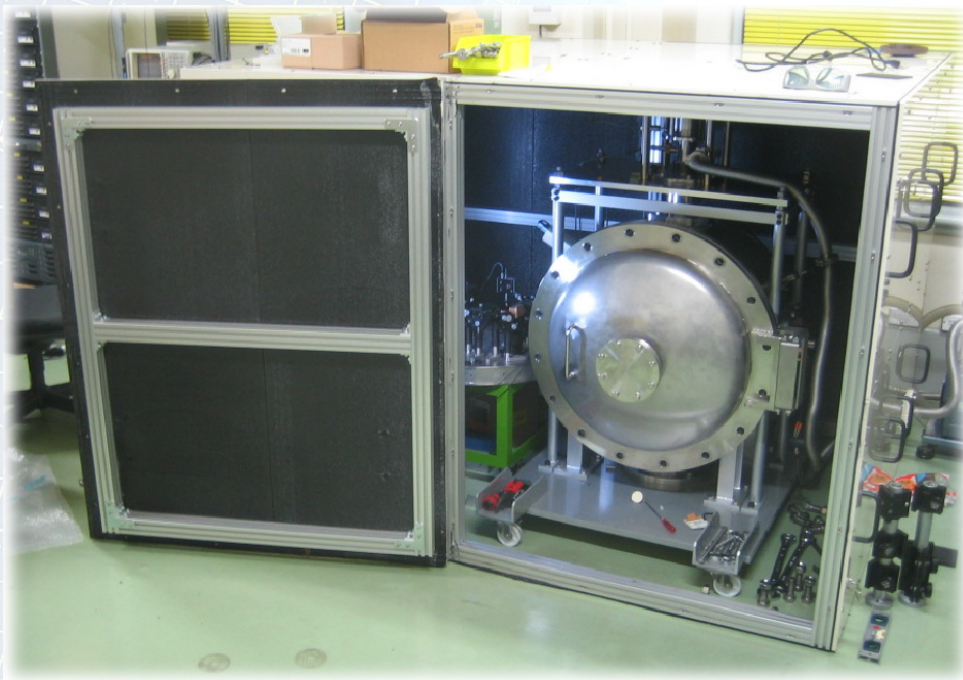


光技術と重力・重力波

- 重力・重力波物理学 -



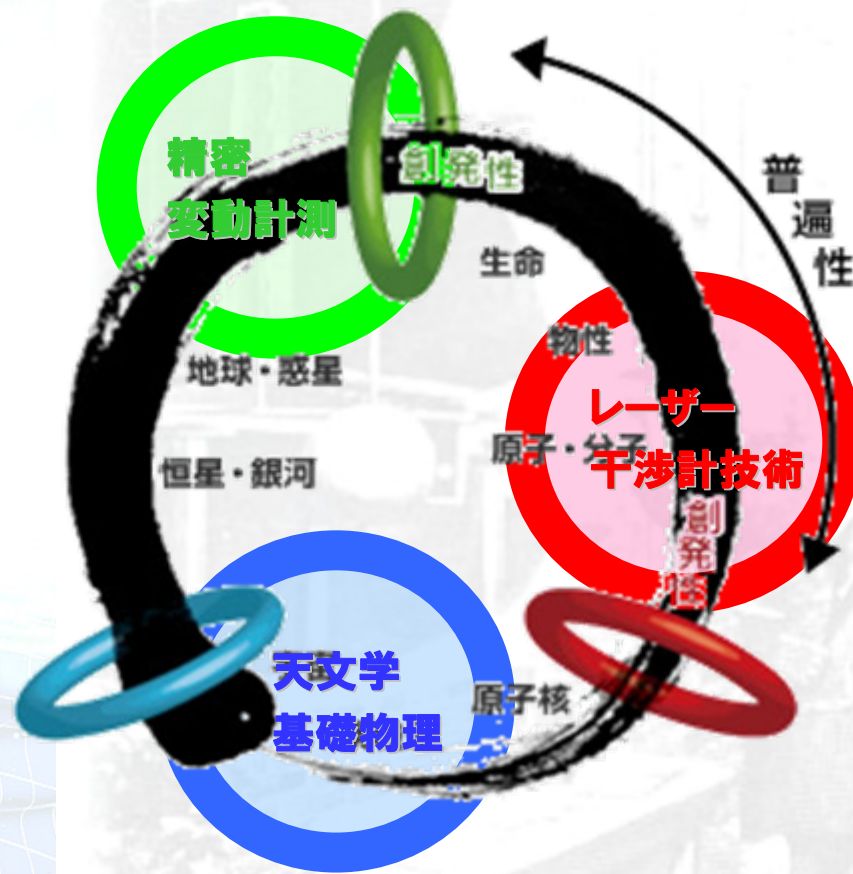
安東 正樹

(京都大学 理学研究科)

研究の目標

重力・重力波物理学

重力という普遍的な対象を、
先進的な実験手法で研究
→ 宇宙・基礎物理に
対する新しい知見



重力・重力波物理学

重力という普遍的な対象を, 先進的な実験手法で研究
→ 宇宙・基礎物理に対して新しい知見を得る.

高感度レーザー干渉計

標準量子限界を越える
マクロな系の高感度計測

重力による余剰次元検証

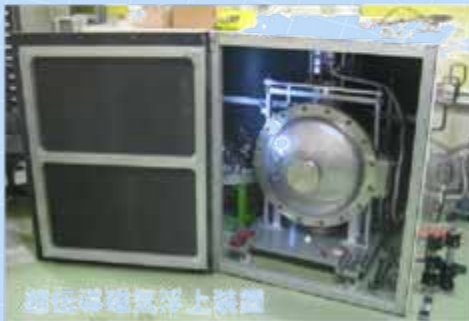
微小距離での重力逆二乗則測定
超伝導磁気浮上による試験マス支持
外来雑音抑圧・除去 微小信号処理



高感度レーザー干渉計

重力波による天文学

大型レーザー干渉計画の推進
国際重力波観測網への参加
宇宙重力波望遠鏡の基礎開発



超伝導磁気浮上装置

光の量子雑音に対する知見
量子光学的手法の発展



LCGT構想図

基礎物理法則に
対する新たな知見

宇宙に対する
新たな知見

新しい分野？

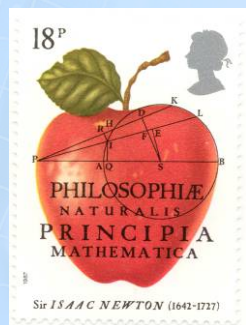
重力 --- 最初に認知された力

落体の法則

ガリレイ (1564-1642)

万有引力の法則

ニュートン (1642 - 1727)



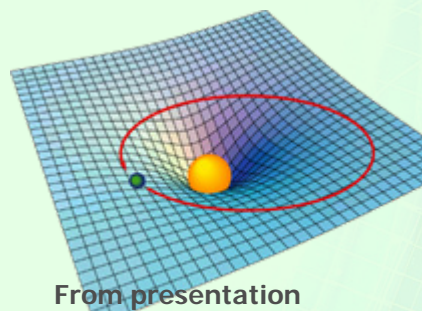
重力波 --- 一般相対性理論

理論的予測

アインシュタイン (1916)

観測での検証

ハルス・テイラー (1974)



From presentation
by Laura Cadonati



重力波による新しい天文学

重力法則の検証による新しい物理？

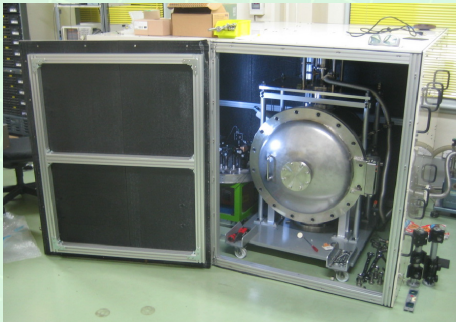
自分にとって新しい！

研究の流れ

技術の応用

レーザー干渉計 による精密計測

高感度レーザー干渉計
精密制御による安定化
外乱・雑音の除去
データ解析 微小信号処理



基礎物理実験

微小距離での
重力の逆二乗則検証



余剰次元理論
の実験的検証

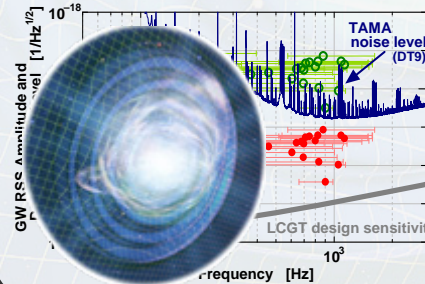


知識・経験 ↑

レーザー干渉計型 重力波検出器の開発



観測データの解析と 重力波信号探査



基礎物理法則への知見

重力波による
新しい天文学

(1) 重力波の観測

重力波

重力波による天文学



重力・重力波物理学

重力という普遍的な対象を、先進的な実験手法で研究
→ 宇宙・基礎物理に対して新しい知見を得る。

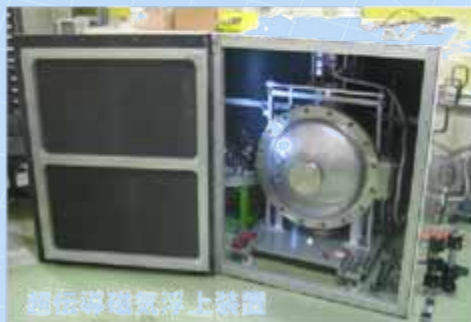
高感度レーザー干渉計

標準量子限界を越える
マクロな系の高感度計測



重力による余剰次元検証

微小距離での重力逆二乗則測定
超伝導磁気浮上による試験マス支持
外来雑音抑圧・除去 微小信号処理



基礎物理法則に
対する新たな知見

光の量子雑音に対する知見
量子光学的手法の発展

重力波による天文学

大型レーザー干渉計画の推進
国際重力波観測網への参加
宇宙重力波望遠鏡の基礎開発



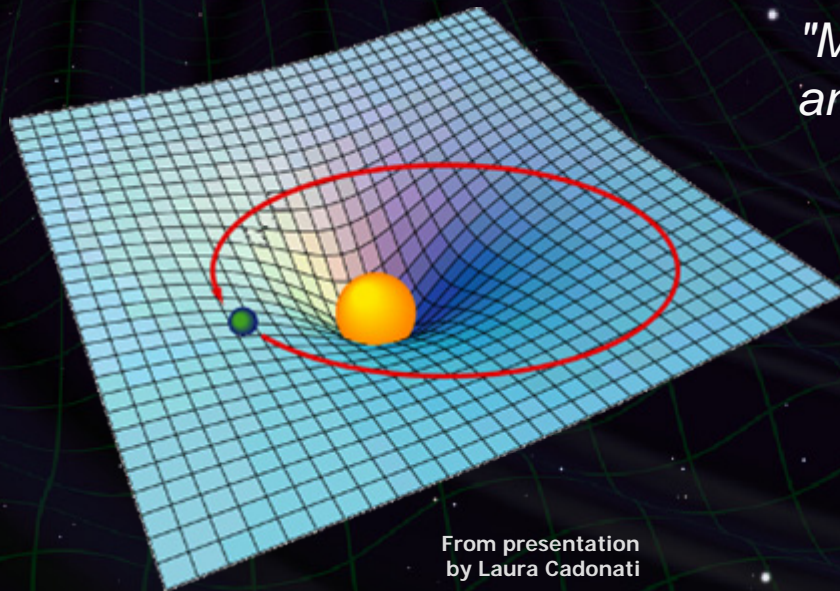
宇宙に対する
新たな知見

重力波

一般相対性理論

→ 重力を時空の性質と解釈

*"Mass tells space-time how to curve,
and space-time tells mass how to move."*
John Archibald Wheeler



From presentation
by Laura Cadonati

アインシュタイン方程式

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

↑
時空の曲率

↑
質量
(エネルギー・運動量)

物質の変動, 形状の変化

→ 重力場の変動

→ 時空の歪みのさざなみとして伝播



重力波

電磁波と重力波

電磁波

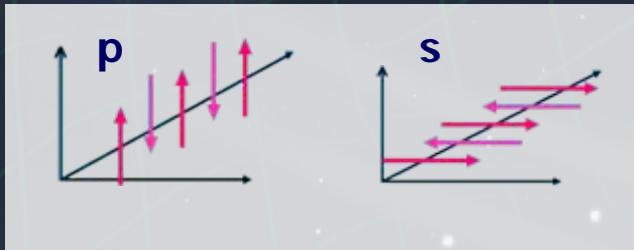
J.C. Maxwell



光速で伝播する電磁場の変動
電磁気学から導かれる

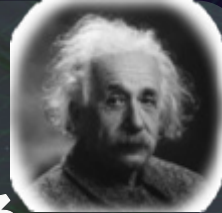
1864年：マクスウェルが予言
1888年：ヘルツの実験で発見

電荷の加速度運動により生成
双極子放射, 2つの偏波



重力波

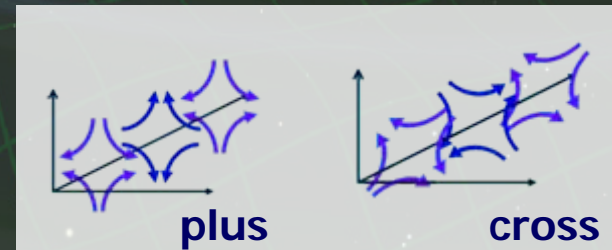
A. Einstein



光速で伝播する時空の歪み
一般相対性理論から導かれる

1916年：アインシュタインが予言
1989年：連星パルサーの観測
によって存在を証明

質量の加速度運動により生成
四重極放射, 2つの偏波



From presentation
by Laura Cadonati

連星パルサーの発見と観測

連星パルサーPSR B1913+16

(1974年 ラッセル・ハルス, ジョゼフ・テイラー)

公転周期: 7.75時間

質量: パルサー 1.44 Msolar
伴星 1.39 Msolar

公転周期の変化率:

$$(-2.4056 \pm 0.0051) \times 10^{-12} \text{s/s}$$

アレシボ天文台 (フェルトリコ)



