

# 解説

## レーザー干渉計による重力波検出

大橋 正健・藤本 眞克

国立天文台宇宙計量部門 〒181 三鷹市大沢 2-21-1

(1990年4月2日受理)

### Gravitational Wave Detectors Using Laser Interferometer

Masatake OHASHI and Masa-Katsu FUJIMOTO

Space-Time Astronomy Section, National Astronomical Observatory,  
2-21-1, Osawa, Mitaka 181

#### 1. はじめに

アインシュタインが一般相対性理論によって予言した重力波を検出することは、現代物理学の基礎の一つであるゲージ場理論を検証するのみならず、宇宙に対する人類の新しい目を開くことにもなる、困難ではあるが最も魅力的課題の一つである。

重力波を実験室で発生し検出することは現状ではほとんど不可能であり、大質量の物体が激しく変動する天体現象から発生する重力波の検出が最も可能性あるものと考えられている。天体重力波の観測は、近年飛躍的に拡大した観測方法でも見ることのできない質的に新しい宇宙像をもたらすことが期待されている。

重力波天文学が成り立つためにある程度の頻度と強度をもつ重力波源として、おとめ座銀河団における超新星があり、その出現は年間10個程度で、その爆縮で発生する重力波(中心周波数1kHz, 継続時間1msのパルス状)による地球周辺の空間の歪みは、 $h \sim 10^{-21}$ と推定されている<sup>1)</sup>。

このレベルの重力波を検出するためには、有効長が約100km(重力波の半波長)の光波干渉計で光の波長の約100億分の1以下の変化を検出する必要がある。これは、周波数が超高安定化されたkW級のレーザー光源と数kmの腕の長さを持つ大型レーザー干渉計によって可能と予想される。しかしながら、要求される感度を実現するには、あらゆる面で極限の性能を持つ要素の開発とシステムを長期間安定に動かせるための工学的諸問

題の解決などが必要である。

現在世界各国で大型レーザー干渉計の建設計画が提案され、重力波天文学への期待も高まっている。わが国でも独創性のあるレーザー干渉計型重力波アンテナの設計・建設を推進して、重力波を有効に検出するための地球規模の観測網の形成に貢献したいとの考えから、関係研究者が集まって重力波アンテナの概念設計を始めている。

ここでは、この概念設計に基づいて、レーザー干渉計型重力波アンテナの構成と検出限界、その実現のために要求されるレーザーや光学系の性能について解説する。また、さらに検出感度を高める可能性のある技術としてスクイズド光の利用や量子非破壊測定法についても簡単に触れる。

#### 2. レーザー干渉計による重力波検出

##### 2.1 検出の原理

重力波アンテナは、図1に示すように、基本的には単純なマイケルソン干渉計である。干渉計では光源からの光は、ビームスプリッターで直交する方向に分けられ、二本の腕を往復して再びビームスプリッターに戻って干渉する。このとき戻ってきた二つの光に位相差が存在すると、光検出器に入射する光の強度が変化する。この位相差が、振幅 $h$ 、波長 $\lambda$ の重力波によって引き起こされる場合、その大きさは、

