

Hunting Waves in Space

dSPACE システムを使用した

重力波の研究

LIGO (レーザー干渉計重力波観測装置)



おろし座のかに星雲は、約900年前に発生した超新星の残骸であり、代表的な重力波の源です。

重力波を検出することは、物理学における未解決の研究課題の1つです。アルバート・アインシュタインは、1915年に重力波の存在を予測しましたが、重力波検出の可能性については疑問視していました。しかし、最新の観測技術により、その実現の可能性が高くなってきました。米国のLIGO（レーザー干渉計重力波観測装置）の研究者は、dSPACEシステムを用いて、重力波検出専用の観測所を設置しました。



順調に行けば、LIGO のレーザー干渉計によって重力波が検出される初めてのケースとなります（ここに示されているのは、ワシントン州のハンフォードに設置されているものです）。レーザー干渉計の2本のアームの長さはそれぞれ、4 km です。画像は LIGO プロジェクトのご厚意によるものです。

宇宙のさざ波

重力波は、適切な非対称系をなす加速された質量群から放出され、光速で伝播します。重力波が通過すると、瞬間的に空間とその空間内のすべての物体が歪められます。ただし、この歪みが生ずるのはほんの一瞬のことです。銀河系内の星が爆発し、超新星が出現しても、その結果発生する重力波による歪みは、太陽から地球まで

重力波の検出方法

重力波は、その経路内にあるすべてのものを瞬間的に歪めるので、それを確実に検出するための方法が1つだけあります。一定の確定されている距離の長さを、非常に高い精度で観測するという方法です。長さの突発的な変化が観測された場合、これは、重力波が通過した痕跡である可能性がありますからです。この距離はできるだ

重力波は、どのような物質でも突き抜けることができ、地球でさえも障害物とならないからです。したがって、観測所を設置する位置や方向による違いが生じないため、従来の観測所と比べて大きなメリットとなっています。

LIGO：重力波観測装置

LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory：レーザー干渉計重力波観測装置) では、半透明なミラーでレーザービームを分割しています。この際、2つのハーフビームが、4 km の2本のビーム管に沿って互いに直角に伝わります。各ハーフビームは、干渉計アーム内にある一対のミラーの間を約50回往復するので、4 km のアームが、200 km の長さの場合と同等の感度を持つこととなります。2つのハーフビームは、最終的に光検出器で再結合され、正確に相殺されます（相殺的干渉）。この場合、光検出器の画像は黒いまです。重力波が到達すると、2つのアームの長さが反対方向に歪められるので、2つのハーフビームにずれが生じ、完全には相殺されなくなり、その結果、検出器に痕跡が残ります。重力波を検出するために、LIGO では、4 km の干渉計アームの長さの中で、原子直径のわずか10億分の1の変化を測定する必要があります。LIGO は非常に感度が高いため、たとえば、数キロメートル

「dSPACE システムのおかげで、さまざまな要件が実現され、割り当てられた時間と予算内で作業が問題なく完了できるようになりました」

Dr. Mark Barton、カリフォルニア工科大学

の距離（1億5千万 km）に対して水素原子の直径分に相当するものであり、わずか千分の1秒の間の現象に過ぎません。重力波が地震のように私たちに揺らすというのは、全くSF的な発想です。このため、重力波の検出は極めて困難なものとなっています。しかし、重力波は非常に微弱であるという事実にもかかわらず、宇宙に関する貴重な情報をもたらしてくれるのです。このことが、研究者の興味を引く理由となっています。

け長いことが必要です。距離が長いほど、歪みも大きくなるからです。

レーザー干渉計を使用することで、この重力波を観測するという発想が現実のものとなりました。レーザー干渉計は、光の波動特性を利用して長さを正確に測定するものであり、光学的な「精密定規」として、既に数多くの分野で役に立つことが証明されています。

従来の観測所とは異なり、重力波観測所は、澄み切った星空を必要としません。



離れた海岸で生じる波や、遠く離れた田畑で稼働しているトラクターなど、重力波以外の混同の元となるさまざまな振動も記録します。したがって、主な課題は、このバックグラウンドノイズから装置全体を分離することになります。重力波に反応するのは、対となっているアームミラー間の距離であるので、これらの「試験質量」光学装置用のサスペンションの設計において、特に注意が必要となります。このために私たちは、dSPACE プロトタイピング