その後の継続的な観測

重力波の放出

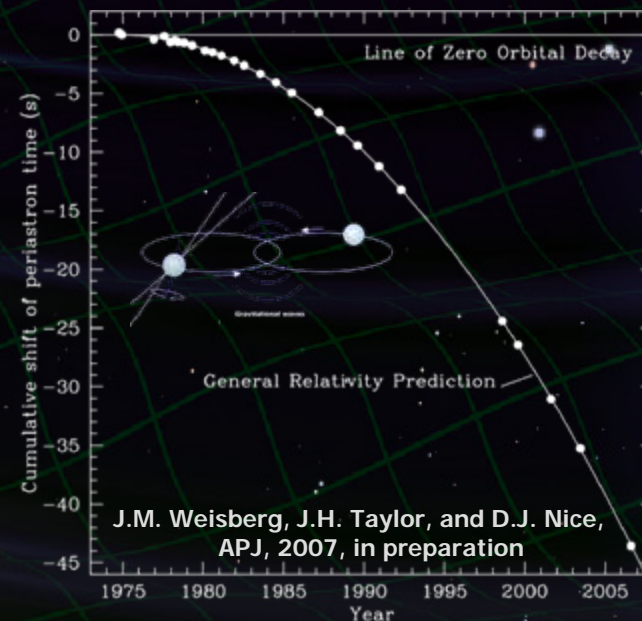
→ 公転エネルギーを失い, 互いに落ち込む

一般相対性理論による理論値

観測との差は0.2%程度



重力波の存在の証明



重力波の効果

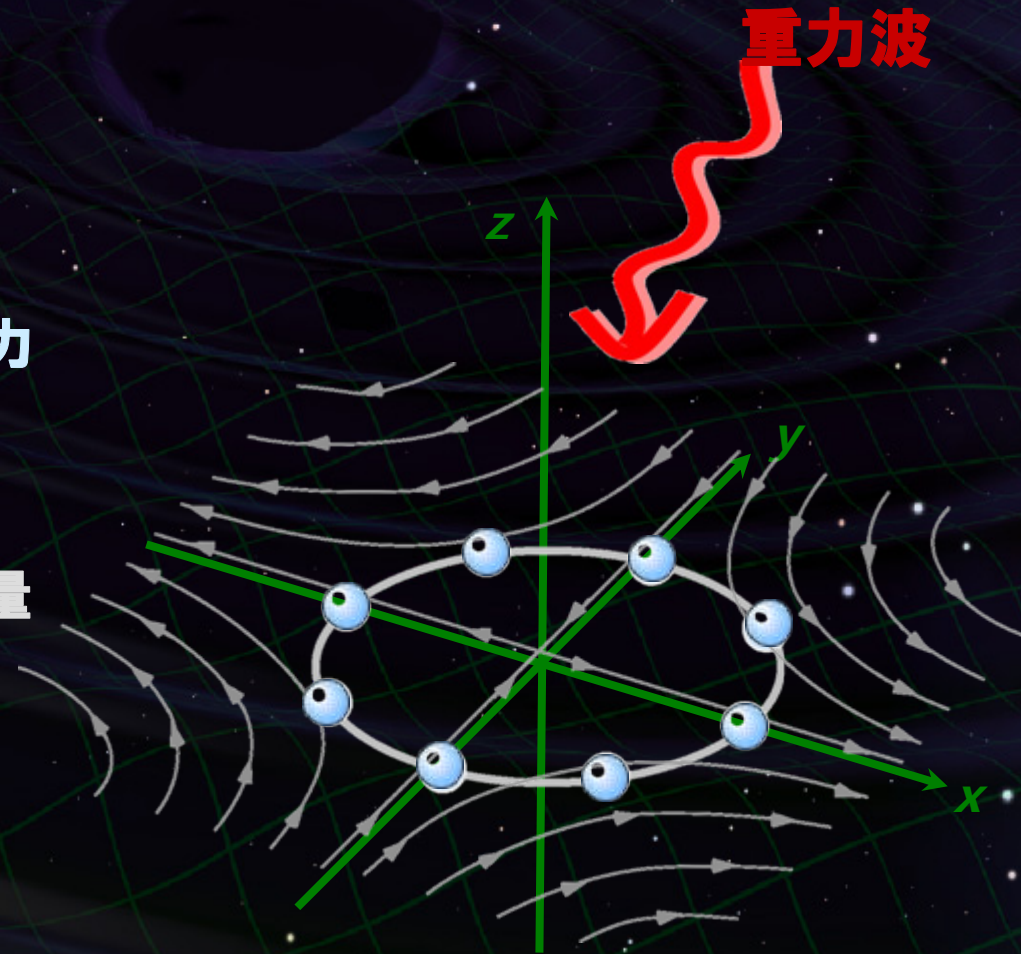
重力波の効果

自由質点間の距離の変化
大きさを持った物体への潮汐力

重力波の振幅 h : 無次元の歪み量

$$h = 10^{-21}$$

→ 1mの距離が
 10^{-21} m 伸縮する



重力波の効果

2つの自由質点間の固有距離の変化

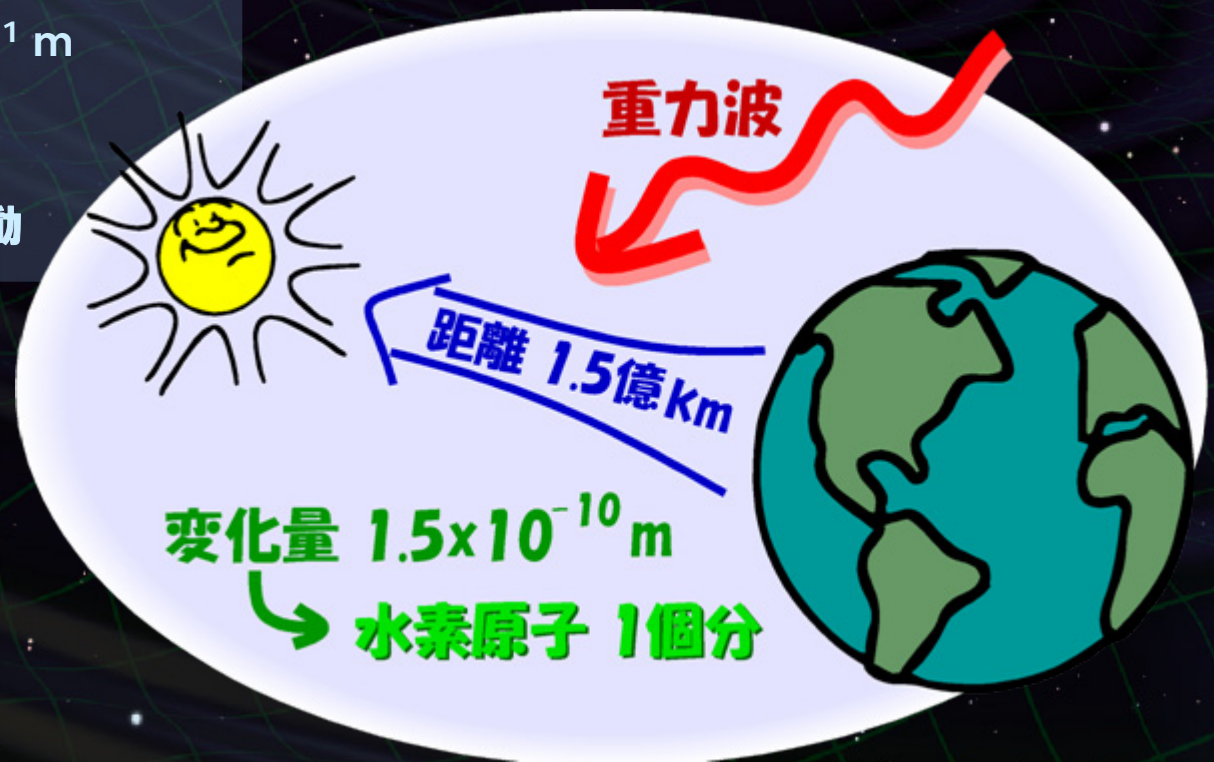
(例) 地球-太陽間の距離変動

距離 1.5×10^{11} m

重力波振幅 10^{-21}

→ 1.5×10^{-10} m

の距離変動



重力波による天文学

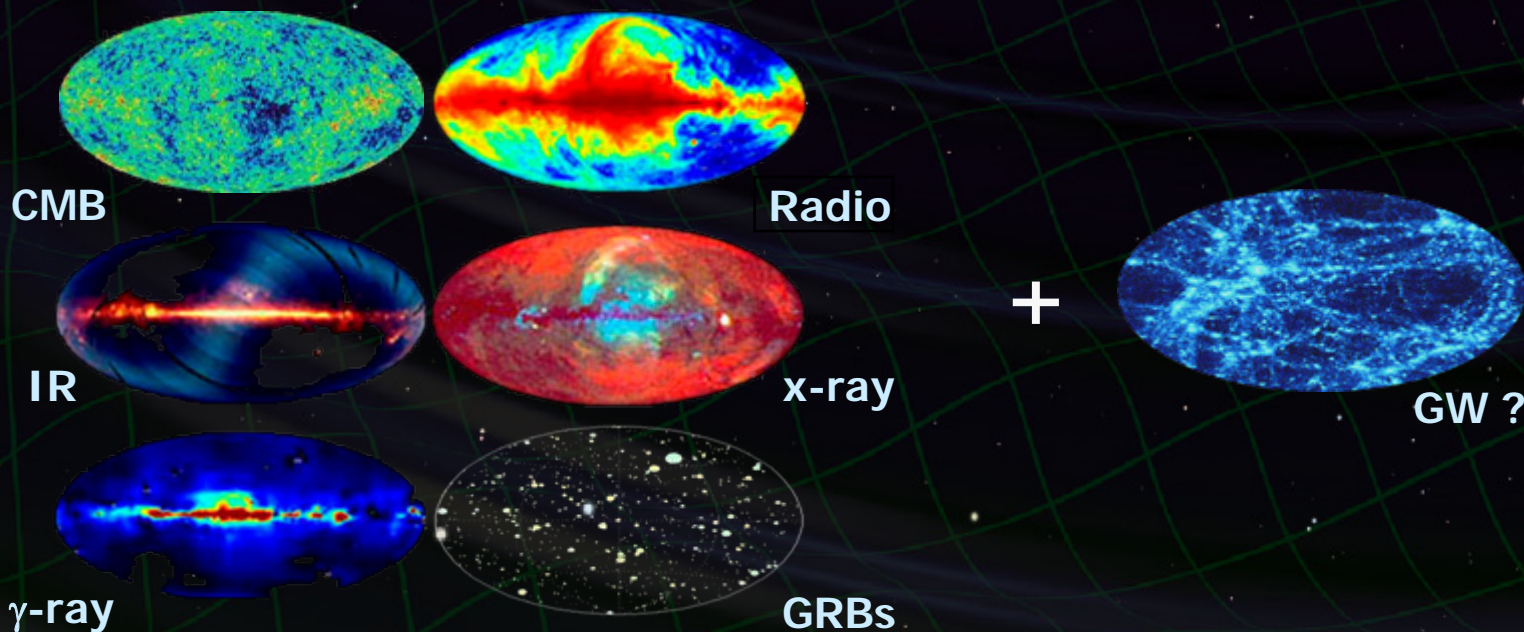
重力波の特徴

質量の加速度運動により生成
物質に対して強い透過力
波源のスケール < 波長
→ バルクな情報



宇宙を観測する新しい手段

電磁波と相補的・独立な観測
他では見ることの出来ない現象
'晴れ上がり'前の初期宇宙
激しい天体現象の内部



重力波による観測



背景画: NASA/WMAP Science Team

レーザー干渉計型重力波検出器

基本: マイケルソン干渉計
レーザー光源からの光を
直交する2方向に分岐

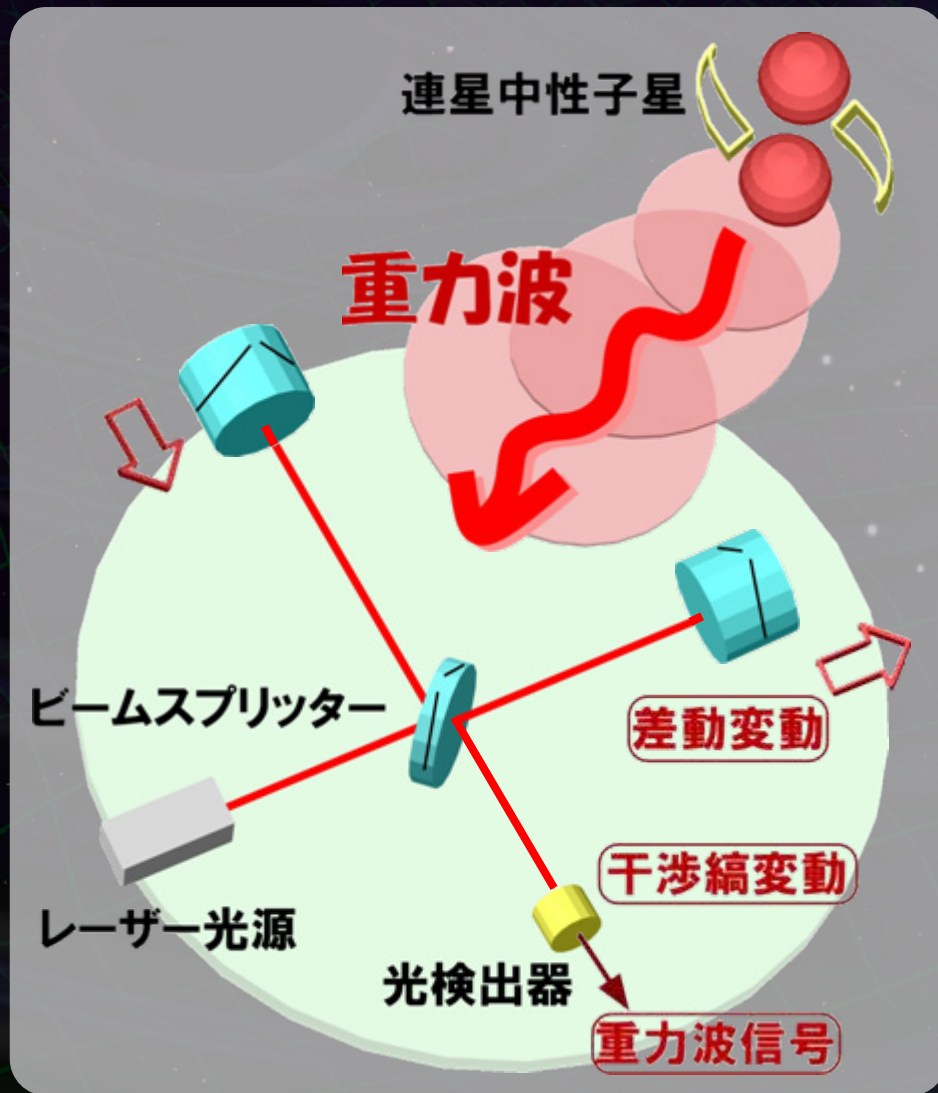


それぞれ、鏡で打ち返し干渉させる
干渉光を光検出器で観測する

重力波が入射



腕の長さの差動変動を
干渉光量の変動として検出



重力波観測の現状

検出の試み：1960年代より行われる

現在、大型検出器が稼働中

レーザー干渉計型：5台、共振型検出器：3台



➡ 国際的観測ネットワーク

→ 検出の信頼度向上、波源の方向特定、重力波偏波の分離
1年を超える観測データが取得されている

連星中性子星合体イベント：50kpc～14Mpcの観測レンジ

→ 我々の銀河、近傍銀河でイベントがあれば検出可能

重力波観測による成果の例

ガンマ線バースト

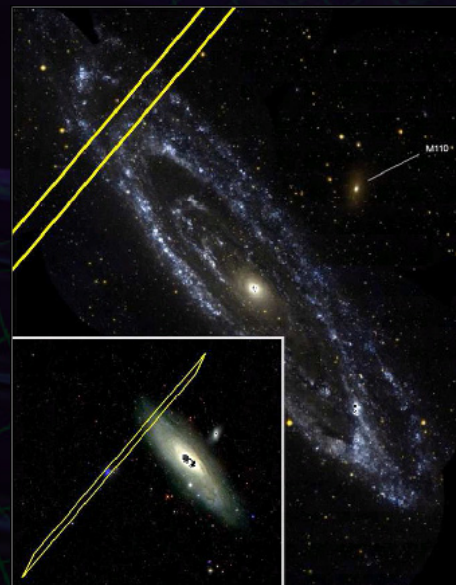
2007年に観測されたGRB070201

(Konus-Wind, INTEGRAL, MESSENGER)

→ M31 (アンドロメダ)

銀河方向で発生

継続時間の短いガンマ線バーストは、
連星中性子星の合体に起因している
可能性がある。



米国の地上重力波検出器LIGOが、十分な感度で観測を行っていた。

→ データ解析の結果、信号はなかった。

このShort GRBはM31で発生した 連星中性子星合体
に起因するものではない、と結論付けられた。

Abbott et al, arxiv:0711.1163.