$$\Delta\phi \sim (\lambda_0/\lambda)h$$

で与えられる。ここで、 $\lambda$ は光の波長である。

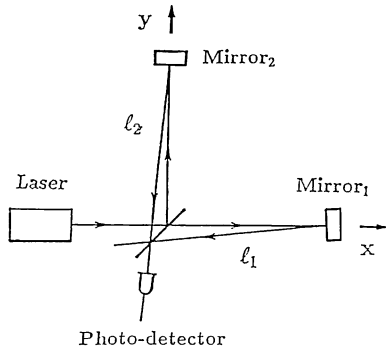


図1 マイケルソン干渉計

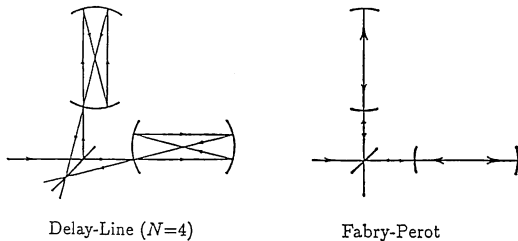


図2 Delay-Line方式とFabry-Perot方式

原理的には単純なマイケルソン干渉計といっても kHz 帯の重力波を狙う場合、最適化したアンテナの腕の長さは 75 km という現実には難しい大きさになってしまう。最適化を一言でいうと、干渉計の光路長が、重力波の半波長に一致するということである。光路を何重にも折り返してこの長さを実現する方法が考え出されている。ディレイライン(DL)方式とファブリーペロー(FP)方式の二つの方法である。図2に従って簡単にこの二つの方法を説明すると、DL方式は2枚の鏡の違う場所で光を折り返すものであり、折返し回数を  $N$  とすると腕の長さ  $l$  に対し実効的な光路長は  $Nl$  となる。これに対しFP方式は光共振器の多重反射を利用する方法であり、FP共振器のフィネスを  $F$  とすると実効光路長は  $F l \times (2/\pi)$  となる。DL方式は、その原理が単純であるという反面、鏡の違う場所を回折なくビームを折り返すために鏡自体の大きさが非常に大きくなってしまふ。一方、FP方式では光源の周波数安定性などに厳しい条件がつくが、それをクリアすれば最終的な感度はDL方式より良くなるといった具合に、それぞれの方法で長短がある。また、図3に示すように、FP方式は周波数応答がDL方式より滑らかであることも特徴である。

## 2.2 光のショットノイズと検出の限界

重力波に対する感度を議論するためには雑音を考えな

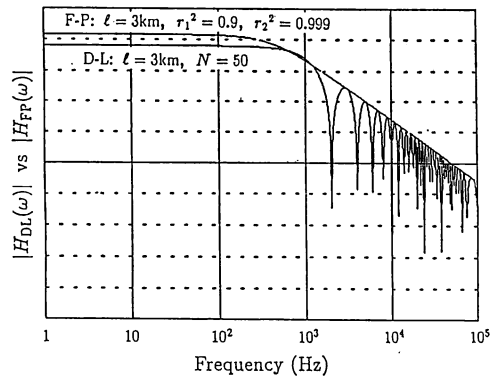


図3 F-P vs D-L

ければならない。最も原理的な雑音は光が光子であることに起因し、光電流のショットノイズとなって現れる。重力波によって引き起こされる光電流  $I_p$  の変化を計算すると、

$$\Delta I_p = I_p \Delta \phi = I_p (\lambda_0 / \lambda) h$$

となる。これが、光電流のショットノイズに等しくなるという条件のもとで検出できる最小の位相変化量が決まる。光電流のショットノイズは

$$\langle i_n^2 \rangle = 2eI_p$$

で与えられ、一方、検出器に流れる光電流  $I_p$  は、レーザーパワーを  $P$ 、検出器の量子効率を  $\eta$  とすると

$$I_p = e\eta P \lambda / 4\pi\hbar c$$

であるから、結局ショットノイズ限界はバンド幅を  $\Delta f$  とすると

$$\{I_p (\lambda_0 / \lambda) h_{\min}\}^2 = 2eI_p \Delta f$$

から

$$h_{\min} = \frac{1}{\lambda_0} \sqrt{\frac{8\pi\hbar c \lambda}{\eta P} \Delta f}$$

で表される。

## 2.3 FP方式重力波検出器の具体的構成

FP方式重力波アンテナは、マイケルソン干渉計の2本の腕をファブリーペロー共振器で置き換えたものである。この直交した2本の共振器からの反射波を干渉させると、光源の周波数雑音のようなコモンノイズに関しては引き算となり、重力波信号に関しては足し算になる。その際、二つの共振器の特性をどこまで揃えられるかによって干渉のメリットを生かせるかどうかが決まる。なぜなら、干渉計のマッチングのふんだけ光源の周波数雑音等の寄与を減らせるからである。たとえば、両方の共振器の特性が1%の精度で一致していればコモンノイズの影響は100分の1になるのである。このファクターは、光源の波長安定化への厳しい要求を軽減させ、FP

