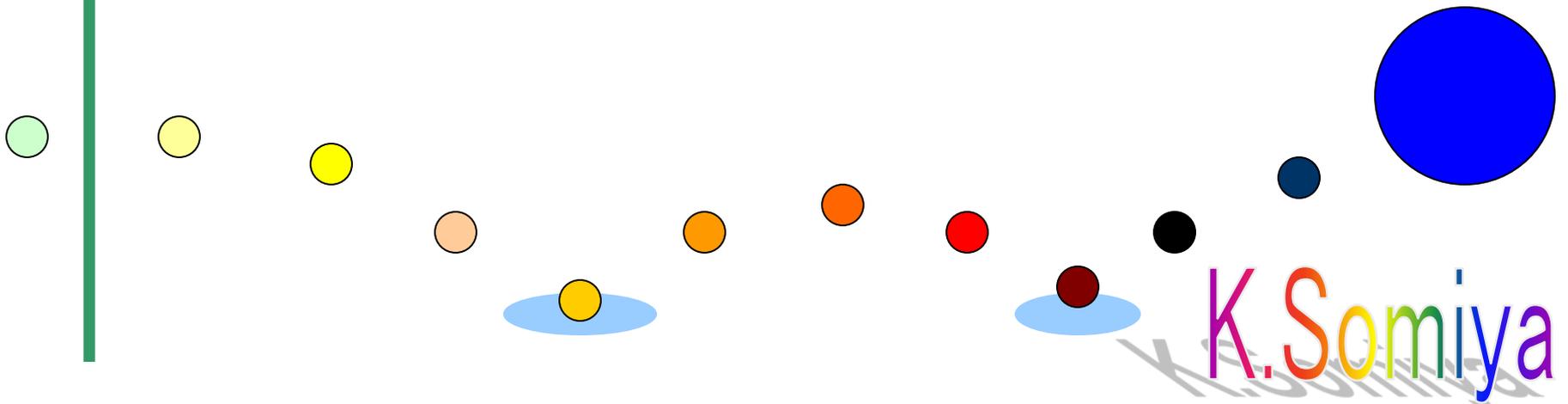


重力波検出器の開発

April 16, 2014

東京工業大学
宗宮健太郎



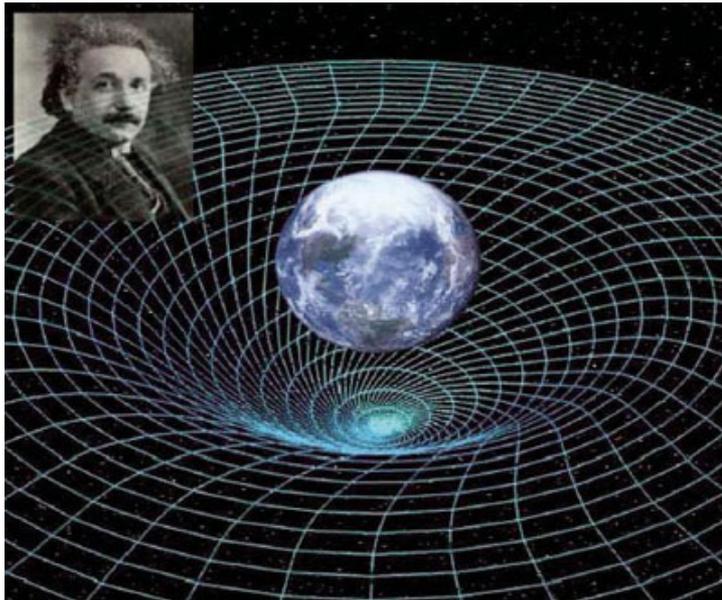
重力波



アインシュタインによる
重力波の存在予言

(1916年)

「ダイナミックな時空の変化は
遠方まで波として伝わる」



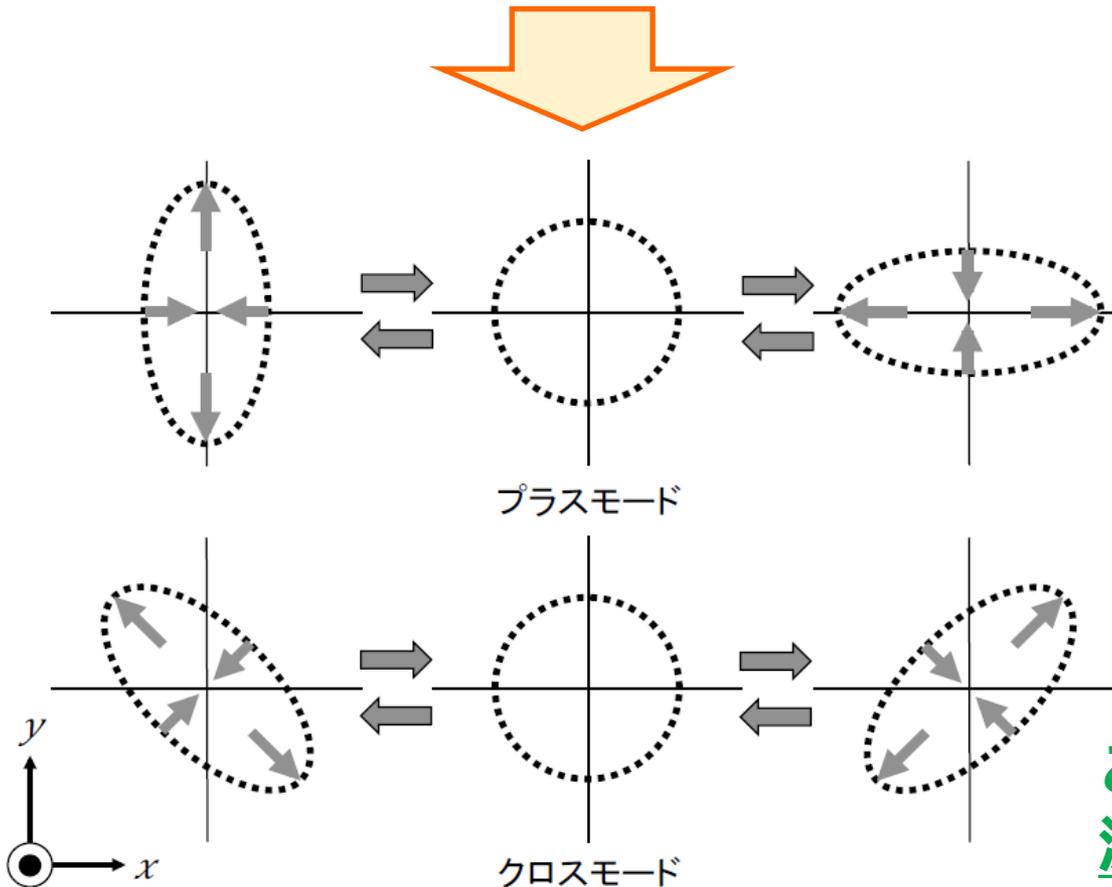
宇宙初期や星の内部など
光やニュートリノでは見えない
情報を伝える

重力波の影響

アインシュタイン方程式

$$\square \bar{h}_{\mu\nu} = -\frac{16\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

(弱い重力場での近似式)



空間が歪む
||
物体間の距離が変化

このような空間の歪みが
波として遠方に伝搬する

General Theory of Relativity

The effects of the
General Theory
of Relativity can only
be shown in
astronomical distances.

Einstein made four
predictions to support
the General Theory
of Relativity.

They concern:

1. Precession of Mercury's orbit
2. Deflection of light
3. Redshift
4. Gravitational Waves

The proof of gravitational
waves is still lacking.

The other predictions have
been experimentally
proved, with an exactitude
up to 13 decimal points.

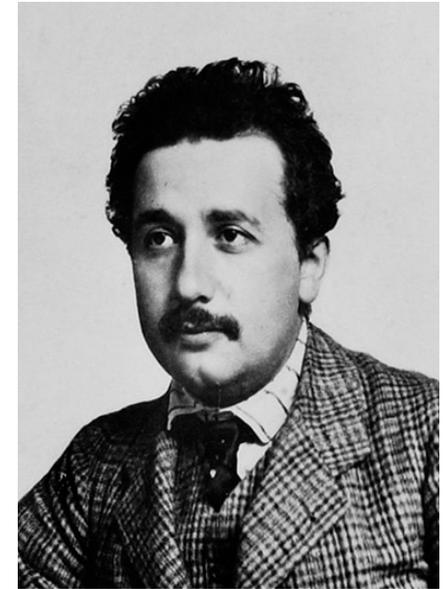
一般相対性理論の証明

← ベルンのアインシュタイン博物館にある説明 (写真)

$$\square \bar{h}_{\mu\nu} = 0 \rightarrow \bar{h}_{\mu\nu} = A_{\mu\nu} e^{ik(ct-z)}$$

$$A_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{h}_+ & \bar{h}_\times & 0 \\ 0 & \bar{h}_\times & -\bar{h}_+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

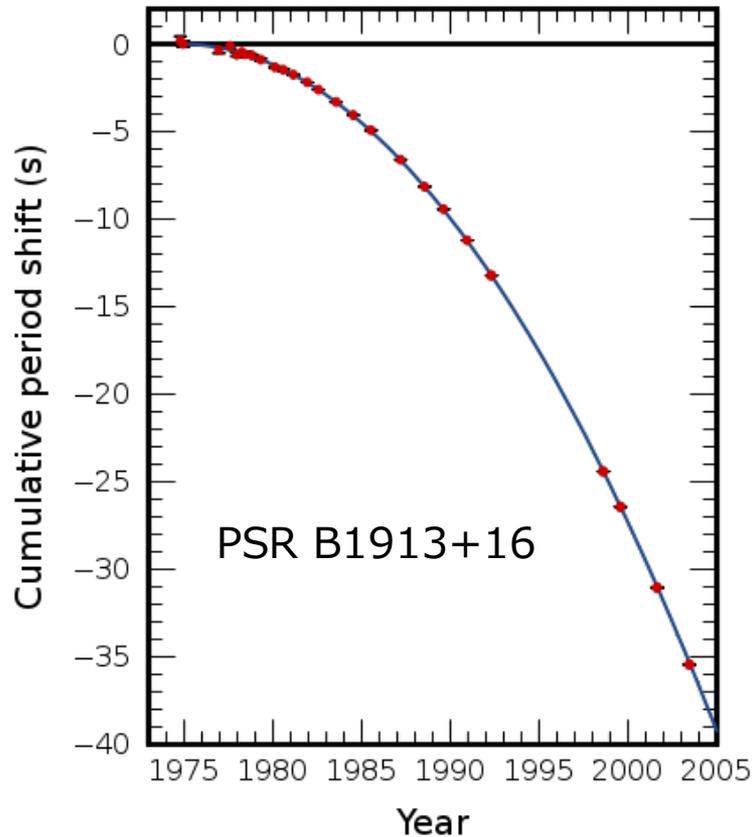
(in 1916)



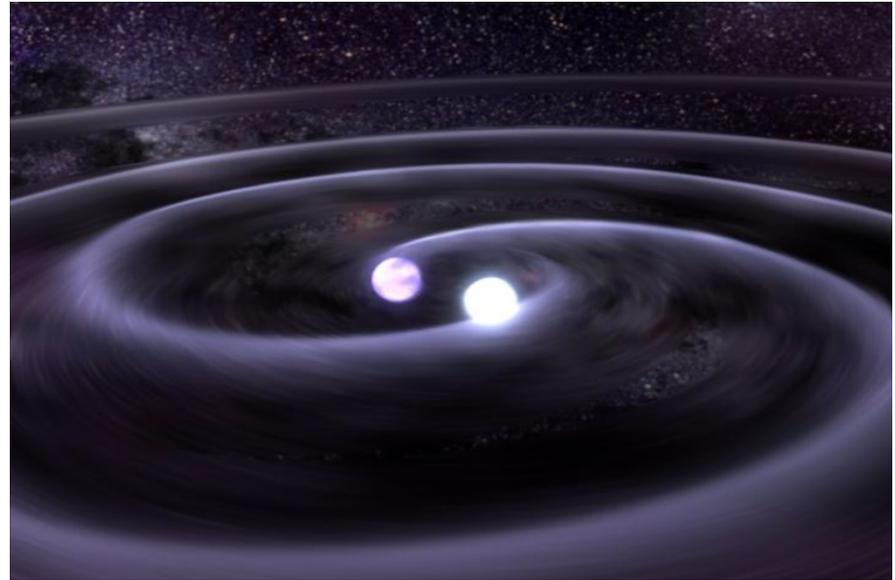
“20世紀から21世紀に持ち越された宿題”