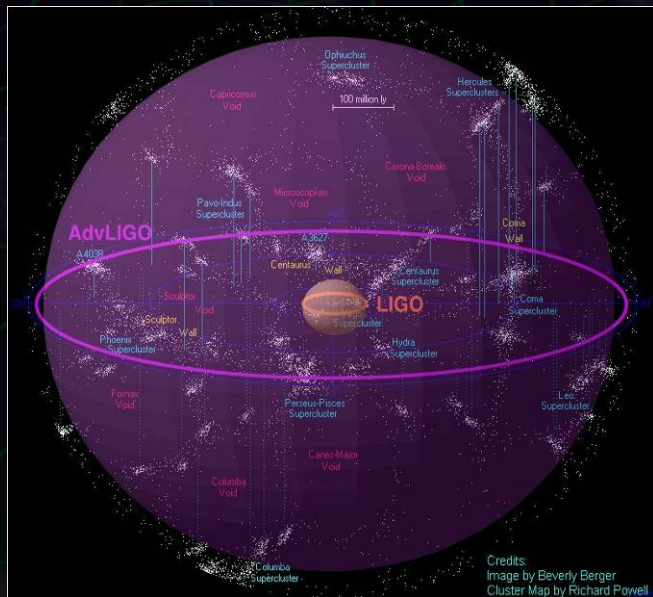
重力波による本格的な天文学

稼働中の重力波検出器: 近傍銀河でイベントがあれば検出可能

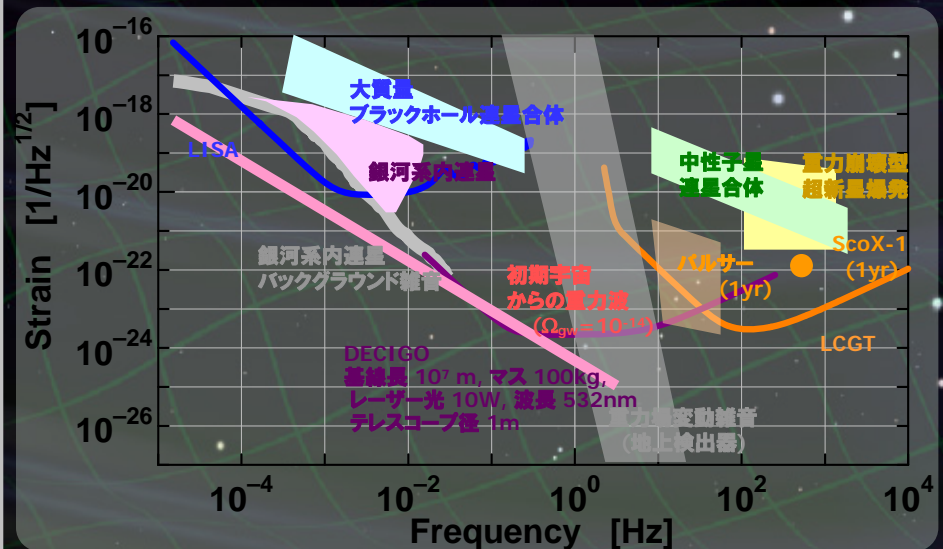
ただ... そのようなイベントは極めて稀 (10^{-5} event/yr/gal)

本格的な天文学への2つの方向

高感度化
より多くの銀河をカバーする



広い周波数帯での観測
さまざまな対象を観測



高感度化の価値

重力波の振幅 --- 距離に反比例



感度が 10倍向上

→ イベントレートは 1000倍

得られるサイエンス

Initial LIGO 1年間の観測

~ Advanced LIGO 3時間の観測



LIGOの高感度化

Enhanced LIGO

現在のLIGOのアップデート

感度を2倍に

観測可能距離: 30Mpc

Advanced LIGO技術の先行導入

2009年 観測開始

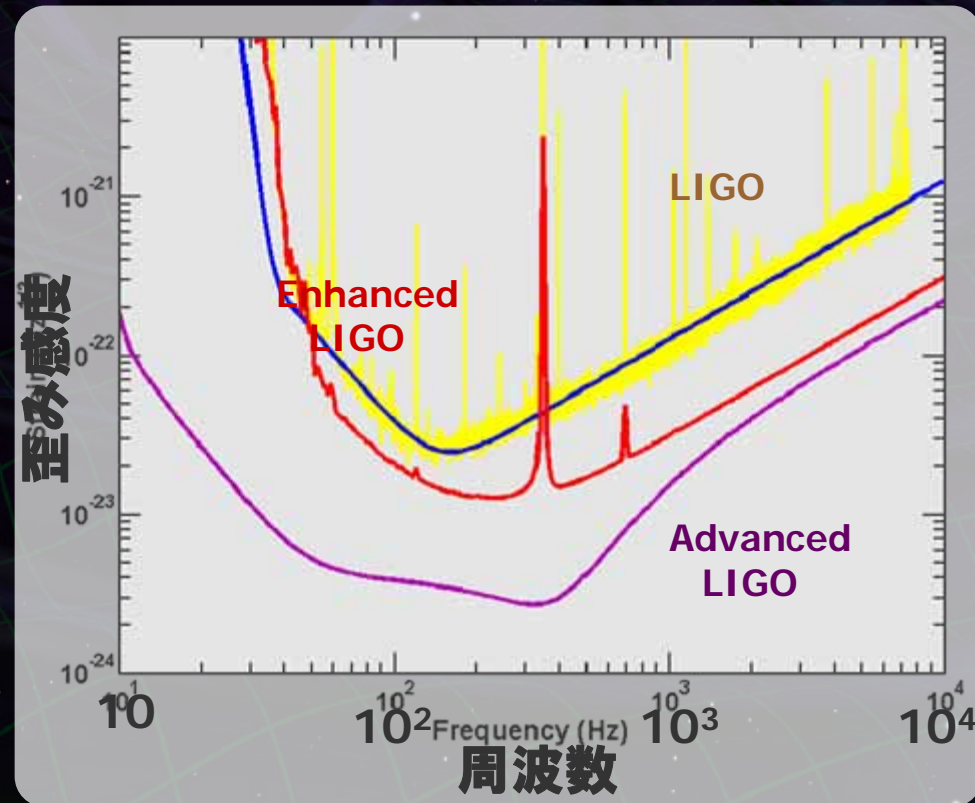
Advanced LIGO

現在のLIGOの10倍の感度

低周波数感度の向上

観測可能距離: 350Mpc

2014-15年 観測開始



LCGT

LCGT (Large-scale cryogenic Gravitational-wave Telescope)

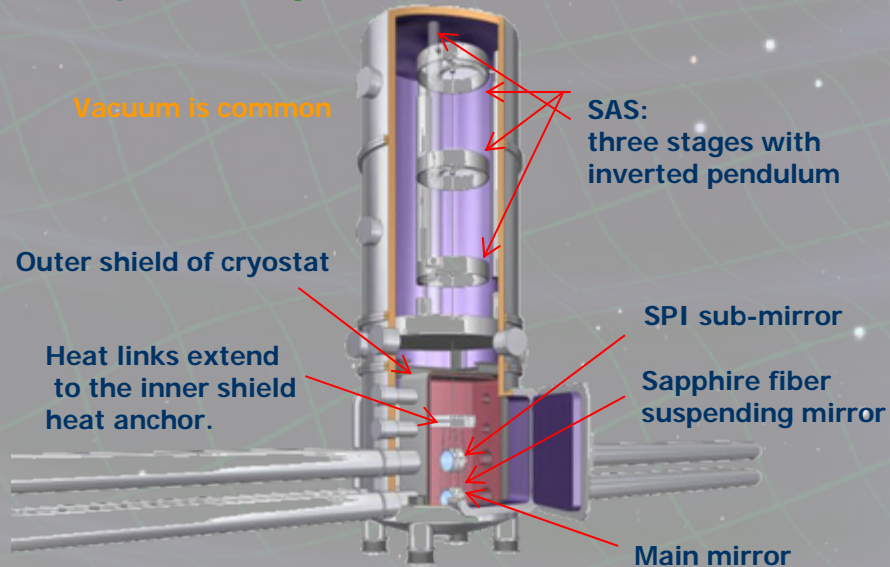
Advanced LIGOと同等の感度 (検出可能距離 ~200Mpc)

低温干渉計 鏡の温度: 20K → 熱雑音の低減
地下に設置 神岡鉱山 (地下 1000m) → 地面振動の低減, 安定な連続動作
大型干渉計 基線長 3km, 高出力レーザー

2014年頃 観測開始を目指す



Suspension system

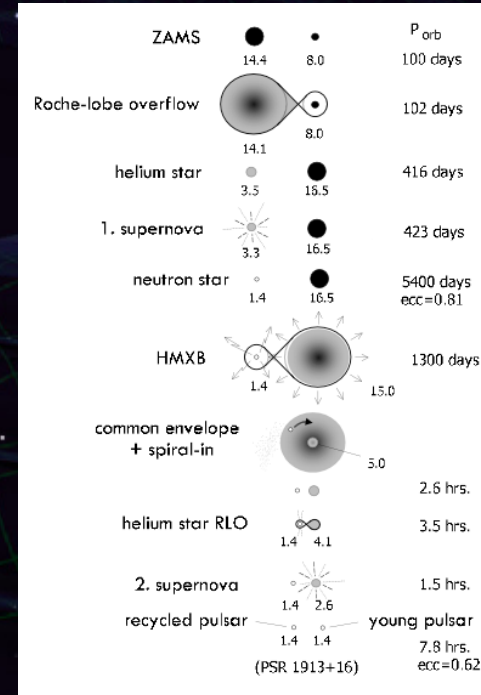


LIGO/LCGTで重力波は見つかるか？

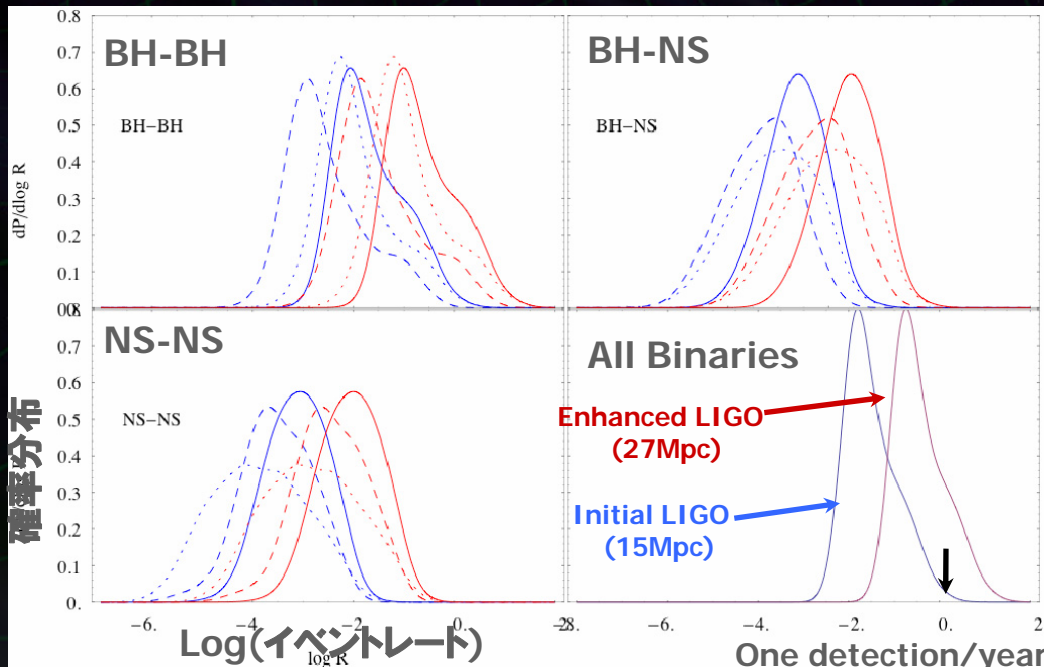
'Probability of detecting compact binary coalescence with enhanced LIGO'

O'Shaughnessy et al astro-ph/0706.4139

連星進化モデルをもとに、
シミュレーションを行い、検出確率を推定



Voss and Tauris (2003)



