

超低損失ミラー用散乱角度分布測定装置の開発

武者研究室 長岡 慧

1. 序論

1916年 Albert Einstein によって重力波の存在が予言された。重力波は、時空の歪みが波動の形で伝搬する現象である。しかし、重力波の振幅は非常に小さく、生じる空間の歪みは $\Delta L/L=10^{-21}$ 程度である。これは、地球と太陽間の距離が水素原子 1 個分変化するに過ぎない。重力波検出には大型のファブリーペローマイケルソン干渉計が用いられ、わが国では KAGRA と呼ばれる重力波検出器の開発が行われている。これに使用されるミラーには、99.99%以上の高反射率と数 ppm 以下の超低損失であることが要求される。過去には航空電子株式会社と電気通信大学の共同研究により、反射率 99.996%、損失 1.5 ppm の超高性能ミラーの作成に成功したが、現在これに並ぶ、もしくはこれを超えるミラーの作成は出来ておらず、KAGRA で使用可能なミラーの日本国内での作成は不可能である。我々は現在、シグマ光機、国立天文台と協力し、ミラーの作成技術を過去と同じ水準に戻し、かつそれを上回る技術を得るために研究を行っている。その研究の一環として今回実験を行っているのが、ミラーの散乱角度分布の測定である。ミラー表面で起きる光学散乱は、その散乱源となる物質の大きさにより、レイリー散乱やミー散乱などに分かれる。これらの散乱により生じる散乱光の光強度の角度分布は異なる。そのため、ミラーの散乱角度分布が測定できれば、その角度分布からミラー表面の散乱源の大きさが評価可能

であると考えられる。一方で、今回評価するミラーの全損失は現在使用している全散乱測定装置により、数 10 ppm 程度と非常に小さいことがあることがわかっている。これは 1 W のレーザーを入射しても 10 μ W 程度しか散乱しないことになる。もちろんこれは全散乱での値であるから、角度分布を測定するとなると、さらに小さい光を検出する必要がある。この検出には、Si フォトダイオードとトランス・インピーダンス・アンプ回路を使用した。さらに様々な個所から発生する迷光も測定に影響を及ぼすため、これらの迷光対策についても、使用するダンパーや吸光シートなどの選定も行った。この論文では、この測定装置の立ち上げに関して現状について報告する。

2. 原理

2.1 重力波検出器

重力波による空間の歪みは非常に小さく、その歪みは近傍銀河で生じた重力波の場合でも $\Delta L/L = 10^{-24}$ 程度である。これは太陽と地球間距離が水素原子 1 個分変化するに過ぎない。

重力波検出器としては共振型検出器や干渉計型検出器などの種類が存在し、現在の重力波検出の主流はファブリーペローマイケルソン干渉計である。ファブリーペローマイケルソン干渉計とは、マイケルソン干渉計の腕の部分にファブリーペロー共振器に変えたものである。以下に概略図を示す。

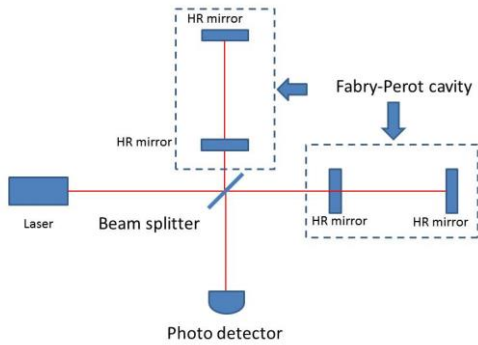


図 2.1 ファブリーペローマイケルソン干渉計

重力波検出器の感度はファブリーペロー共振器を構成するミラーの反射率に依存する。そのため、高反射率、超低損失のミラーが必要となる。

2.2 散乱

散乱とは、光が粒子などの相互作用により、進行方向が変化する現象であるといえる。このときに生じる散乱は、散乱源の大きさにより、レイリー散乱やミー散乱といった、異なる特徴を示すものに分かれる。

レイリー散乱は散乱源の大きさが光の波長以下である、数10 nm以下で生じる散乱である。レイリー散乱の角度分布は以下の計算式により求めることができ、次のような角度分布が得られる。

$$I(\theta) = \frac{I_0 \pi^4 d^6}{8R^2 \lambda^4} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 1} \right)^2 (1 + \cos^2 \theta)$$

