

重力波観測の現状と今後

川村静児

1 はじめに

現在、世界各地で 300 m から 4 km のアーム長を持つ巨大レーザー干渉計型重力波アンテナが建設中である。アメリカの LIGO 計画、フランス・イタリアが共同で行なっている VIRGO 計画、ドイツ・イギリスの GEO 計画、そして日本の TAMA 計画である。なかでも TAMA300 は 2000 年夏に世界最高感度を達成し 160 時間の観測を行なうなど、順調な進展を見せている。また LIGO でもつい先ごろ、4 km 干渉計に先立って 2 km 干渉計の動作に成功し、今後目標感度達成を目指して装置の調整を行なっていく予定である。将来的には、アメリカでは現在の装置に大改良をほどこし、感度の飛躍的な改善を行なっていく方針であり、また日本では神岡のトンネル内に 3 km の低温重力波アンテナを作ろうという計画 (LCGT) が推進されている。さらに NASA と ESA が共同で提唱中の LISA 計画は巨大干渉計を宇宙に打ち上げる壮大な計画であり、現在活発に準備が進められているところである。本稿では干渉計型重力波アンテナの簡単な説明のあと、世界の重力波観測計画の現状、特に TAMA300 の構成および実際に得られた結果、さらに今後の課題と展望について紹介する。

2 レーザー干渉計による重力波検出

2.1 検出原理

重力波検出のための干渉計にはマイケルソン干渉計が用いられる。図 1 に示すように、適当な方向から適当な偏極を持った重力波がやってくると、干渉計の片方の腕の長さが伸び、もう一方が縮み、干渉光の明暗が変化する。それを光検出器で測定すれば重力波が検出できるという訳である。実際には干渉光のフリンジが常に一定になるようにミラーに制御をかけ、そのフィードバック信号を解析することにより重力波の検出を行なう。なお干渉計が重力波に対して感度を持つためには、ミラー及びビームスプリッターは自由質点として振る舞う必要がある。そこでそれらは振り子状に吊り下げられており、そのため振り子の共振周波数より十分高い周波数領域では、水平方向に自由落下しているとみなすことができる。

2.2 標準型干渉計

マイケルソン干渉計による重力波検出の原理はこのように非常に単純なものであるが、実際は超高感度を実現するために以下に述べるような工夫がなされている。(図 2 参照)

(1) ファブリペローアーム共振器

重力波は空間のひずみとして伝わってくるので、腕の長さが長いほど、重力波によって引き起こされる腕の長さの変化量、すなわち干渉計の重力波信号も大きくなる。もっとも腕の長さが長すぎると、光が腕の中を一往復する間に重力波の位相が変わってしまい信号がキャンセルしてしまう。たとえば 100 Hz の重力波をターゲットにした場合腕の長さは 750 km あればよく、それ以上長くしても得をしない。ところが実際に 750 km の干渉計を地上に造るのはいろいろな面でほとんど不可能である。そこで両アームにファブリペロー共振器を構成し、光を共振器内で実効的に多重反射させ重力波信号を増幅される。干渉計の検出に伴う

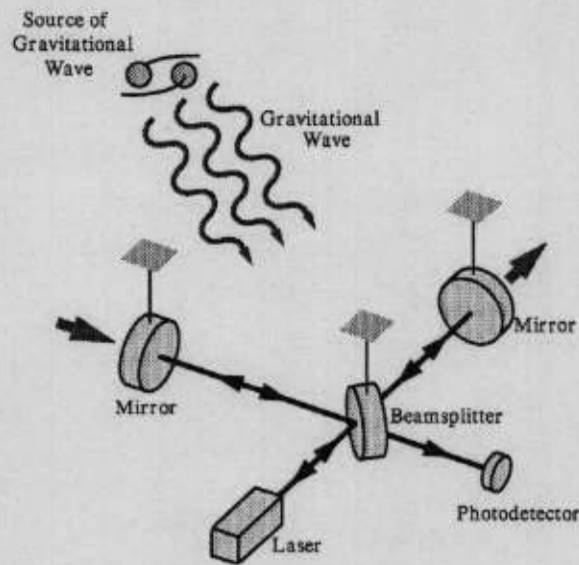


図 1: マイケルソン干渉計を用いた重力波検出の原理

ノイズは通常、光の折り返し回数によらず一定だと考えられるので、結果として S/N 比が改善される。ただしミラーを直接揺らす雑音に対しては同様に増幅されるので S/N 比は良くならない。