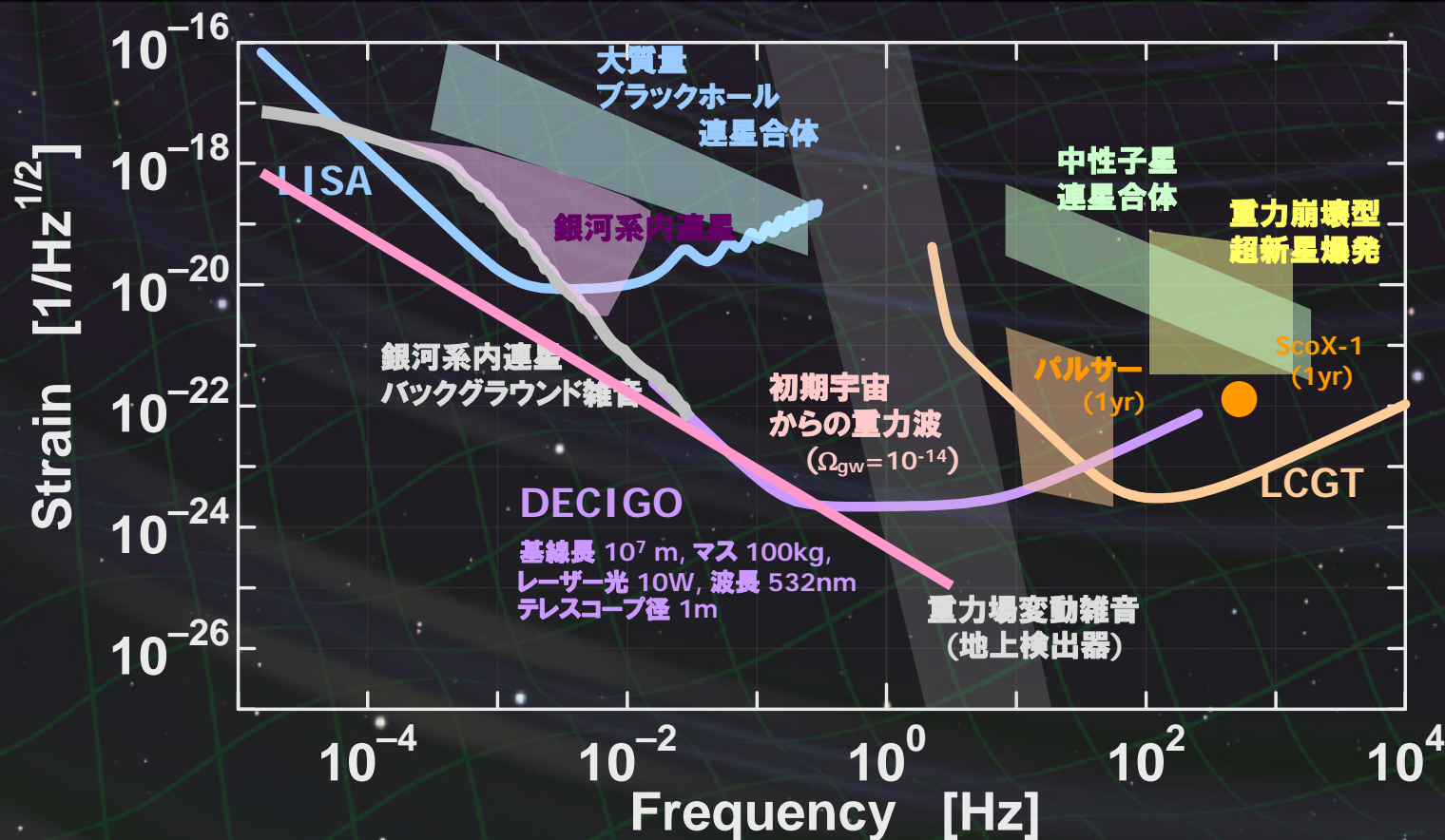
推定された検出確率：

(1年間の観測)

Initial LIGO (現在): 0.01-5%
 Enhanced LIGO (2009): 34%
 Advanced LIGO (2014): 99.9%

観測周波数帯と観測対象

- 地上干渉計 : 10Hz - 1kHz → 中性子星など
 DECIGO : 0.1 - 1Hz → 中間質量BHなど, 初期宇宙からの重力波
 LISA : 1mHz - 10mHz → 大質量BHなど



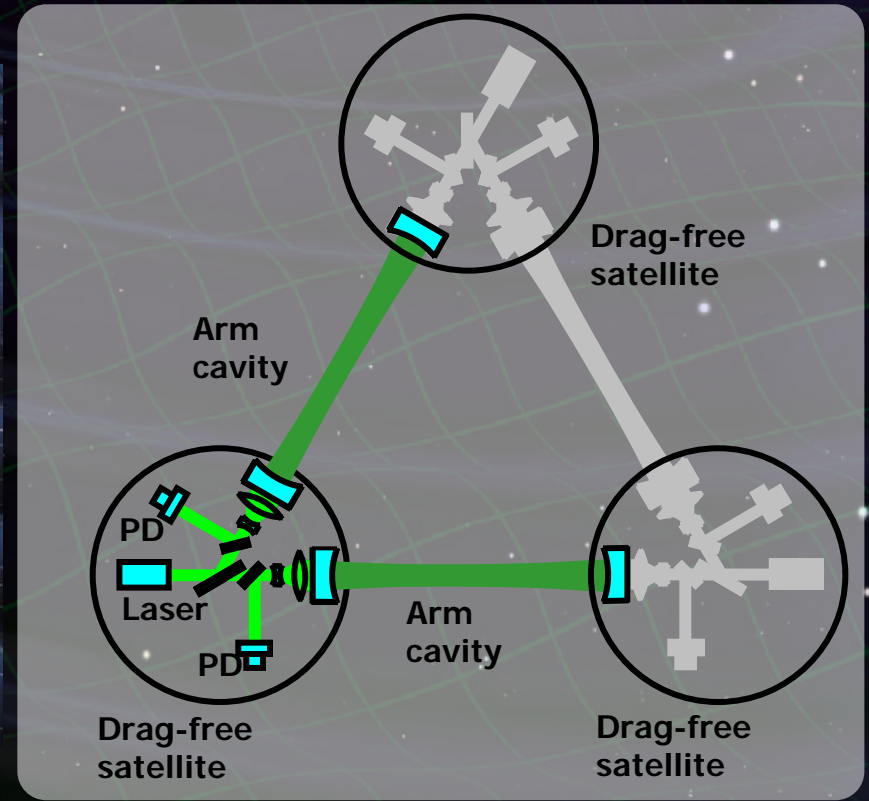
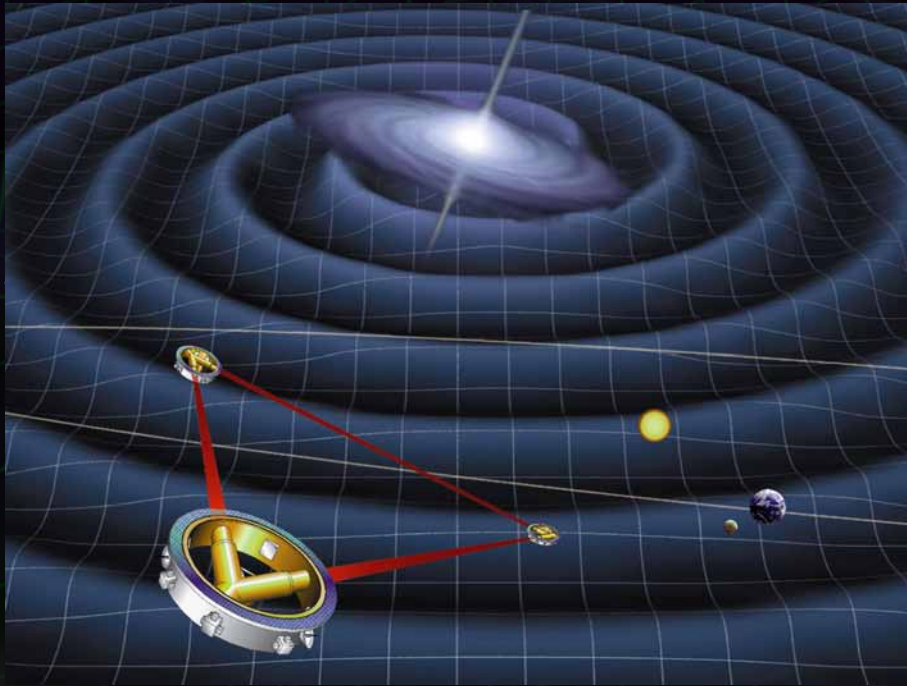
宇宙重力波望遠鏡

LISA

(Laser Interferometer Space Antenna)
3台のS/Cで基線長500万kmの干渉計を構成
ターゲット: 1mHz 前後の周波数帯
ESA/NASA共同プロジェクト
打ち上げ: 2018年目標

DECIGO

(Deci-hertz Interferometer
Gravitational Wave Observatory)
3台のS/Cで基線長1000kmの干渉計を構成
ターゲット: 0.1Hz 前後の周波数帯
打ち上げ: 2025年頃



重力波天文学

重力波天文学の見通し (個人的見解)

2016年前後：重力波の検出

(Advanced LIGO/LCGT/Advanced Virgo)

年間10回程度の 連星中性子星合体の検出

→ 相対論の検証

中性子星の状態方程式, ガンマ線バーストの起源?

重力崩壊星からの重力波

→ 超新星爆発のメカニズム

2020年前後：重力波による天体観測

(LISA, 地上からの観測)

巨大ブラックホール連星合体

→ 銀河形成への知見

星の巨大ブラックホールへの落下

→ ブラックホール時空への知見

銀河系内連星観測

→ 白色矮星などへの知見

パルサーの観測

2025年前後：重力波による宇宙論

(DECIGO, LISA, ETなど地上からの観測)