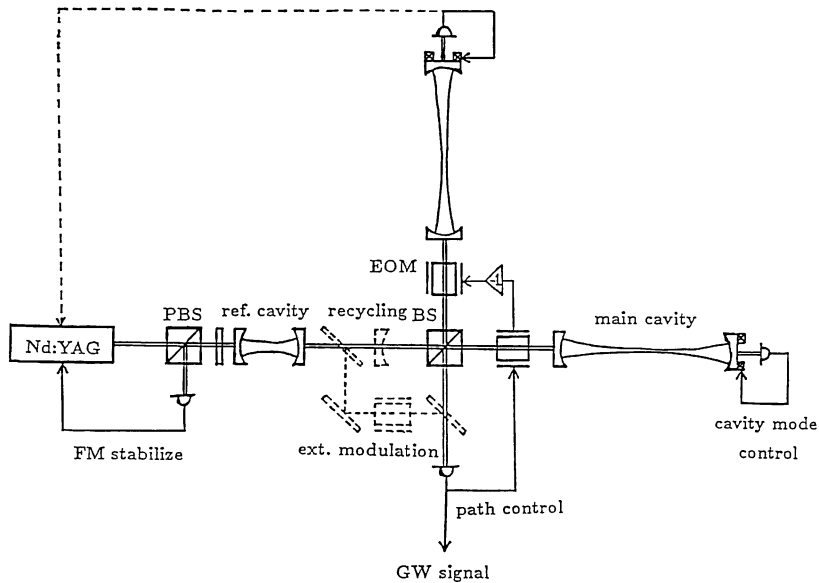


図 4 重力波アンテナの概念設計図

方式の成功の鍵となるであろう。

干渉計における雑音のうち、ショットノイズだけを考えた場合、感度を上げるための最も簡単な方法は腕を長くすることである。しかし、FP の応答特性や制御の観点からは、FP の縦モード間隔を広くするほうが望ましく、腕は短いほうが良いという側面もある。一方、地面振動等の点からは長いほうが良い。また、短くしてフィネスを上げるということになると、光学系への要求が現実離れして厳しくなる。これらを、総合的に配慮した結果、ここで述べる概念設計 (図 4) では基線長を 3 km としている。また、このときのフィネスは 80 である。

干渉計の光源としてはハイパワーのものが不可欠であり、原理的に S/N 比はパワーだけで決まっている。しかも、干渉計の 2 本の腕のマッチングが現実にはかなり難しいので、本来ならばキャンセルされる周波数雑音や強度雑音に関してもいぜん厳しい要求がある。

それぞれの腕を構成する FP 共振器は、共振周波数がレーザーの周波数と一致するようにローカルコントロールされる。ここでは共振器の透過光からレーザーと共振器の周波数の差に比例した誤差信号をつくらせている。通常は反射波から誤差信号をつくるのだが、その方法だとリサイクリングが不可能になってしまうからである。ただし、透過光から誤差信号を取り出すためには変調方法を工夫しなくてはならない。ここでは、鏡自体の弾性的な特性を利用した機械変調を考えている。また干渉計出力をダークフリンジに置くために、2 本の腕の光路長を

コントロールする必要があるので EOM (電気光学変調素子) 等が使われるが、リサイクリングを考えれば最終的にはこれも光学素子を使わない方法を考えなくてはならない。共振器全体を 2 枚の鏡の間隔を保ったまま移動させるリニアアクチュエーターの利用やビームスプリッターを移動させる方法が考えられる。

レーザーパワー 1 kW が実現できれば当面必要はないが、感度をあげるためにリサイクリング<sup>2)</sup>への準備はしておかなくてはならない。そのためには、リサイクリングミラー以降には光学素子を入れないようにする。また、低周波領域の強度雑音の影響を受けないように、干渉信号の変・復調は外部変調方式を用いる。そのために、リサイクリングミラーの前でメインビームの一部 (反射防止膜で反射する程度のもの) を分けて、この目的のために利用する。

このほかにも、干渉計の重要な周辺設備として、地面振動の混入を防ぐ防振系や、音響雑音を遮蔽したり散乱を防いだりする真空系があるが、ここでは述べない。

#### 2.4 世界的動向

これまでに、表 1 に示すように米、英、西独、日本で 10 m クラスのレーザー干渉計型重力波検出器のプロトタイプが開発されてきており、その感度はすでに共振型の重力波アンテナに匹敵するところまで来ている。それを踏まえて、世界各国の重力波グループは、重力波天文台としての性能を持つ km 級レーザー干渉計を提案している。簡単に紹介すると

表1 主なプロトタイプ

	独 (MPQ)	英 (Glasgow)	米 (Caltech)	日本 (ISAS)
方式	DL	FP	FP	DL
腕の長さ(m)	30	10	40	10
折返し数	100	3000	2000	100
光路長(km)	3	30	75	1
レーザー	すべて Ar レーザー			