(2) モードクリーナー

レーザーから出てくる光には通常、ビームの横揺れ、角度揺れ、径の脈動などが存在し、これらは干渉計の幾何学的な非対称性と結びついて干渉計の出力段でノイズとなって現れる。そこでレーザー光を干渉計に入射する前に、ファブリペロー共振器を通すことにより、ビームの整形をする。この共振器がモードクリーナーである。モードクリーナーはまた、レーザー光の周波数安定化の基準としても使われる。レーザー光をモードクリーナーに共振させる過程で、光の周波数を制御してモードクリーナーの共振器長に合わせる必要があるが、これがそのまま光の周波数安定化になる。さらにモードクリーナーは光の周波数雑音、強度雑音などに対して受動的なローパスフィルターとしての役割も持つ。これは、光が共振器内にとどまる典型的な時間より速い周波数変化や強度変化は、光の共振器内での折り返しにより平均化されるためである。

(3) リサイクリング

干渉計では通常ショットノイズを抑えるために、検出器側ポートが常にダークフリンジになるように、すなわち全ての光がレーザーの方に戻っていくように、両腕の光路長差がコントロールされている。そしてレーザーの方に戻っていく光は何の役にも立たず捨てられるだけである。ところで次のサブセクションで説明するように、干渉計のショットノイズに対する S/N 比は入射光のパワーのルートに比例して良くなる。そこで、この使われていない光を再利用して実効的にレーザーパワーを高めようとする方法が、リサイクリングである。実際には干渉計の前に別のミラーを吊り下げ、干渉計から戻ってくる光を、もう一度干渉計の方にコヒーレントに打ち返すのである。

2.3 雑音

干渉計にはさまざまなノイズが存在するがここでは 3 つの基本的な雑音とそれを抑えるための対策について説明する。

(1) ショットノイズ

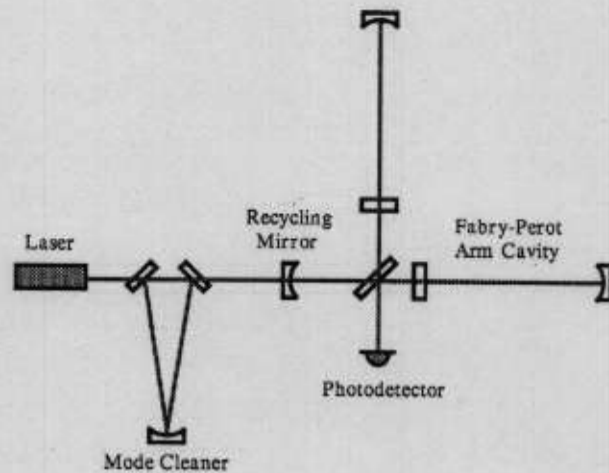


図 2: 標準型干渉計

光はフォトンの集まりであるため検出時に統計的な揺らぎが生ずる。このノイズは検出器におけるフォトン数のルートに比例、つまり光のパワーのルートに比例する。一方、干渉計の出力段における重力波の信号の大きさは入射光のパワーに比例するので、ショットノイズに対する S/N 比は入射光のパワーのルートに比例して良くなる。もっともパワーが高すぎると今度は、輻射圧の揺らぎが大きくなり、光がミラーを直接揺らしてしまふ。したがって、ショットノイズと輻射圧の揺らぎの雑音を等しくする最適な光のパワーが存在し、このとき 2 つのノイズの和は最小となる。実はこれが不確定性原理で与えられる量子限界である。現在、ほとんどの大型重力波検出器が使うことになっている Nd:YAG レーザーのパワーは 10 W クラスであり、まだ最適な光のパワーには達していない。

