

2006. 5.18
宇宙線研究所

将来計画勉強会：重力波(LISA)

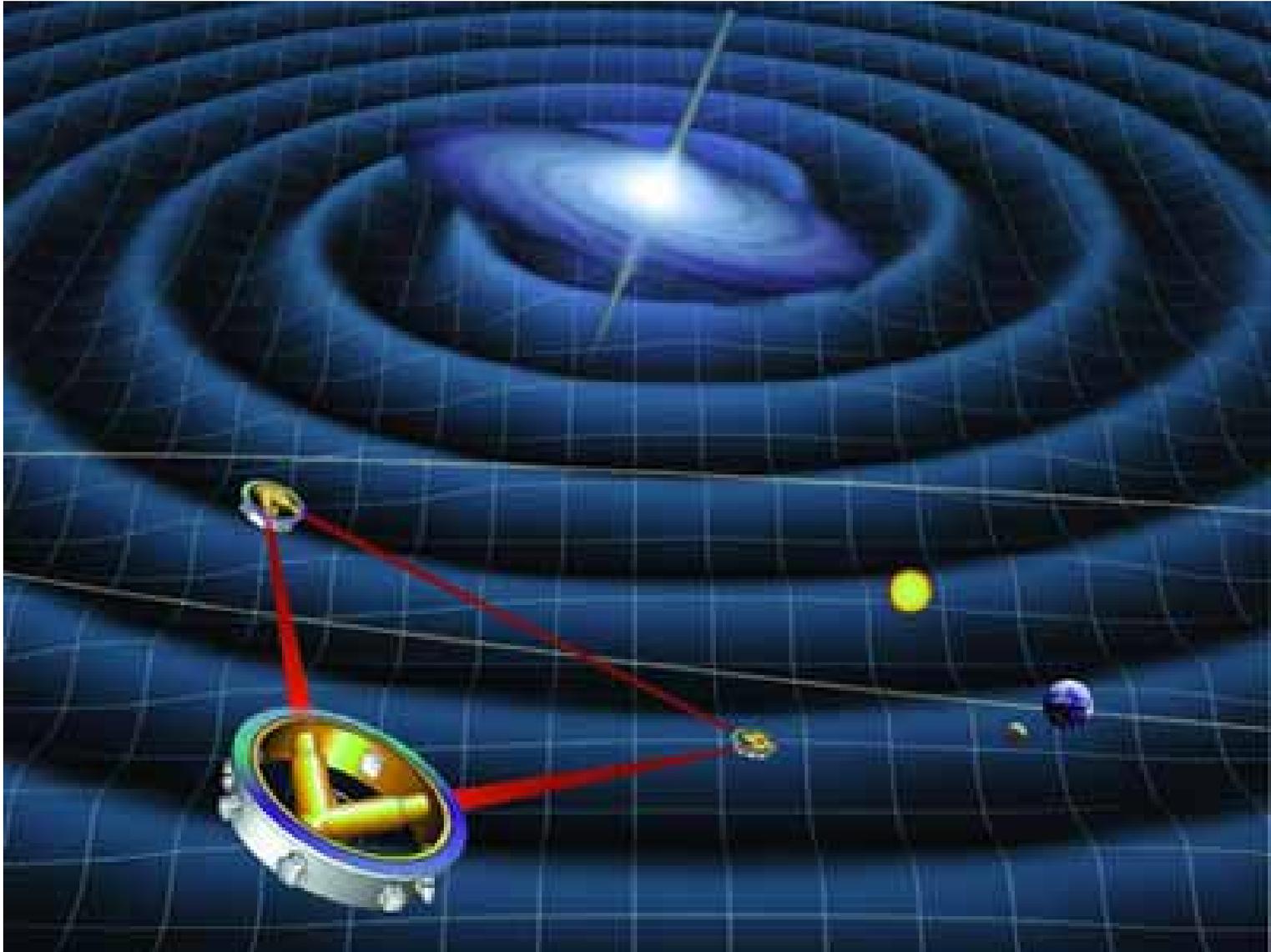
黒田和明

2つの銀河系が衝突するシミュレーション図。それぞれの銀河中心にブラックホールがあれば、2重ブラックホールが誕生する。

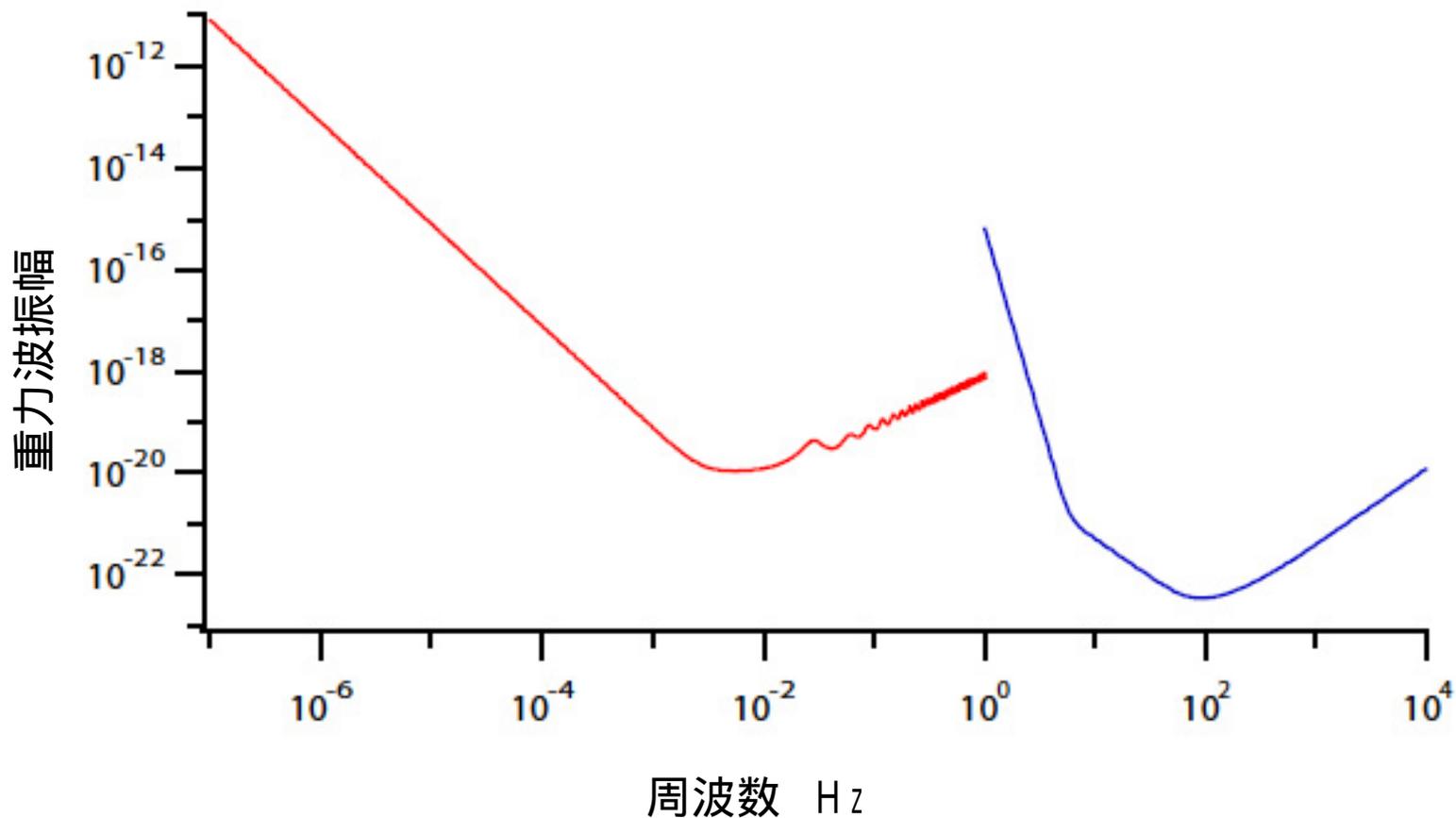


Laser Interferometer Space Antenna

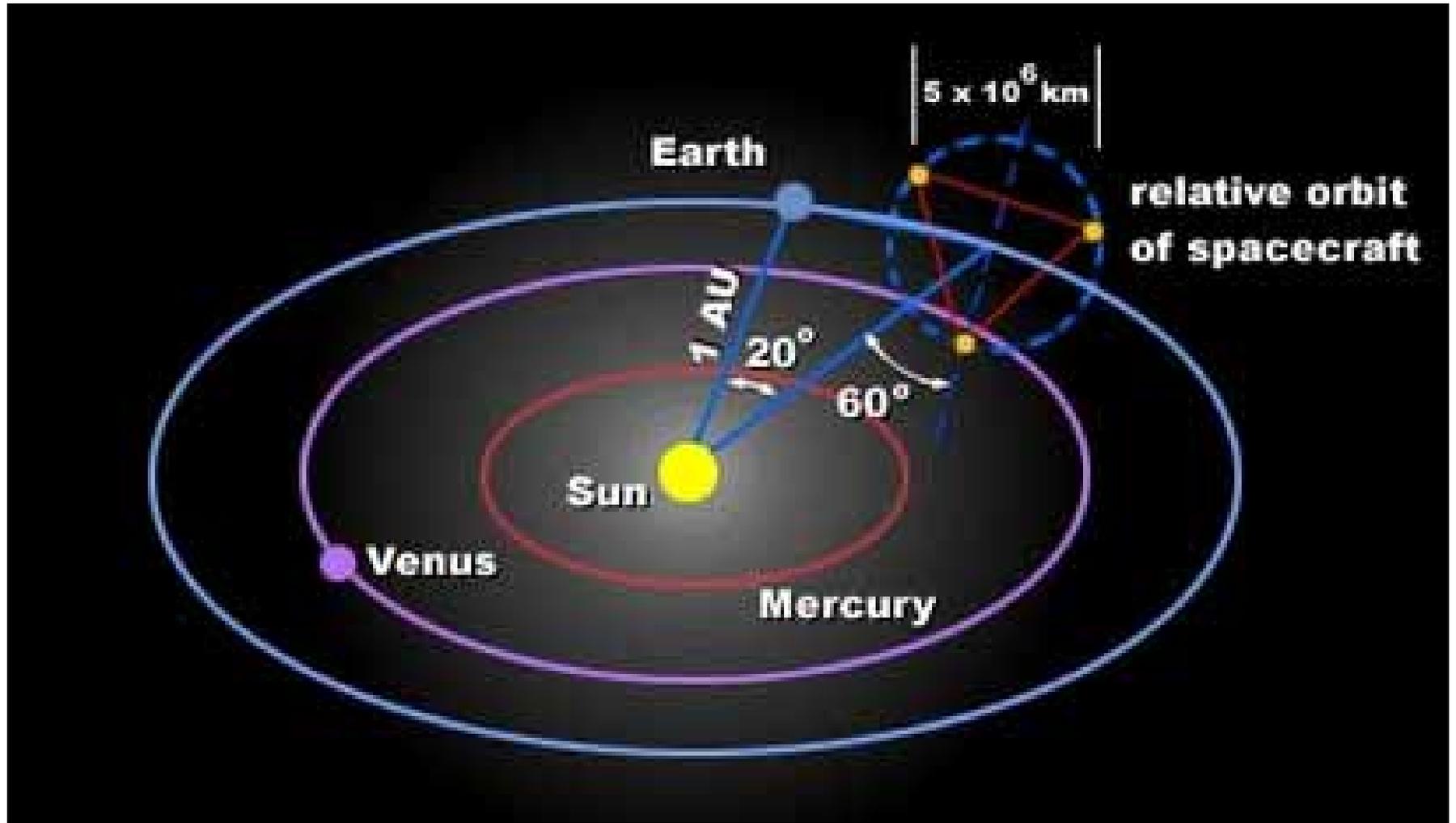
for the detection and observation of gravitational waves



