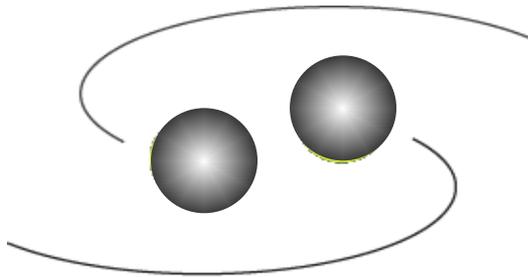


KAGRAの特徴

- 大規模な重力波
天文台(3km×3km)
- 地下の安定かつ静寂な
環境を利用
- 鏡を低温にして熱雑音
を低減

KAGRAが狙う連星中性子星の合体

連星合体時の重力波予想波形



Inspiral phase

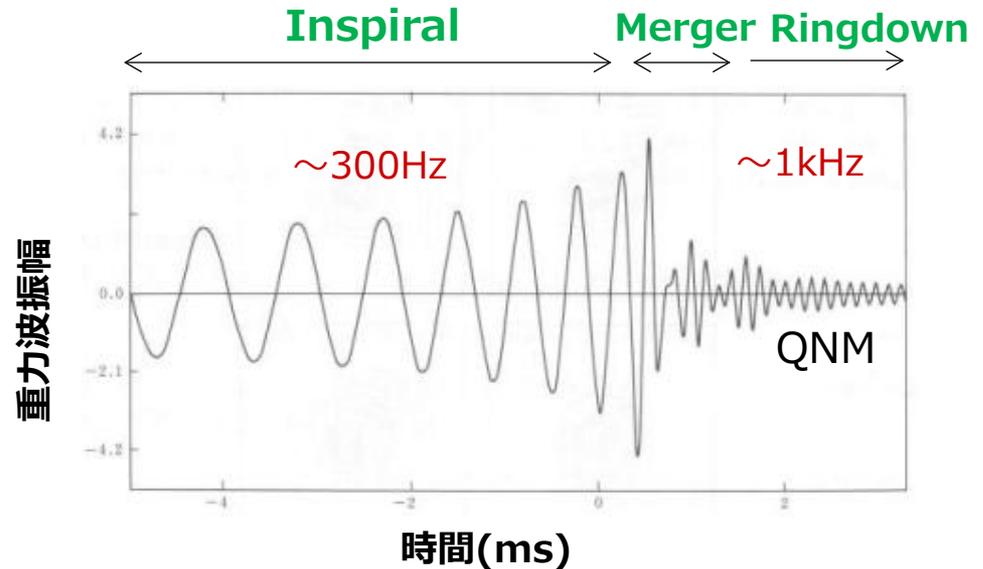
- chirp波形→質量
- 振幅→地球までの距離
- 偏波→軌道面の傾き

Merger phase

- さまざまな初期、境界条件による
→半径、粘性、状態方程式、潮汐効果（変形、分裂）の情報

Ringdown

- 周波数→ブラックホール質量
- 減衰時間→ブラックホールのスピン



連星合体の波形からさまざまな
情報が得られる

KAGRAが狙う主なターゲット

- 連星中性子星の合体
- ブラックホール連星の合体
- 大質量星の重力崩壊
- 回転するパルサー

KAGRAのデザイン感度（暫定値）が達成されると、270Mpc（9億光年）遠方で起きた連星中性子星の合体を検出可能である



1年に数回の重力波イベント検出が可能となる



重力波天文学成立の第一歩となる

KAGRAが切り拓く新しい物理・天文学

1. 強い重力場における相対論的効果の検証
2. ブラックホール生成の瞬間を見る
3. その他、中性子星、GRB等の知見
4. 究極的には、宇宙の始まりを見る

 **重力波天文学**の幕を開く

KAGRA建設の現状



トンネルの掘削



低温ミラーを収納するクライオスタット



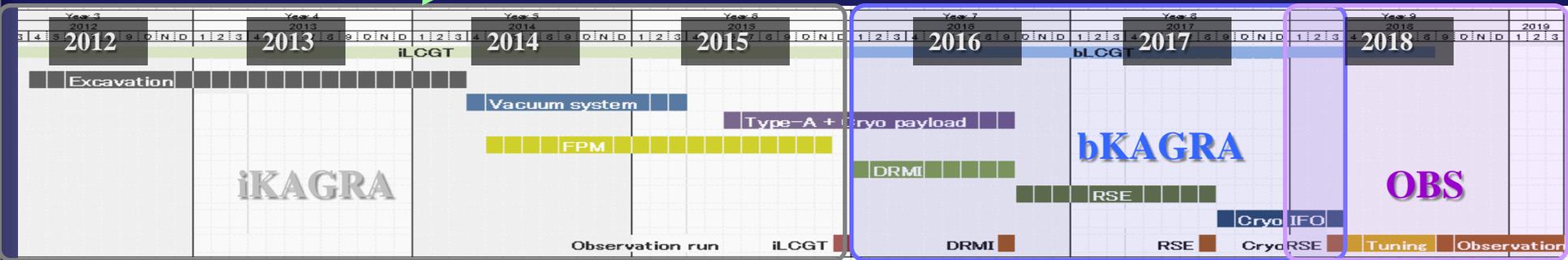
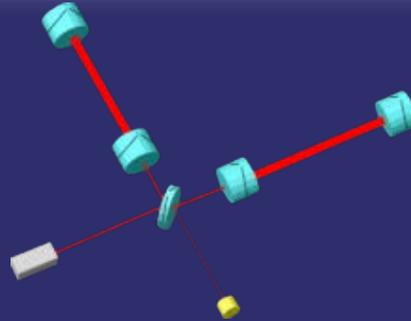
真空ダクト