(2) 地面振動による雑音

地面の揺れは 100 Hz 付近で $10^{-10} m_{rms}$ 程度であるので、アーム長 1 km としてもこのままでは重力波の引き起こすひずみに対して 10^{-13} 程度の感度しか持たない。したがって 100 Hz で例えば感度 (10^{-22}) を実現しようとするに 9 桁もの防振が必要となる。先程述べたように、ミラーは重力波に対して感度を持つようにワイヤーで吊り下げられている。これは同時に防振の効果も持ち、振り子の共振周波数 (1 Hz 程度) より十分高い周波数領域では、ミラーの動きは地面振動に対して f^{-2} の依存性を持って減衰する。従って、100 Hz 付近ではこれだけで 4 桁の防振効果がある。更に必要な残りの防振ファクターを達成するために、例えばスタックと呼ばれるものが使われる。これは金属板と弾性体を交互に重ねたもので、この上にミラーの懸架システムを置くことにより必要な防振が得られる。

(3) 熱雑音

熱力学によると全てのモードは温度で決まるエネルギーを持つ。したがってミラーの振り子モード、及びミラーの内部モードも温度に応じたブラウン運動を行ない雑音が生じる。これを抑制するためには、振り子モードあるいはミラーの内部モードの Q 値を高くして (すなわちロスを低くして)、熱運動を共振周波数付近に集中させ、結果として測定周波数領域でのミラーの揺らぎを小さくする必要がある。またミラー全体を冷やすことにより運動エネルギー自体を小さくすることもできる。

一般に干渉計の感度はこれら 3 つのノイズで制限される。図 3 に示すように、低周波領域では地面振動が、高周波領域ではショットノイズが、そして中間領域では熱雑音が干渉計の感度を定める。

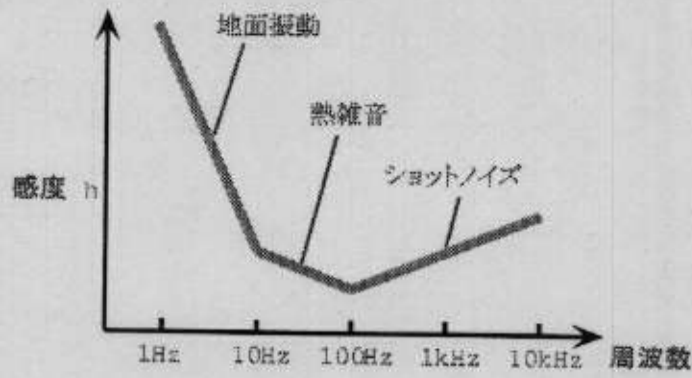


図 3: 干渉計の典型的な雑音

2.4 制御系

干渉計が重力波アンテナとして適切に動作するためには、干渉計の制御が必要である。両腕の共振器、モードクリーナー、およびリサイクリング共振器の各点で光が共振し、なおかつマイケルソン干渉計の検出器側のポートが暗くなるように光の周波数、あるいはそれぞれの共振器の長さを制御する必要がある。制御信号の取得は、通常光に 10 MHz 程度で位相変調を加え、通常の干渉計の検出ポートや、リサイクリングミラーの前後からも光をピックアップし、それらを復調することにより、干渉計の長さに関する信号が取り出せる。またミラーのアラインメントの制御も重要である。アラインメント信号を得るためには、ウェーブ・フロント・センシングと呼ばれる、干渉する 2 つのビームの波面の傾きを検出する方法が用いられる。これらの長さやアラインメントに関する信号はミラーの制御用マグネット・コイル・アクチュエーターを通して干渉計にフィードバックされる。