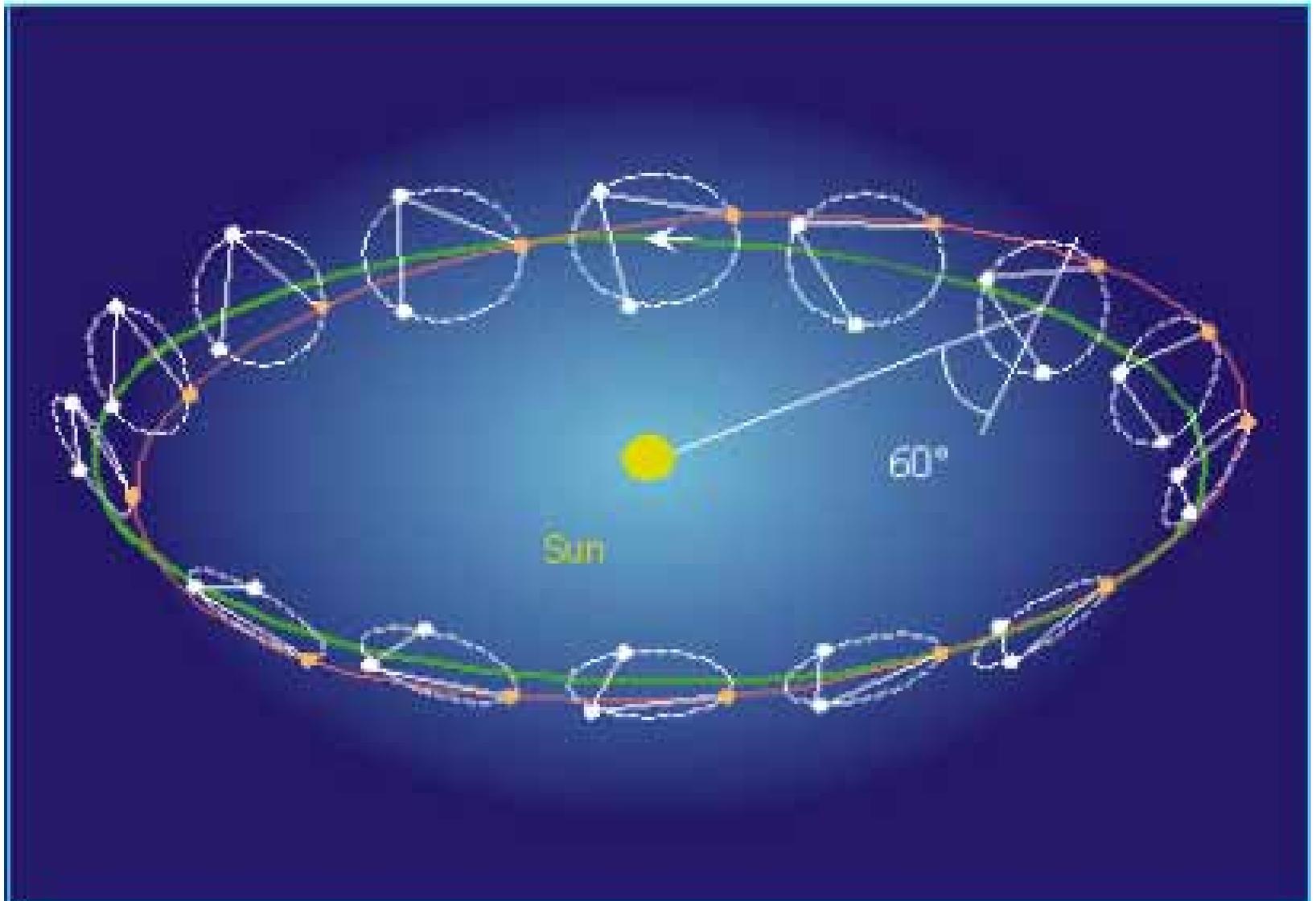
LISAの観測周波数帯域とLCGTとの比較



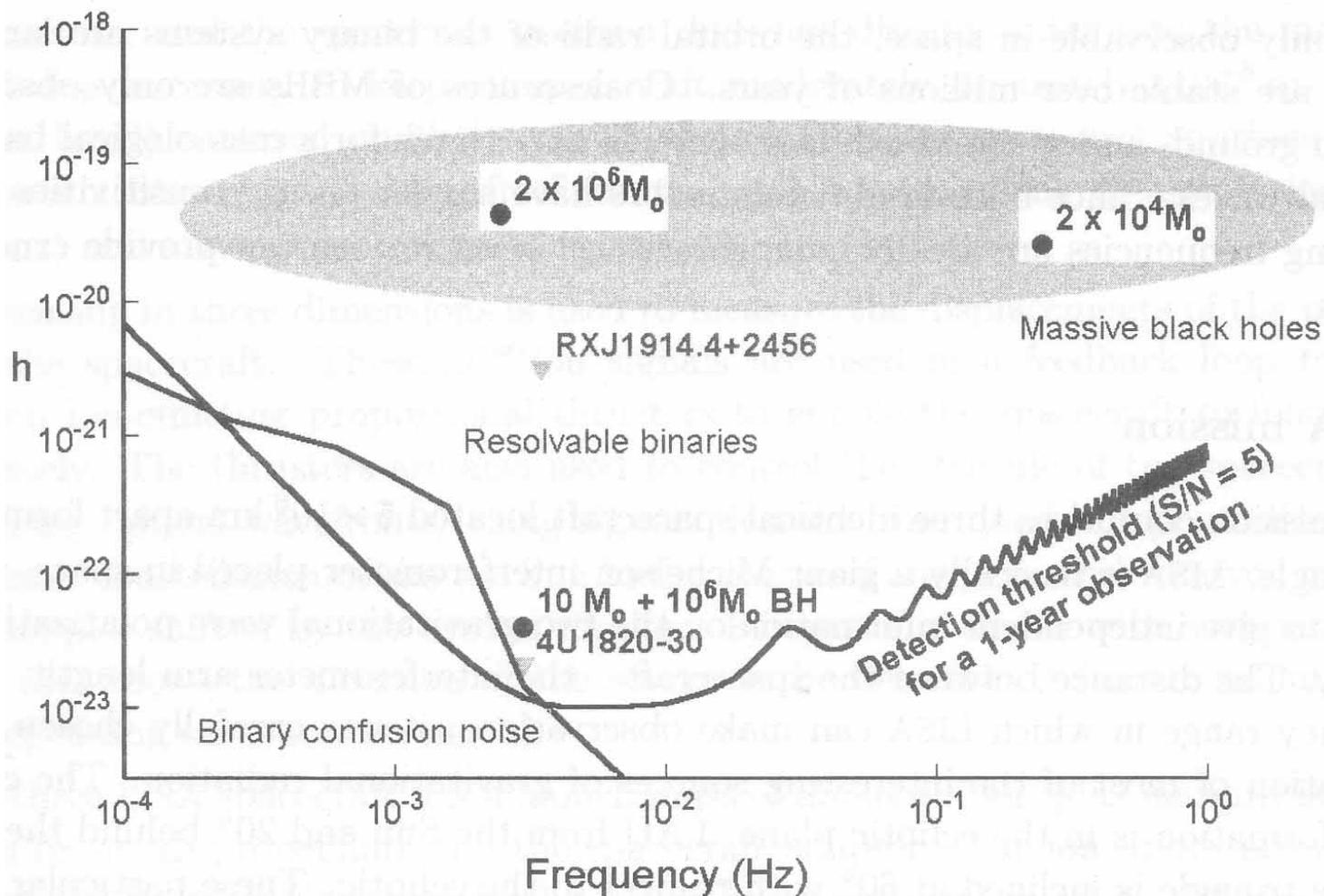
LISAの概念設計



LISAは一年で太陽の公転軌道を周回する。



LISAの観測対象



内 容

- 重力波の基礎
 - 一般相対性理論
 - 重力波の発生と検出
- LISAの観測対象
 - 特徴と利点
 - 重力波源
- 装置の概要と技術
 - 干渉計
 - Drag free技術

LISAで観測する一般相対性理論の 基礎(1)

- 一般相対性理論の基礎は等価原理である。
- 重力の効果は等価原理によって時空の幾何学に置き換えられる。
- 曲がった時空は2つの自由質点の間に働く潮汐力により分かる。
- 重力波は時間変動する潮汐力であり、重力波検出器は、微弱な潮汐力を計測しなければならない。
- 重力源の-spinは周囲の慣性系を引きずる (Lense-Thirring effect)。ブラックホールの周りを巡る中性子星の運動をLISAはつぶさに観測できる。

LISAで観測する一般相対性理論の 基礎(2)