米 LIGO 計画—Caltech と MIT の共同  
(4 km FP 方式干渉計 2 台)

英・独 英 Glasgow 大と西独 Max-Planck 研究所の  
共同 (3 km FP (DL) 方式干渉計)

仏・伊 VIRGO 計画  
(3 km FP 方式干渉計)

豪 AIGO 計画—ANU, UWA 等の共同  
(3 km FP 方式干渉計)

日本 計画中

である。このなかで、LIGO はすでに NSF に概算請求しており、今年6月には結果がわかることになっている。日本では、東京大学、国立天文台、宇宙科学研究所、高エネルギー物理学研究所、電気通信大学、東京工業大学等が協力して、重力波天文台実現に向けて基礎研究を進めている。

### 3. レーザーに要求される性能

先に述べた重力波アンテナにおいては光源は、

出力 1 kW

周波数雑音  $\delta\nu/\nu \leq 10^{-21}/\sqrt{\text{Hz}}$

強度雑音  $\delta P/P \leq 10^{-9}/\sqrt{\text{Hz}}$

を満たさなければならない。一方、外国で開発されているプロトタイプでは数 W 級の Ar レーザーを単一波長単一モードで安定化して使用している。現時点での性能は、

実行パワー 数百 mW

周波数雑音  $\delta\nu/\nu \leq 10^{-19}/\sqrt{\text{Hz}}$

強度雑音  $\delta P/P \leq 10^{-7}/\sqrt{\text{Hz}}$

の程度である。しかし、Ar 等のガスレーザーは、

- 効率が悪い。
- プラズマ振動による雑音が大きい。

などの欠点が指摘されており、超高安定高出力レーザーとしては不向きであると考えられている。いま、いちばんの有力候補として考えられるのは LD 励起の Nd: YAG レーザーである。このレーザーは

- 固有の雑音が非常に小さい
- LD の発振波長がちょうど Nd: YAG ロッドの非常に励起率の高い波長帯 (720 nm~830 nm) と一致するため効率が高い
- 核融合のガラスレーザーと波長が同じためそこで開発された高出力用の光学部品が多く存在しているという利点がある。リングレーザー型のもも実用化されて市販されている。LIGHTWAVE 社のものは 10 mW クラスのもので安定化を行わない状態でも  $20 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$  程度の周波数雑音と報告されている。また、高フィネスの FP 共振器を周波数弁別器として利用した安定化機構をつけ加えたものでは  $0.01 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$  の周波数雑音が実現されている<sup>3)</sup>。これは現存するレーザーのうちで最も安定なものの一つである。また、YAG レーザーはフラッシュランプで励起して多モードで発振させると 100 W 以上の連続発振が得られており、加工用ではさらに大出力のものが開発されている。したがって、これらの要素をうまく組み合わせて kW クラスの光源を開発することは決して不可能ではない。現在試みられている高出力化の方法は

- 安定化した LD 励起のレーザーを種にしてフラッシュランプ励起の大出力レーザーに注入同期を行う。
- 多くのレーザーを発振させ位相同期制御を行うことで光をコヒーレントに足し合わせる。

の二つである。YGA レーザーの場合は前者のように注入同期を行うことで単一モード発振が得られることが示されておりモード選択用のエタロンが不用になるので低損失化が期待できる。すでに、この方法で 10 W 以上の単一周波数単一モード発振が得られている。また、複数のレーザーを用いなければならないときは後者の方法がシステムを簡略化できるという報告もある。どちらの方法が有効かはこれからの研究次第である。究極には 1 kW 以上の出力の LD を使って YAG レーザーを発振させることが理想的である。フラッシュランプの代りに高出力の LD で励起を行うと高効率を得られ、励起や冷却時の過剰雑音を取り除くことができるという指摘がされている。大出力レーザーの場合には結晶内に生じる熱的な歪の影響が大きくなるので結晶を板状に加工したスラブ型のレーザーが有望であると考えられている。

周波数安定化<sup>4)</sup> に関しては、Pound 方式が有望である。この方法は、非常にフィネスが高い FP 共振器を用いて、FM 雑音を AM 雑音に変換して高感度に読み取り、光源のレーザー発振用共振器をフィードバック制御