遠方の連星の観測

→ インフレーション, ダークエネルギーへの知見

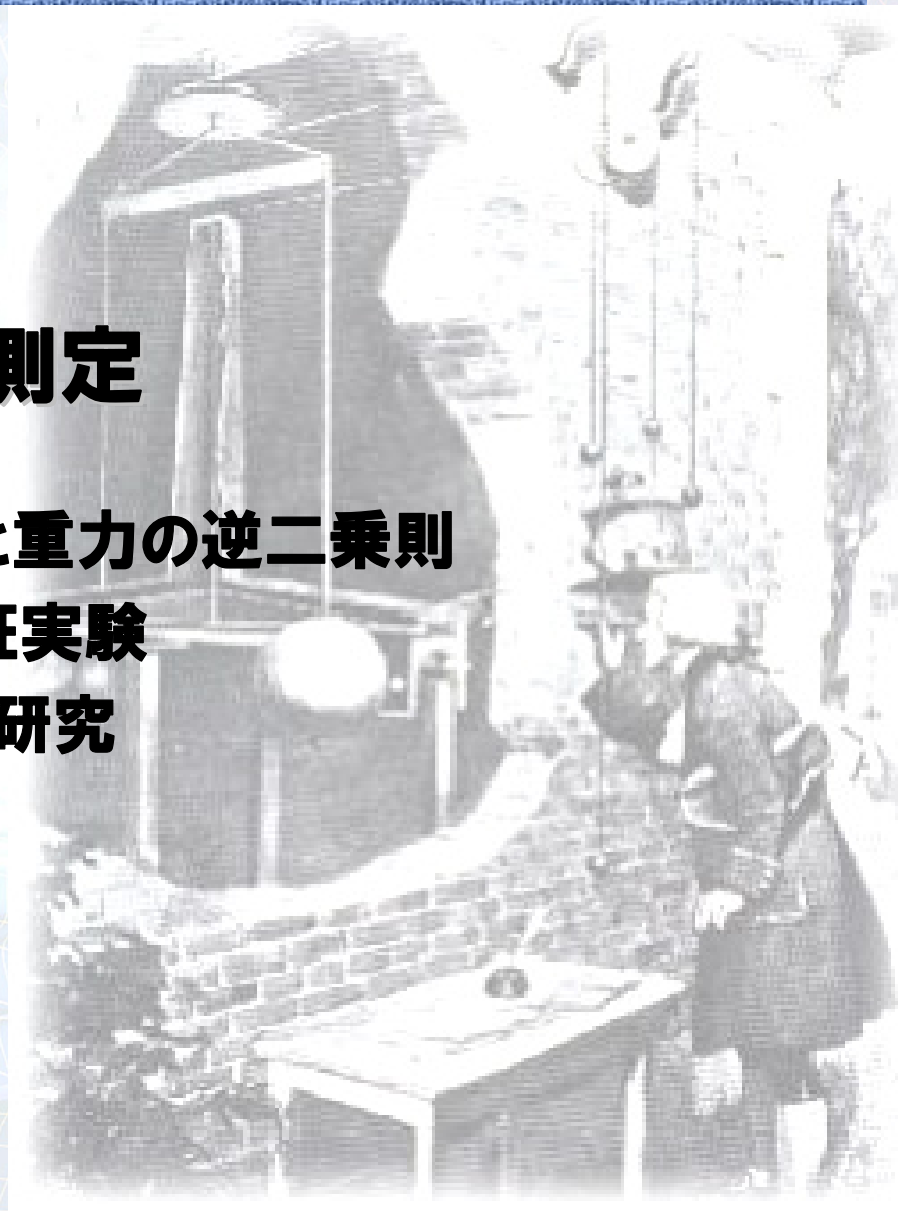
中間質量ブラックホール連星合体

→ 銀河形成への知見

全く新しい重力波の発見

(2) 重力の測定

余剰次元と重力の逆二乗則
近年の検証実験
これからの研究



重力・重力波物理学

重力という普遍的な対象を、先進的な実験手法で研究
→ 宇宙・基礎物理に対して新しい知見を得る。

高感度レーザー干渉計

標準量子限界を越える
マクロな系の高感度計測

重力による余剰次元検証

微小距離での重力逆二乗則測定
超伝導磁気浮上による試験マス支持
外来雑音抑圧・除去 微小信号処理



高感度レーザー干渉計

光の量子雑音に対する知見
量子光学的手法の発展

重力波による天文学

大型レーザー干渉計画の推進
国際重力波観測網への参加
宇宙重力波望遠鏡の基礎開発



LCGT構想図

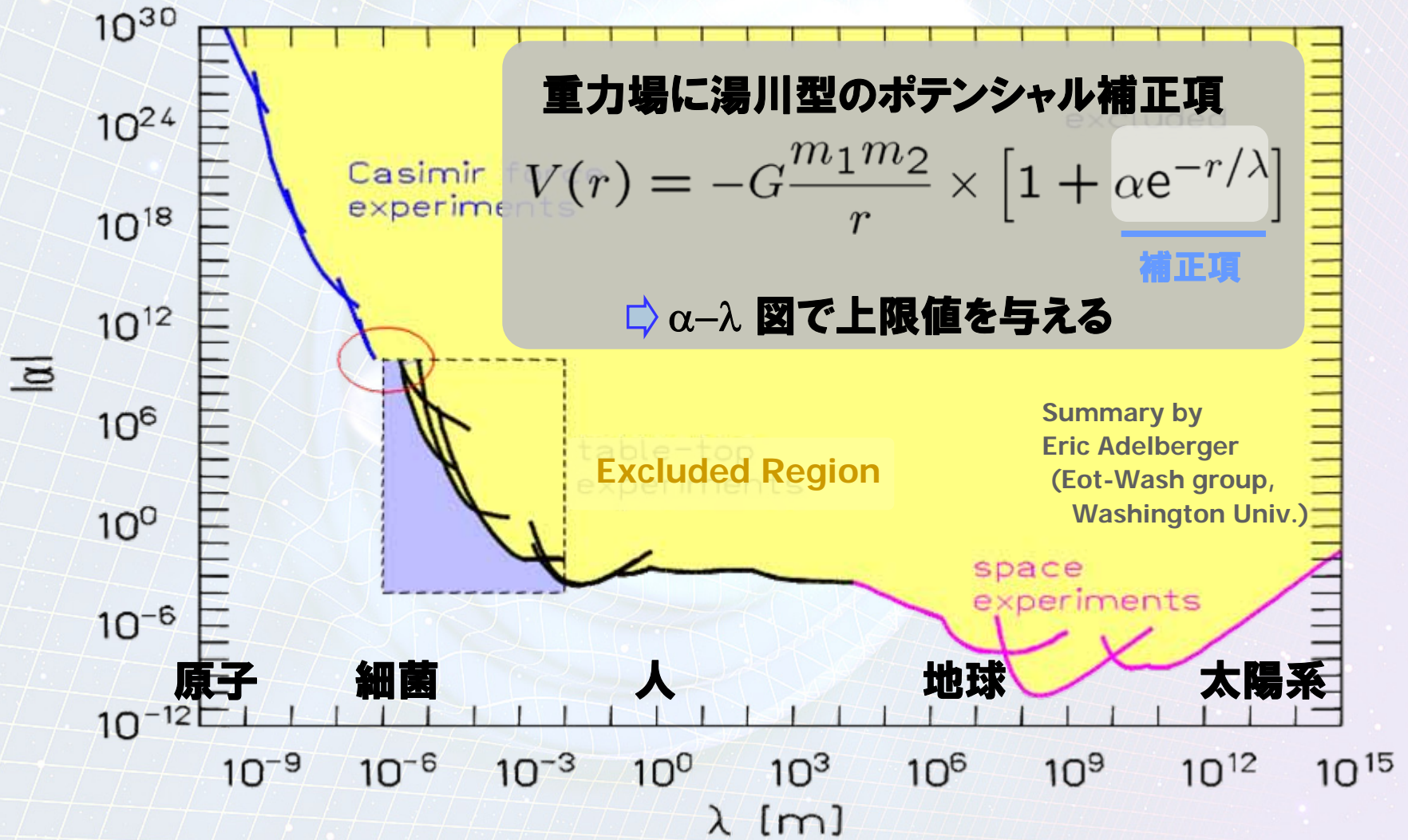
宇宙に対する
新たな知見

基礎物理法則に
対する新たな知見

重力の逆二乗則

重力法則 --- 基礎物理法則

→ さまざまなスケールで重力逆二乗則の検証



現代物理における重力の逆二乗則

物理学の根本に関わる問題...

階層性問題 (Hierarchy Problem)

重力だけが極端に弱い

宇宙項問題

(Cosmology Constant Problem)

ダークエネルギーの大きさが、真空場揺らぎのエネルギーより極端に小さい

⇒ 余剰次元の存在で説明できる可能性

(R.Sundrum, Phys.Rev. D 69 044014, 2004)

→ 微小距離 (0.1mm以下) での
重力の逆二乗則の破れとして現れる

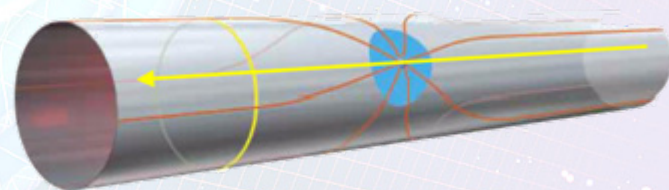
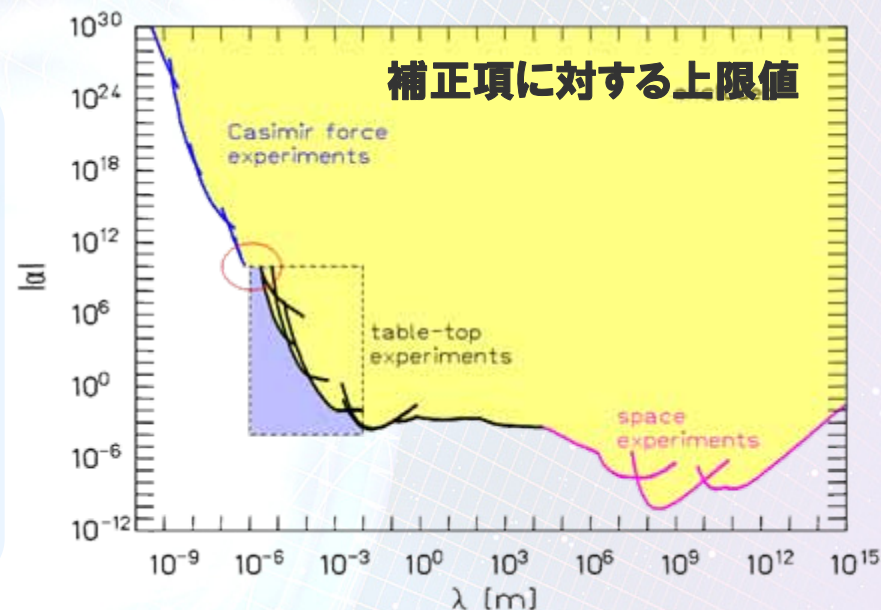


Figure courtesy Savas Dimopoulos

ダークエネルギーのスケール

$$\rho_d \sim 3.8 \text{ keV/cm}^3 \rightarrow \lambda_d \sim 85 \text{ }\mu\text{m}$$

実験原理

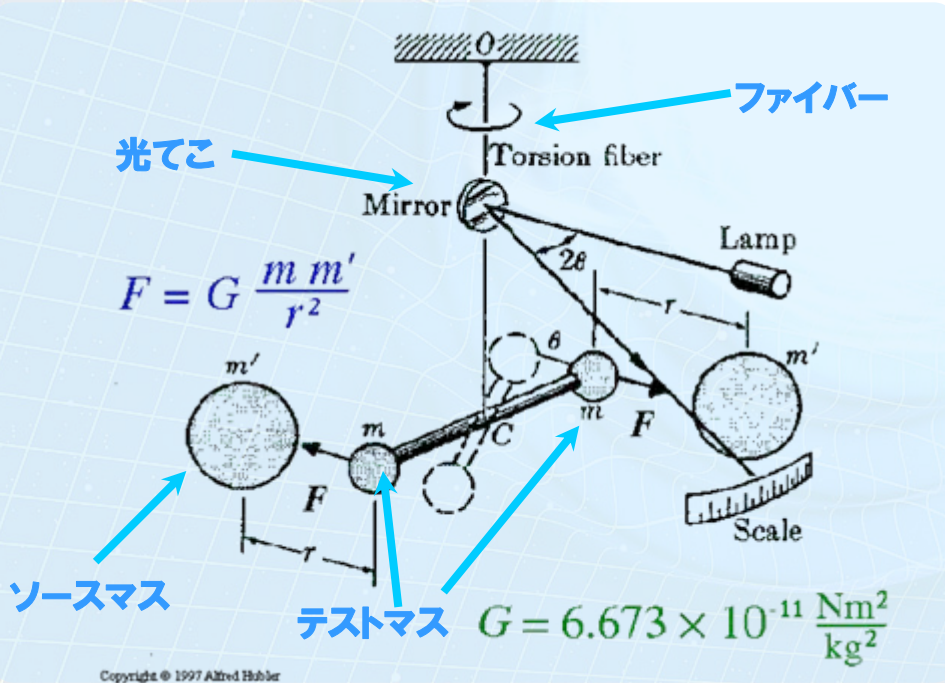
微小距離での重力の逆二乗則の検証実験

ねじれ秤 (Torsion Balance) が基本

ダンベル状をした振り子の
重力源によるねじれを測定

ねじれ計測 --- 光てこ
反射された光のスポット位置 → 角度変動

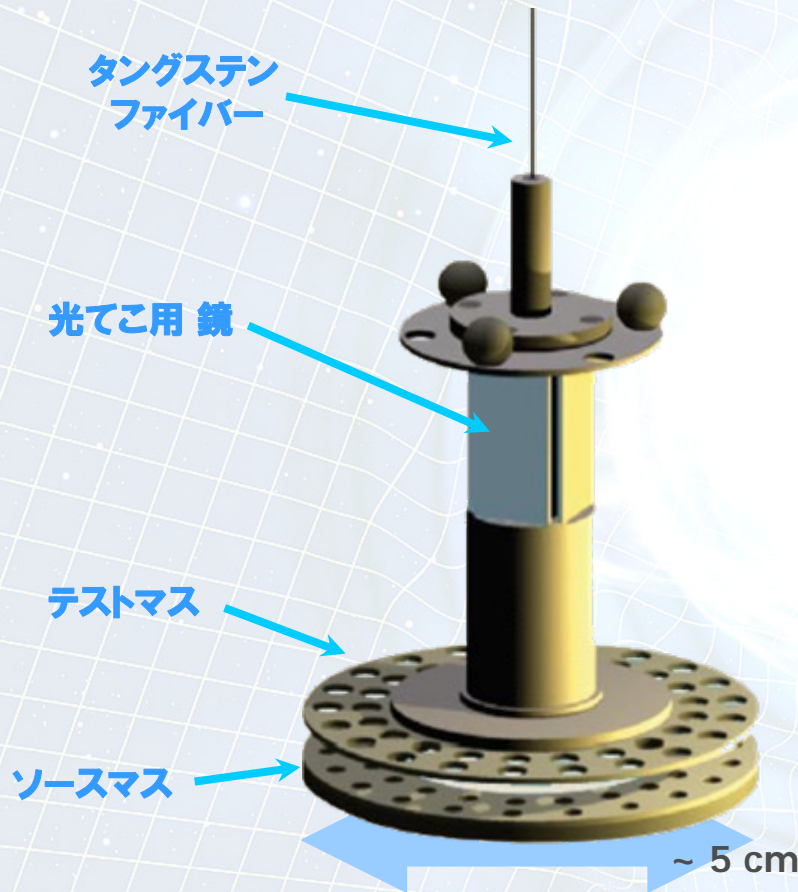
キャベンディッシュの実験 (1798)



近年の検証実験

ワシントン大 グループ (Eot-Wash group)

D. J. Kapner et al., Phys. Rev. Lett 98, 021101, 2007)



0.1mm以下のスケールでの測定

→ 最も良い上限値 $|\alpha| < 1$, $\lambda = 56\mu\text{m}$

その他

スタンフォード大

(Phys.Rev.D 77,062006, 2008)

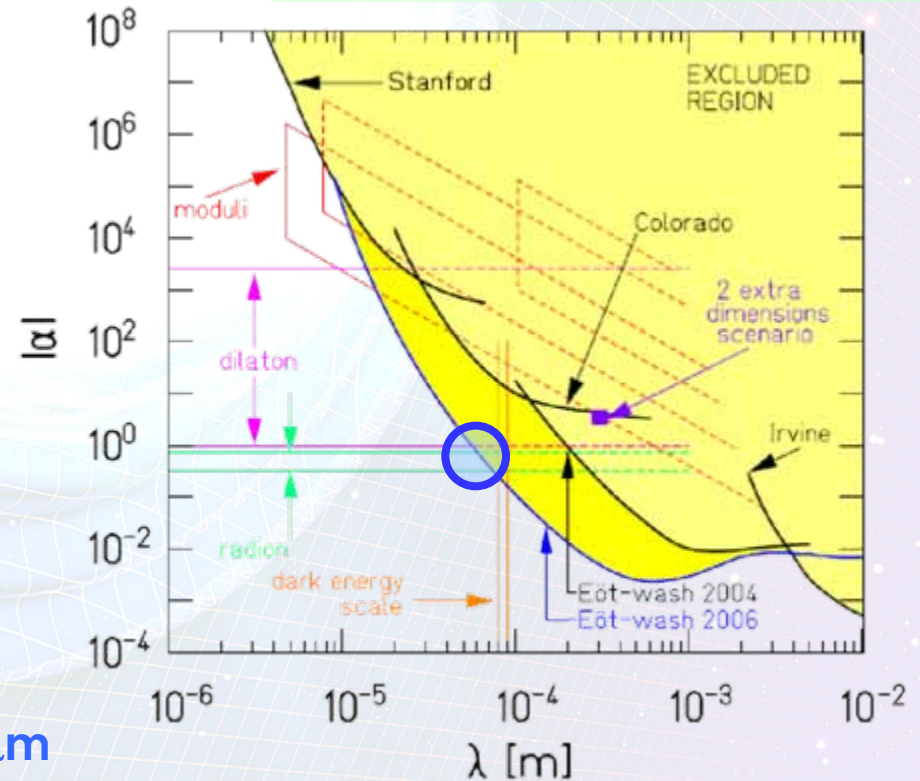
ウーハン大 (中国)

(Phys.Rev.Lett. 98,201101, 2007)

カリフォルニア大 アーバイン

(Phys.Rev.D 32,3084, 1985)

トレント大 (イタリア)



研究の目標

実験の目標:

補正項に対する**上限値を更新する**
逆二乗則の破れを探索する

初期目標:

1mm程度のスケールでの測定

$$|\alpha| < 10^{-4}, \lambda = 1-3 \text{ mm}$$

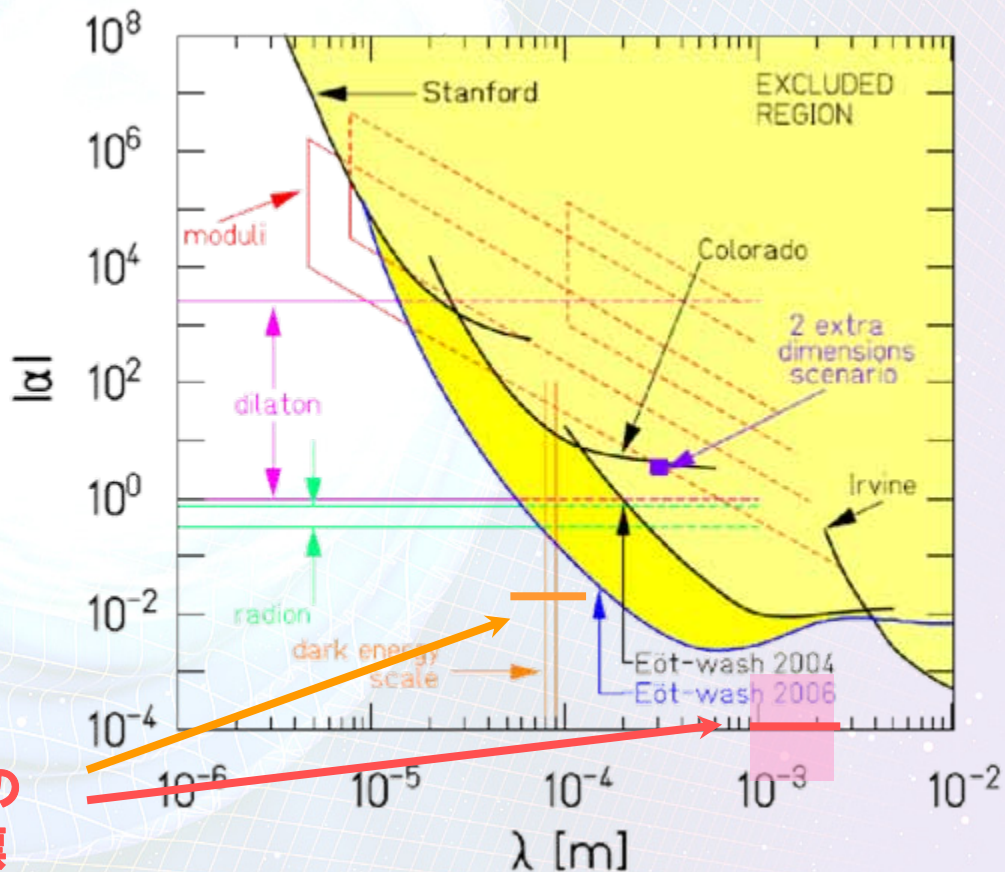
(従来の上限值を2桁更新)