- 特殊相対論は2つ目の基礎である。
- 真空中では何者も光速を越えることはできない。
- 物体の位置変化により周囲の重力場は変化しその変化は光速より早くは伝搬できない。物体から十分遠くではこの変化は重力場のリップルとして光速で伝播する。
- 一般相対性理論と異なる理論でもすべて重力波を予言するが、光速より遅く伝播することはあっても光速より早くはなく、また、偏波の性質が異なる。
- LISAは偏波の性質を詳しく調べることができる。

LISAで見る一般相対性理論の基礎

(3)

- 重力源の運動が光速より十分小さければ、重力源を多重極モーメントに展開できる。
- モノポールモーメントは全質量である。
- 重力波として出ていくエネルギーは重力波振幅の2乗である(2次の効果)。
- 質量保存則によりモノポール輻射は存在しない。
- 重力源の運動量保存により双極子輻射は存在しない。
- 意味ある輻射は4重極子輻射である。大抵の場合高次のモーメント輻射を無視して良い近似になっているが、ブラックホール合体のように強い重力の場合にはオーダーの評価ができる程度の精度しかない。
- LISAは、高い精度でブラックホール合体時の重力波を観測できる。

LISAでみる場の方程式

- エネルギー密度、モーメント密度の3成分、応力の6成分、全部で10個の量が重力場の創生に関わるため、場の方程式は複雑になる。時空の幾何学では同数の成分をもつ計量テンソルで表現される。
- エネルギーを持ち去る重力波は系の質量を減少させ、相互に作用する重力を小さくするため、場の方程式は非線形となる。
- 現実の世界で場の方程式を厳密に解くのは容易ではない。
- 質量とスピンだけで記述されるブラックホールの時空は厳密に解かれている(Kerr Metric)。
- 電荷を持たないブラックホールの時空はKerr時空でなければならない(no-hair theorem)。
- LISAはブラックホールを巡る中性子星からの重力波を観測する。もし、質量とスピンだけで予測される時空と異なることがわかれば、no-hair theoremが一般相対性理論そのものが間違っている。

LISAでみる場の方程式

$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right) h_{\alpha\beta} = \frac{G}{c^4} (\text{source})$$

$$\nabla^2 \Phi = 4\pi G \rho$$

速度が小さい極限では場の方程式はニュートンの方程式に帰着する。
hは無次元量 $/c^2$ の一般化になっている。

重力波の性質(1)

$$\vec{L} \cdot \nabla(\nabla\Phi) \sim L\Phi/\lambda^2$$

重力波検出器は重力波による加速度にではなく、 L だけ離して置かれた物体に働く加速度の差に反応する。輻射ゾーンでは、 $\sim 1/r$ ($\sim 1/r$ ではない)。

$\sim hc^2$ ゆえに加速度の差は、 $L \sim \lambda^2 h$ のオーダーとなる。したがって基線長 L の干渉計の両端の質量の加速度の変化は

$$\frac{d^2 \delta L}{dt^2} \sim L\omega^2 h$$

重力波の性質(2)

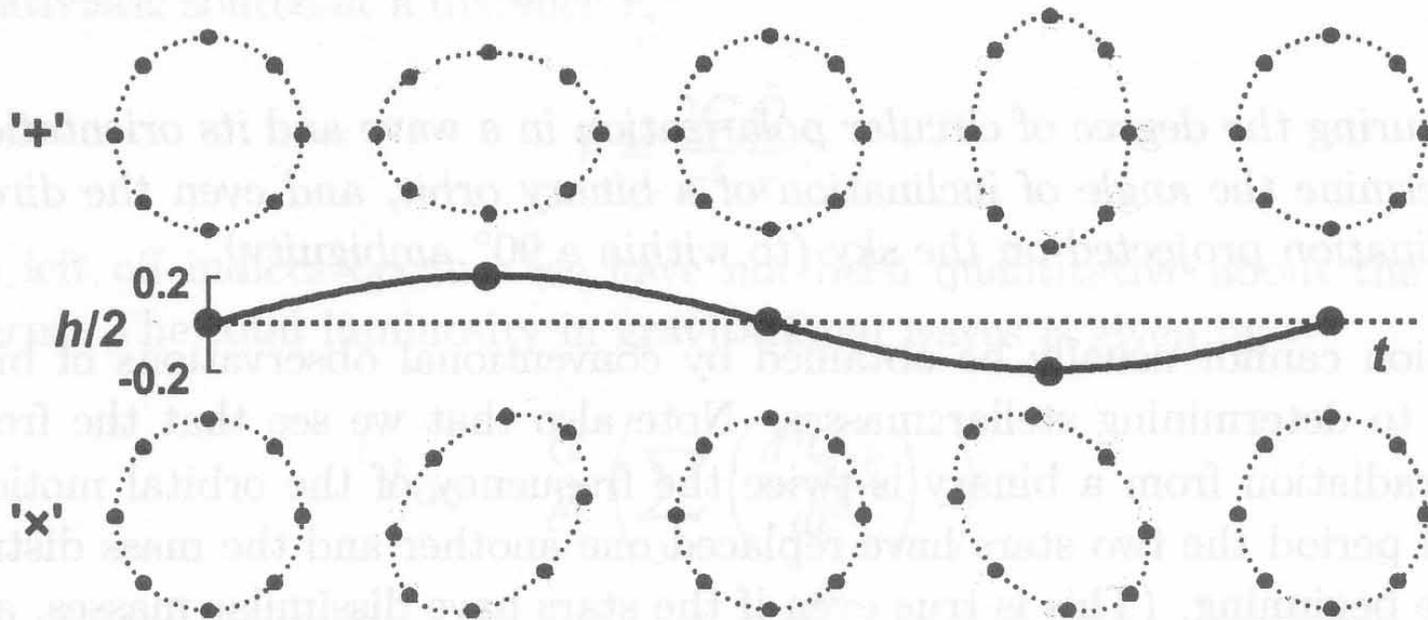
時間微分は であるため、加速度の変化は $L/L \sim h$ となり、
厳密な計算では

$$\frac{\delta L}{L} = \frac{1}{2}h$$

この結果から、重力波を捉えるには基線長 L を長くすれば
よいことが分かる。

重力波の性質(3)

重力波は横波で2つの偏波がある。



重力波の生成(1)

最低次の近似では重力源の多重極展開の中で二次モーメントを考えればよい。

トレースレスの4重極テンソルとして標準的に右の表式が用いられる。

$$I_{jk} = \int \rho x_j x_k d^3x$$

$$Q_{jk} = I_{jk} - \frac{1}{3}I\delta_{jk}$$

重力波の発生(2)

距離 r になる非相対論的速さの重力源から出る重力波の振幅は

$$h = \frac{2G}{c^4} \frac{\ddot{Q}}{r}$$

全光度は、次式で与えられる。ただし、大括弧は時間平均を表す。

$$L_{\text{GW}} = \frac{G}{c^5} \left(\sum_{jk} \left(\frac{d^3 Q_{jk}}{dt^3} \right)^2 \right)$$