第二世代重力波検出器の完成によって
いよいよこの問題が解決される

重力波の存在の間接証明(1)



- アレシボ天文台の電波望遠鏡で観測
- 太陽光の2%のエネルギーを放出
- 3億年後に合体する

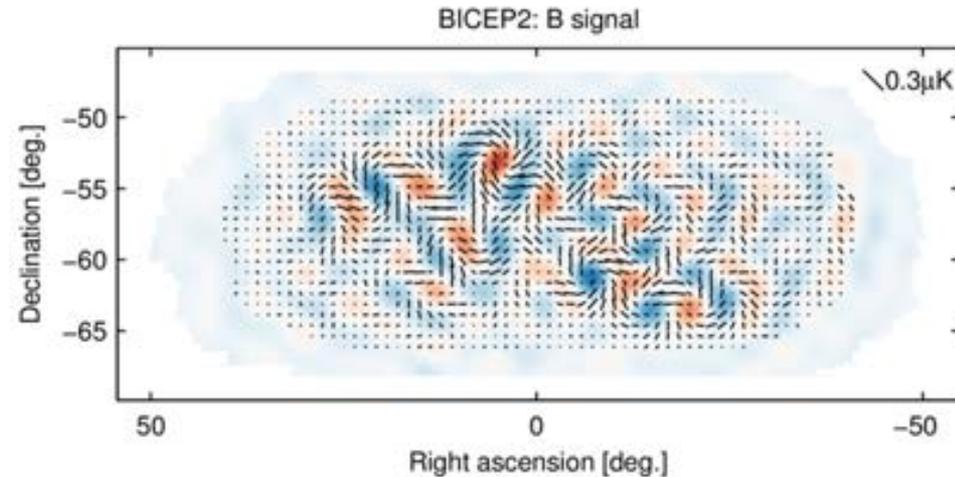


- ハルスとテイラーが観測した中性子星連星の周期変動
→ 重力波によるエネルギー放出
- 重力波が空間を伝搬したことを証明したわけではない

重力波の存在の間接証明(2)



- 南極のアムンゼンスコット基地にあるBICEP2で観測された
- 背景重力波は宇宙誕生後、10のマイナス36乗秒後に放出される
- 背景マイクロ波はその30万年後に放出される

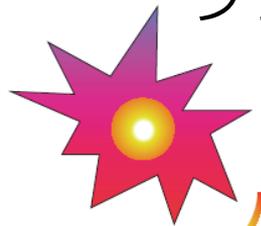


- 時空の真空揺らぎがインフレーションで広がり重力波を放出
→ 背景マイクロ波に偏光
- 重力波がその間の空間を伝搬したことを示している
→ 地球に来た分はまだ見えない

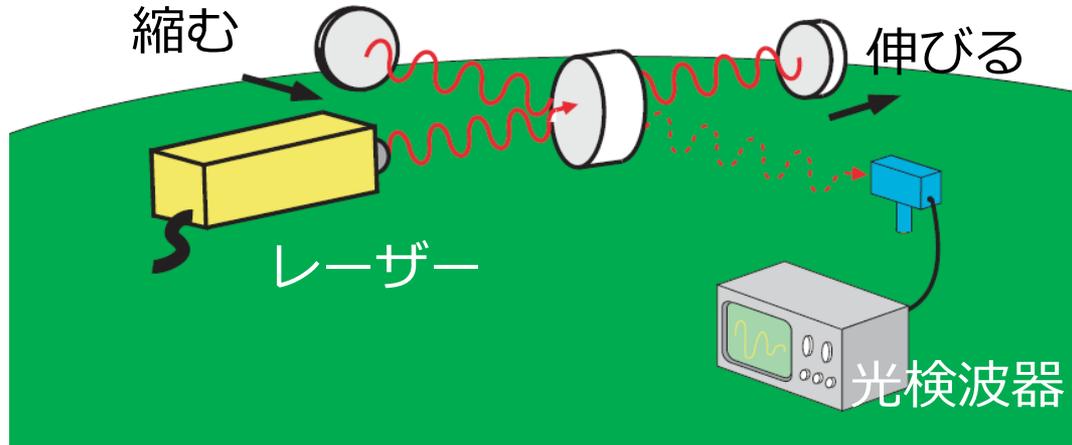
重力波を直接観測するには

遠方の銀河

超新星爆発, 中性子星,
ブラックホール合体, etc.



Gravitational Waves



地球

重力波が空間を伝搬



地球上で物体間距離が変わる



大型干渉計で光の往復時間を計測して観測

- LIGO in US [4km]
- Virgo in Italy [3km]
- GEO in Germany [600m]
- KAGRA in Japan [3km]

GW research history

1916 Einsteinが重力波の存在を予言

1969 Weberが重力波を検出したと発表
(雑音であったと考えられている)

1974 HulseとTaylorが天体観測から存在を間接証明
(1993 ノーベル賞)

1995 TAMA (JPN) の建設開始

1999 TAMA 観測開始

2002 LIGO (US) 観測開始

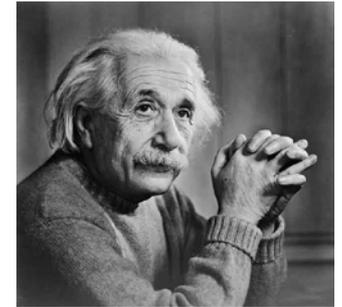
2005 GEO (GER/UK) 観測開始

2007 Virgo (ITA/FRA) 観測開始

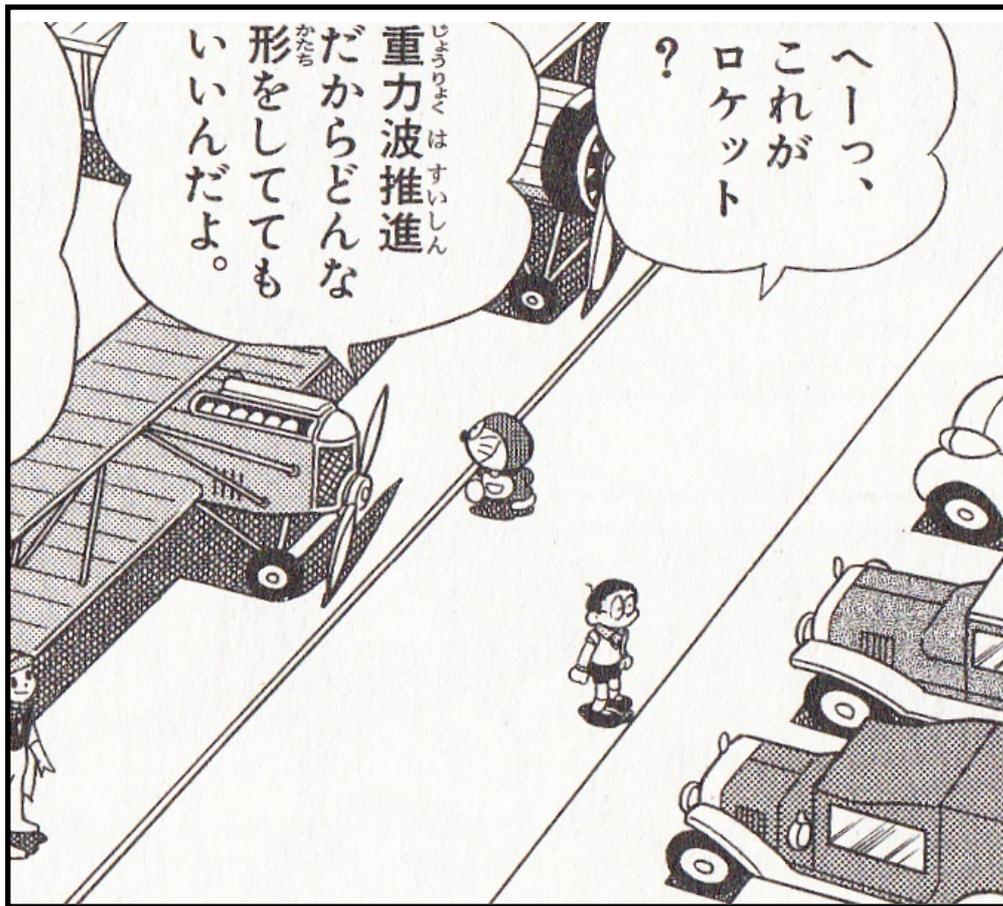
2009 LIGO-Virgo 1年間におよぶ共同観測

2010 欧米が第二世代へのアップグレードを開始

2010 KAGRA (JPN) 建設開始



重力波推進ロケット in ドラえもん

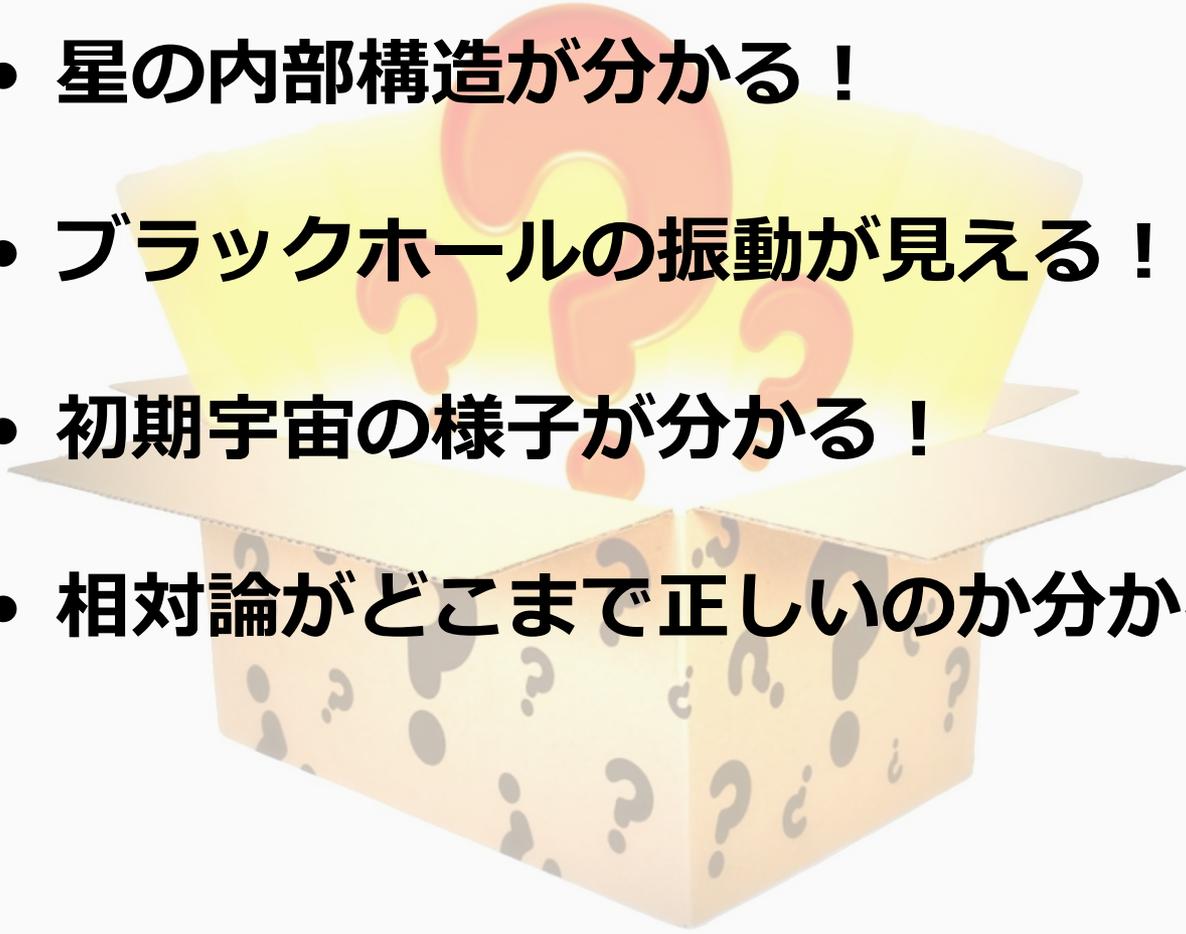


1996年上映の映画
『のび太と銀河超特急』のひとコマ。
23世紀の遊園地ドリーマーズランド
のレンタロケットは**重力波推進**。

あと200年ちょっとの間に、重力波が
検出され、生成できるようになり、
それを推進力に応用できる…？

© Tentomusi Comics

重力波の観測で分かること

- **星の内部構造が分かる！**
 - **ブラックホールの振動が見える！**
 - **初期宇宙の様子が分かる！**
 - **相対論がどこまで正しいのか分かる！**
- 