KAGRAの年次計画

・iKAGRA (2010.10 – 2015.12)

3-km FPM interferometer

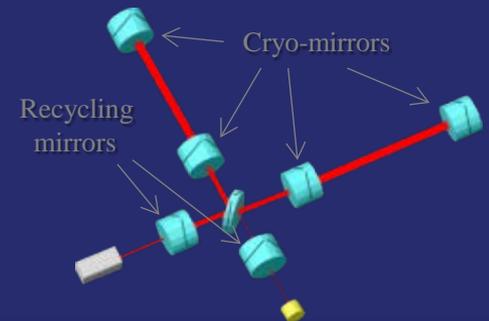
- Baseline 3km room temp.
- Operation of total system with simplified IFO and VIS.



・bKAGRA (2016.1 – 2018.3)

Operation with full config.

- Final IFO+VIS configuration
- Cryogenic operation.



M. Ando

地下サイト（神岡）の優位性

- 直接、地面振動雑音が小さいだけでなく
- 非線形効果による低周波から高周波への up-conversion 雑音が小さい
- 鏡の振動が小さいので、鏡位置制御のゲインを小さくできる
→ 制御から回り込む雑音が低減される

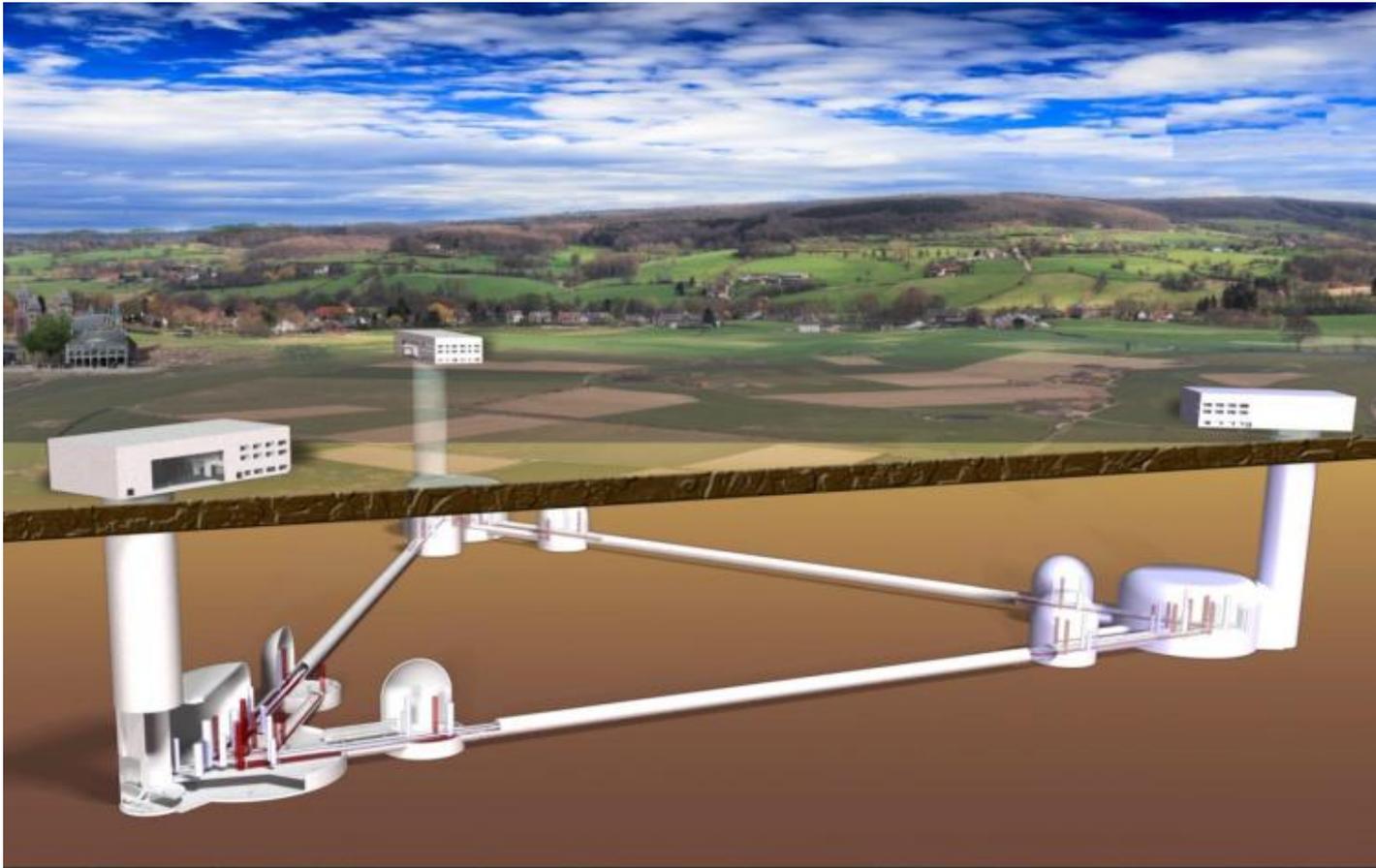
1991年神岡サイト調査



早川幸男先生に同行

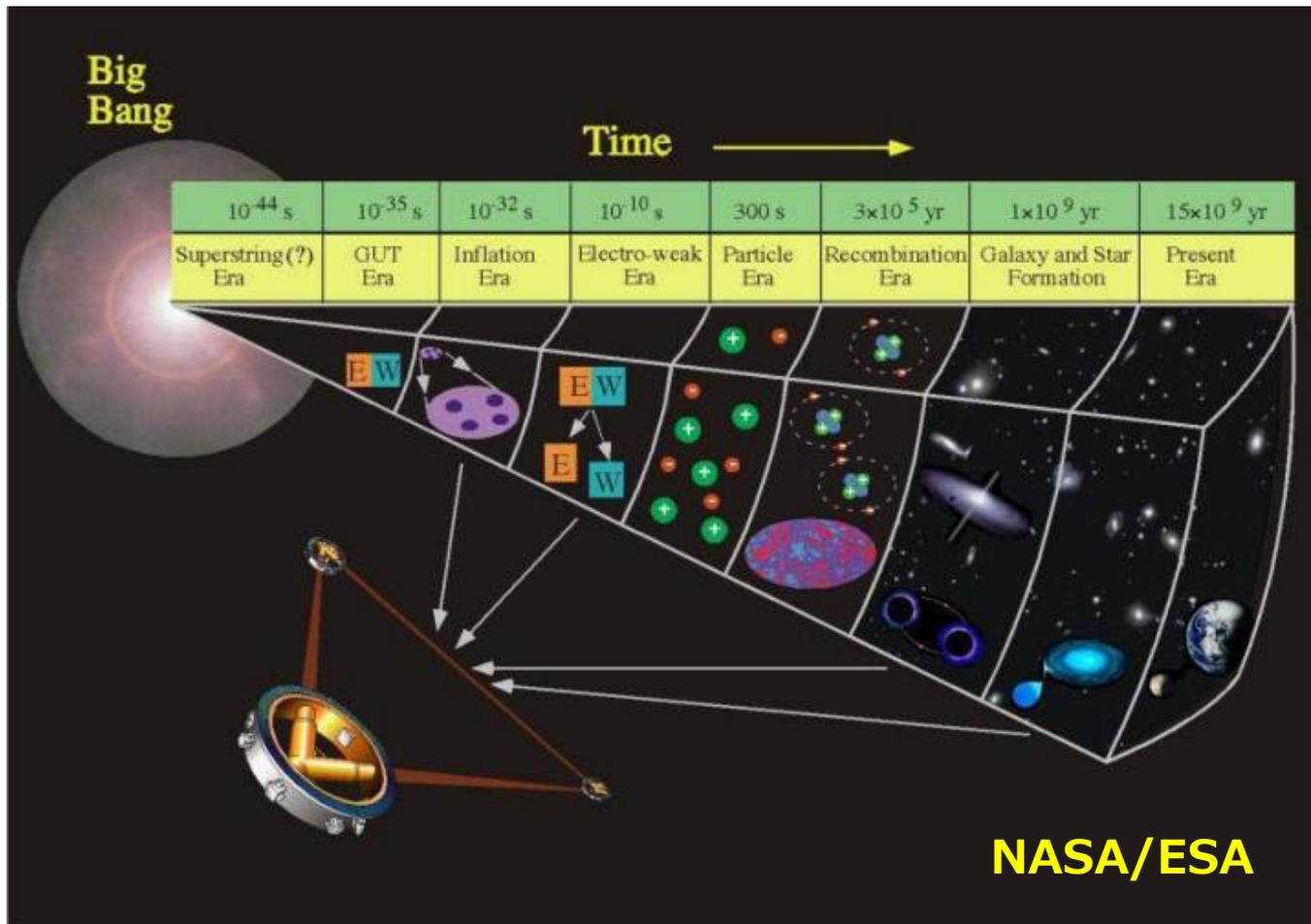
3rd-generation detector: ET (Einstein Telescope)