重力波の発生(3)

以上の表式の近似式を求めておく。

$$\ddot{I}_{jk} = \frac{d^2}{dt^2} \int \rho h_j x_k d^3x \sim \int \rho v_j v_k d^3x$$

Vはビリアル定理により内部重力 intより小さいので重力波
振幅の式と組み合わせると

$$h \leq \frac{G}{c^4} \frac{\Phi_{\text{int}}}{r} \int \rho d^3x = \frac{\Phi_{\text{ext}}}{c^2} \frac{\Phi_{\text{int}}}{c^2}$$

ここで extは観測者の位置での重力ポテンシャルGM/r

重力波の発生(4)

円軌道で公転している二重星の出す重力波は最大の強度位置で

$$\omega_{\text{orbit}} = \left(\frac{GM_T}{d^3} \right)^{1/2}$$

$$h_0 = 1.5 \times 10^{-21} \left(\frac{f}{10^{-3} \text{ Hz}} \right)^{2/3} \left(\frac{r}{1 \text{ kpc}} \right)^{-1} \left(\frac{\mathcal{M}}{M_\odot} \right)^{5/3}$$

ただし、チャープ質量、

$$\mathcal{M} = \frac{(M_1 M_2)^{3/5}}{(M_1 + M_2)^{1/5}}$$

重力波の発生(5)

光度公式によれば、重力波放出により系のエネルギーが消失する。その時間スケールは

$$\begin{aligned} \tau_{GW} &= \frac{|E|}{L_{GW}} \sim \frac{5c^5}{2GM R^2 \omega^4} \\ &\sim \frac{5c^5}{2G^3} \frac{R^4}{M^3} \\ &\sim \frac{5}{2\omega} \left(\frac{c^3}{GM\omega} \right)^{5/3} \end{aligned}$$

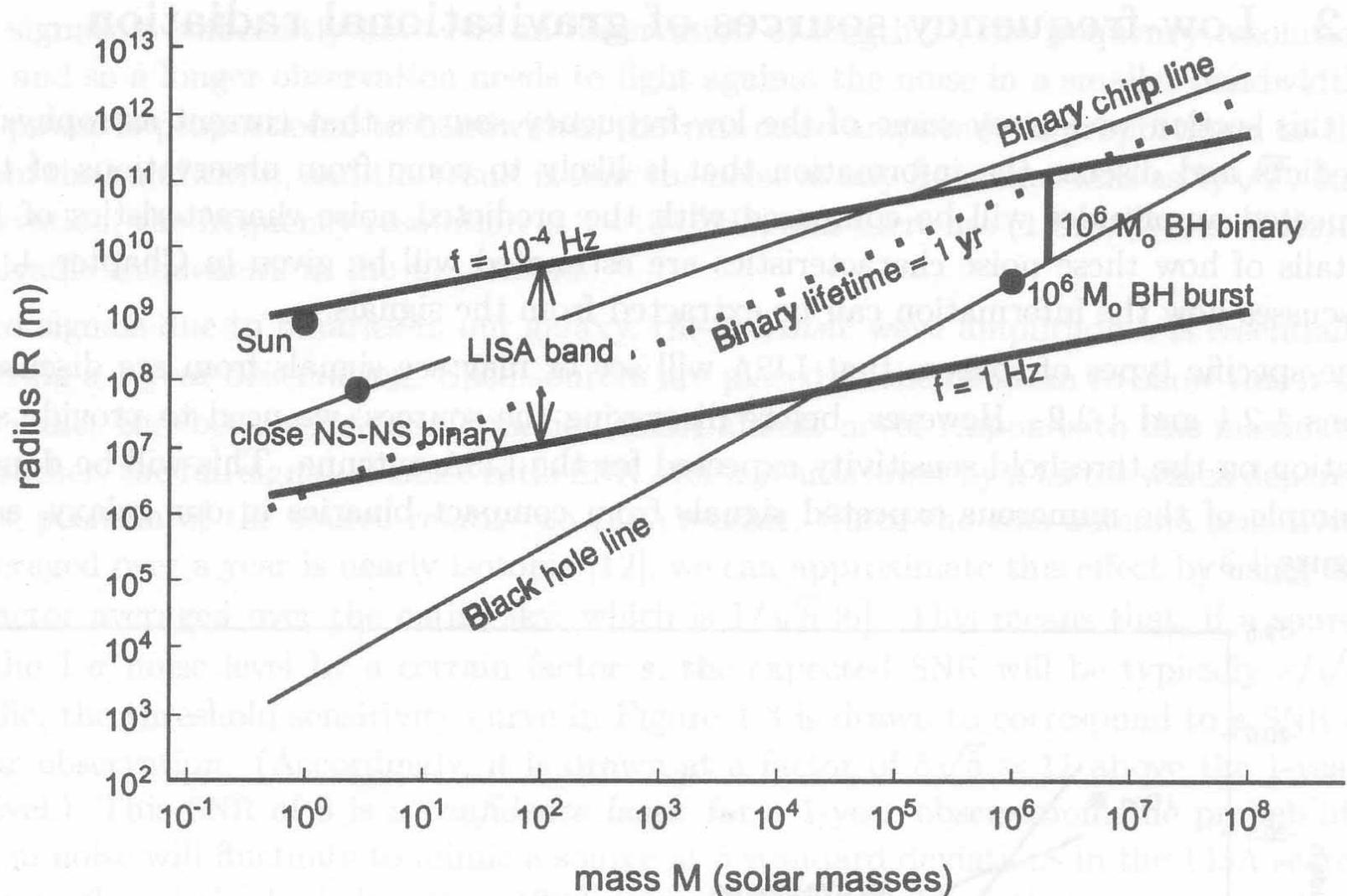
重力波の発生(6)