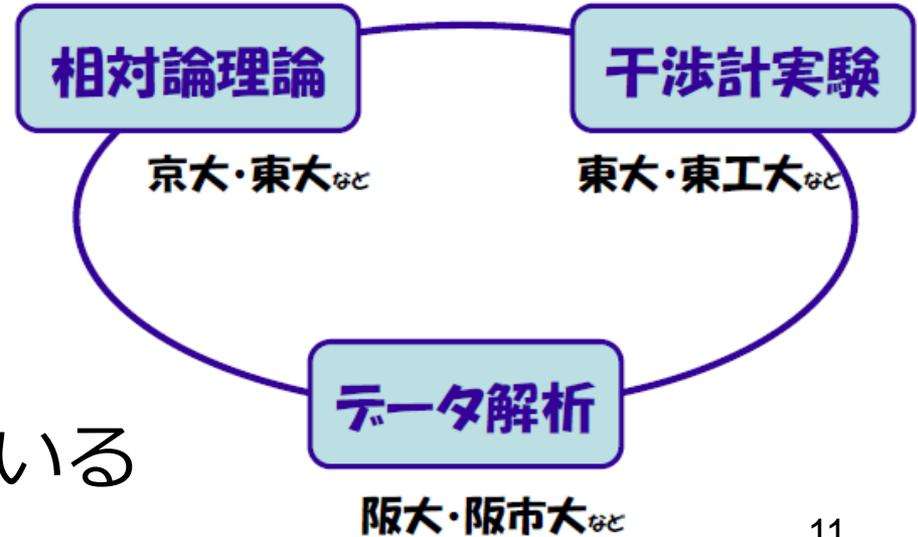
重力波観測の特徴



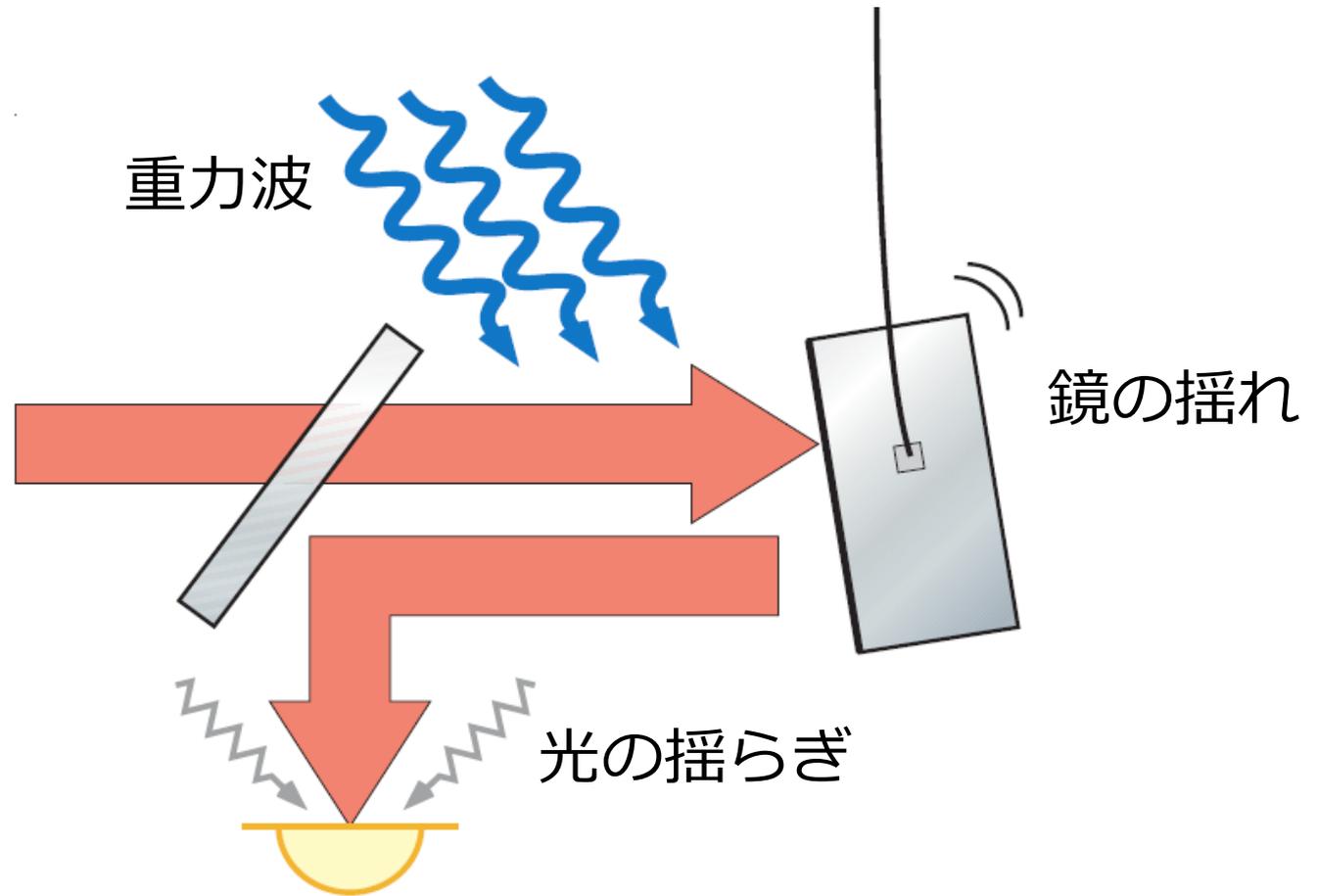
[通常の観測]
観測装置の準備から観測結果の
解析までを自らが行う

[重力波の観測]

- 役割分担されている
- 装置を使いこなすこと
自体が研究対象になっている

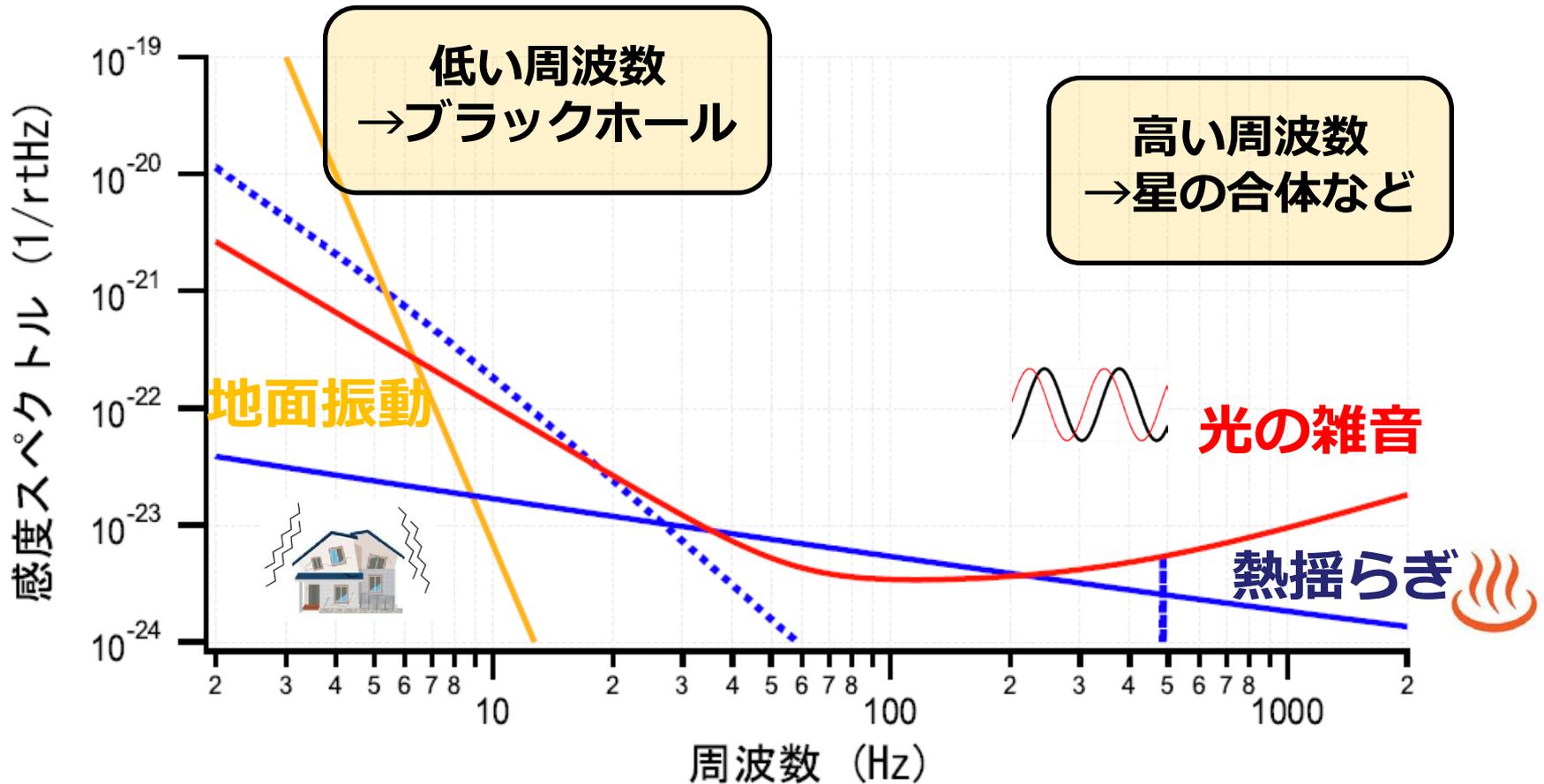


重力波検出器の信号と雑音



**雑音が小さいと、微かな重力波信号でも見える
⇒ より遠くの、より多くの星が見えるようになる**

重力波検出器の感度スペクトル



周波数ごとに、観測を妨げる雑音源も異なる
各々の雑音を減らせば、重力波の観測が可能

感度を制限する雑音の解析

1. 地面振動とは？

地面の揺れが伝わって鏡を揺らす雑音
→ **振り子による防振**がカギになる

2. 熱雑音とは？

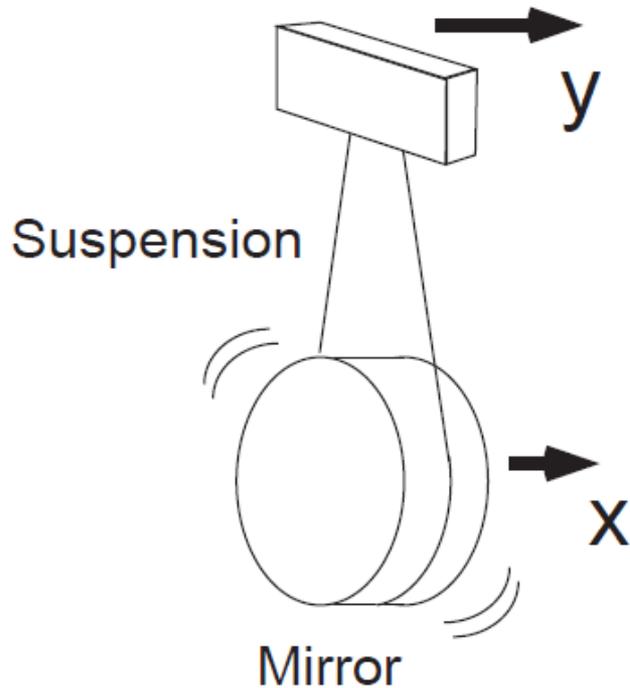
ブラウン運動で鏡や振り子に変形する
→ **揺動散逸定理**を使って計算する

3. 光の揺らぎとは？

光の位相がずれると距離が測れなくなる
→ 周波数雑音および**光子数の量子揺らぎ**
(こちらはほとんど消える)