ヨーロッパの計画：基線長10km、地下、低温干渉計
2026観測開始予定、さらに1ケタの感度向上



宇宙空間を利用した重力波検出実験

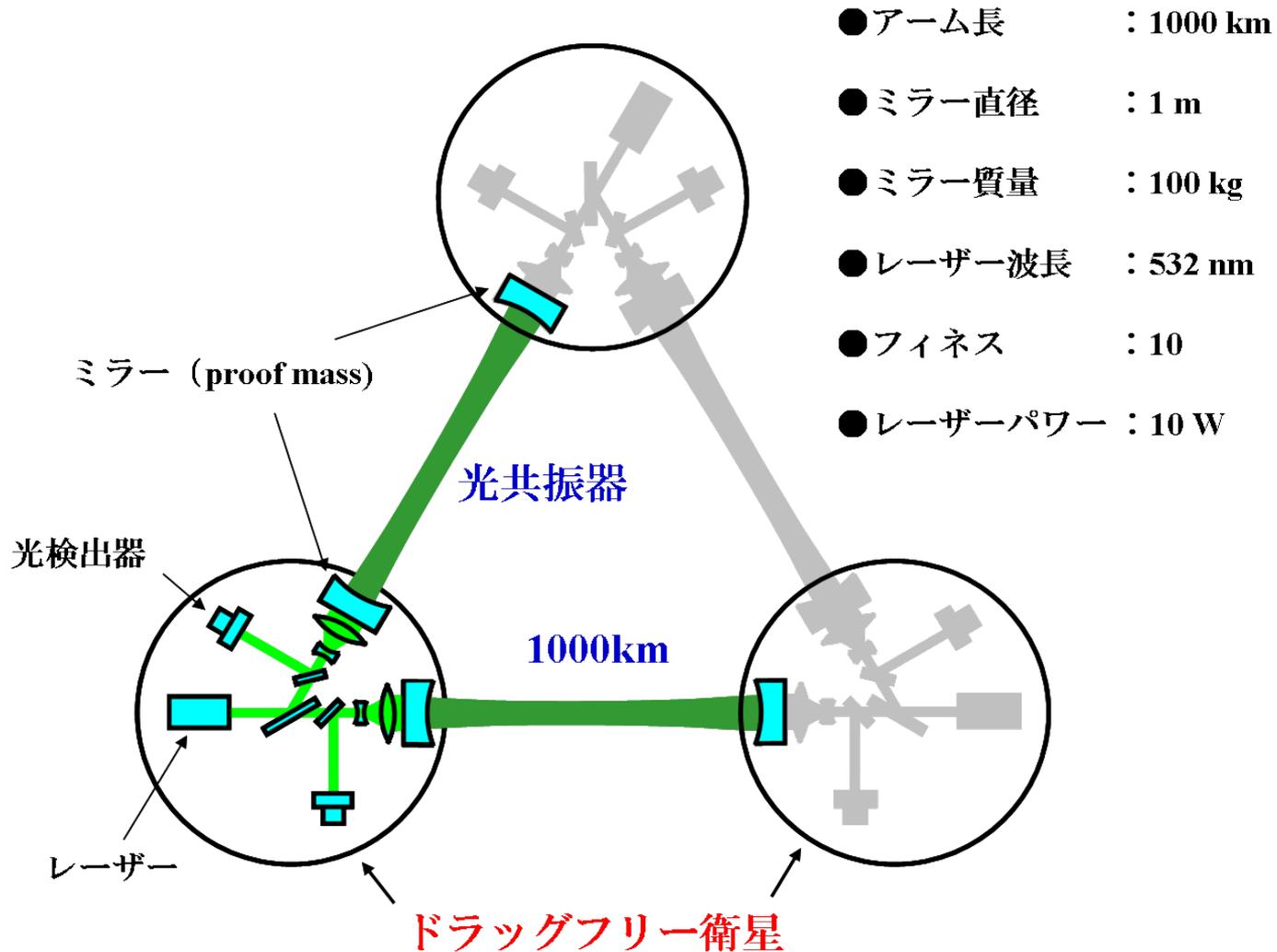
宇宙空間レーザー干渉計のめざすもの



重力波は宇宙の始まり直後の情報をもっている

- ➡ 低周波重力波検出の重要性
- ➡ 宇宙空間重力波検出器が必要

日本のスペース重力波アンテナ計画DECIGO



DECIGOによって得られる重力波とその物理

- ブラックホール連星の合体
 - ➡ 巨大ブラックホール形成のメカニズム解明
- 中性子連星の合体
 - ➡ 宇宙膨張の加速度計測
 - ➡ ダークエネルギーの制限
- 宇宙背景放射の測定
 - ➡ インフレーションの痕跡

