

2011/08/01 第41回天体・天文物理若手 夏の学校

大型低温重力波望遠鏡(LCGT)計画 —重力波の初検出を目指して—

東大宇宙線研重力波推進室
修士2年 関口貴令

重力波関係のトーク



- 観測機器(口頭発表・1日目午後)
 - ◆ 大型低温重力波望遠鏡(LCGT)計画 [関口]
 - ◆ LCGTの技術的側面とノイズ対策 [牛場]
 - ◆ スペース重力波アンテナDECIGO計画 [田嶋]
 - ◆ 重力波観測におけるデータ解析の概要と今後の課題 [橋詰]

- 観測機器(ポスター発表)
 - ◆ DECIGO Pathfinderの開発について [権藤]
 - ◆ 新型重力波検出器Torsion-bar Antenna [正田]

- 重力波源(ポスター発表)
 - ◆ 重力波輻射におけるポストニュートニアン展開の正確性 [磯山]
 - ◆ ブラックホール・中性子星連星からの重力波とスピンの影響 [久徳]
 - ◆ 連星中性子星合体とその重力波 [仏坂]

- B-mode偏光(口頭発表・3日目午後)
 - ◆ POLARBEAR実験によるB-mode偏光観測 [井上]

重力波とは



- 質量を持つ物体が加速度運動すると生じる時空のさざなみ

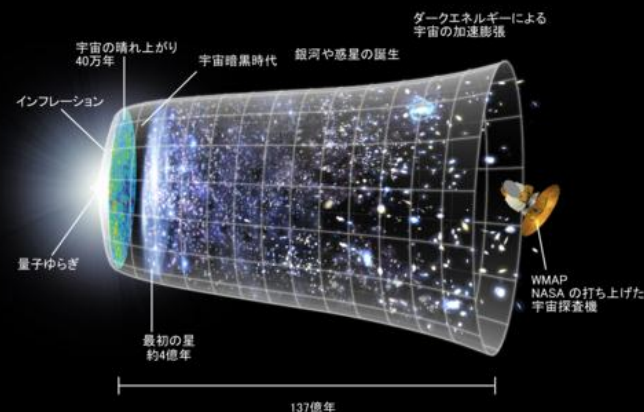
$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + a_{\mu\nu} e^{i(\omega t - kx)}$$

- 電磁波と似た性質 (光速で伝播・2つの偏光・時空を媒体)
- 双極子放射がなく (四重極が最低次) 振幅が非常に小さい
⇒ 直接検出はまだ誰も成功してない
- 重力波の存在は間接的に証明されている (Hulse, Taylor, 1992)

重力波観測の意義



- 強重力場での一般相対論の検証
- 電磁波以外のもので宇宙を“見る”
 - ◆ 天体(パルサー)までの距離を測る新たな道具
 - ◆ 光では見えない中性子星の内部構造
 - ◆ 宇宙の晴れ上がり以前の初期宇宙
- 電磁波観測とは一線を画す「**重力波天文学**」