して、周波数安定化を行うというものである。この場合、安定化の限界は雑音を読みとるときの検出器のショットノイズで決まるので、ハイパワーであることはここでも重要である。出力の安定化は、電源等、環境の変動を防ぐのはもちろんのこと、フィードバックによる能動的な方法で安定化する。さらに、周波数安定化に使う FP 共振器を受動フィルターとして用いた安定化も有効である。さらに、ビームの変動等も安定化しなくてはならない。

#### 4. 鏡と光学素子に要求される性能

##### 4.1 鏡

マイケルソン干渉計の腕を構成する FP 干渉計の鏡には、かなり厳しい性能が要求される。ただ、核融合関係で赤外の鏡は非常に良く開発されてきており、レーザーとして Nd: YAG レーザーを使うメリットが生かせるのではないかとと思われる。

まずコーティングであるが、ニアミラーはともかくエンドミラーは非常に反射率が高く (99.99% 以上) なくてはならない。そして、鏡自体の材質を含めてもロスが 100 ppm 以下という非常に透明なものでなくてはならない。このロスはリサイクリングにとっては重要なパラメーターであり、後述するように熱の問題とも関係が深い。さらに、50 kW にもなる FP 共振器中のパワーに耐えられる強度が必要である。次に曲率半径は、シミュレーションによって設計されたとおりのものにし、しかも 4 枚の鏡がまったく同じ精度で製造される必要がある。このとき鏡面精度は、できれば  $\lambda/100$  以下になることが望ましい。以上の鏡の製造には、検査技術も併せて開発する必要がある。鏡を検査するのにもちろん干渉計が必要となるが、この場合の干渉計としては DL 方式のほうが向いているかもしれない。なぜなら、DL 方式は鏡の局所的な非一様性を詳しく調べることができ、高反射率についても、フィネスという概念がないので自由に鏡の反射率を設定できるからである。

鏡の大きさについては、共焦点に近い 3 km の FP 共振器の鏡の場所でのビームの大きさが直径 8 cm 程度となるので、回折のロスを考慮するとおおよそ直径 24 cm くらいが妥当であろう。次に、鏡の熱振動を考えて、重さが大体 10 kg で、弾性振動の最低次のモードの周波数が 10 kHz 以上、機械的な Q 値が  $10^5$  以上になるような形状が必要である。図 5 は薄い円板の面外振動のモードを示したもので、 $n$ ,  $m$  はそれぞれ動径部分、角度部分の振動の次数を表し、 $k$  は振動モードに対するパラ

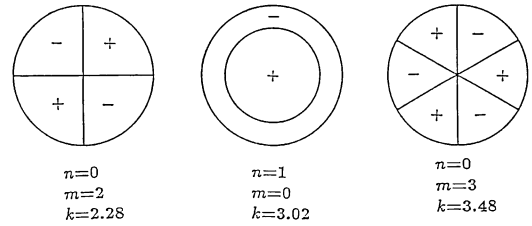


図 5 円板の面外振動

メータとなっている。最低次のモードは円板の四重極モードであり、鏡の材質としてフェーズドシリカを仮定すると、このモードの周波数を 10 kHz 以上にするためには、鏡の厚さを 10 cm 程度にしなくてはならないことになる。またこのとき、鏡の光軸方向の伸縮モードの振動数は 30 kHz 程度になる。これは、キャピティの機械変調を考えると、変調周波数を 20 kHz くらいまで高くすることができることになるので、都合がよい。以上のように、弾性体としての性質についても厳しい要求があって、鏡の形状や大きさはほぼ決まってしまう。

熱膨張について考えれば、材料の均一性は非常に大事である。鏡はコーティングと材質の光の吸収によって暖められ、変形する。この場合鏡が完全に相似型で熱膨張してゆきだけなら、それほど問題とはならないが、鏡の材料が一様になっていなかったり、熱伝導が悪く熱勾配ができる、やっかいなことになるからである。鏡の熱変形は天文関係でもかなり検討されており、とくに計画中の 8 m 級の反射鏡では、最高の分解能を得るためには、鏡の変形は重大な問題である。現在、コーニング社の ULE など、熱伝導、熱膨張率、均一性等についてかなり良い素材が開発されつつある。