R =散乱粒子からの距離、 m =屈折率、 I_0 =入射光強度

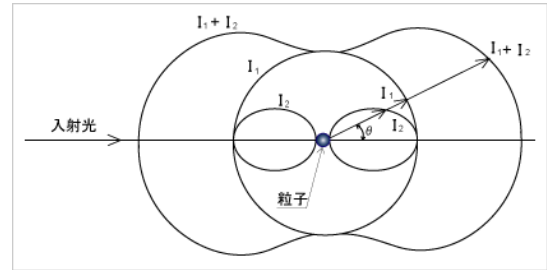


図 2.2 レイリー散乱角度分布

ミー散乱は主に散乱源の大きさがおおよそ光の波長と同じ程度の際に生じる光学散乱である。

非偏光光線のミー散乱の散乱強度は以下の式で表される。

$$I(\theta) = \frac{I_0 \lambda^2 (i_1 + i_2)}{8\pi^2 R^2}$$

i_1 =垂直方向のミー強度パラメータ

i_2 =水平方向のミー強度パラメータ

強度パラメータ i_1 、 i_2 は、屈折率 m 、粒径パラメータ α ($\alpha = \frac{\pi D}{\lambda}$)、および散乱角 θ の関係で表される。

ミー散乱を数学的に解析するには非常に難しい要素があるため、コンピュータのプログラムで解くのが現在主にとられている手法である。

3. トランス・インピーダンス・アンプ回路

この実験ではミラー表面で生じる散乱光の角度分布をフォトダイオード(PD)で検出する。このとき検出する光は非常に小さいため、PDで出力される電流もまた非常に小さい。この電流を、オシロスコープで検出されるレベルの電圧に変換する必要がある。この変換に使用するのがトランス・インピーダンス回路である。

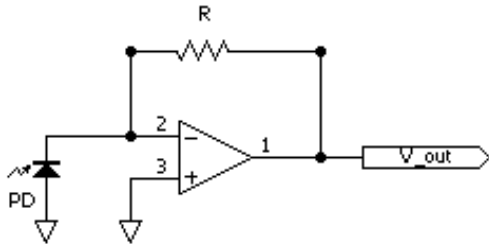


図 3.1 トランス・インピーダンス・アンプ回路

この回路により、PD 電流 i_{PD} により生じる出力電圧 V_{out} は

$$V_{out} = i_{PD} \times R$$

となるため、 i_{PD} が非常に小さい場合でも R の値を大きくすることで V_{out} の大きさを調整することが可能となる。今回の実験では PD から生じる電流が 3×10^{-9} A と非常に小さいので、抵抗には 100 M Ω を使用する。また、雑音の評価も併せて行った。

4. 散乱角度分布測定装置

今回作成した測定装置の概略図は以下のとおりである。

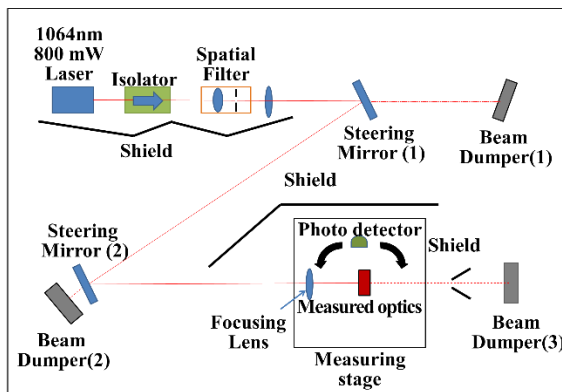


図 4.1 散乱角度分布測定装置概略図

光源には波長 1064 nm、出力 800 mW の Nd:YVO₄ レーザーを使用する。アイソレータを使用し、戻り光を抑制した後に、空間フィルタを通すことでビームの整形と拡大を行う。ステアリングミラーを 2 枚用い