3 TAMA300

3.1 目的及び研究体制

TAMA 計画は 1995 年に文部省の創成的基礎研究の 1 つのテーマとして 5 年計画として発足し、その後 2000 年から 2 年間の延長が認められた。プロジェクトの目的は、将来の日本の大型重力波アンテナ LCGT のための技術確立および、可能性としては低いが見込みの重力波検出をめざすことである。

TAMA300 は国立天文台の敷地内にあり、国立天文台をはじめ、東京大学、東京大学宇宙線研究所、京都大学基礎物理学研究所、高エネルギー加速器研究機構、電気通信大学レーザー極限技術研究センター、宮城教育大学、大阪大学、新潟大学などが共同で、実験・理論の両面で研究を進めている。また諸外国のプロジェクトとの間でも、各種要素技術の開発及びデータ解析において、さまざまなレベルでの共同開発・研究がおこなわれている。

3.2 装置の構成

TAMA300 の現在の構成を図 4 に示す。最終的な光学系はアーム共振器、モードクリーナー、リサイクリングを持った標準型干渉計であるが、現在のところまだリサイクリングは導入されていない。

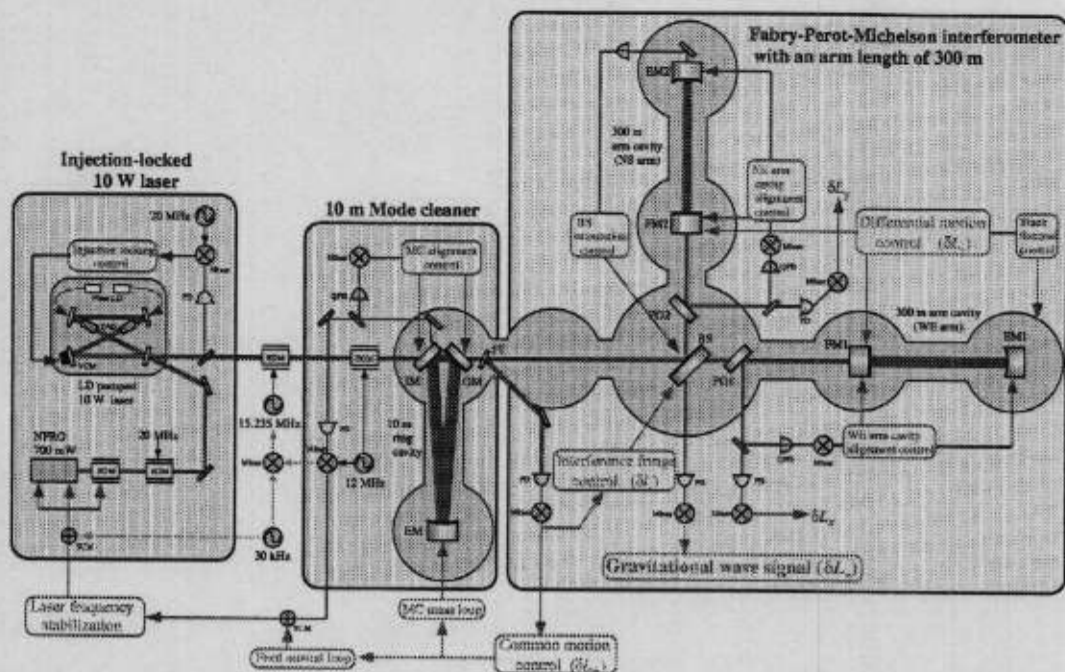


図 4: TAMA300 の構成

3.3 現状

1999年夏に世界に先駆けてテスト観測を始めた TAMA300 は、その後改良・調整を重ね、ついに 2000年夏にレーザー干渉計型重力波アンテナとして世界最高感度を達成した。図 5 に TAMA300 の感度向上の経過を示す。現在の感度は重力波の引き起こす空間のひずみに対して、1 kHz 付近で $5 \times 10^{-21} \text{ Hz}^{-1/2}$ であり、これは我々の銀河の中心でおこる連星中性子星の合体から放出される重力波を S/N 比 30~40 で検出できる性能である。(図 6 参照)