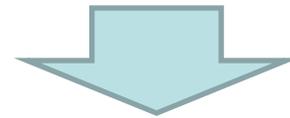
地面振動

地面振動を軽減する「防振」機構

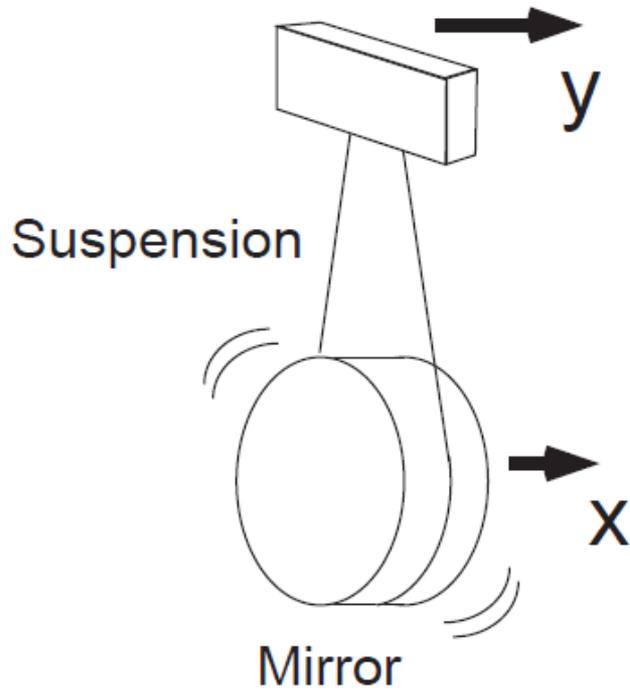


振り子に吊られた鏡の運動方程式

$$m\ddot{x}(t) = -\frac{mg}{\ell}(x(t) - y(t))$$

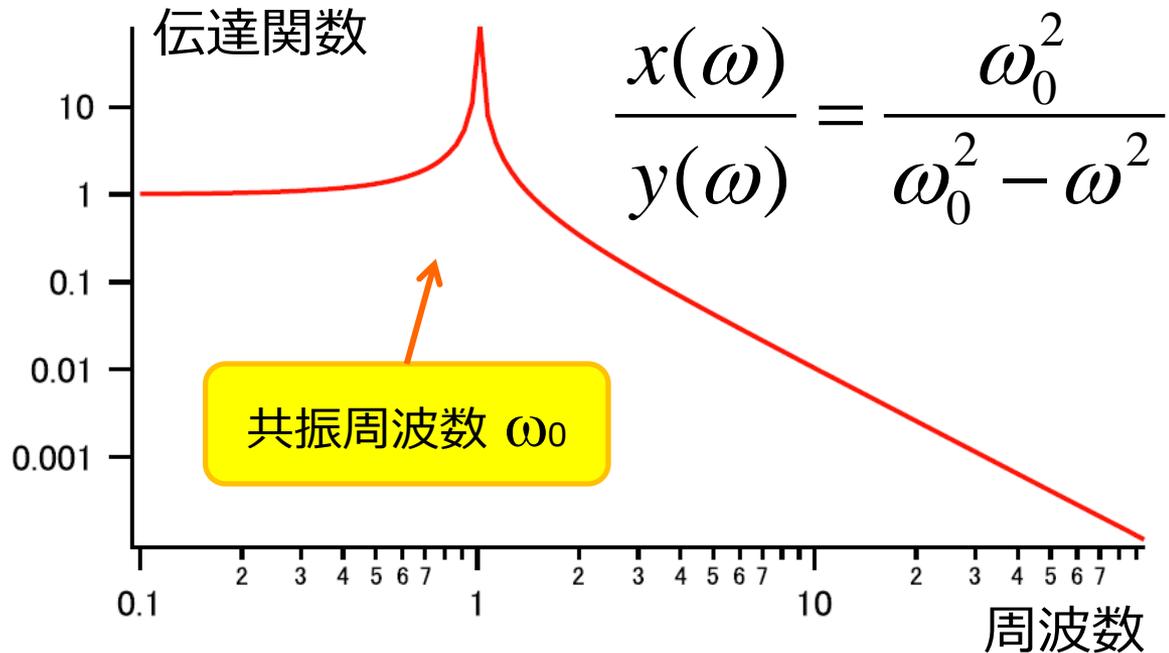
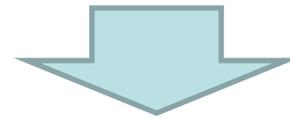


地面振動を軽減する「防振」機構



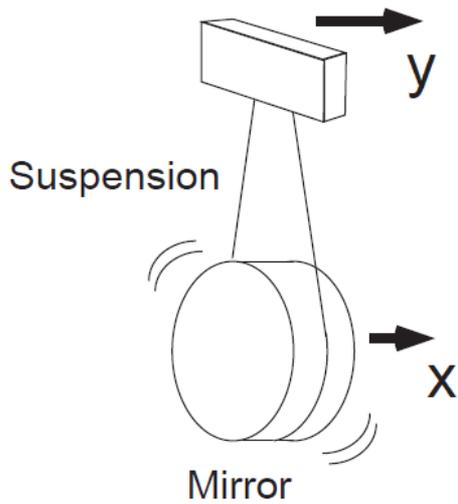
振り子に吊られた鏡の運動方程式

$$m\ddot{x}(t) = -\frac{mg}{\ell} (x(t) - y(t))$$



高周波では地面振動が
あまり鏡に伝達しない
(=防振)

共振を抑えるダンピング

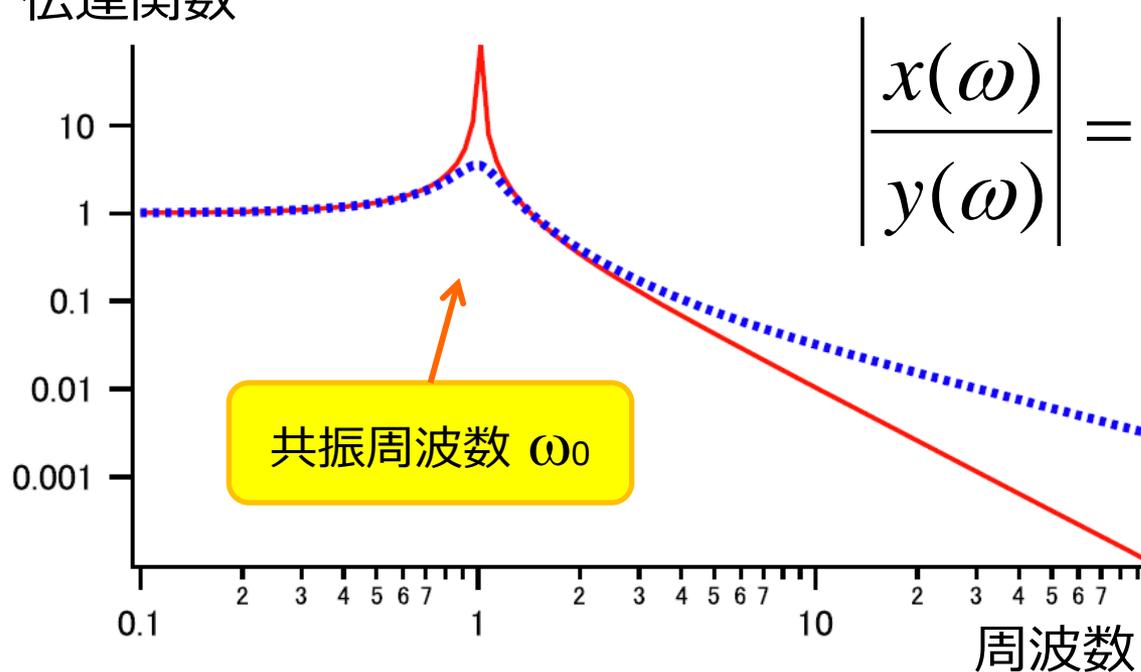


$$m\ddot{x}(t) = -\frac{mg}{\ell}(x - y) - \gamma(\dot{x} - \dot{y})$$

磁石などを用いて
速度に比例した力を課す



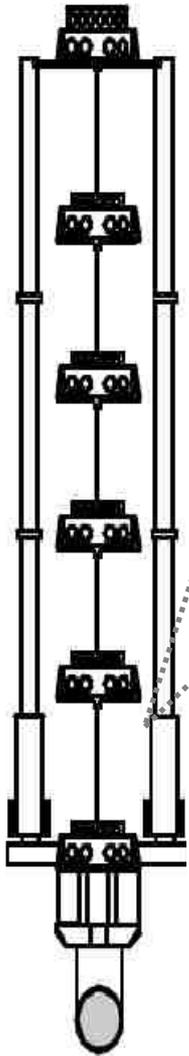
伝達関数



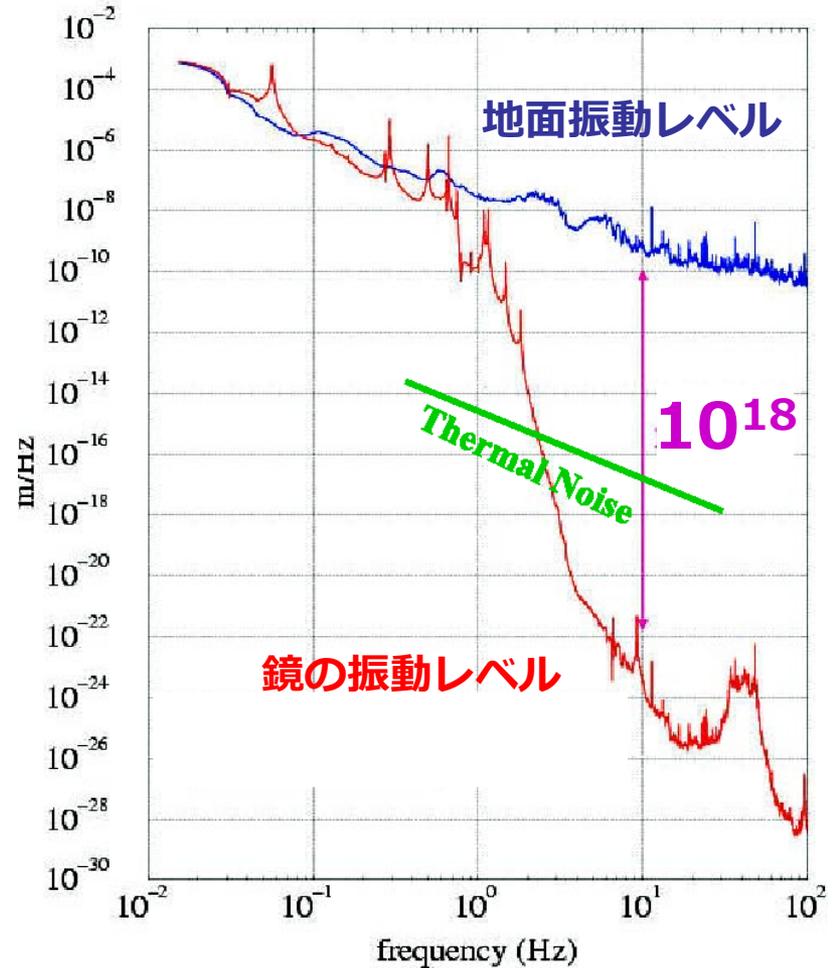
$$\left| \frac{x(\omega)}{y(\omega)} \right| = \sqrt{\frac{\omega_0^4 + \gamma^2 \omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2}}$$