重力波検出の原理



- 重力波によって生じる潮汐力を計測

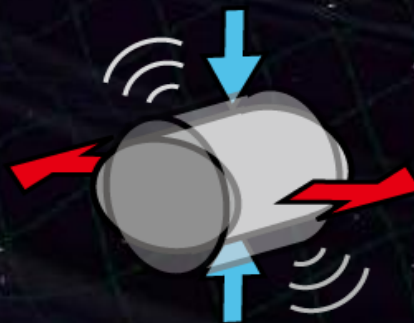
+モード



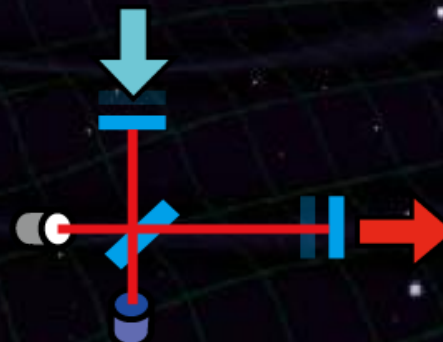
×モード



共振型



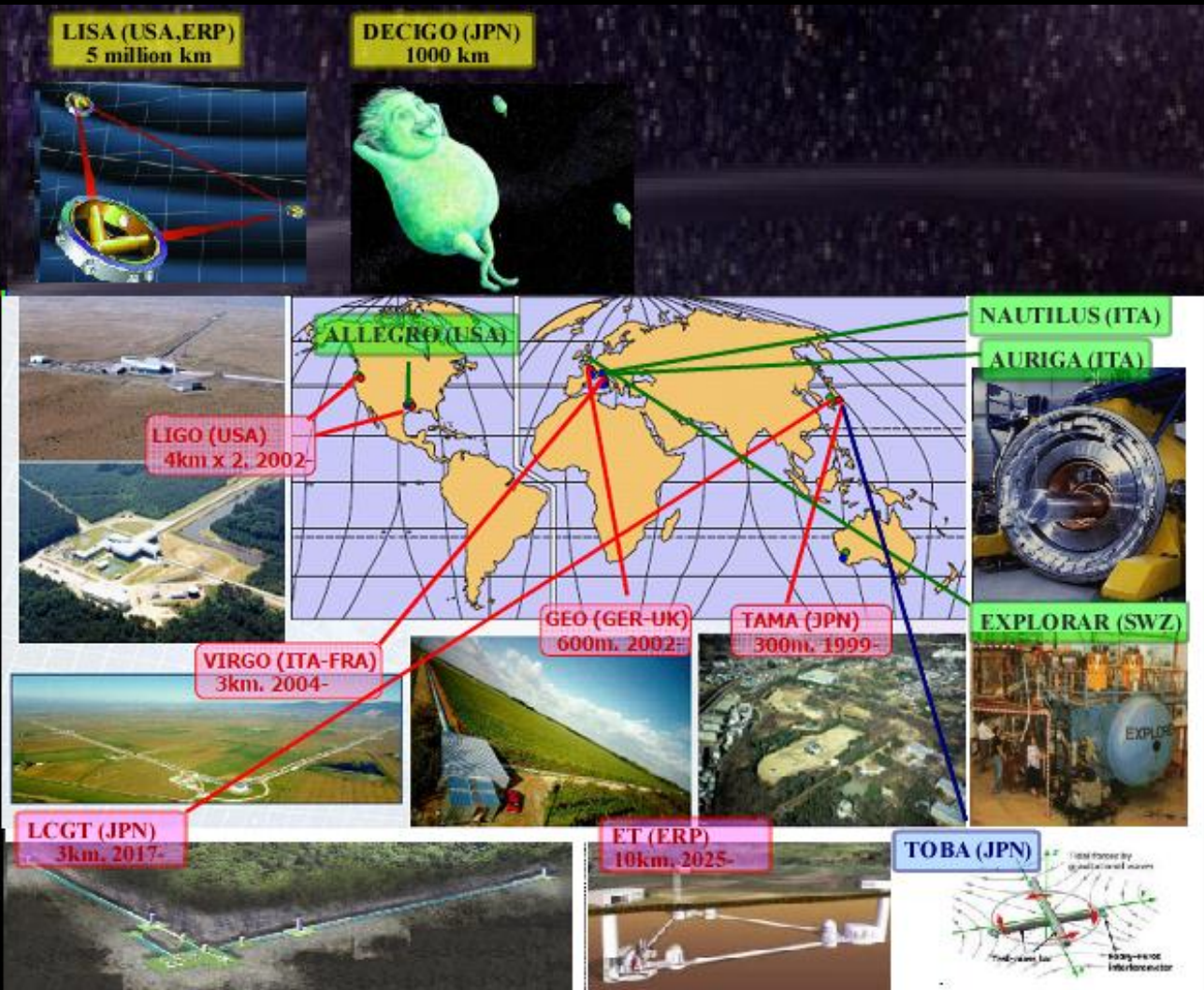
干渉計型



Torsion Bar型



世界の重力波検出器・検出計画



共振型アンテナ
(NAUTILUS, AURIGA, EXPLORAR, ALLEGRO)