- ブラックホールダークマターの検証
 - R. Saito and J. Yokoyama, *Phys. Rev. Lett.* (2009)
- 初期宇宙における相転移の検証
 - R. Jinno, T. Moroi and K. Nakayama, *Phys. Lett. B* (2012)

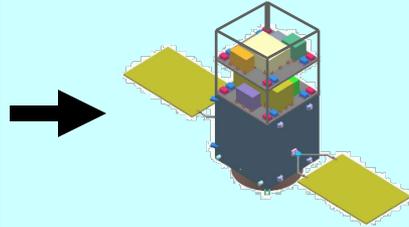
衛星搭載用超小型検出器 $SWIM_{\mu v}$

DECIGOに至るロードマップ



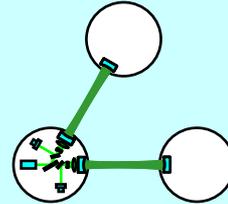
$SWIM_{\mu v}$ (2009)

最初のステップ



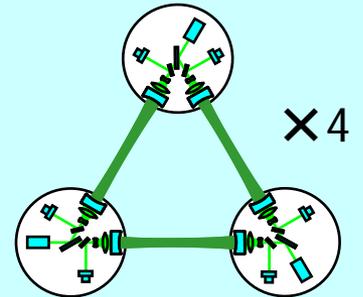
DECIGO Pathfinder
(~2013)

重要技術の実証



Pre-DECIGO
(~2018)

確実な重力波検出



DECIGO
(~2024)
重力波望遠鏡

$SWIM_{\mu v}$ の目的：衛星搭載機器の開発運用ノウハウを得る・軌道上環境の基礎データの取得
→ 小型のため厳しい大きさ・重量・電力の制限

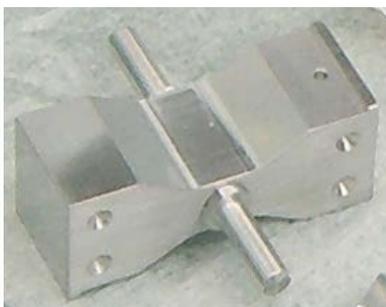
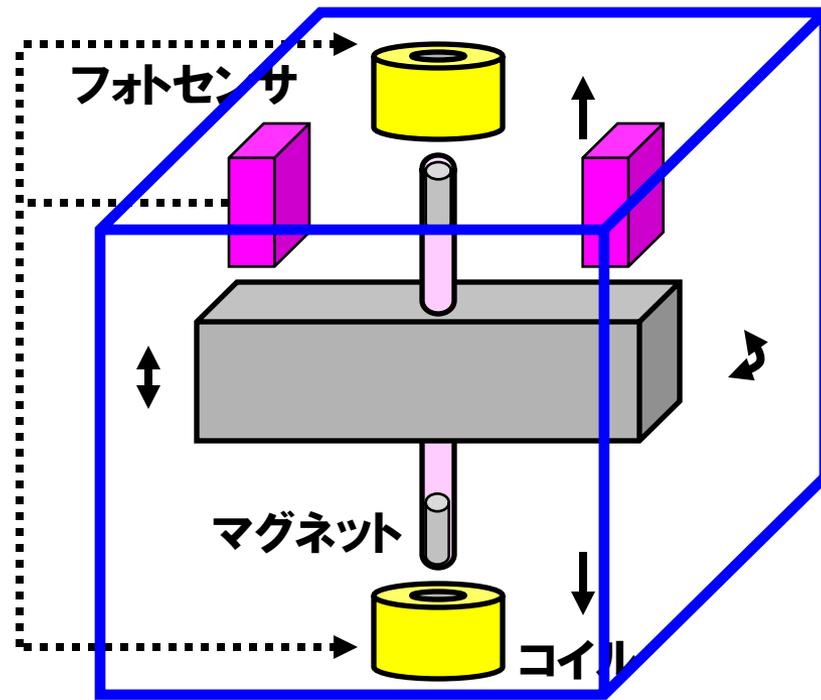
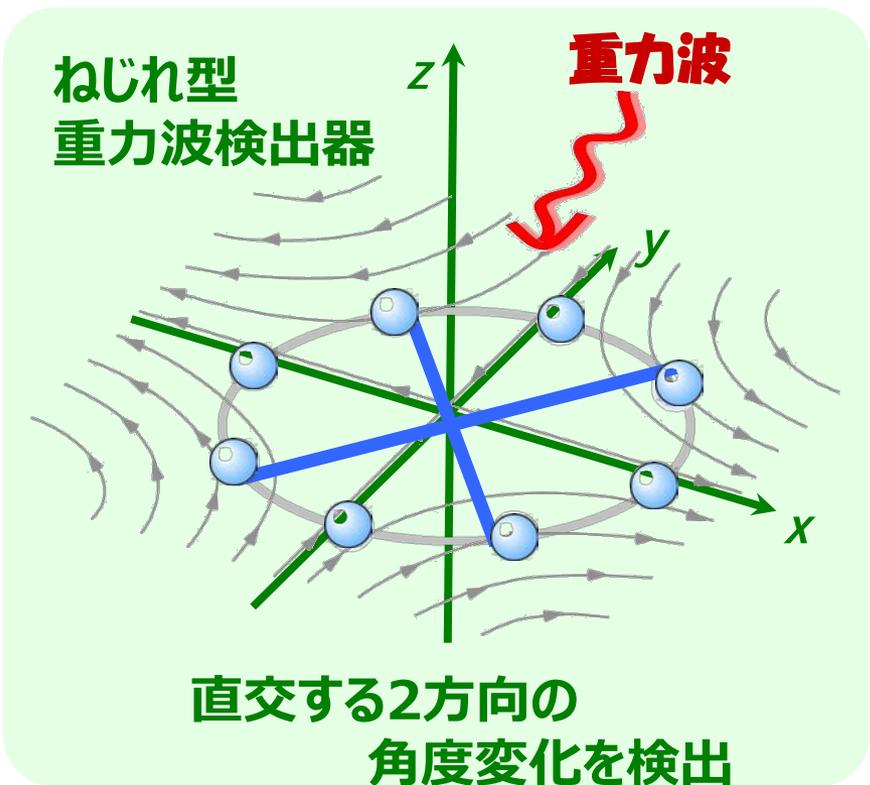
衛星搭載用ねじれ型重力波検出SWIM μ v