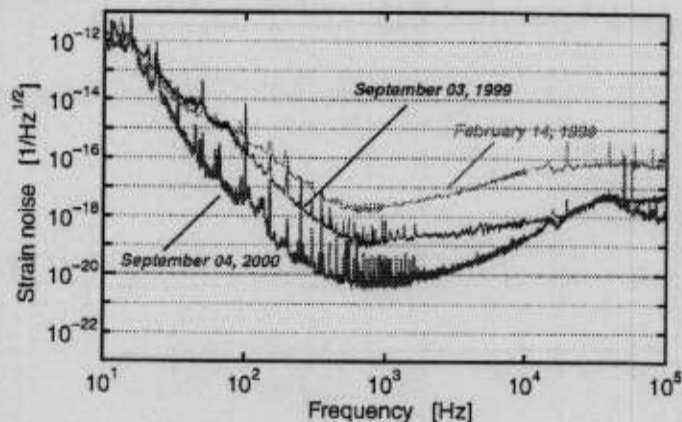


図 5: TAMA300 の感度の変遷

この感度は以下に示すようなさまざまな雑音で制限されている。

- (1) 10 Hz 以下: 地面振動による雑音。
- (2) 10 Hz~200 Hz: アライメントの制御雑音。アライメントの制御系の雑音が、制御の帯域外で、ミラーの角度揺れを引き起こし、それがビームスポットのミラーの中心からのずれと結合して、共振器長の

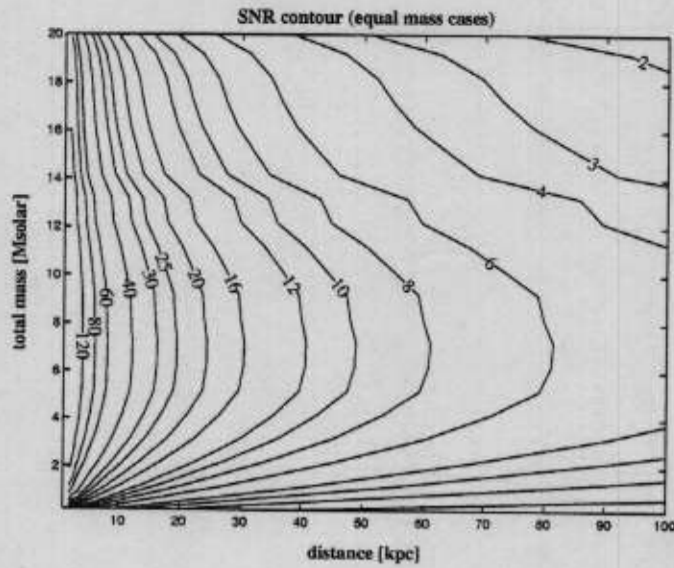


図 6: チャープ信号に対する S/N 比

雑音となるもの。

(3) 200 Hz～700 Hz: ある種の位相雑音。ビームスプリッターと両腕のインプットミラーだけからなる、マイケルソン干渉計の動作においても存在する雑音。散乱光の影響ではないかと考えられている。

(4) 700 Hz 以上: レーザーの周波数雑音。高い周波数では周波数安定化のゲインが取りづらいため周波数雑音が残ってしまう。

アラインメント制御に伴うノイズに対しては、すでにミラー懸架システムとアラインメント用制御回路を改良することにより雑音を抑えることに成功した。また散乱光を除去するためモードマッチング用レンズを鏡に換えることも 2001 年 4 月に行なわれる予定である。