干渉計型(地上)
(LIGO, VIRGO, GEO, CLIO, TAMA, **LCGT**, ET)

干渉計型(宇宙)
(LISA, DECIGO, BBO)

Torsion-bar Antenna
(TOBA)

大型低温重力波望遠鏡(LCGT)計画



Large-scale Cryogenic Gravitational-wave Telescope

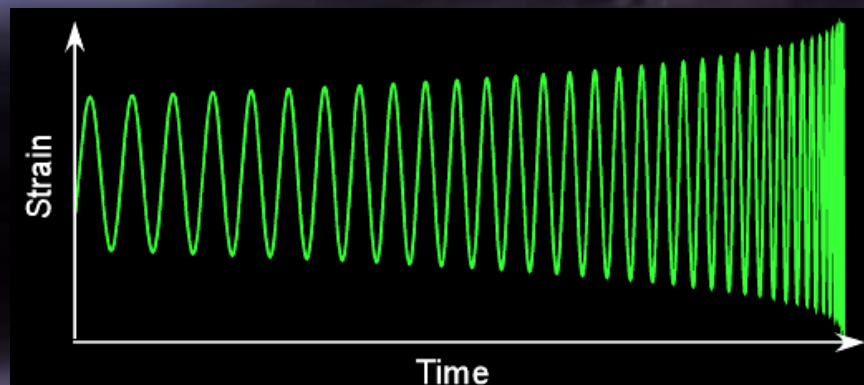
- レーザー干渉計型重力波検出器
- 神岡鉱山地下に、3 kmの腕を持つ干渉計を設置
- 4枚の鏡を極低温(~ 20 K)に冷却、3 kmの光の通り道は超高真空
- 中性子星連星合体から放出される重力波が主なターゲット



中性子星連星合体と重力波



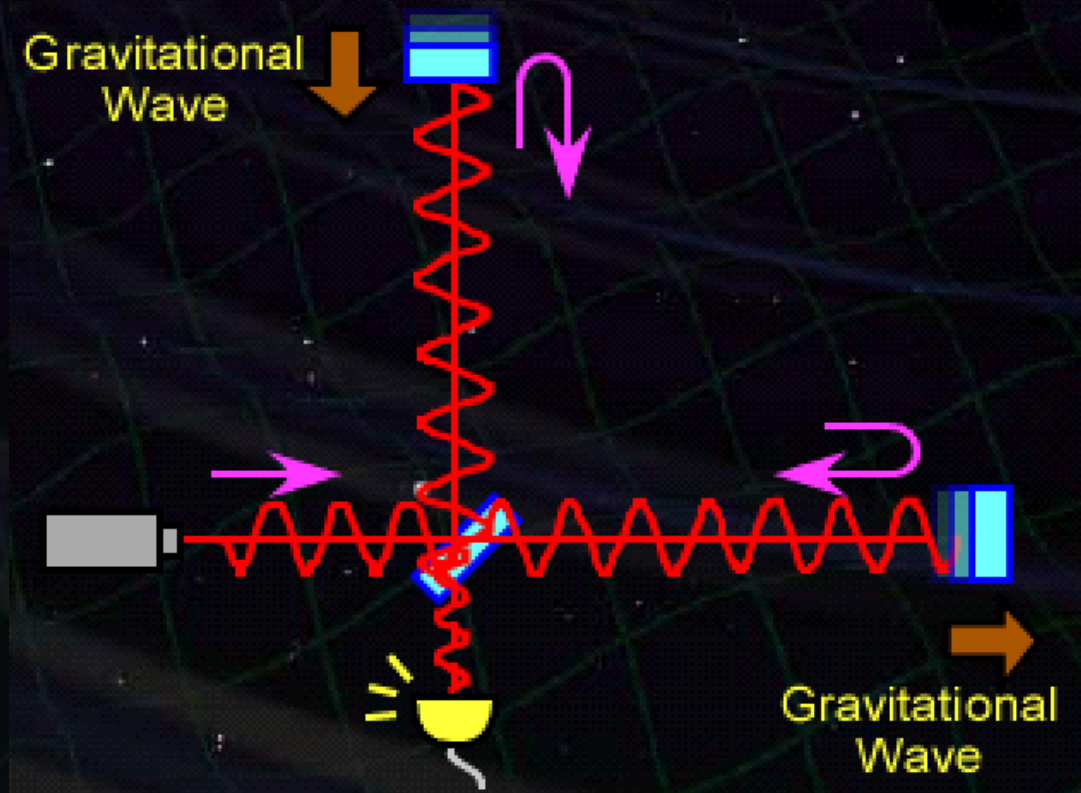
- 重力波でエネルギーを失い、だんだん連星間の距離が短くなる
- 最後に衝突する際に大きな重力波を放出する(最後の3秒間)
- 特徴的な波形(チャープ信号)を持つので雑音と区別しやすい
- 重力波の強度は $\sim 10^{-21}$ 程度(距離に依る)、周波数は $100 \sim 1000$ Hz