共振の大きな動きを
抑えることができる
(=ダンピング)

多段振り子による防振



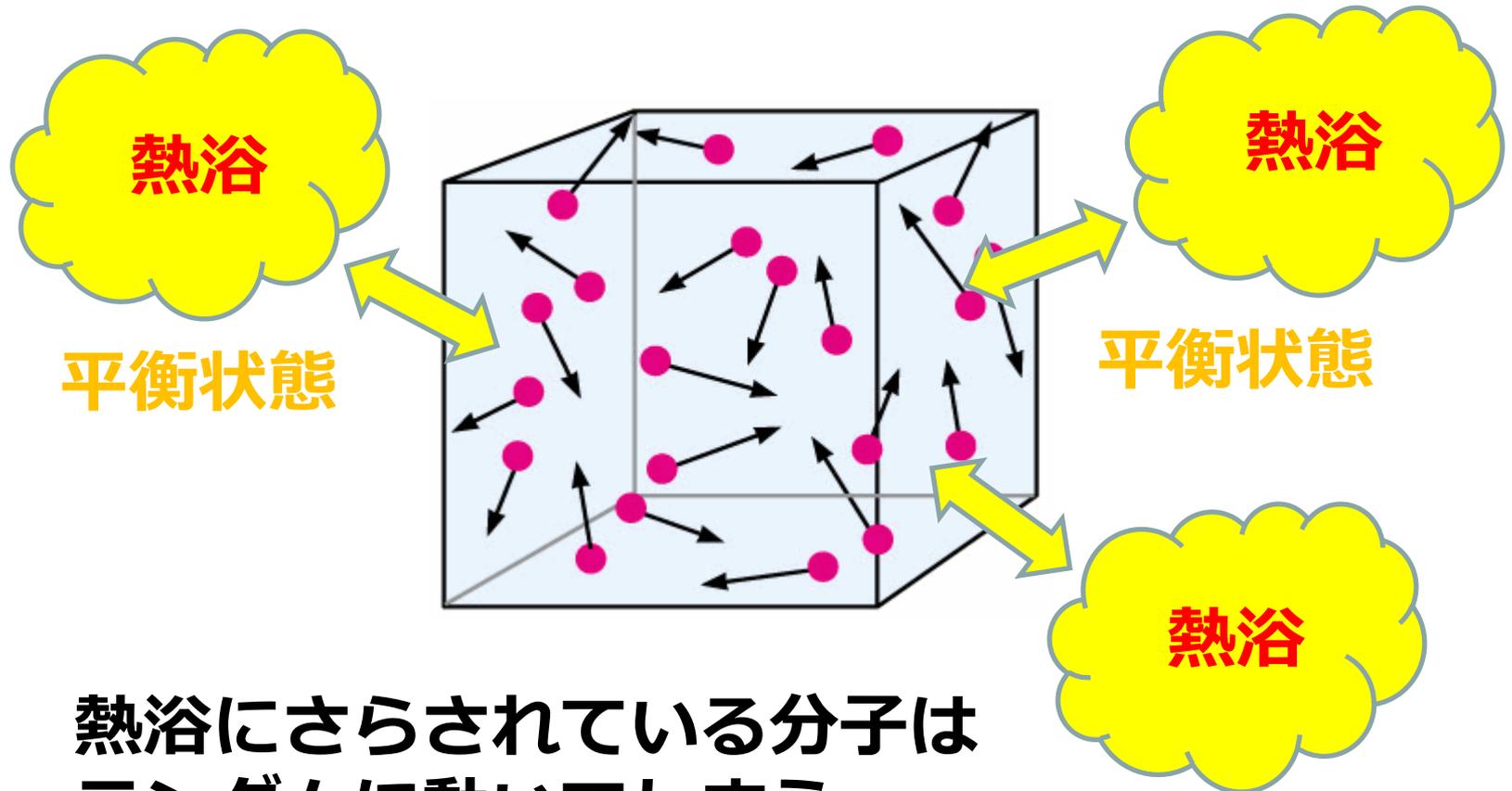
イタリアの高性能防振



大幅な地面振動雑音の軽減を実現

熱雜音

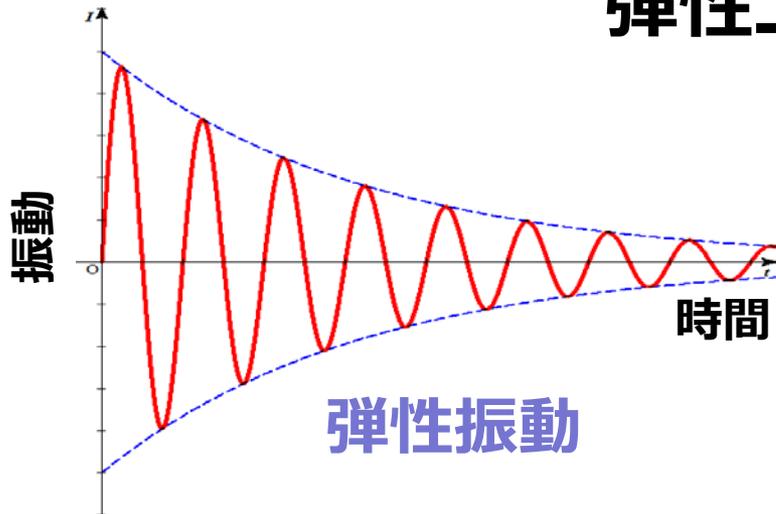
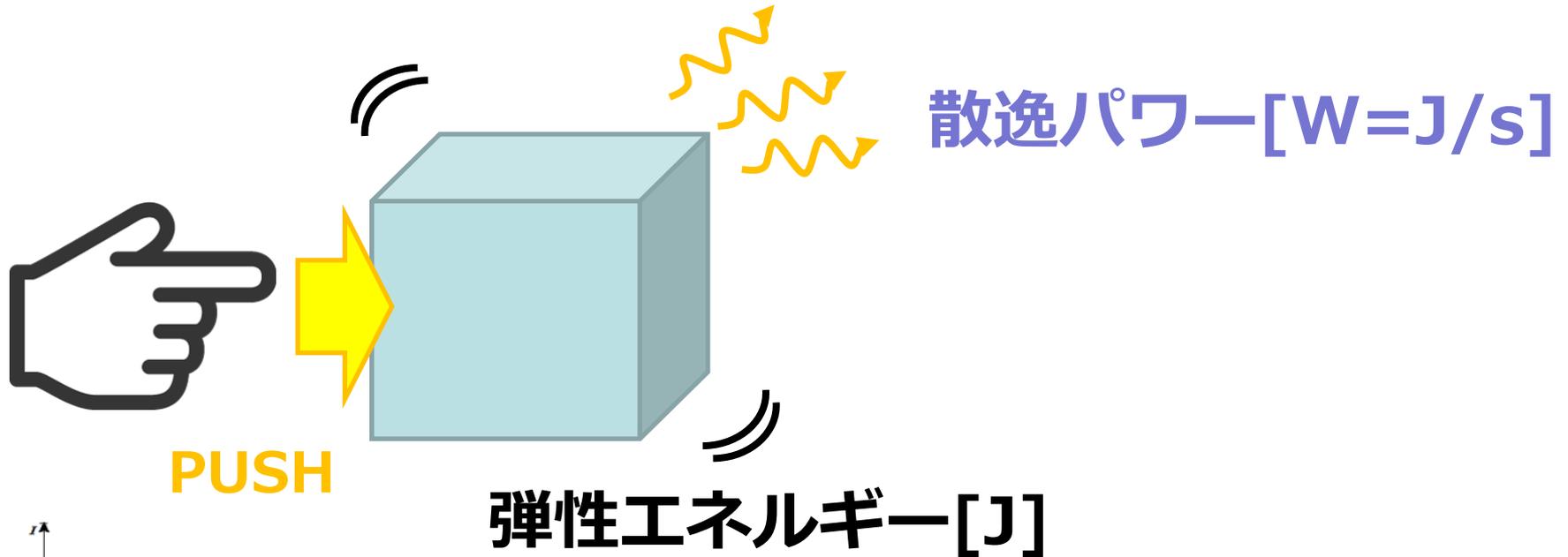
熱雑音 = ブラウン運動



熱浴にさらされている分子は
ランダムに動いてしまう

熱浴とのエネルギーのやりとりが大きい物体ほど、
ブラウン運動も大きくなる

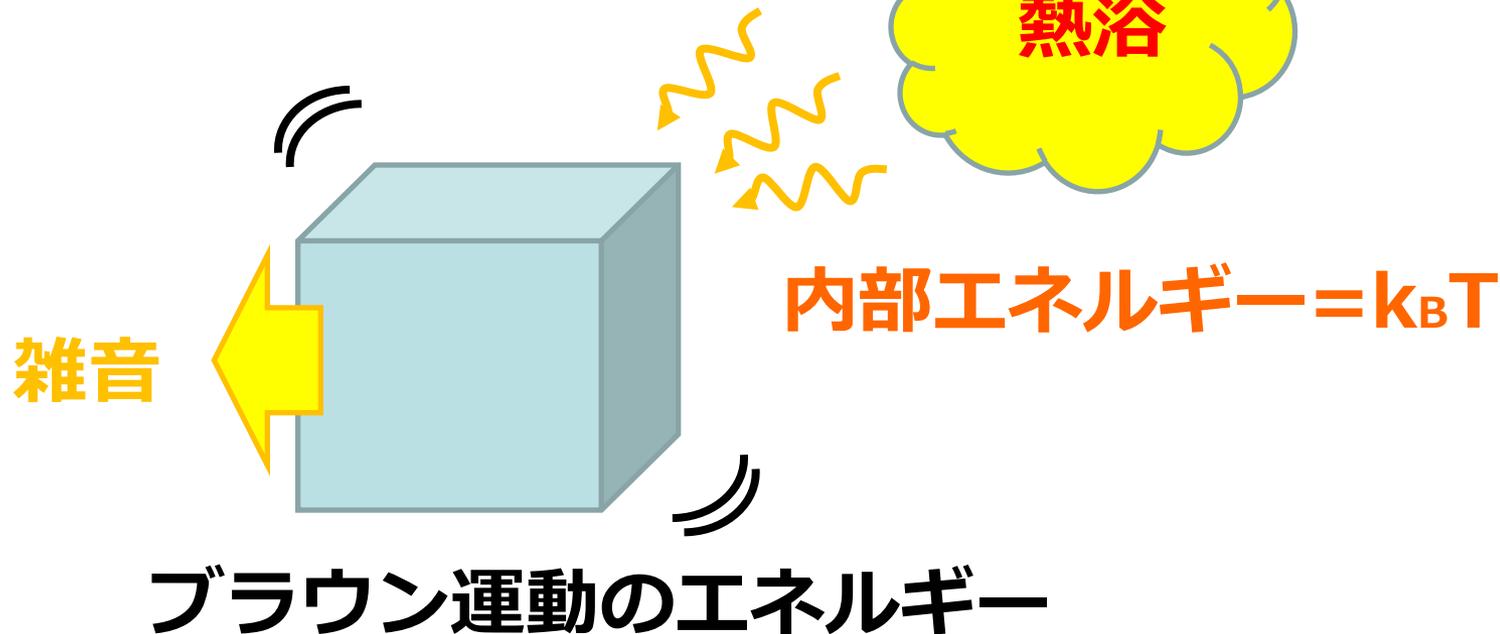
熱浴とのやりとりを表す「機械的損失」



$$\frac{\text{散逸パワー} \times \text{周期}}{\text{弾性エネルギー}} = \text{機械的損失}$$

1周期でどれだけのエネルギーを熱浴に放出するかを表している

熱浴とのやりとりを表す「機械的損失」

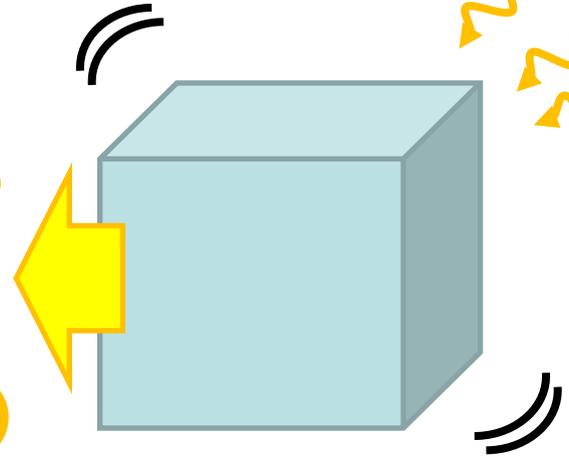
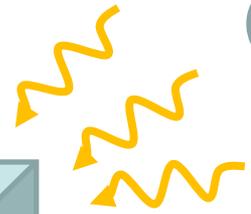