##### 4.2 光学素子

EOM については、通常数百 W 程度のパワーまでは、ポッケルスセルの結晶を大きくすることで対処できるであろうが、この方法に限界はないのかという問題がある。またビームサイズは決まっているわけだから、これとのかねあいもある。またこの素子は、光の波面を乱してしまうという問題を抱えており、これによる 2 本の腕の特性の不一致は干渉効率を低下させ、干渉計にとっては致命的な欠陥となるかもしれない。さらにリサイクリングにおいては、この素子のロスが問題となる。

光検出器には、90% 以上の高い量子効率が必要される。せっかくハイパワーレーザーを開発しても、検出器の量子効率が低いとこれを無駄にしてしまうことになるからである。干渉光を検出器の直前で周波数ダブリングして、量子効率の高い領域にもって来る技術もあるが、

ここでは考えていない。現在赤外域では、量子効率は検出器の表面で反射するために低くなっており、この問題を解決できれば90%という効率は十分可能だと思われる。ただし、非常に小さな出力インピーダンスとマッチングを取れるプリアンプを作れるかどうかという問題が残されている。

## 5. より高感度を目指して

今まで見てきたように、現状では干渉計の検出感度はショットノイズで決まっている。感度を上げるには、光源のパワーを高めるかリサイクリングによって干渉に関わる光子の数を増して、ショットノイズを下げれば良い。パワーを2桁上げると検出感度が1桁向上する。一方、光子数が増すとミラーの受ける光圧のゆらぎも増えるから、光子数には最適値が存在する。光子の検出効率を1とすると、この最適の場合の検出感度は量子力学における不確定性関係による位置の測定限界に一致する。この検出限界を通常量子限界 (standard quantum limit: SQL) と呼ぶ。

### 5.1 量子非破壊測定

SQLを越える測定も原理的には可能である。それは、ある物理量を測定しても測定の影響(反作用)がその物理量に及ばないような測定法である。測定の反作用は正準共役の関係にある一方の物理量がすべて引き受けるので不確定性関係を破ることなく任意の精度である一つの物理量が測定できるのである。このような測定は、測定される量の量子状態を壊さないのが量子非破壊測定と呼ばれ、はじめは共振型の重力波検出器(一つのマクロな調和振動子)に対して考えられた<sup>5)</sup>。広帯域な周波数特性を持つ干渉計型の重力波アンテナに対しては、まだ具体的な量子非破壊測定法は考案されていないが<sup>6)</sup>、原理

的には制限はないと考えられている。

### 5.2 スクイズド光の利用

コヒーレント光は互いに正準共役な物理量のゆらぎが同程度の状態でSQLに対応しているのに対して、スクイズド光は一方の量が他方よりはっきり定まった状態である。たとえば、あるスクイズド光の光子数のゆらぎはコヒーレント光の場合の $\sqrt{N}$ より小さい。このような状態の光を利用すると同じパワーの光源でもショットノイズによる検出限界を下げることができる。ただしこの場合ミラーの受ける光圧のゆらぎは増すことになる。ともかくこの方法でもSQLに近づくことが可能である<sup>7)</sup>。

現在発生に成功しているスクイズド光が実際に干渉計に使われるようになるためには、克服すべき技術的課題は多いが、将来の高感度化に備えて興味ある研究課題ではある。

## 文 献

- 1) 中村卓史, 藤本真克: "重力波天文学", 日本物理学会誌, **45** (1990) 2.
- 2) B. J. Meers: "Recycling in laser-interferometric gravitational-wave detectors," *Phys. Rev.*, **D 38** (1988) 2317.
- 3) D. Shoemaker, *et al.*: "Frequency-stabilized laser-diode-pumped Nd: YAG laser," *Opt. Lett.*, **14** (1989) 609.
- 4) 大津元一, 田幸敏治: "レーザー周波数安定度, 再現性向上のための分光的手法", *分光研究*, **32** (1983) 305.
- 5) C. M. Caves, *et al.*: "On the measurement of a weak classical force coupled to a quantum-mechanical oscillator. I. Issues of principle," *Rev. Mod. Phys.*, **52** (1980) 341.
- 6) K. S. Thorne: "Gravitational radiation," *Three Hundred Years of Gravitation*, ed. S. W. Hawking and W. Israel (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1987) pp. 330-458.
- 7) C. M. Caves: "Quantum-mechanical noise in an interferometer," *Phys. Rev.*, **D 23** (1981) 1693.