ダンピング時間と重力波振幅の式から

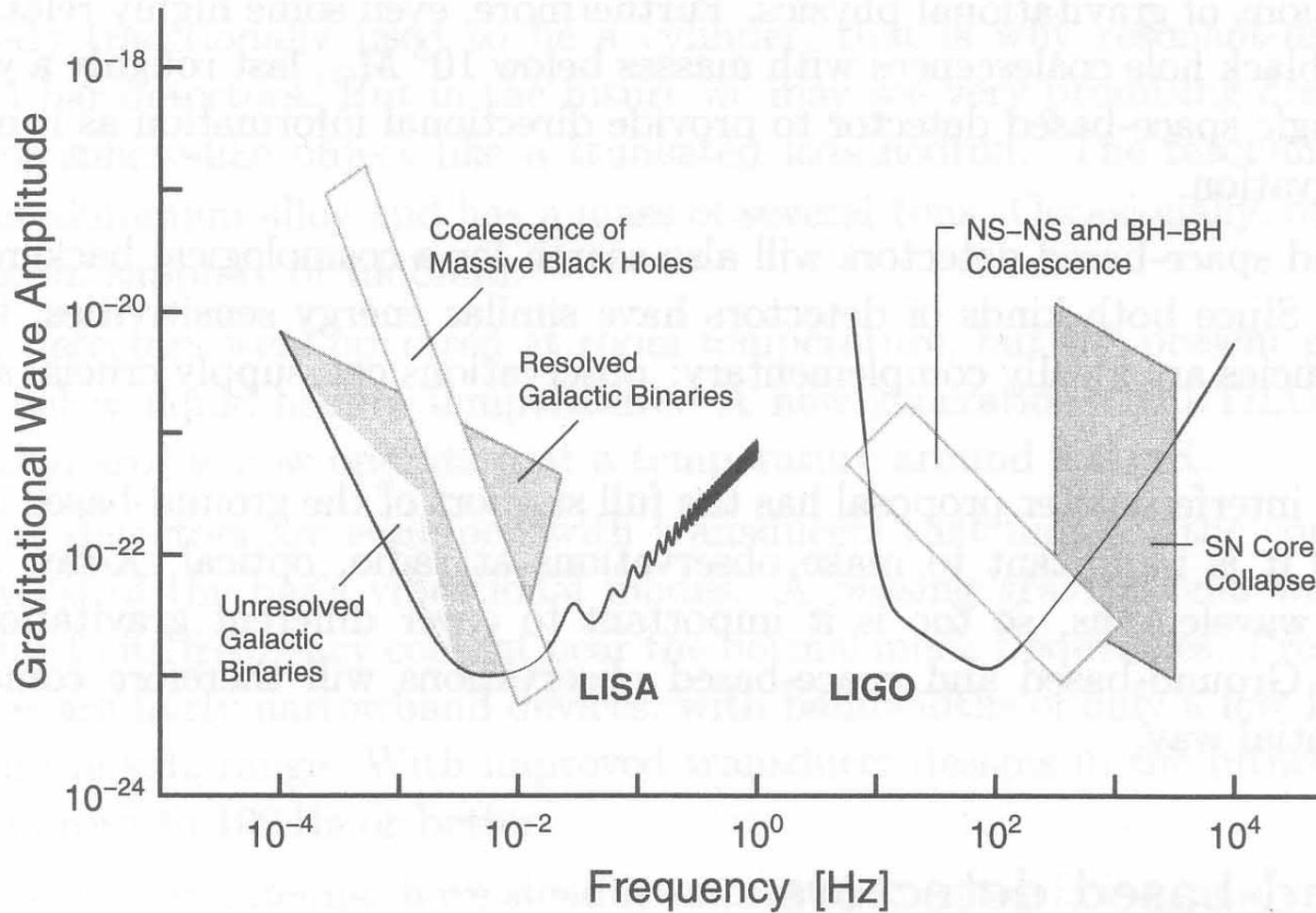
$$h \sim \frac{c}{\omega r} \frac{(GM\omega)^{5/3}}{c^5} \sim \frac{c}{\omega^2 T_{\text{GWT}}}$$