"エネルギーの熱浴への放出と
吸収が同じ係数で表される"
(=揺動散逸定理)

$$\frac{\text{運動エネルギー}}{\text{内部エネルギー}} = \text{機械的損失}$$

1周期でどれだけのエネルギーを
熱浴から吸収するかを表している

もう1つのパターン

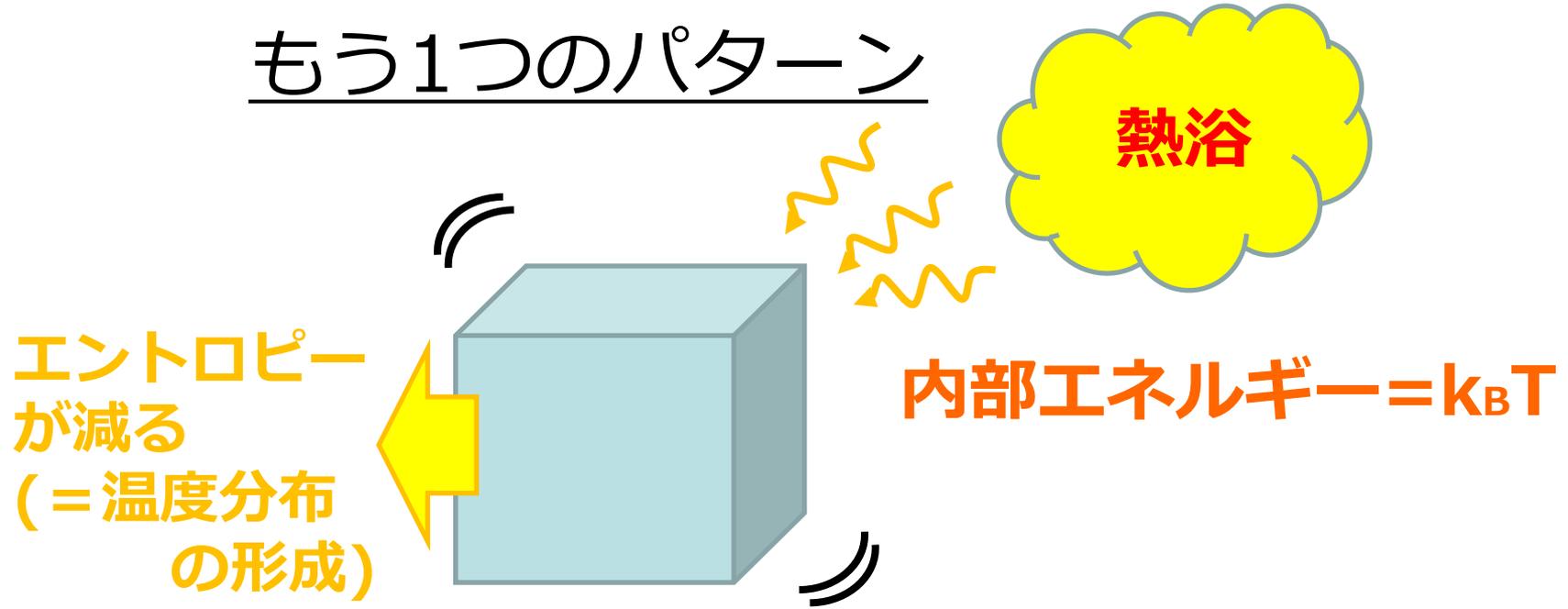


エントロピー
が減る
(= 温度分布
の形成)

内部エネルギー = $k_B T$

ブラウン運動が仕事をする

もう1つのパターン



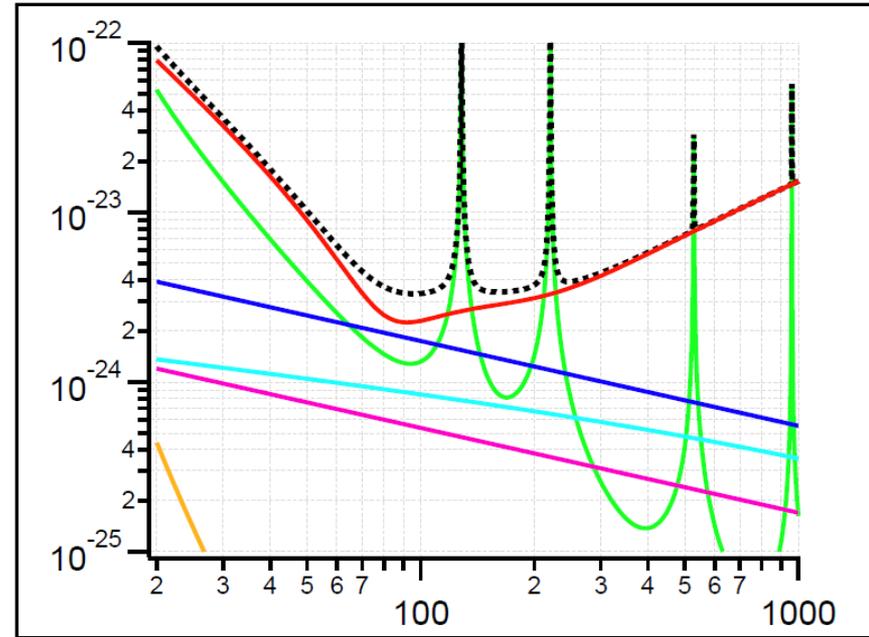
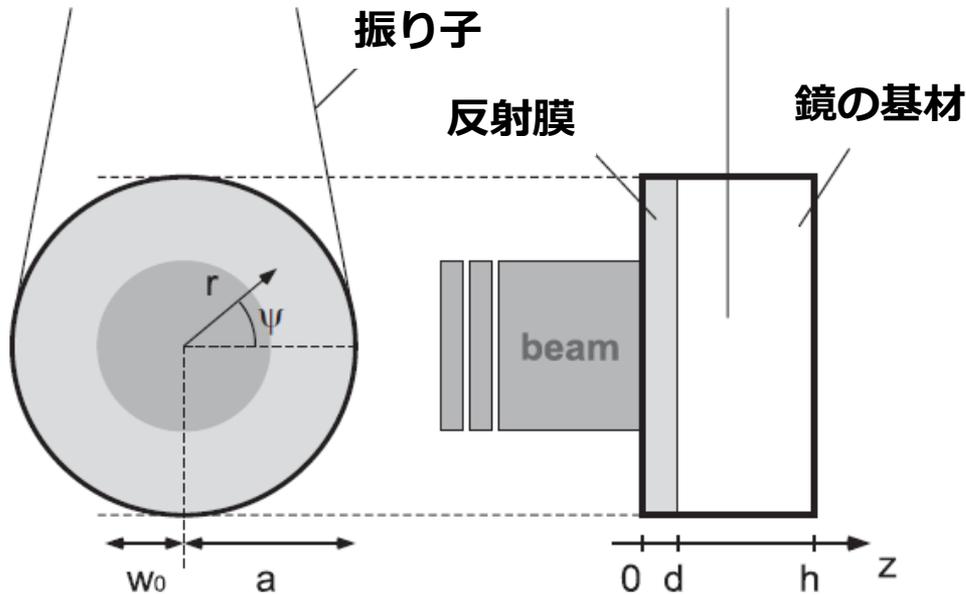
ブラウン運動が仕事をする

1. 熱浴 \Rightarrow 運動エネルギー (pV) \Rightarrow 表面の変形 \Rightarrow 雑音
2. 熱浴 \Rightarrow 仕事 (TS) \Rightarrow 温度分布 \Rightarrow (熱膨張率と結合) \Rightarrow 雑音
3. 熱浴 \Rightarrow 仕事 (TS) \Rightarrow 温度分布 \Rightarrow (屈折率と結合) \Rightarrow 雑音

1: ブラウニアン熱雑音 2: 熱弾性雑音 3: サーモリフラクティブ雑音

熱雑音の発生場所

100Hz付近のKAGRAの感度



- 反射膜ブラウニアン熱雑音：反射膜は機械的損失が大きい
- 基材の熱弾性雑音：低温 \leftrightarrow 高熱伝導率 でなんとか小さい
- 基材のブラウニアン熱雑音：サファイアは機械的損失が小さい
- 振り子のブラウニアン熱雑音：低周波を制限&ピークがある

※赤は量子雑音、橙は地面振動、黒は合計、サーモリフレクティブ雑音は小さい

熱雑音の改善方法

例：反射膜の熱雑音

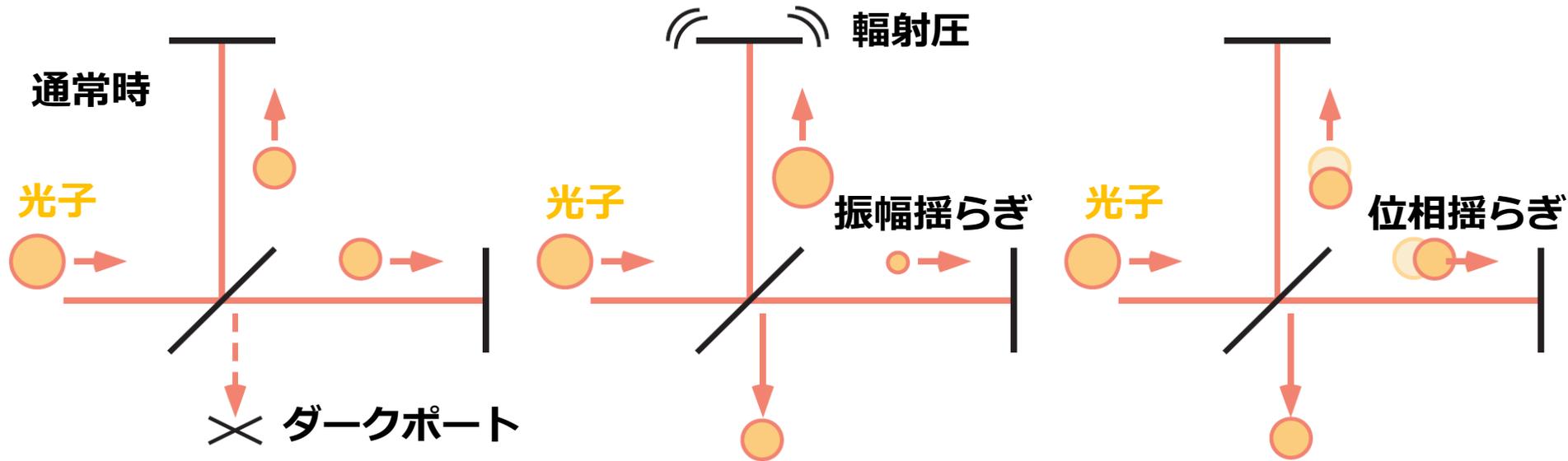
$$S_x = \frac{4k_B T}{\Omega} \frac{d}{\pi w_0^2} \frac{Y_c^2 (1 + \nu_s)^2 (1 - 2\nu_s)^2 + Y_s^2 (1 + \nu_c)^2 (1 - 2\nu_c)^2}{Y_s^2 Y_c (1 - \nu_c^2)} \phi_c$$

- 膜厚dを減らす
- ビーム径 w_0 を小さくする (LIGO, Virgo)
- 基材のヤング率 Y_s を大きくする (KAGRA)
- 膜の機械的損失 ϕ_c を小さくする (LIGO, Virgo)
- 温度Tを下げる (KAGRA)