干渉計による重力波検出の原理



- 光の干渉を利用した微小変位検出器 (**Michelson干渉計**)
- 重力波の潮汐力で鏡の位置が変動 ⇒ 光検出器に光が入る

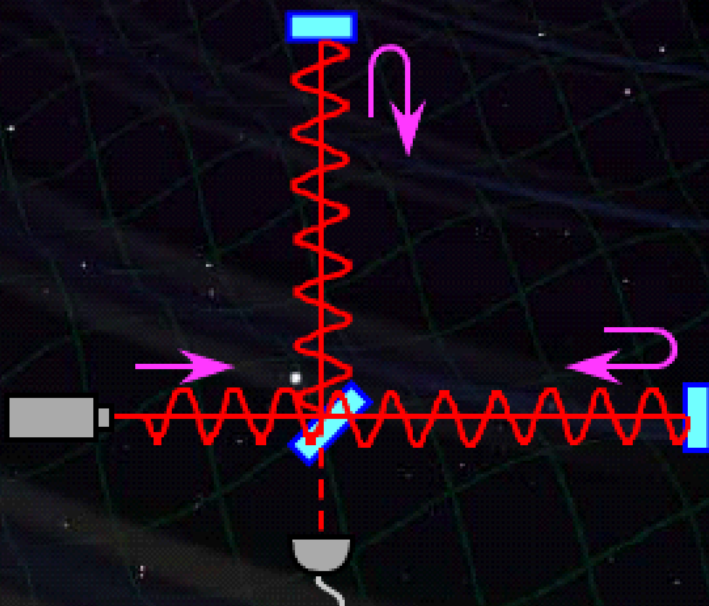


干渉計による重力波検出の原理

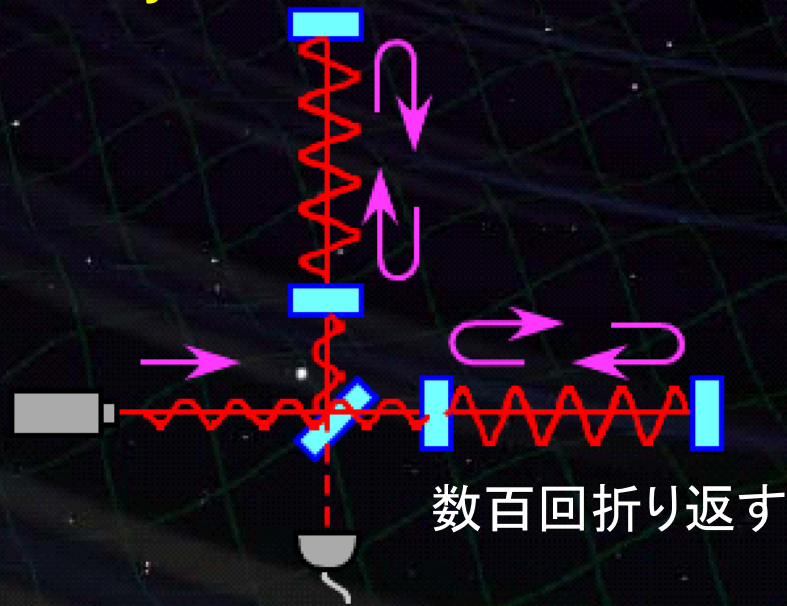


- 重力波は腕の長さをおある割合で変化させる。
⇒ 腕は長ければ長いほど有利(でも長すぎはダメ)
- 100 Hzの重力波に対し感度が最大となる腕の長さ: 1500km !
- 光を腕の中で何回も折り返す ⇒ 実効的に腕の長さを長くできる