重力波による潮汐力



棒状の物体に(差動)回転変動を及ぼす

- ねじれ型重力波検出器



浮上マス
慣性モーメント $\sim 10^{-5} \text{ kg m}^2$



コイル



フォトセンサ

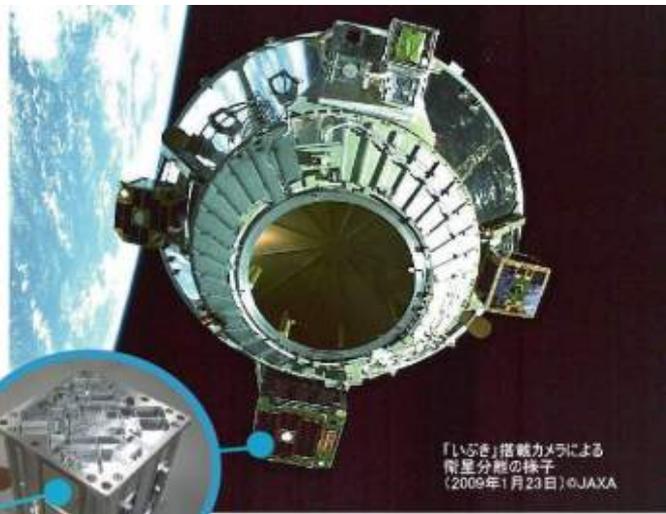
宇宙に飛び出した超小型重力波検出器SWIM

- 2006年デザインスタート
- 2007年実機完成
- 気球実験
- 航空機実験
- 振動試験
- 熱試験
- 放射線試験



2009年1月23日 H-IIA
ロケット15号機により打ち
上げ

GOSAT のピギーバック
高度670km



協力：
JAXA
牧島・中澤研
RESCUE



- 2009年5月非接触位置制御に成功
- その後断続的にデータを取得
- 2010年9月に運用を終了（停波）

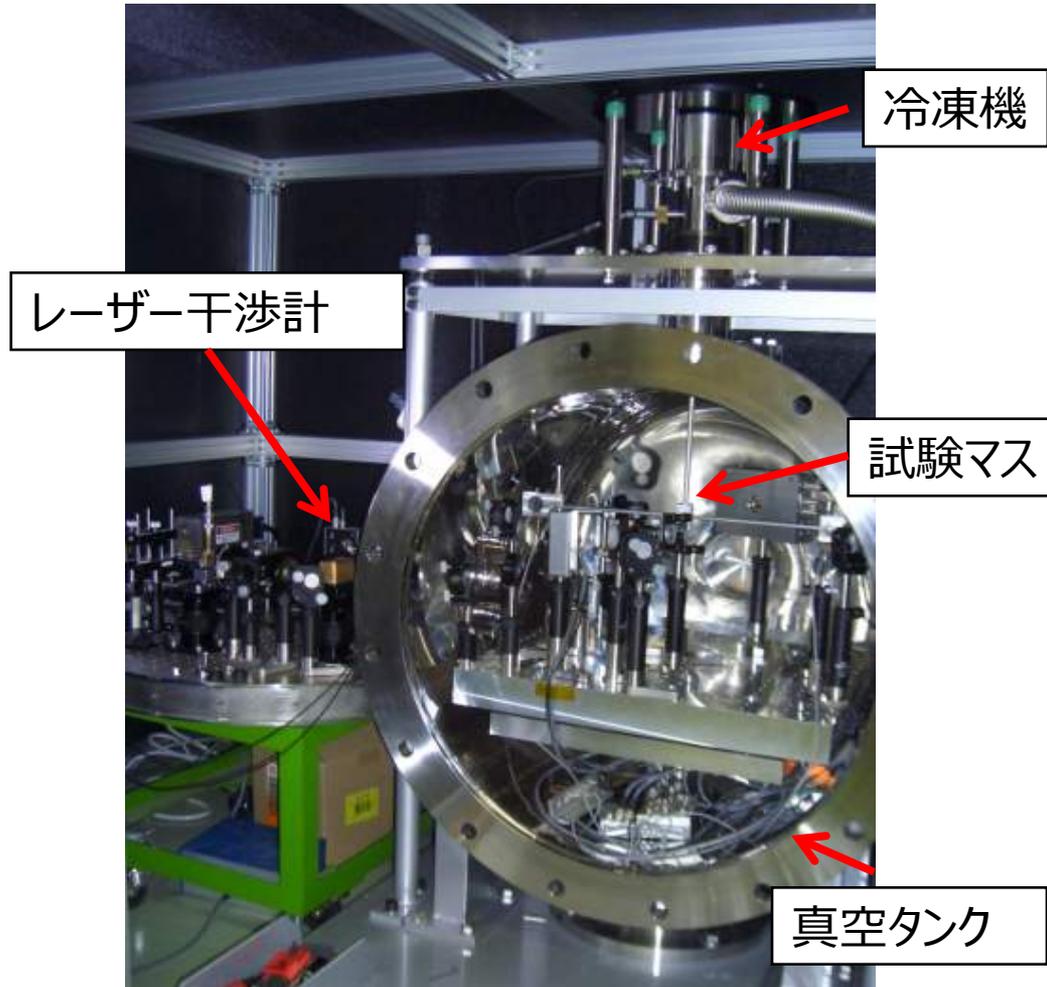
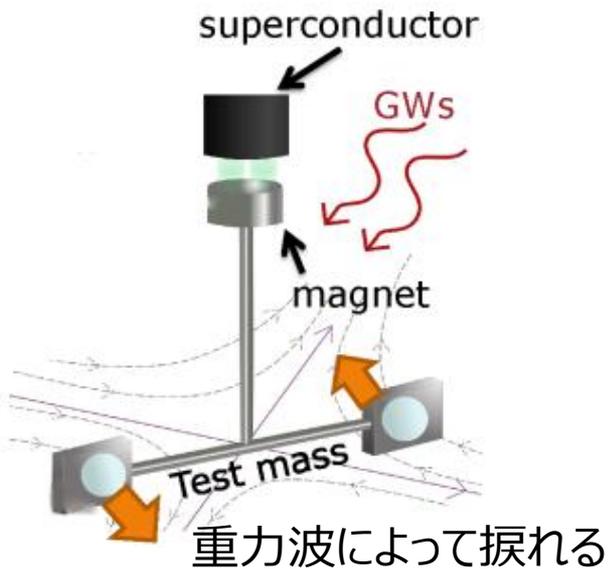
日本物理学会誌 65(2010)

「はじめての宇宙実験－超小型重力波検出器SWIM」安東、穀山、坪野

磁気浮上捩れ型重力波検出器(TOBA)



逆T字型浮上試験マス



超伝導磁気浮上型捩れ重力波検出器 60

Phys. Rev. Lett. 106, 161101 (2011) [4 pages]

Upper Limit on Gravitational Wave Backgrounds at 0.2 Hz with a Torsion-Bar Antenna

• **M. Ando et al**, *Phys. Rev. Lett.* 2010
TOBAの提案

• **K. Ishidoshiro et al**, *Phys. Rev. Lett.* 2011
TOBAによる重力波の初めての測定

Abstract	References	No Citing Articles
----------	------------	--------------------

Download: PDF (302 kB) Buy this article Export: BibTeX or EndNote (RIS)

Koji Ishidoshiro^{1,*}, Masaki Ando², Akiteru Takamori³, Hirota Takahashi^{3,4}, Kenshi Okada¹, Nobuyuki Matsumoto¹, Wataru Kokuyama¹, Nobuyuki Kanda⁵, Yoichi Aso¹ and Kimio Tsubono¹

¹Department of Physics, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

²Department of Physics, Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan

³Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Bunkyo-Ku, Tokyo 113-0032, Japan

⁴Department of Humanities, Yamanashi Eiwa College, Kofu, Yamanashi 400-8555, Japan