観測に関しては、2000 年 8 月 21 日より 2 週間の連続観測が行なわれ、総観測時間 160 時間以上を記録した。装置の最長連続運転時間は 12 時間以上、8 月 26 日から翌日にかけては 24 時間中 23 時間以上もの運転に成功するなど抜群の安定度を示した。今回の観測では、非定常雑音が以前と比べて飛躍的に抑えられ、また干渉計の各フィードバック信号や地面振動をはじめとする各種環境信号も約 100 チャンネル記録されており、重力波以外の原因で現れた信号を取り除くことが可能となっている。現在、重力波の痕跡を探してデータ解析を行っているところである。

重力波検出器として感度とともに非常に重要なのが、装置の安定度である。この点、TAMA300 は干渉計型重力波アンテナとしては抜群の安定性を示したが、平日の昼間は低周波の地面振動が大きいため装置を安定に動作させることができなかった。この状況を改善するため能動的防振システムを 4 つのテストマスに導入した。それにより低周波領域での振動を引き下げることに成功し、昼間でも安定に動作させることが可能となった。そこで次回の連続観測では平日の昼間も含めた連続運転をめざすことになる。

3.4 今後の課題と展望

日本の将来計画、LCGT は宇宙線研究所をホスト機関として、神岡のトンネル内に 3 km の低温重力波アンテナを作る計画である。我々は LCGT の 2005 年スタートをめざして、TAMA による高感度レベルでの観測と LCGT のための技術開発を平行して行なっていく予定である。

4 諸外国の計画

4.1 LIGO

1992年にスタートしたLIGO計画は、カリフォルニア工科大学とマサチューセッツ工科大学の共同プロジェクトであり、4kmのアーム長を持つ干渉計をワシントン州とルイジアナ州に1台ずつ造るという、総予算約500億円の大型計画である。離れた場所に2台必要な理由は、相関を取ることで、ローカルなノイズから重力波の信号を区別するためである。またワシントン州の施設では2kmの干渉計も同じ真空装置に収納される。これは4kmと2kmで重力波信号が2倍違うことを利用して重力波信号か雑音かの識別に使うためである。LIGO計画では、最初は既存の技術のみを用いた標準的な干渉計を造り、その後2年間の観測の後、より高度な技術を取り入れて感度の向上を目指すものである。2000年に2kmの干渉計の動作に成功し、今後感度の向上をめざして調整を続けると同時に、4kmの干渉計のインストールも平行して行なう。なお将来の大改造に必要な技術の開発に関しては、1997年に発足したLIGO Science Collaborationの中でアメリカ内外から多数の大学・研究所が参加して精力的に研究が行われている。

4.2 VIRGO

もう一つの大型計画VIRGO計画はアーム長3kmの標準的な干渉計をイタリアのピサに造るものであり、その特徴はスーパー・アテニューエーターと呼ばれる防振システムにより、干渉計の感度の低周波限界を10Hzまで引き下げることである。この防振システムは5段に重ねた振り子や垂直防振などからなり、10Hzで 10^{-17} の防振を目標としている。現在、まだ建物が建設中であり完成はかなり遅れると考えられる。

4.3 GEO

GEO計画は600mの帯域可変型干渉計をドイツのハノーバーに造る計画である。この干渉計は標準型とは違い、マイケルソン干渉計の検出器側のポートにもう1枚ミラーを吊るし、重力波の信号をもう一度干渉計に打ち返すことにより信号の増幅(シグナル・リサイクリング)をするもので、通常のパワーリサイクリングと共に使われることからデュアル・リサイクリングと呼ばれる。そしてこの2つのリサイクリングのおかげで、干渉計の腕にファブリペロー共振器が不要となり、そのため制御系が非常にシンプルになっている。このタイプの干渉計の長所として、シグナル・リサイクリング用ミラーの位置を微妙にずらすことにより帯域をずらして干渉計の感度を特定の周波数で上げることができる。現在干渉計の一部が動作している。