と r_{GW} は観測量なので、計測される h から連星系までの距離 r が求められる。

LISAの観測する対象のまとめ



LISAは地上の重力波検出器と相補的な関係にある。



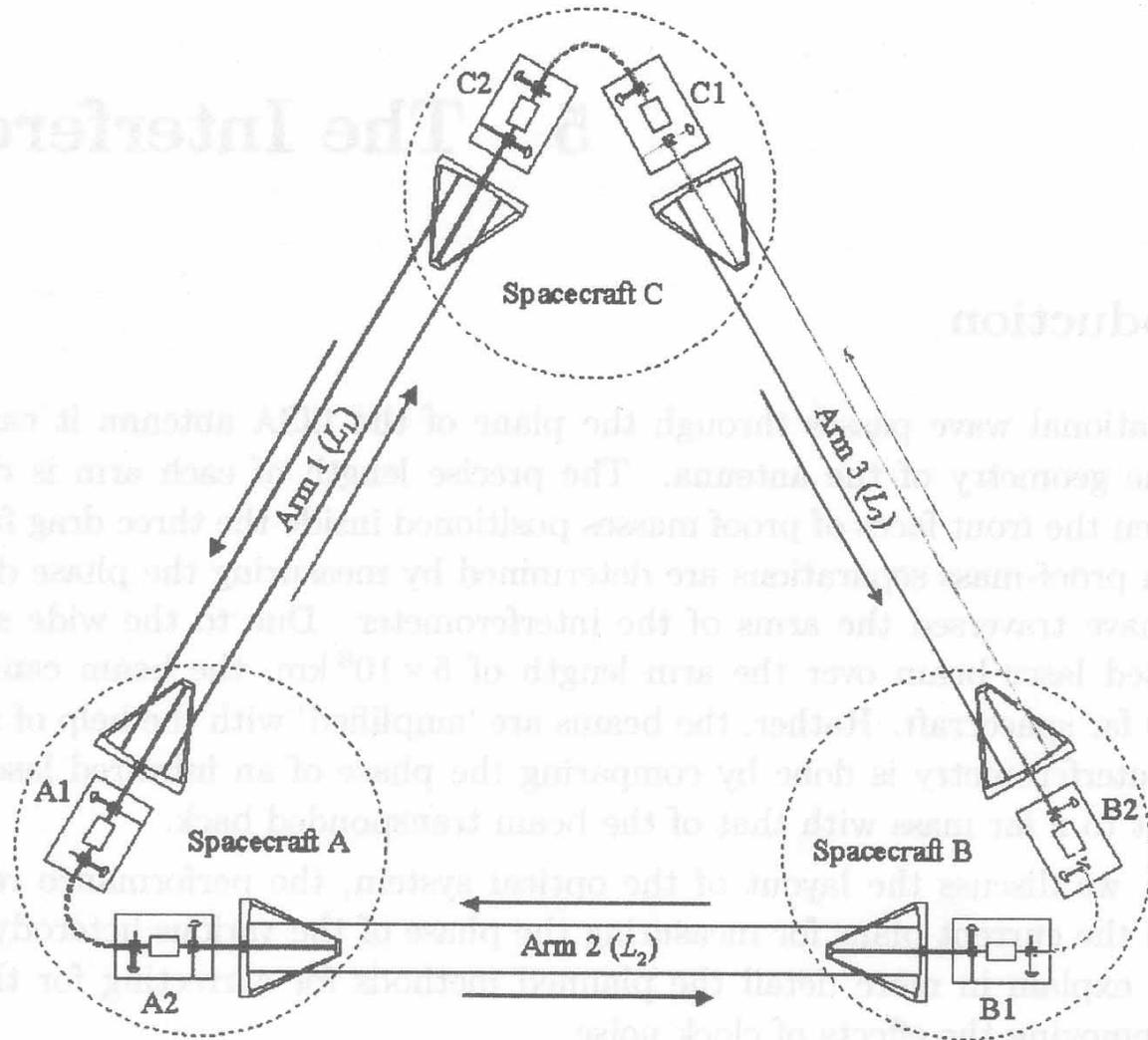
LISAの技術

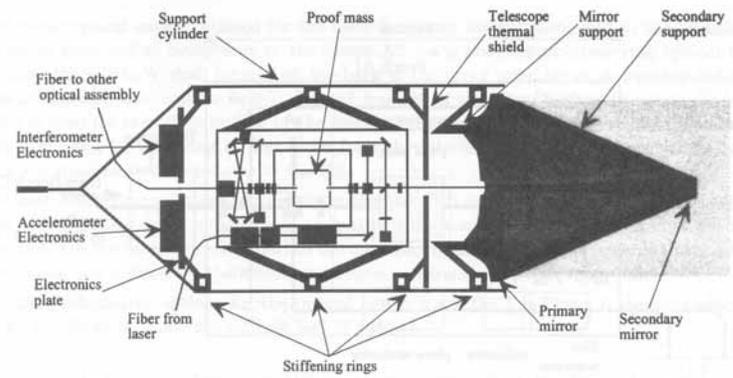
- Drag free技術の確立
- 宇宙環境での安定な動作
- 周波数安定度の確保