⁵Department of Physics, Osaka City University, Osaka 558-8585, Japan

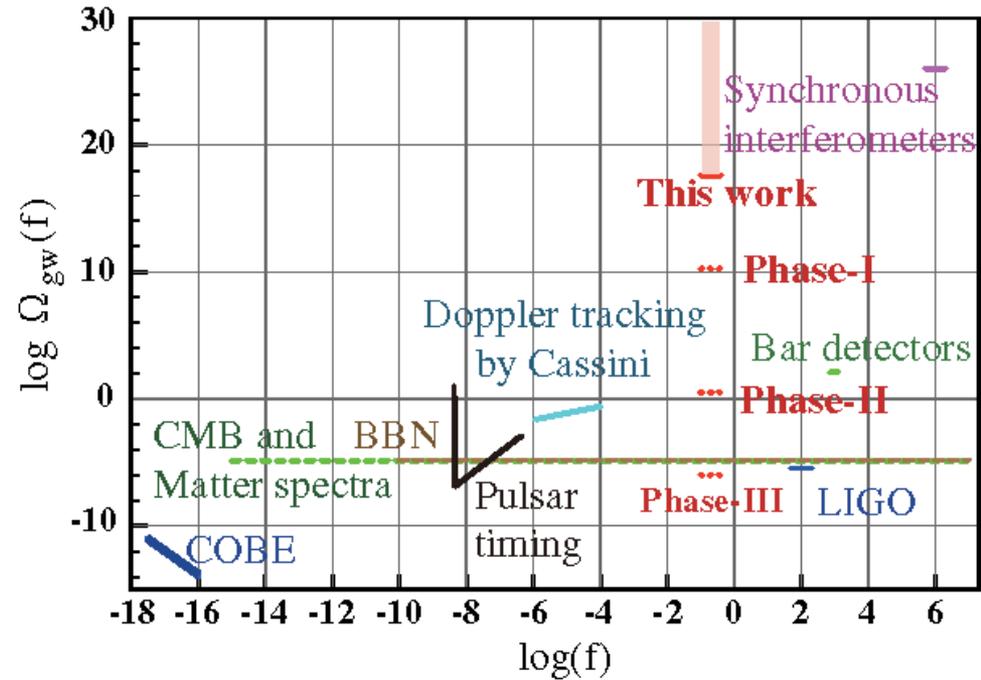


Received 30 November 2010; published 20 April 2011

See accompanying *Physics Synopsis*

We present the first upper limit on gravitational wave (GW) backgrounds at unexplored frequency of 0.2 Hz using a torsion-bar antenna (TOBA). A TOBA was proposed to search for low-frequency GWs. We have developed a small-scaled TOBA and successfully found $\Omega_{\text{gw}}(f) < 4.3 \times 10^{-17}$ at 0.2 Hz as demonstration of the TOBA capabilities, where $\Omega_{\text{gw}}(f)$ is the GW energy density per logarithmic frequency interval ... units of the closure density. Our result is the first nonintegrated limit to bridge the gap between the LIGO band (around 100 Hz) and the Cassini band (10^{-6} – 10^{-4} Hz).

© 2011 American Physical Society



0.2Hz近辺で初めて背景重力波の上限を出した

重力波観測と他の観測（光、X等）との連携

重力波は高エネルギー現象（重力崩壊、連星合体、パルサー等）の中心部から出てくる

➡ 重力波観測は電磁波や宇宙線の観測と密接にリンクしている

2つの連携観測モード

- トリガー探査:

他の観測（ガンマ線、X線、可視／赤外光、電波、ニュートリノ、、、）がまずあって、重力波観測につながる

- フォローアップ探査:

重力波観測が他の検出器（電磁波等）にアラームを出す

➡ **Multi-messenger Astrophysicsの成立**



研究室最後のメンバー

まとめ

1992年



TANKO-100レーザー干渉計 (宇宙研)

1971年



共振型重力波検出器 (本郷)

2000年



TAMA300レーザー干渉計 (三鷹)

2017年 (完成予定)

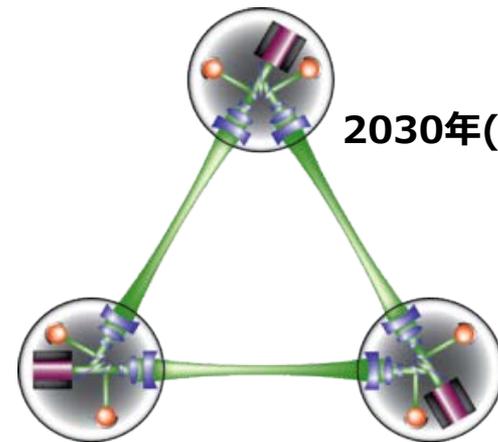


KAGRA3kmレーザー干渉計 (神岡)

将来的には、宇宙に関する多くの情報が重力波によって得られると期待される

➡ 重力波研究には輝かしい未来がある

2030年(?)



DECIGO重力波アンテナ (宇宙空間)