て伝搬させ、測定ステージ上のターゲットに入射させる。その際に生じる散乱光をフォトダイオードで検出することで散乱角度分布の測定を行う。

5. 迷光対策

今回の測定では以下の図のように迷光がノイズとなってしまい、散乱光を測定できなくなる可能性があるため、迷光対策を行い、迷光を散乱光以下にする必要がある。

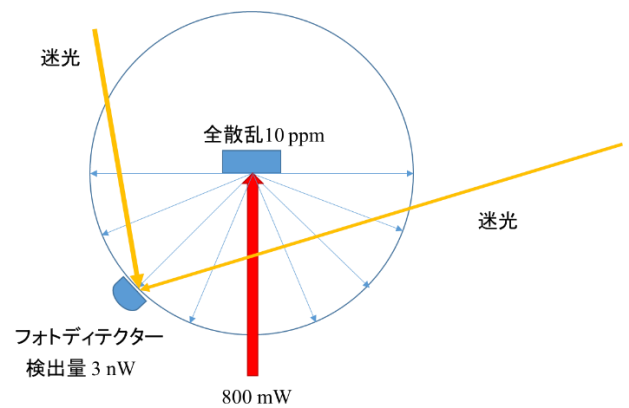


図 5.1 迷光対策概要

今回の実験では散乱光が 3 nW 程度であるため、それ以下に低減する必要がある。そのため、ビームダンパーの選定やシールドを用いた迷光対策などを行った。

5.1 ビームダンパーの選定

ビームダンパーは、入射したビームを吸収する光学機器である。本実験でもステアリングミラーの透過光やアイソレータの漏光といった測定に悪影響を及ぼす光をダンパーするために使用している。だが、ビームダンパーにも少なからず散乱（後方散乱）が存在するため、使用するビームダンパーも散乱が小さいものを選択する必要がある。今回は市販品のもの自作したものとの比較を行った結果、自作したものが市販品に比べて 1/10 程度の散乱となった。以下に今回自作したビームダンパーの写真を載

せる。

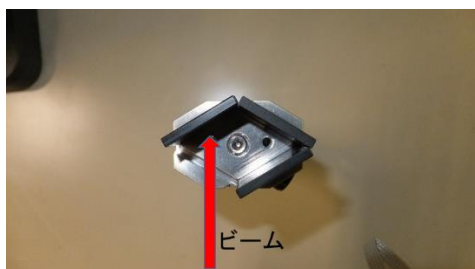


図 5.2 自作ビームダンパー

これは ND フィルタをひし形に配置したもので、上の写真のようにビームを入射すると内部で反射しつつ吸収される。またビームダンパーの特性評価のほかにも低散乱植毛シートの特性評価を併せて行った。

5.2 迷光対策結果

遮蔽板や上記のビームダンパーを用いて迷光対策を行った結果、迷光は以下のように低減することが出来た。

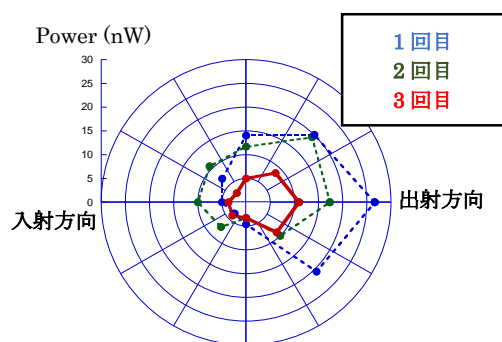


図 5.3 迷光対策結果

これは測定ミラーの位置に光検出器を設置し、 360° 回転させ、どちらの方向からどのくらいの迷光が来ているかを測定した結果である。1回目は遮蔽板などを設置していない場合で2回目は遮蔽板やビームダンパーを設置した状態、3回目はこれらの位置を調節した場合のものである。この結果からこれら遮蔽板やビームダンパーは迷光対策として効果があるということが分かった。

6. まとめと展望

超低損失ミラー用散乱角度分布測定装置の開発を行った。今回行った内容を次に示す。

- ・散乱角度分布測定装置で使用する光学機器の特性の測定と、その結果を用いた光学系の設計

- ・受光系で使用するトランス・インピーダンス・アンプ回路を作成し、特性を評価したうえでのシミュレーション結果との

- ・迷光対策で使用するビームダンパーや低散乱植毛シートの特性評価

今後の予定であるが、現状では迷光対策が不完全で、散乱角度分布の測定が行えていない。遮蔽の最適化を行うことで迷光を 3 nW 以下まで低減する。この目標が達成されたならば、次に透過率が 100% に近いターゲットを用いて散乱角度分布の試験測定を行う。この測定で散乱角度分布が測定できたならば、散乱角度分布測定装置を完成したとみなし、実際のターゲットの散乱角度分布の測定を行う。