5 スペース重力波アンテナ

地上の干渉計では地面振動や重力場勾配の雑音のため10Hzより下で高感度を実現することは難しい。地上干渉計の狙う重力波源のうち代表的なものは中性子星の合体であるが、より重い星の引き起こす現象はそれだけ周波数が低くなるので地上干渉計ではカバーできない。また重力波のストレインに対する感度を上げるためにはアーム長を伸ばし、干渉計における重力波信号を大きくしてやればよいのだが、地上ではせいぜい数kmのアーム長が限度である。これらの地上干渉計の限界から必然的に考えられるのが、宇宙空間に干渉計を持っていくことである。

5.1 スペース重力波アンテナの特徴

スペース重力波アンテナにおいては地面振動や重力場勾配などの物体に直接作用する力の引き起こす雑音が地上に比べて格段に小さい。またアーム長を非常に長く取ることも可能であるので、干渉計における

重力波信号を飛躍的に高めることが可能である。したがってスペースにおいては物体の運動雑音は減り、重力波信号は大きくなるという2重の意味において感度が改善される。

ただしスペースである程度以上アーム長を長くしていくと、発射したレーザー光が回折により一部しか隣の衛星に届かずショットノイズは悪化する。この効果とアーム長が長いことによる重力波信号の増大とが相殺し、結果としてショットノイズに対するS/N比はアーム長に依存しないこととなる。ただしアーム長に対応する重力波の周波数より高い周波数では、光が往復する間に重力波の位相が変化するため信号のキャンセルが起こり感度は悪くなるので、アーム長が長いほど上限周波数が低くなりしたがって高周波での感度が悪くなる。

したがってスペース重力波アンテナは地上のアンテナよりも低い周波数領域に感度があり、その意味で地上の干渉計と相補性を持つといえる。

スペース重力波アンテナは低周波領域に感度があるため、銀河中心の巨大ブラックホールの形成・合体や各種高密度連星の公転運動、さらに宇宙初期からの重力波の検出に適している。

5.2 LISA 計画

欧米ではすでに NASA と ESA の共同計画の LISA 計画 (Laser Interferometer Space Antenna) が提唱され活発に準備が進められている。これは地球軌道付近に 500 万 km 離れた 3 つの衛星を打ち上げそれらの間隔をレーザーで測定し低周波の重力波を検出しようとするものである。総予算は約 500 億円を申請しており 2010 年の打ち上げを目指して現在技術的な検討が繰り返されている段階である。

LISA の目標感度と巨大ブラックホールの合体、高密度連星の公転運動、宇宙初期からの重力波の予想図を図7、図8、図9に示す。

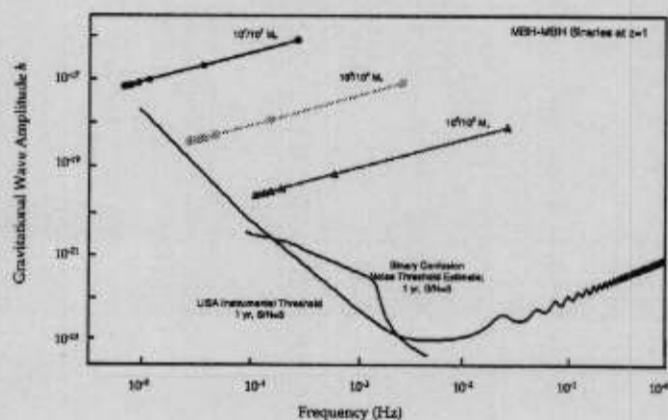


図7: 巨大ブラックホールの合体からの重力波 (LISA のプロポーザルより)

これらの見積もりによれば巨大ブラックホールや各種高密度連星からの重力波は LISA が予定通り動きさえすれば非常に高い S/N 比で検出されることが分かる。また宇宙初期からの重力波についても例え検出できなくとも有意義なアッパーリミットが与えられることが期待される。