Michelson 干渉計



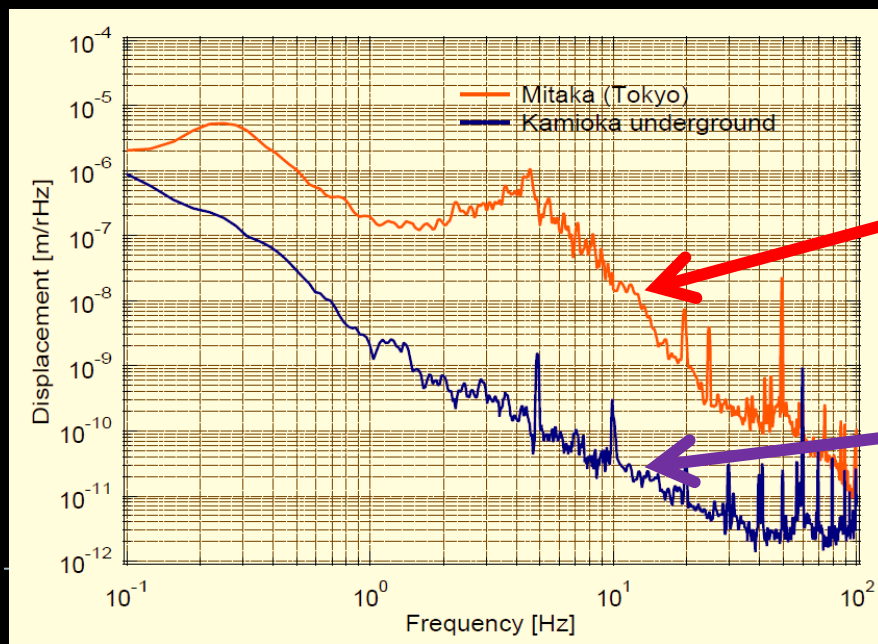
Fabry-Perot Michelson 干渉計



数百回折り返す

重力波検出器の雑音

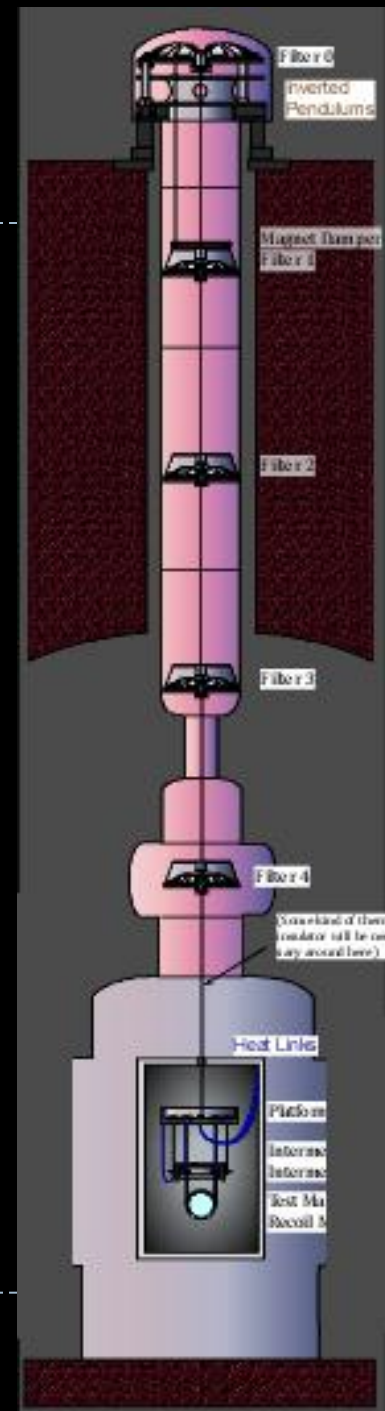
- 重力波検出器は鏡の微小な変位 ($\sim 10^{-18}$ m) を測るもの
- 地面振動などで鏡が揺れると雑音となる
- 地面振動が静かな地下サイト(神岡鉱山)に建設