次の段階:

0.1mm程度のスケールでの測定

$$|\alpha| < 10^{-2}, \lambda = 0.1 \text{ mm}$$

研究の
目標



実験装置の概要

測定の概要

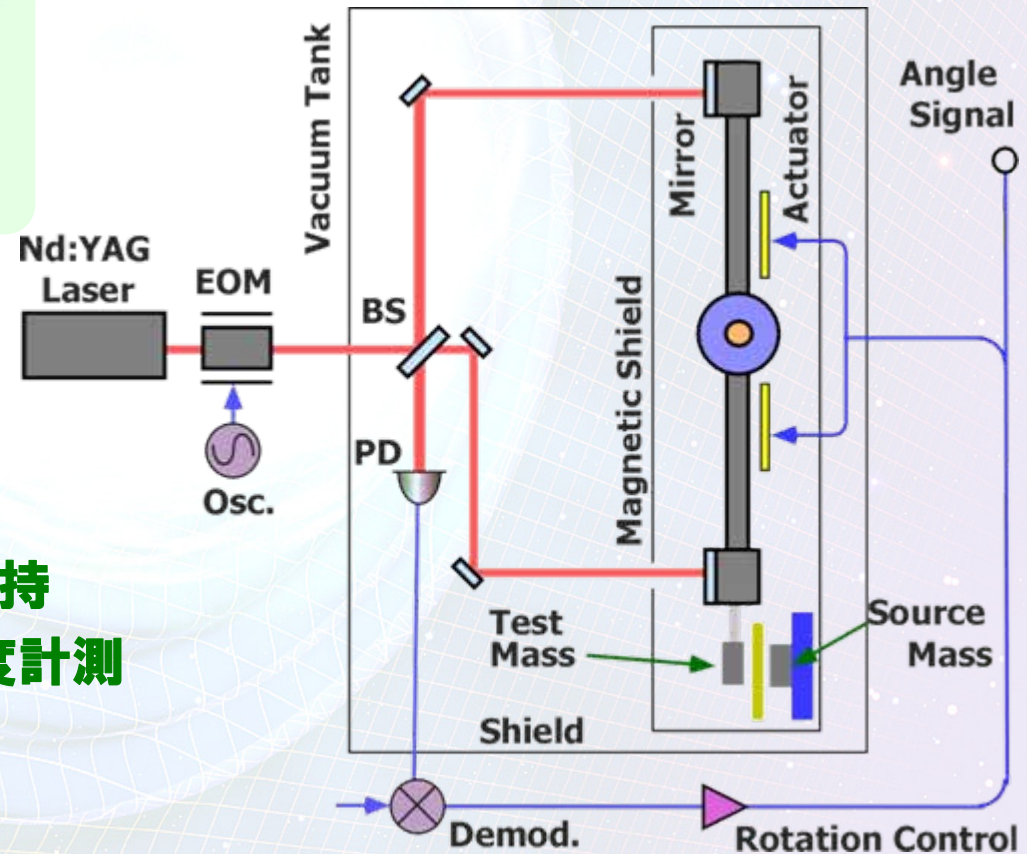
長さ 50cm程度の棒状ねじれ秤
先端にテストマス
近くにソースマスを設置

⇒ 重力による角度変動を
レーザー干渉計で測定

特徴

- (1) 超伝導体による非接触支持
- (2) レーザー干渉計による角度計測

⇒ 高感度化



感度の限界

低周波数: 熱雑音

有限温度の熱浴 + 機械損失
→ 揺動力 (揺動散逸定理)

$$\langle f_n^2 \rangle = 2k_B\gamma T$$

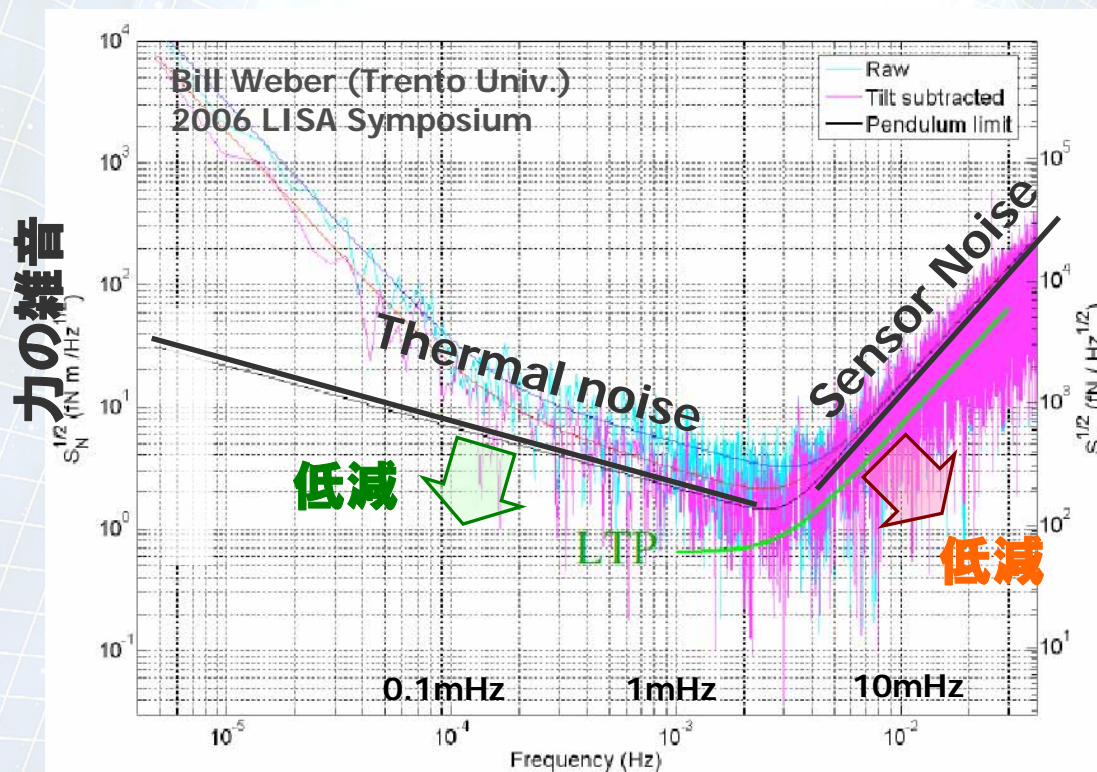
⇒ 機械損失の小さい振り子が大事

高周波数: センサ雑音

角度読取り装置の雑音

光てこ $\sim 10^{-10}$ rad/Hz^{1/2}

⇒ 高感度なセンサを利用

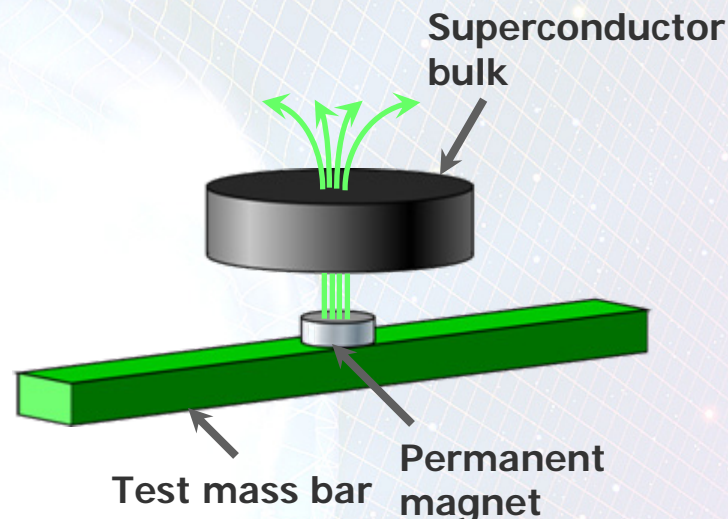


研究の特徴

(1) 超伝導体のピン止め効果を利用

永久磁石の磁束をトラップ → 磁気浮上
軸対称な磁場を持つ永久磁石
→ 回転方向には、
復元力・機械的な摩擦が働かない

⇒ 熱雑音を低減できる可能性



(2) レーザー干渉計による角度測定

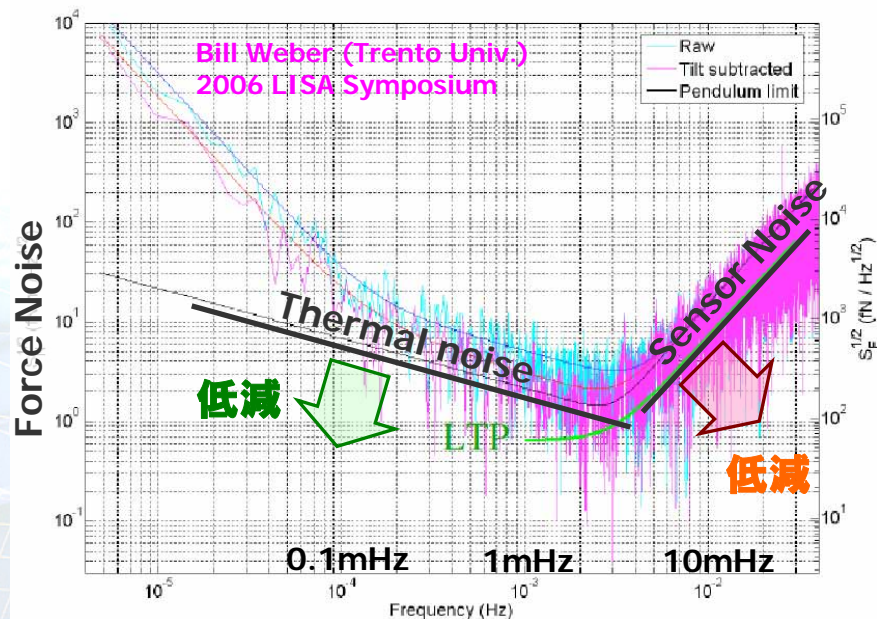
従来の装置

10mHz以上では、光てこの雑音

光てこ $\sim 10^{-10}$ rad/Hz^{1/2}

干渉計 $< 10^{-14}$ rad/Hz^{1/2}

⇒ 高周波数帯での感度の向上



実験装置の全体構成

マイケルソン干渉計

試験マス両端の差動変動（回転）測定

光源: Nd:YAGレーザー

波長 1064nm, 出力 50mW

真空槽

直径600mm円筒形

真空度 10^{-3} Pa (ターボポンプ)