LISA に必要な技術としては、ドラッグフリー衛星、位相ロックによる増幅反射、ヘテロダイン検出の3つが重要である。衛星は太陽風などで軌道が乱されることを防ぐために、衛星内に基準物体を持ち、その基準物体が常に衛星の中心付近にあるように衛星を制御するいわゆるドラッグフリーの技術が必要である。またアーム長が長いので放射されたレーザー光の大部分が失われるので、通常ミラー反射は使えず、位相を合わせて増幅反射しなくてはならない。さらに天体の作る重力場で衛星間の距離が変化しそれに伴って両腕からの反射光がドップラーシフトを受け周波数が変化するので、通常干渉ではなく基準周波数を使ってヘテロダイン検出を行なう必要がある。

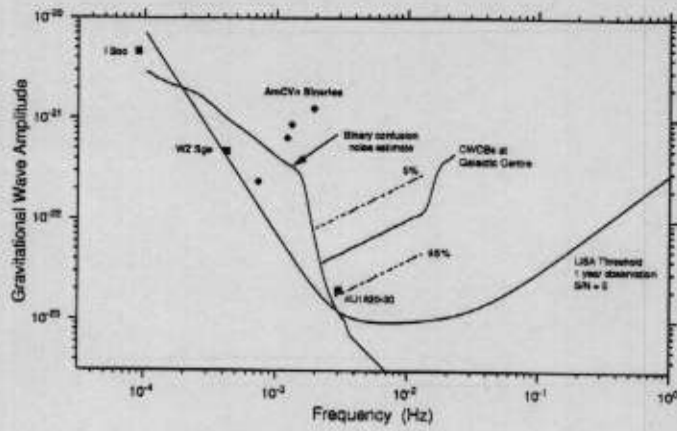


図 8: 各種高密度連星からの重力波 (LISA のプロポーザルより)

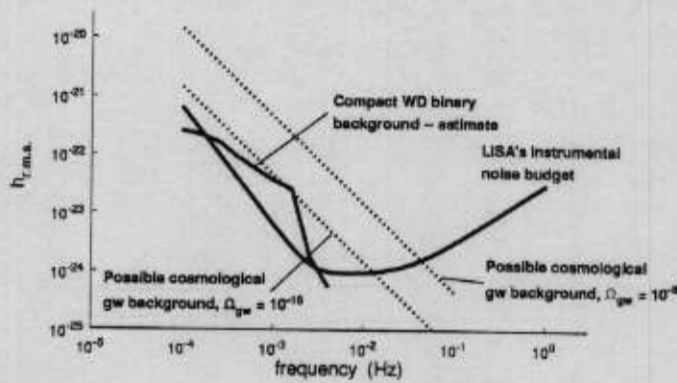


図 9: 宇宙初期からの重力波 (LISA のプロポーザルより)

5.3 日本の計画

日本では現在のところスペース重力波アンテナの具体的な計画は持っていない。LISA への参加に関しては、現在すでに NASA と ESA の間でミッションの分担まで決まっており、また日本ではその母体が全く無いことなどを考慮するとかなり難しい状況ではある。しかし重力波アンテナの特徴として台数が増えると得られる知見が飛躍的に増大することより LISA を 2 セット打ち上げそれに日本が参加するというアイデアは不可能ではない。また LISA とはアーム長を変え、LISA とは違う周波数を狙うという作戦も考えられ、これについてはどちらにずらすのが得策かを見極めるため、科学的な意義やフィジビリティの難易について詳細な検討が必要である。また衛星打ち上げのコスト削減のため、他のミッション例えば宇宙線検出、各種電磁波検出、光干渉計、地球計測などとの複合型ミッションの可能性も検討する必要がある。

6 まとめ

重力波検出は、一般相対性理論の検証という物理学としての興味からだけではなく、宇宙に重力波の窓を開き、全く新しい天文学を世に生み出す可能性をもつという意味においても、非常に重要である。そしてこの重力波検出にむけて、今、我々は着実な一歩を踏み出したのである。重力波検出はいまや目前に迫っている。そして、21 世紀は重力波天文学の時代となるのだ。