他にも熱雑音を減らすためのアイデアがいろいろ生まれている

量子雜音

量子雑音の元は光子の揺らぎ



光子がきっちり半分ずつ分かれるかどうか
量子的な揺らぎが存在する（およそ光子1/2個分）

振幅が半分ずつでなくなる \Rightarrow 輻射圧雑音

分かれるときに位相がずれる \Rightarrow ショットノイズ

ショットノイズの大きさ

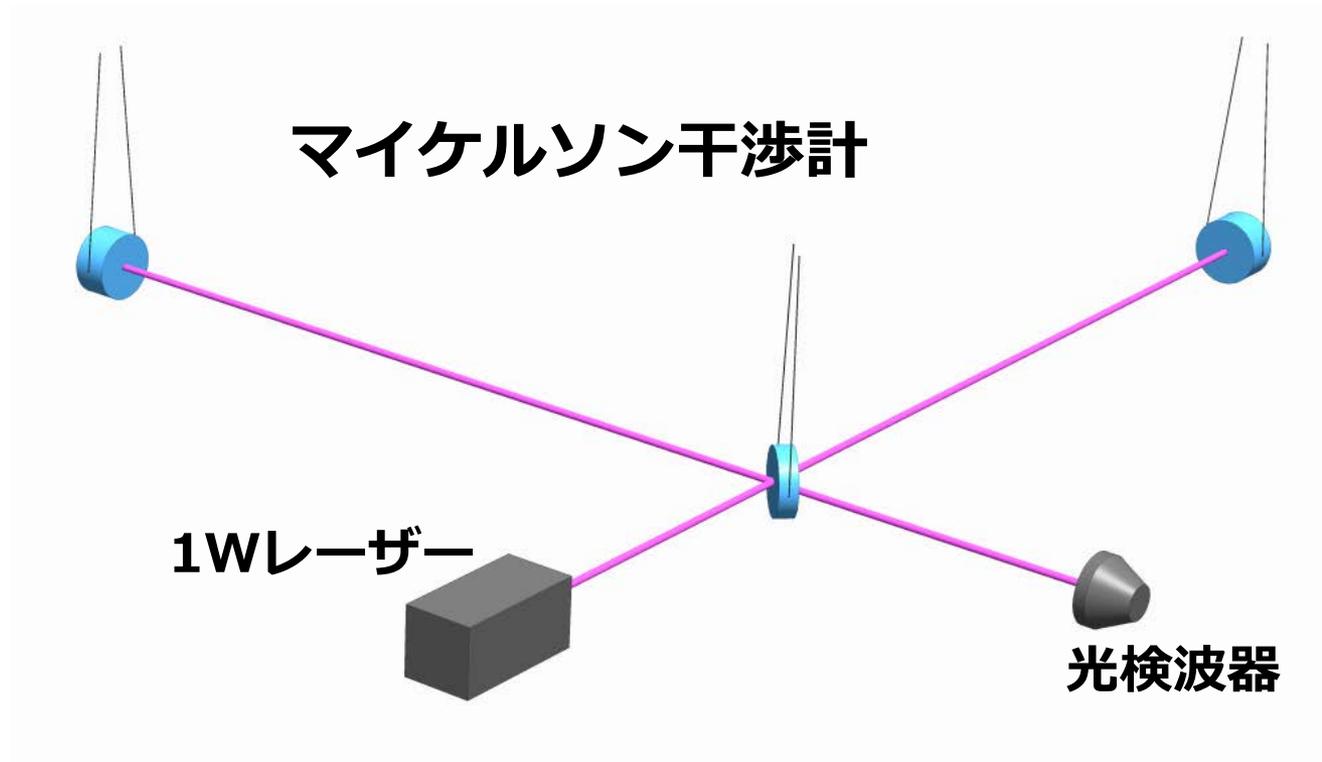
信号	量子揺らぎ
$\frac{\Delta L_{\omega}}{c} \times \sqrt{N}$	$\sqrt{\frac{1}{2}}$
$\underbrace{\hspace{2em}}_{\text{位相のずれ}} \times \underbrace{\hspace{2em}}_{\text{入射電場}}$	$\sqrt{\frac{1}{2}}$
	光子1/2個分の揺らぎ

これらが等しくなるレベルで測定精度が制限される

$$\Delta L_{sh} = \frac{c}{\omega} \sqrt{\frac{1}{2N}} = \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{2N}}$$

1ワットのレーザー（波長1ミクロン）には、約 5×10^{18} 個の光子
→ $\Delta L_{sh} = 5 \times 10^{-17}$ m/rtHz KAGRAの目標には5000倍ほど不足

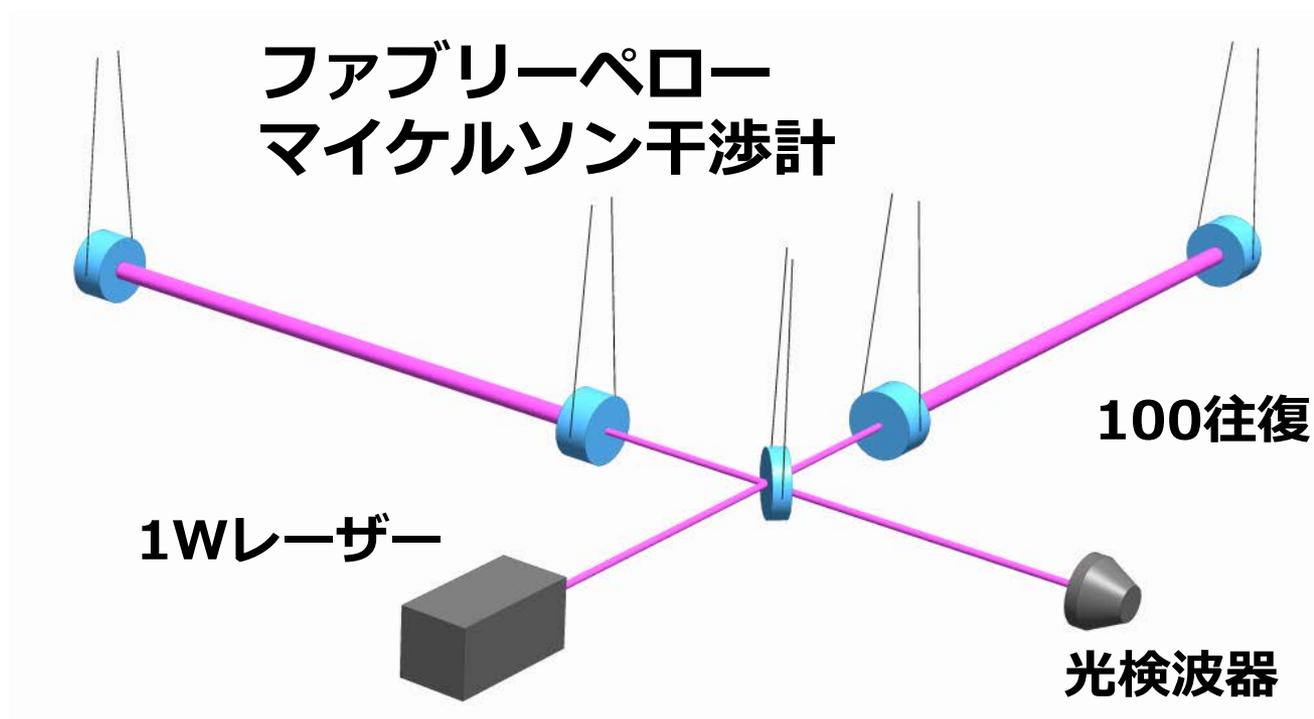
ショットノイズ改善方法



マイケルソン干渉計だと光は1往復して戻ってきてしまう

- 腕の中には0.5Wずつ
- 鏡の位置は1回測るだけ

ショットノイズ改善方法



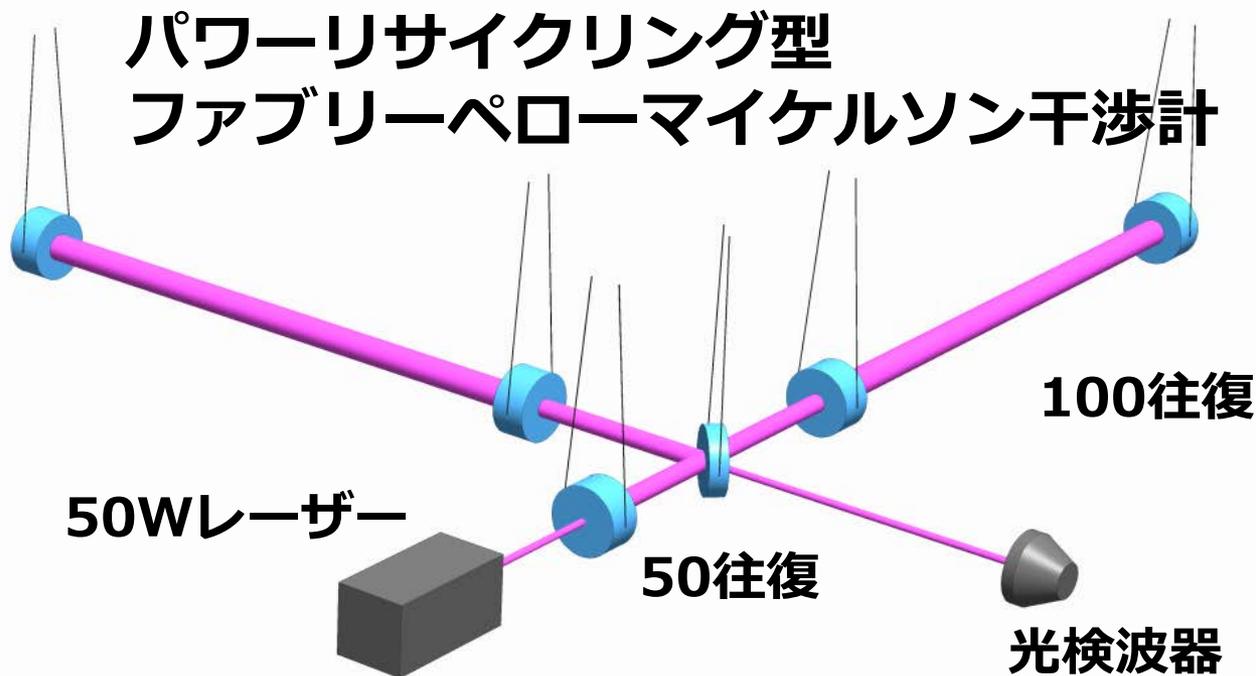
光を2つの鏡の間で100回往復させる(Fabry-Perot共振器)