防音・断熱シールド内に設置

超伝導体バルク

直径 600mm, 厚さ 20mm

$\text{Gd}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.9}$: 70.9%

$\text{Gd}_2\text{Ba}_1\text{Cu}_1\text{O}_7$: 19.2%

転移温度 ~92K

パルス管冷凍機

最低到達温度 ~60K

バルブユニット分離 → 低振動化

柔軟ヒートリンクによる防振

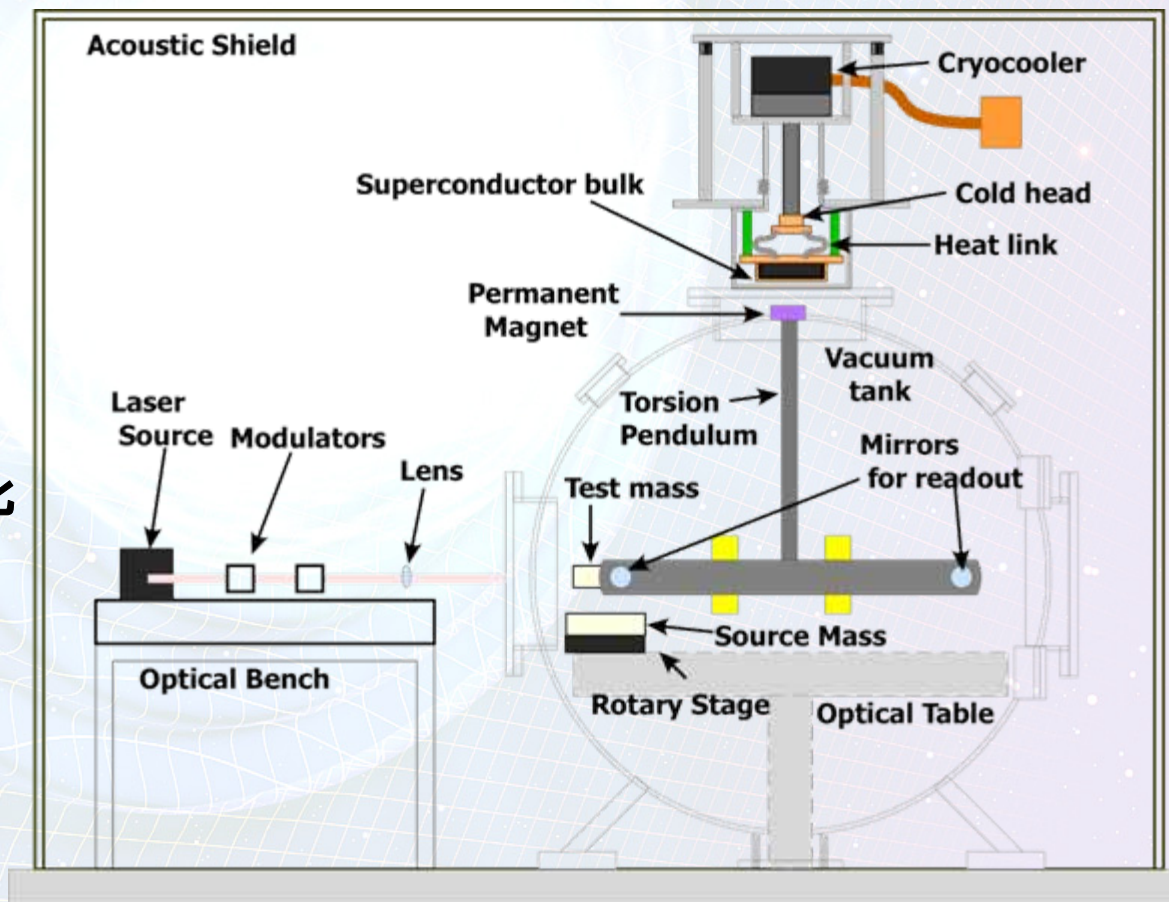
棒状ねじれ秤

長さ500mm程度

先端にテストマスを設置

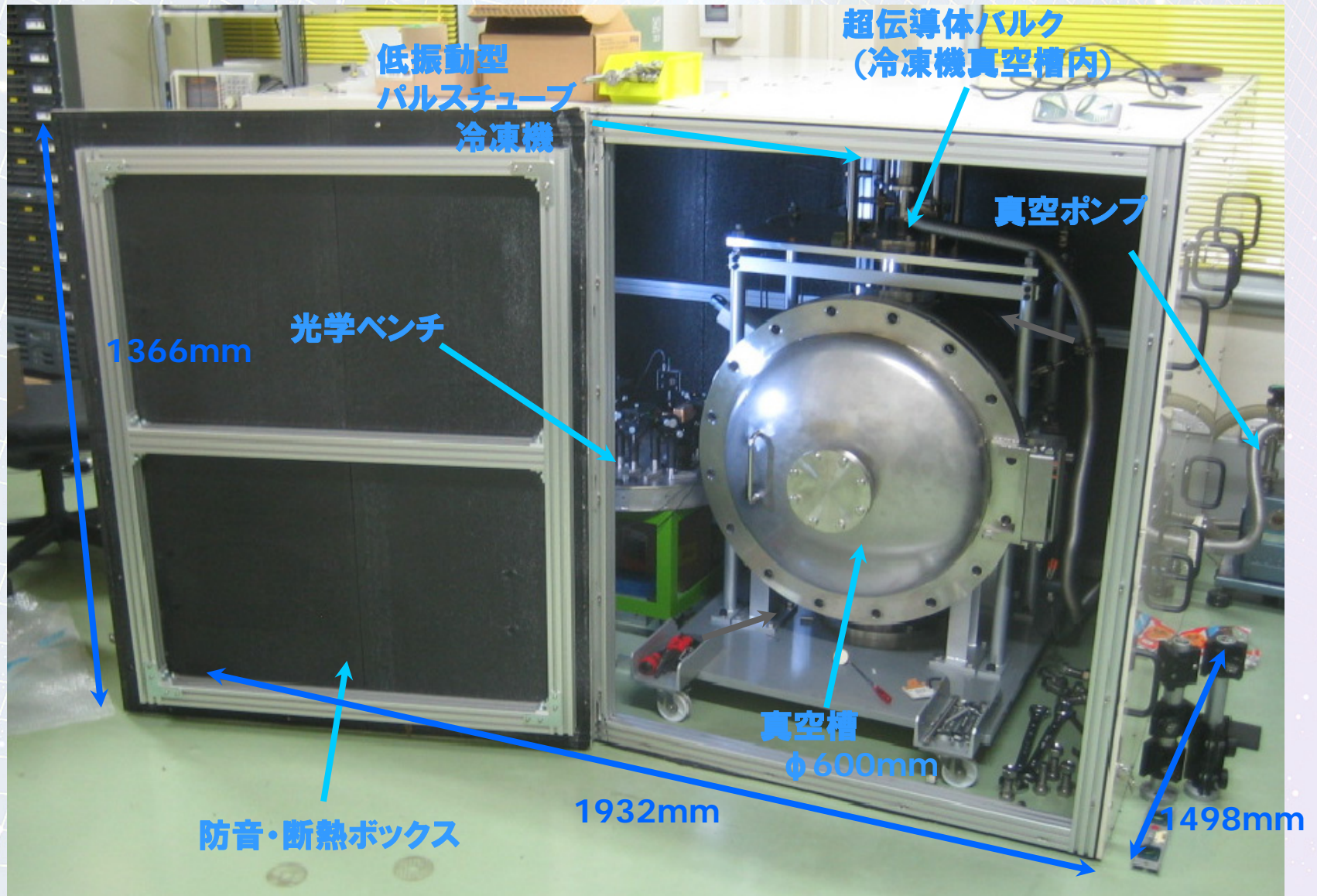
ソースマス形状を工夫

→ Null測定を行う



実験装置全景

東京大学 理学部旧1号館



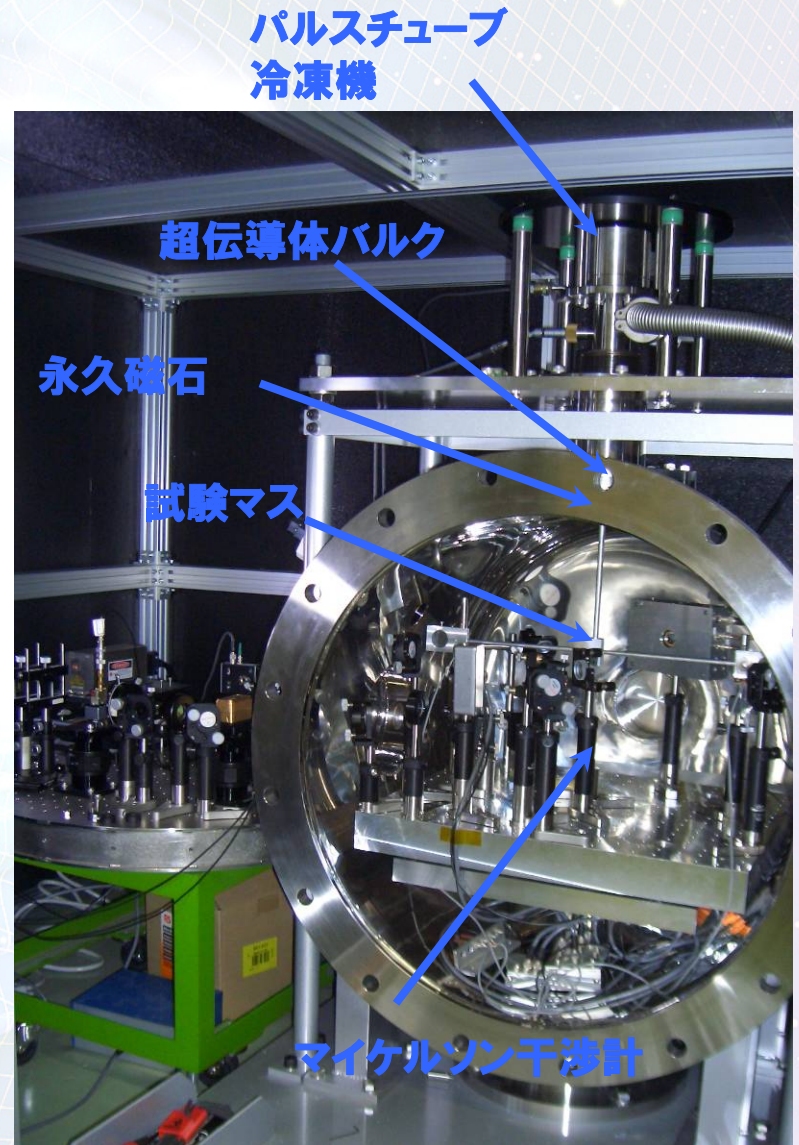
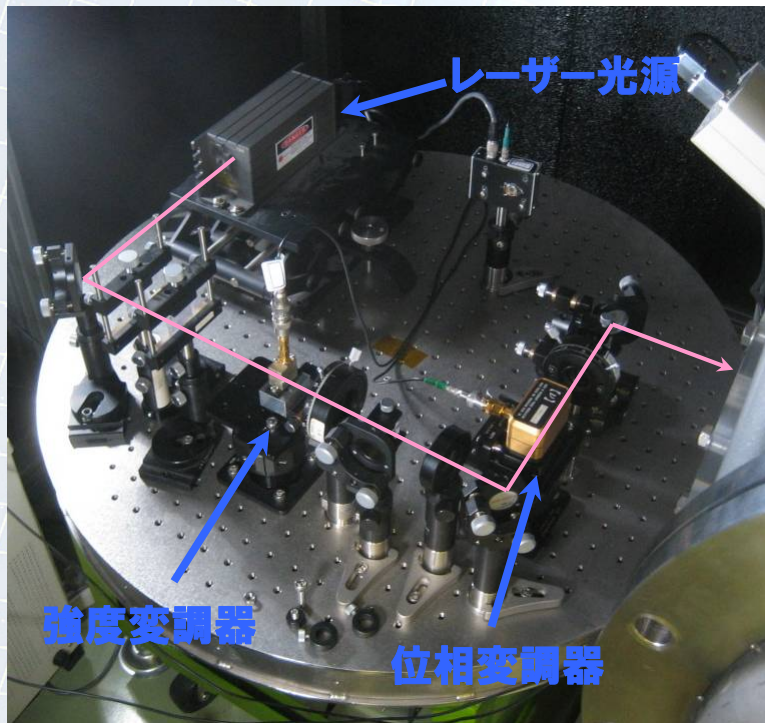
光学系

Nd:YAGレーザー光源

波長 1064nm, 出力 500mW

マイケルソン干渉計

試験マス両端の差動変動 (回転) 測定



超伝導体・冷凍機

超伝導体バルク

直径 600mm, 厚さ 20mm

$Gd_1Ba_2Cu_3O_{6.9}$: 70.9%

$Gd_2Ba_1Cu_1O_7$: 19.2%

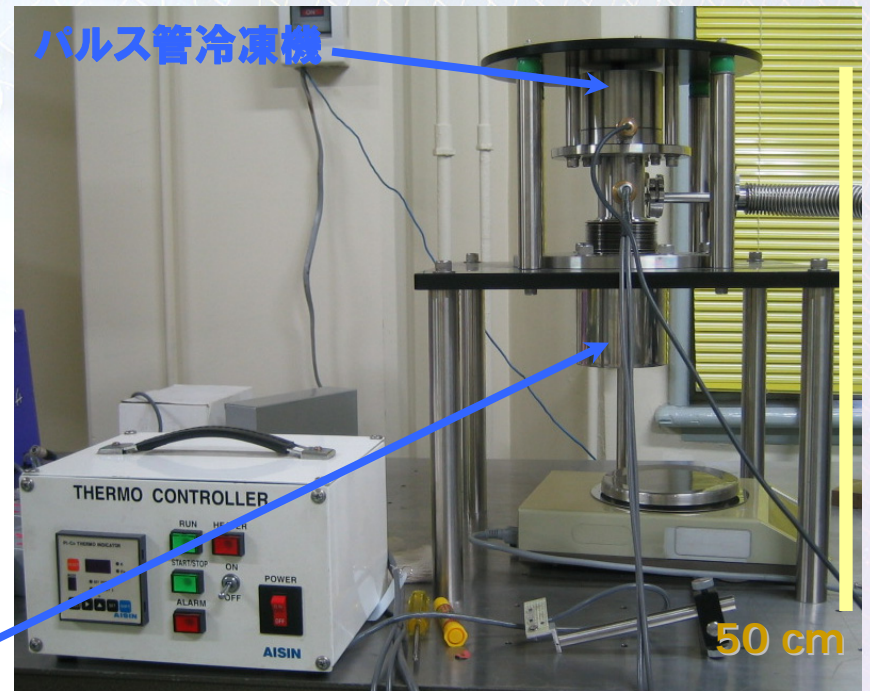
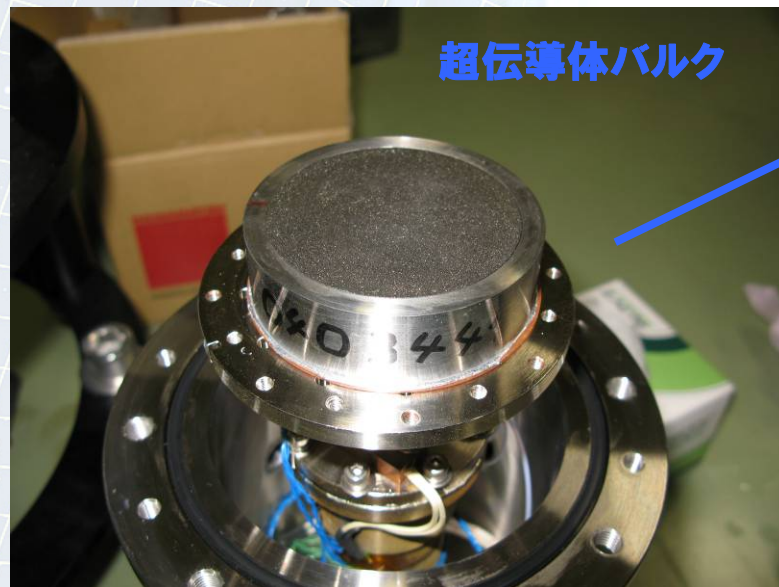
転移温度 ~92K

パルス管冷凍機

最低到達温度 ~45K

バルブユニット分離による低振動化

柔軟ヒートリンクによる防振



コンプレッサー

防振用ヒートリンク
銅線 (銀コーティング)