- 防振装置を用いて観測帯域 (~ 100 Hz) の振動を除去



東京

神岡

里若手 夏の学校



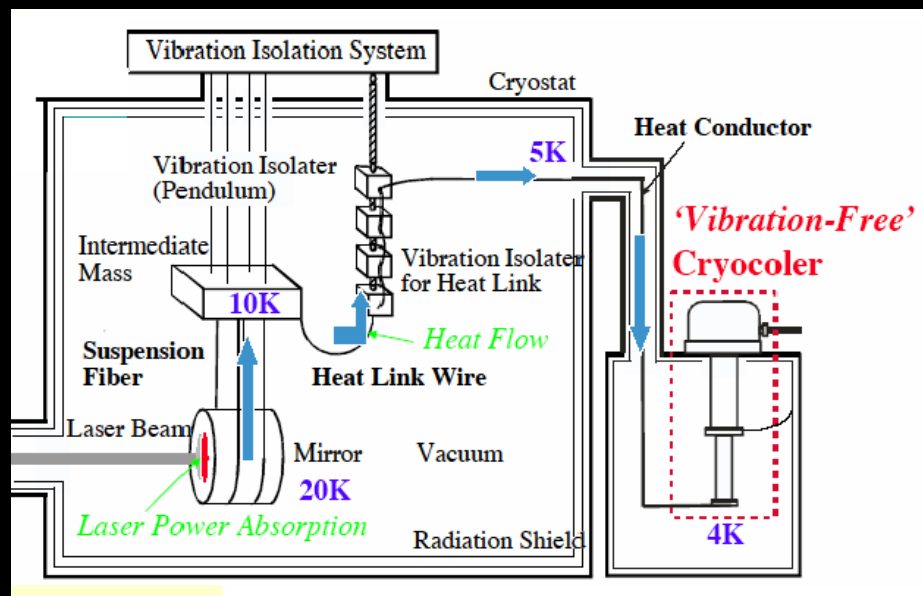
鏡の熱雑音



- 非常に微小な変位を見るため、鏡の熱振動さえ問題
- 熱振動の大きさは絶対温度の平方根に比例 ⇒ 冷やせば小さくなる
- 鏡を冷やす冷凍機が大きく振動しては意味がない
⇒ 低振動のパルス管冷凍機
- 鏡は真空中にあるので対流では冷やせない
⇒ 熱伝導による冷却