1個のLISA衛星

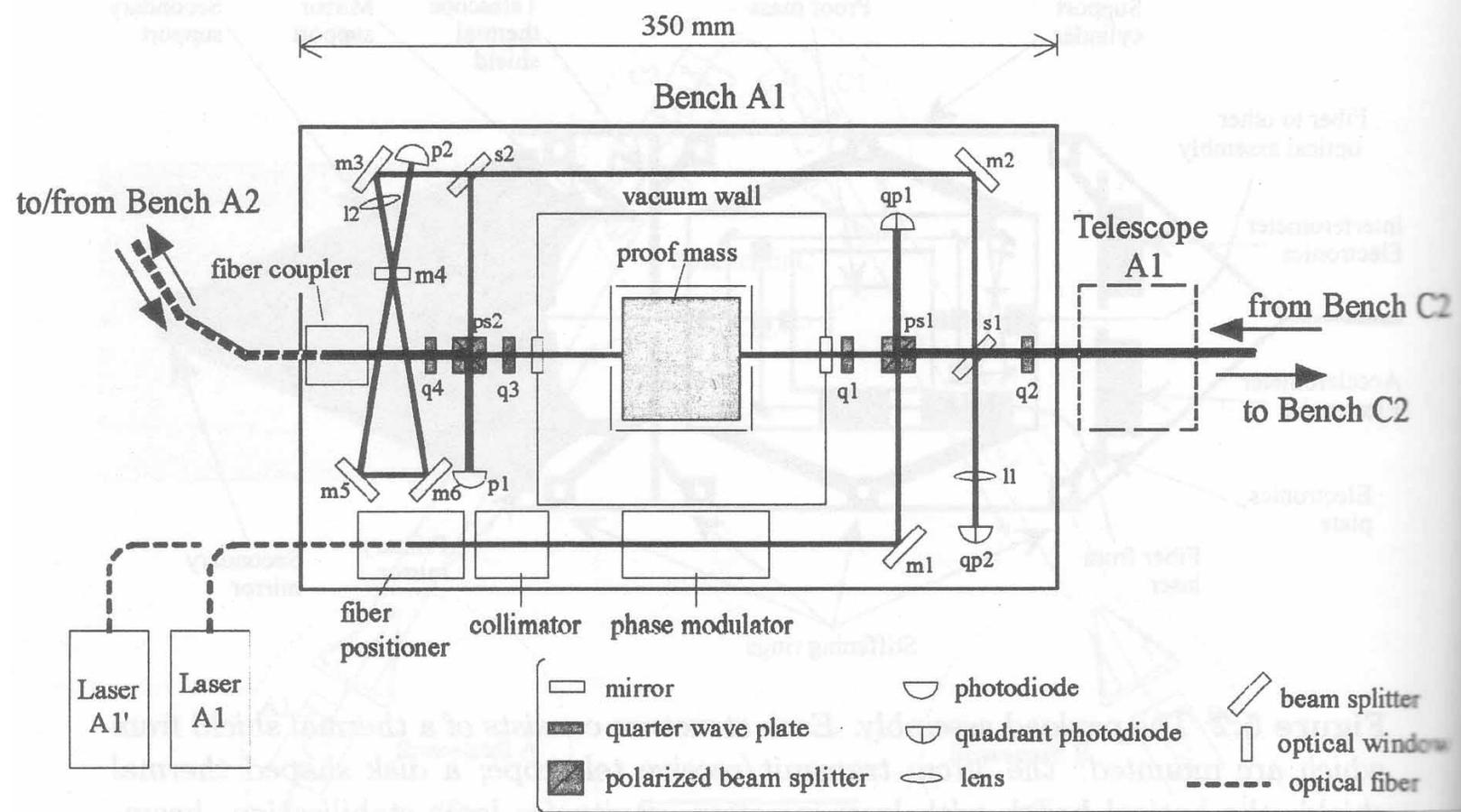


LISA干涉計

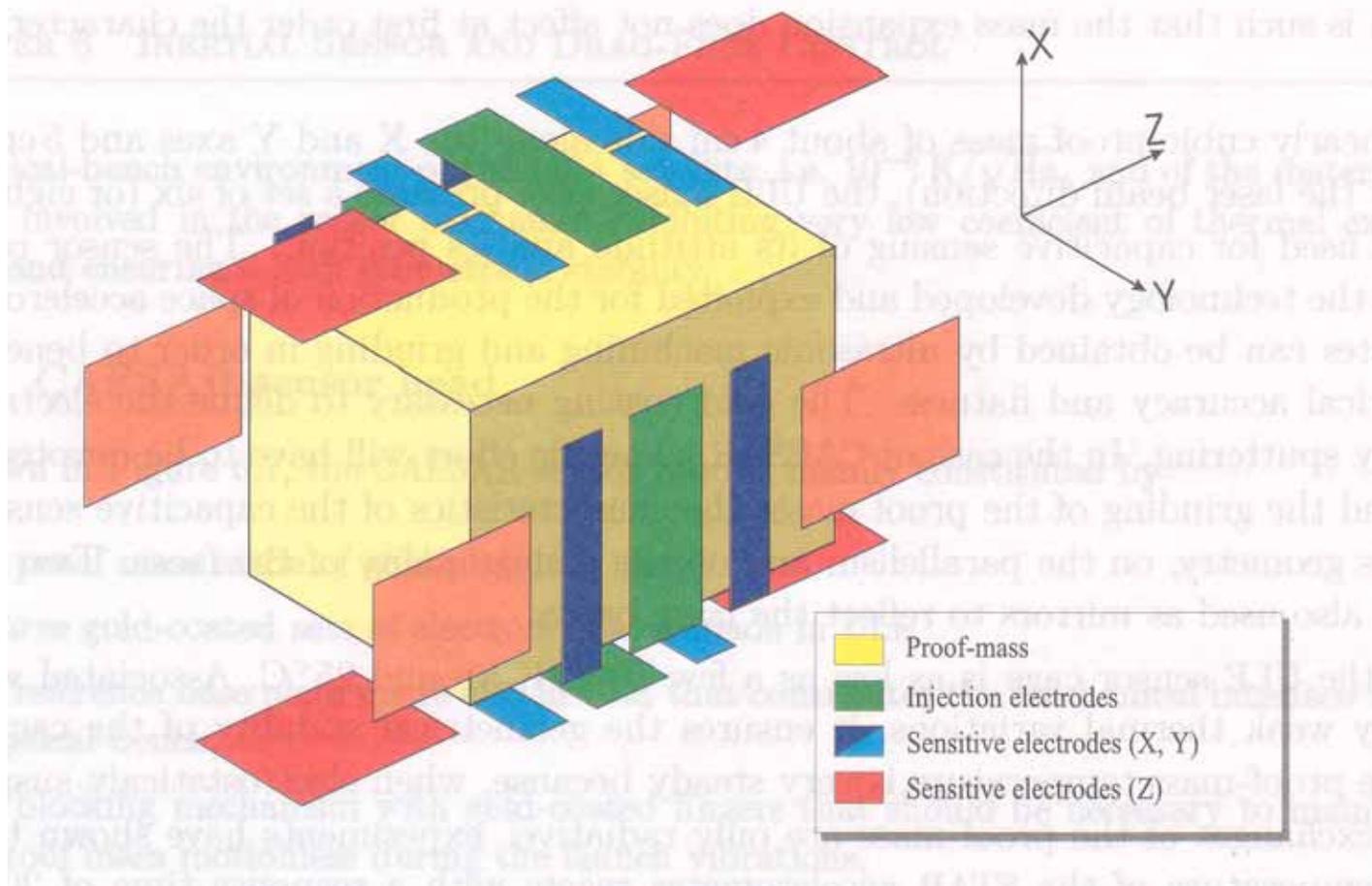




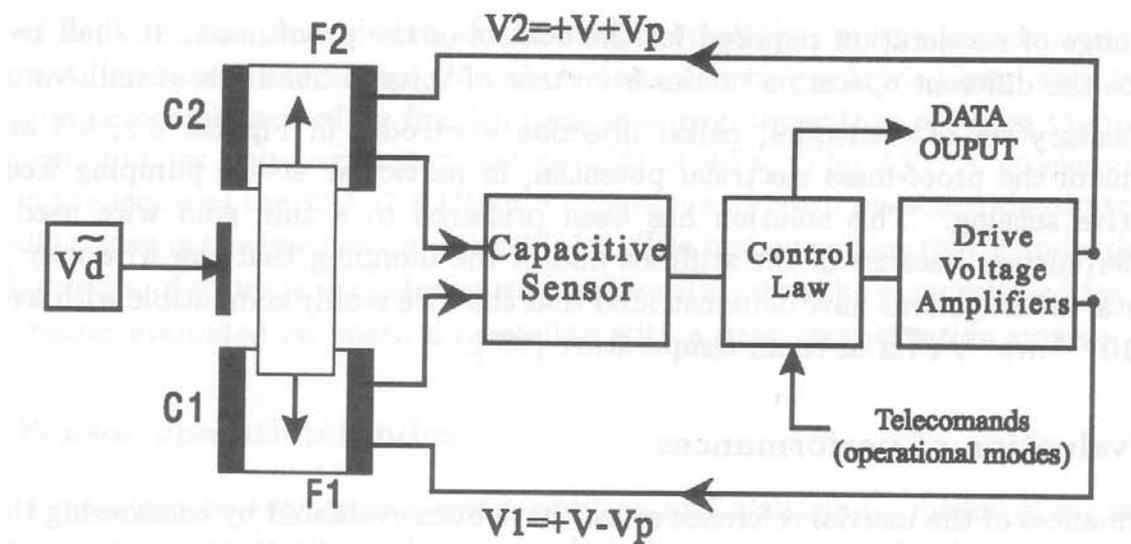
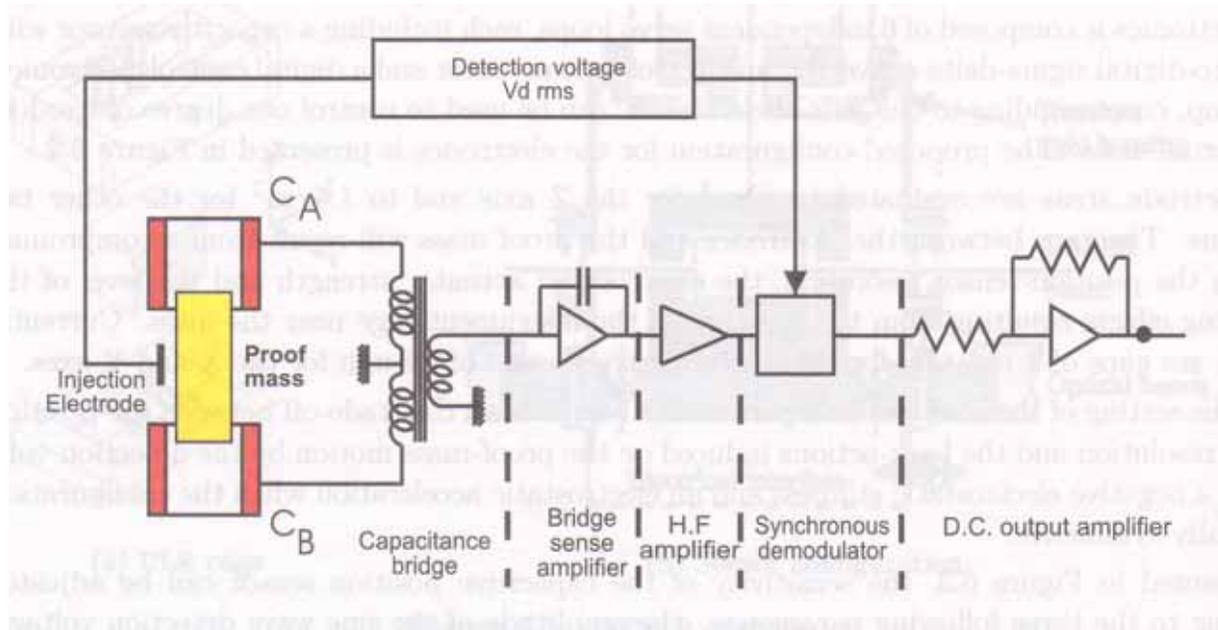
Drag free は金と白金合金の立方体である。



Drag free を担保する加速度計



加速度計



制御機構としてのマイクロジェット

- CMNT
- FEED

まとめ

- LISAはブラックホールからの重力波を主なターゲットとする。
- 高い信号対雑音比により精密な理論の検証ができる。
- 10^6 太陽質量のブラックホール合体は宇宙のどこで起きてても捉えられる。