到達感度の見積もり

低周波数: 熱雑音

有限温度の熱浴 + 機械損失
→ 揺動力 (揺動散逸定理)

$$\langle f_n^2 \rangle = 2k_B\gamma T$$

⇒ 機械損失の小さい振り子が大事

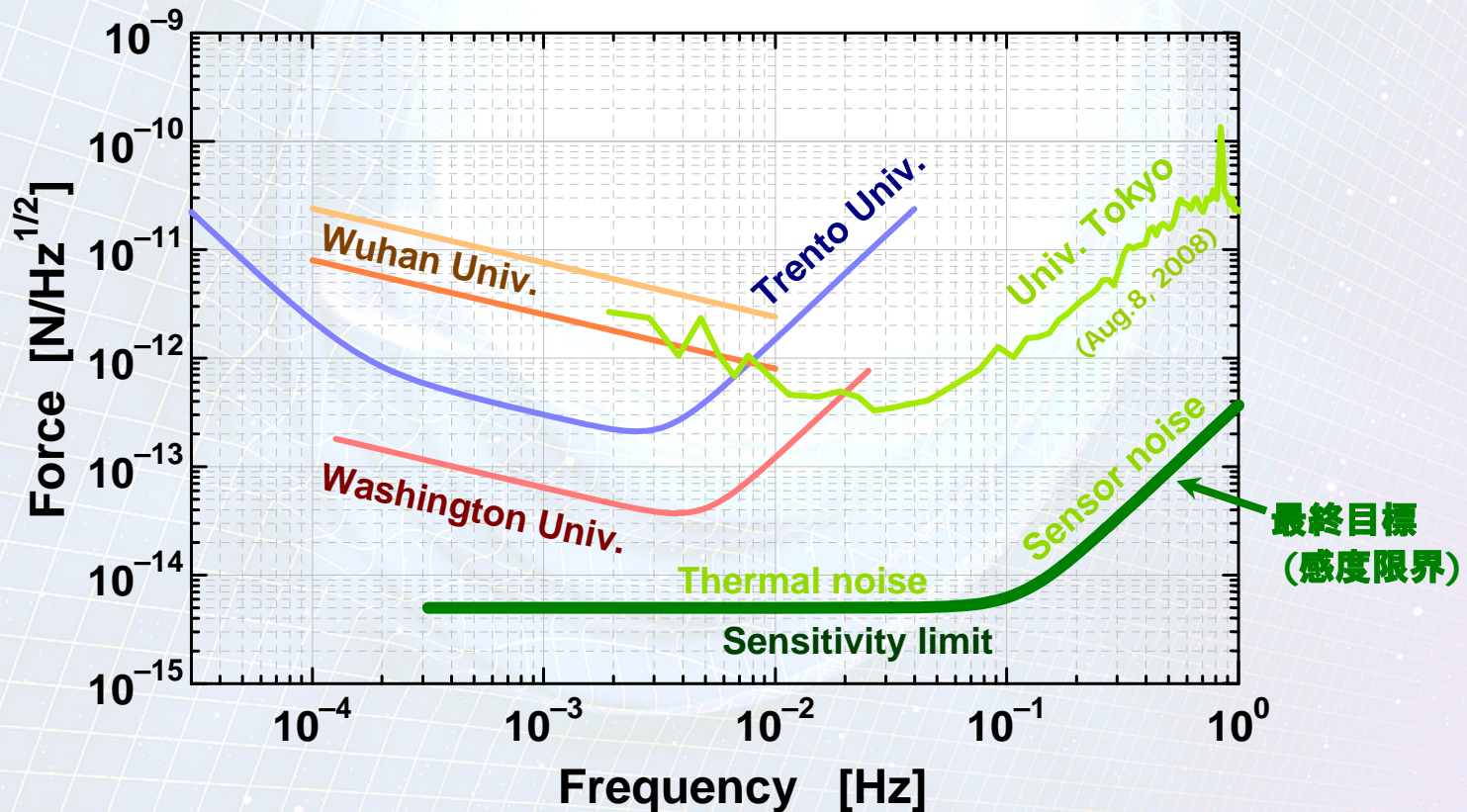
高周波数: センサ雑音

角度読取り装置の雑音

光てこ $\sim 10^{-10}$ rad/Hz^{1/2}

干渉計 $< 10^{-14}$ rad/Hz^{1/2}

⇒ 干渉計では十分小さい



ポテンシャル補正項に対する精度

ポテンシャル補正項の定量的評価

初期目標 : $|\alpha| < 10^{-4}$, $\lambda = 1-3$ mm

距離 $r = \lambda$ で測定するときの力

$$F = F_{\text{Newton}} \times (1 + 2\alpha)$$

⇒ α 程度の相対精度が必要

ニュートン重力の大きさ

タングステン板 2枚に働く力

10x10x1mm, 重心距離 1mm

⇒ 2.5×10^{-10} N

見積もられる精度

良い帯域での感度: 5×10^{-15} N/Hz^{1/2}

測定時間 : 10^2 sec

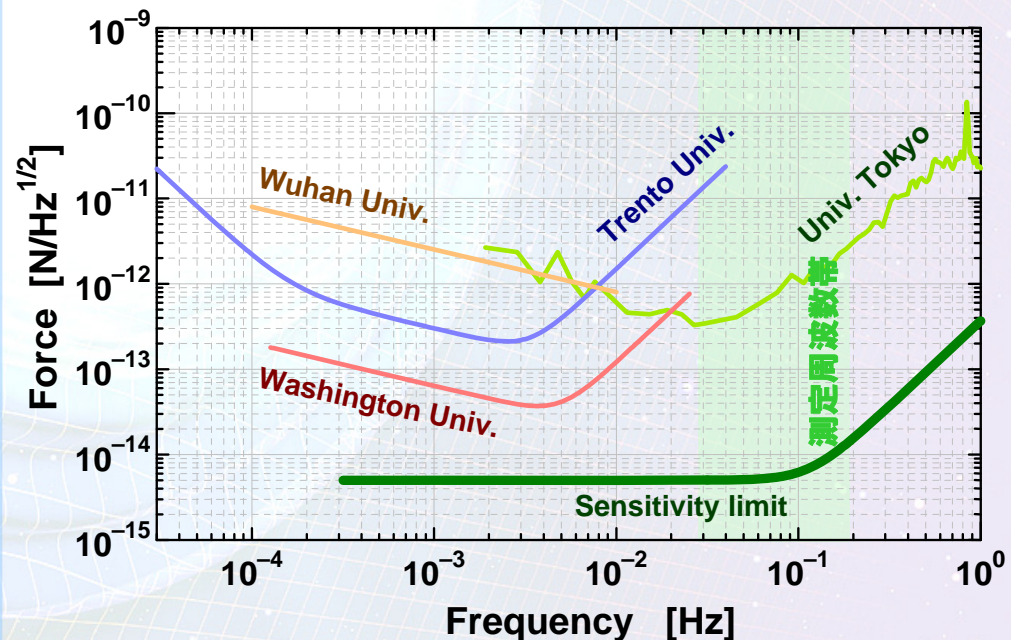
⇒ 5×10^{-16} N

⇒ $|\alpha| \sim 1 \times 10^{-6}$ の精度に対応

感度には 2桁の余裕

→ 目標実現は十分可能

課題: ソースマス駆動方式の研究
パラメータ決定精度



重力測定実験 まとめ

余剰次元理論の検証のため、
重力の逆二乗則検証実験を行う

⇒ 物理学の基本法則に対する知見を得る

目標: 現在の上限値を超える結果を得る

$$|\alpha| < 10^{-4}, \lambda = 1-3 \text{ mm}$$

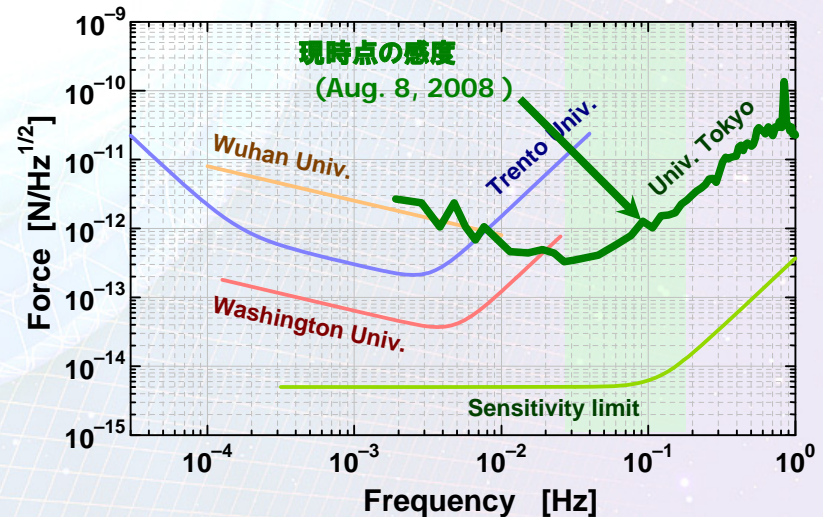
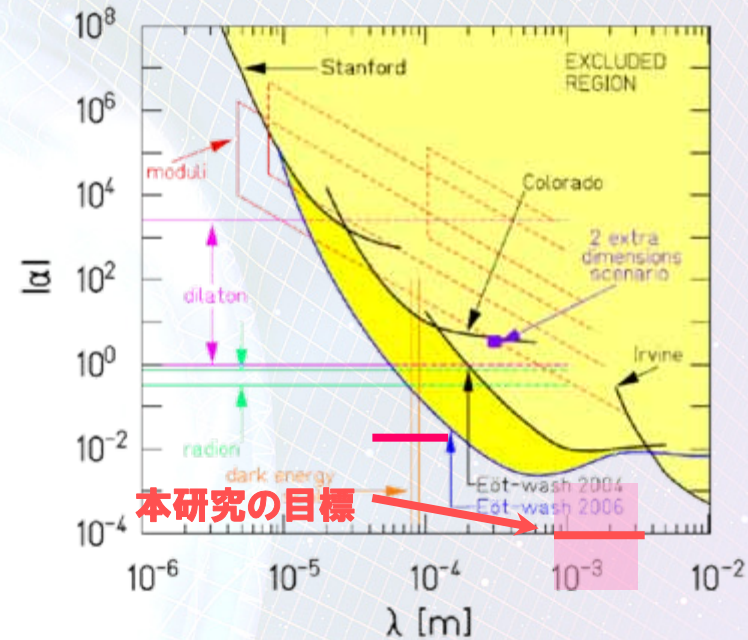
新しい物理の可能性を探求

実験装置:

ねじれ秤の主要な部分は、ほぼ完成
ソースマス駆動方式などが研究課題

現時点での精度 (静置測定)

⇒ $|\alpha| \sim 1 \times 10^{-5}$ の精度に対応



(3) レーザー干渉計技術

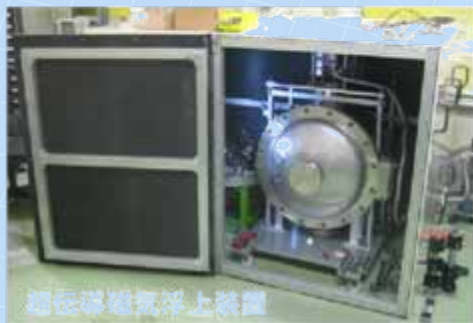


重力・重力波物理学

重力という普遍的な対象を、先進的な実験手法で研究
→ 宇宙・基礎物理に対して新しい知見を得る。

重力による余剰次元検証

微小距離での重力逆二乗則測定
超伝導磁気浮上による試験マス支持
外来雑音抑圧・除去 微小信号処理



基礎物理法則に
対する新たな知見

高感度レーザー干渉計

標準量子限界を越える
マクロな系の高感度計測



光の量子雑音に対する知見
量子光学的手法の発展

重力波による天文学

大型レーザー干渉計画の推進
国際重力波観測網への参加
宇宙重力波望遠鏡の基礎開発



宇宙に対する
新たな知見

光の量子雑音

高感度レーザー干渉計を用いた
マクロな系の精密計測



重力波による天文学
重力測定による基礎物理実験

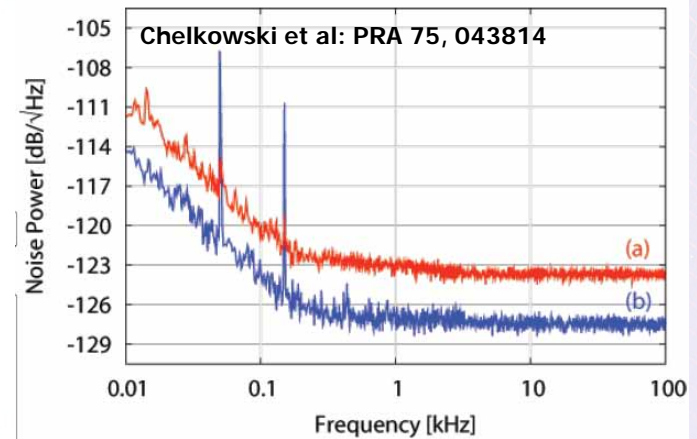


さらなる高感度化

(標準量子限界を超えた測定)

干渉計外部からの
スクイズされた真空場の導入

干渉計方式の工夫によるスクイズング
(ポンデロモティブ・スクイズング)



ミクロな系を対象とした光技術

レーザー冷却・トラッピング



重力・重力波物理学への応用

重力加速度の精密計測

原子干渉計による重力波検出器

まとめ



まとめ

重力・重力波物理学

重力という普遍的な対象を、
先進的な実験手法で研究

重力波観測：

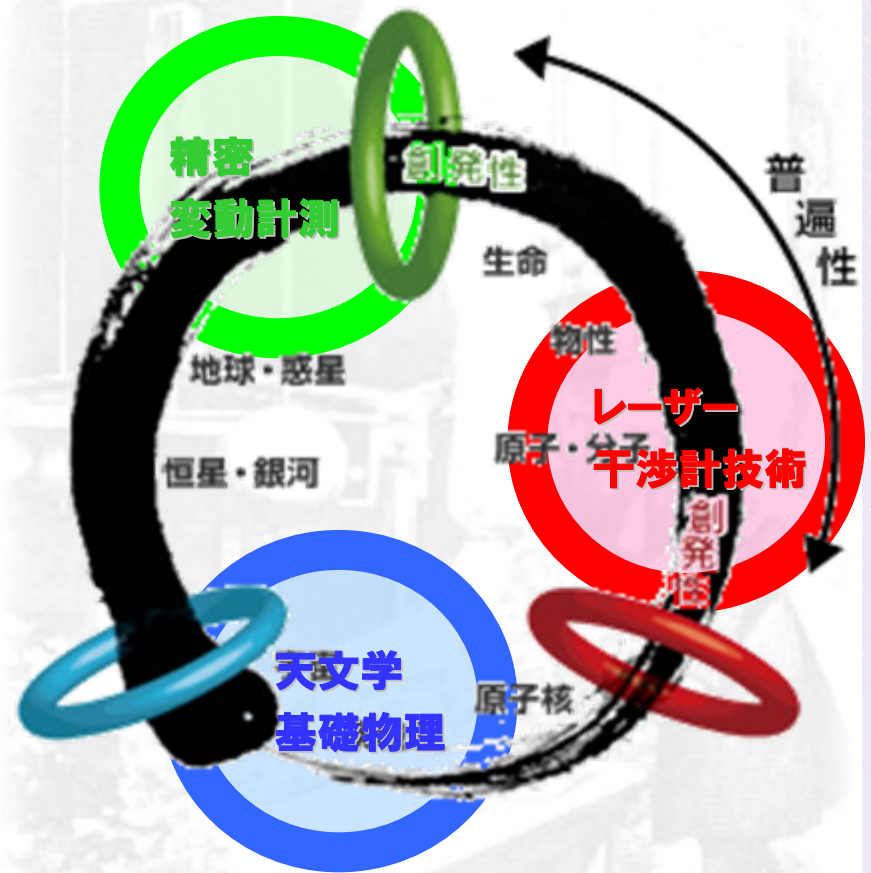
次世代の新しい天文学

重力測定：

基礎物理法則への知見

レーザー光技術の発展

→ 宇宙・基礎物理に
対する新しい知見



終