- 腕の中には50Wずつ
- エンド鏡の位置を100回測る

感度はルート $[100 \times 100 \times 50] = 700$ 倍の改善

ショットノイズ改善方法

パワーリサイクリング型 ファブリーペローマイケルソン干渉計



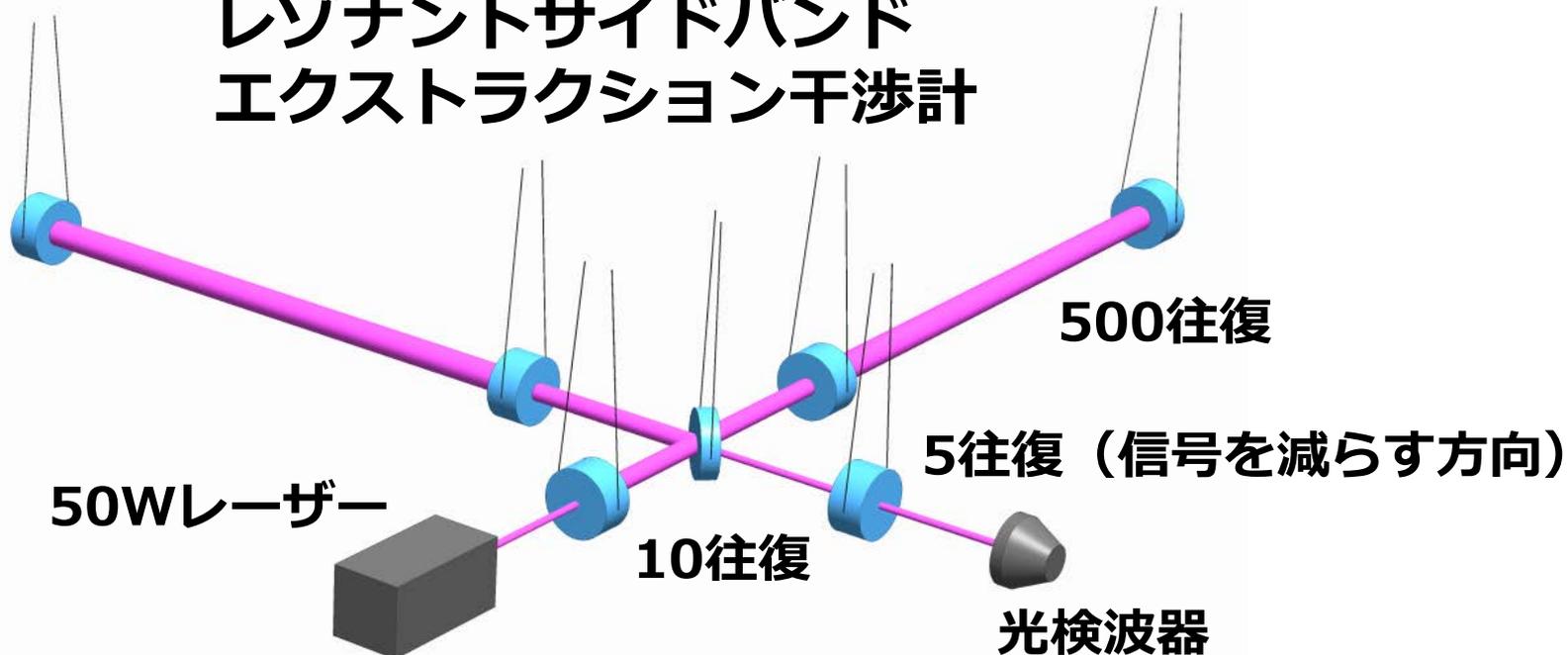
レーザー側へ戻る光を反射して再利用(Power Recycling)

- 腕の中には125kWずつ (50回分の再利用)
- エンド鏡の位置を100回測る

感度はルート $[100 \times 100 \times 50 \times 50] = 5000$ 倍の改善

ショットノイズ改善方法

レゾナントサイドバンド エクストラクション干渉計



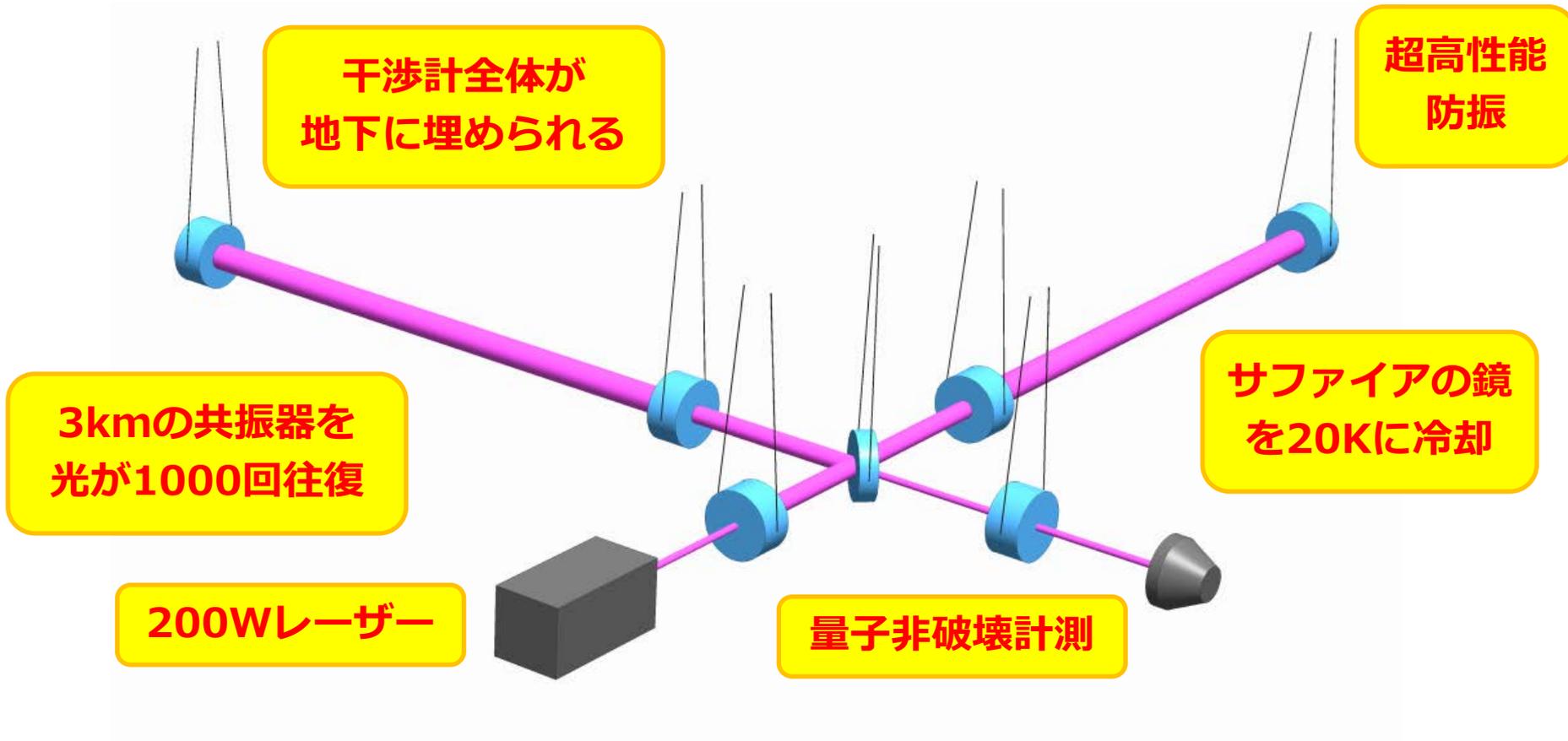
もう1枚鏡を加えると、違う組合せで同じ感度を実現可能

- 腕の中には125kWずつ (これは同じ)
- 信号が過度の共振で相殺するのを防ぐ
- 中央部分を透過するパワーが低い→熱問題が緩和

感度はルート $[500 \times 500 \times 10 \div 5 \times 50] = 5000$ 倍改善 ³⁴

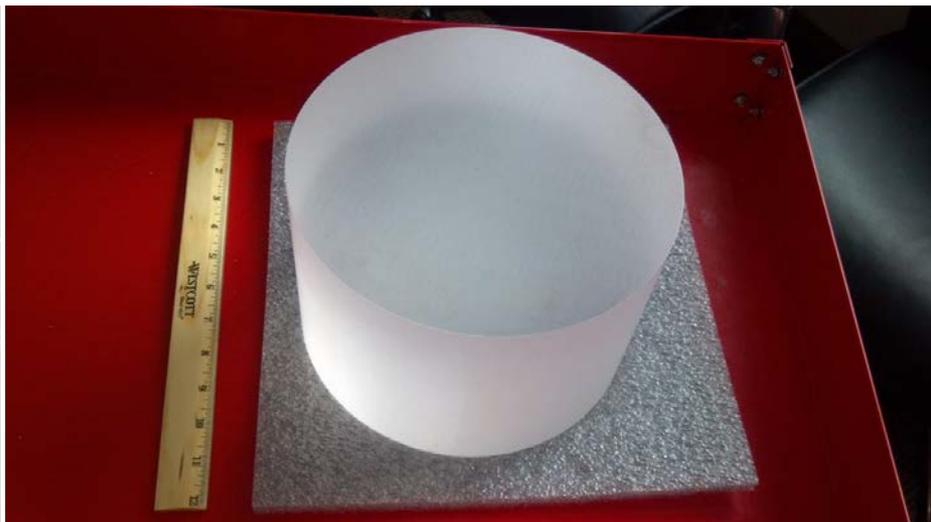
まとめ

KAGRA



世界最先端の計測技術を結集し、
10のマイナス21乗メートルの高感度を実現

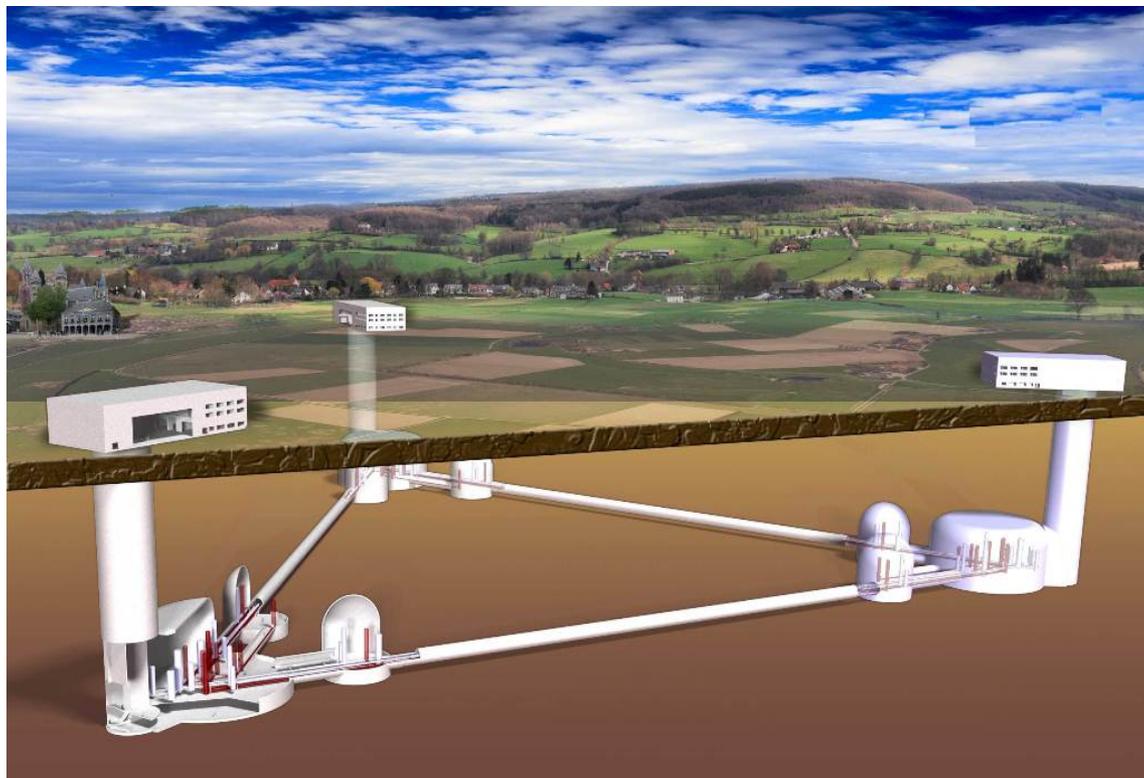
KAGRA建設の様子



最近ホットな研究内容

- 地面振動をたくさんの加速度計で予知して消せるか
- 重力場勾配は問題にならないか
- サスペンションの代わりに磁気浮上できないか
- 干渉計をうまく制御する方法にはどうしたらいいか
- 鏡をうまく冷やす方法はないか
- 機械損失の温度依存性の原因は何か
- 非平衡系での熱雑音はどう計算するか
- 量子光学を利用して量子雑音を改善できないか
- 感度は不確定性原理で制限されるのか
- マイケルソン干渉計以外の新しい方法はないか

欧米は早くも第三世代へ



Members:

- EGO (Italy)
- Max-Planck Inst. (Germany)
- Univ of Jena (Germany)
- Univ Glasgow (UK)
- Univ of Birmingham (UK)
- NIKHEF (Netherland)
- LMA (France)
- ... etc.

- 2025年頃の完成が目標
- 地下 + 低温はKAGRAと共通

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