熱振動のパワースペクトル密度

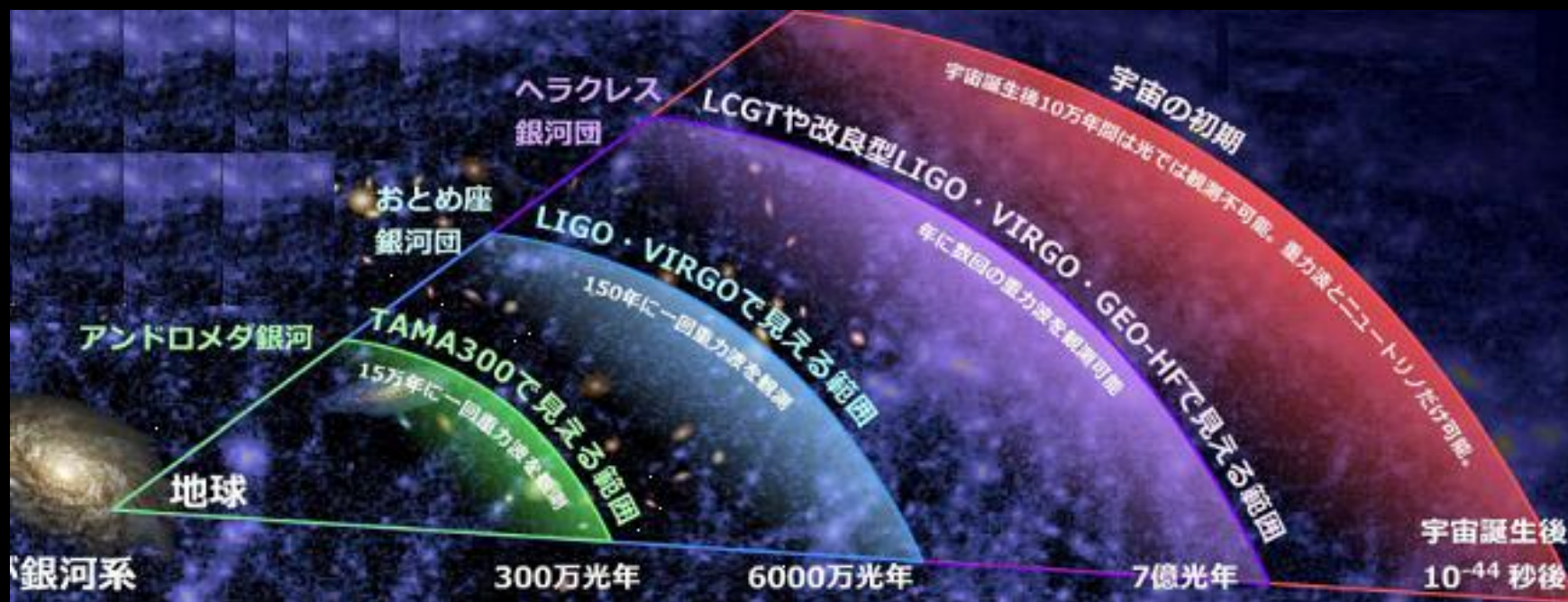
$$G_x(\omega) = \frac{4k_B T \operatorname{Im}[H(\omega)]}{\omega}$$



検出器の感度と見える宇宙の範囲



- 重力波の強度は距離に反比例
⇒感度が良い検出器ほど遠くの重力波イベントが見える
- 中性子星連星合体イベントが見える範囲は、LCGTでは約200 Mpc
- 1年に数回のイベントが観測できる見込み



まとめ



- LCGTは干渉計を地下に設置し、鏡を冷却することで高感度化を目指した重力波検出器
- 予想通りの感度を達成できれば、1年に数回の重力波イベントを受けられる可能性があり、重力波の初検出も夢ではない

LCGTの今後の予定:

- 2013年度: 試験観測を実施 (initial LCGT)
- 2017年度: 装置のアップデートを経て本格観測開始 (base-line LCGT)
- ただし、地震の影響でトンネル工事が遅延 ⇒ **計画が遅れる可能性あり**

ともあれ今後のLCGTの活躍にこうご期待!

End