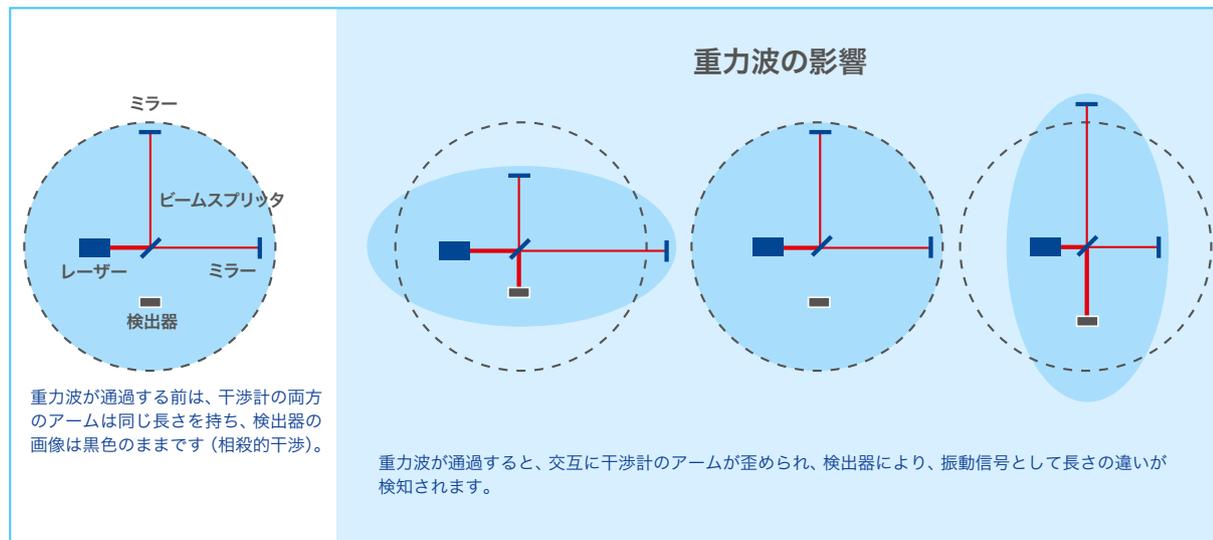
システムを利用した、アクティブダンピング装置を導入しました。

dSPACE システムによる地震ノイズの除去

LIGO の主要なミラーはすべて、一連の振り子として細いワイヤーで懸架されています。これにより、何の介入も加えることなく、単独で、振り子の固有振動数を上回る振動が抑制されます。初期の LIGO では、懸架されているすべての質量が、単純な一段のワイヤーループによって支持され

ていましたが、今後予定されている LIGO の最新型へのアップグレードの際には、非常に大掛かりな一連のサスペンションからなる装置を計画しています。この中で最も精巧に作られるのは一対の 4 段式振り子であり、それぞれ 1 つのガラス製補助質量と 2 つの金属製補助質量で構成されています。このような複雑なシステムのモデル化、制御、およびダンピングが可能であることを証明するために、プロトタイプでは、できるだけ迅速に衝撃を吸収するためのサスペンションシステムの周りに 20 個のセンサとアクチュエータを取り付けました。各センサは、LED と、2 つの間の光ビームがフラグによって割り込まれたときにミラーの偏向を記録する光ダイオードの組み合わせです。アクチュエータは複数のボイスコイルで構成され、センサ信号を使用して、マグネットに作用することによってミラーの静止状態を保持します。dSPACE DS2003 Multi-Channel A/D Board を通じてセンサ信号が記録された後、dSPACE DS1005 PPC Board によって適切な出力値が計算され、複数の DS2102 High-Resolution D/A Board 経由でアクチュエータに送信されます。私たちは、MATLAB®/Simulink® を用いて制御用のモデルを開発しました。実験全体は、dSPACE ControlDesk によってモニタリングされます。このような MATLAB/Simulink および dSPACE の

重力波によって発生する影響の図（説明のため多少拡張されています）



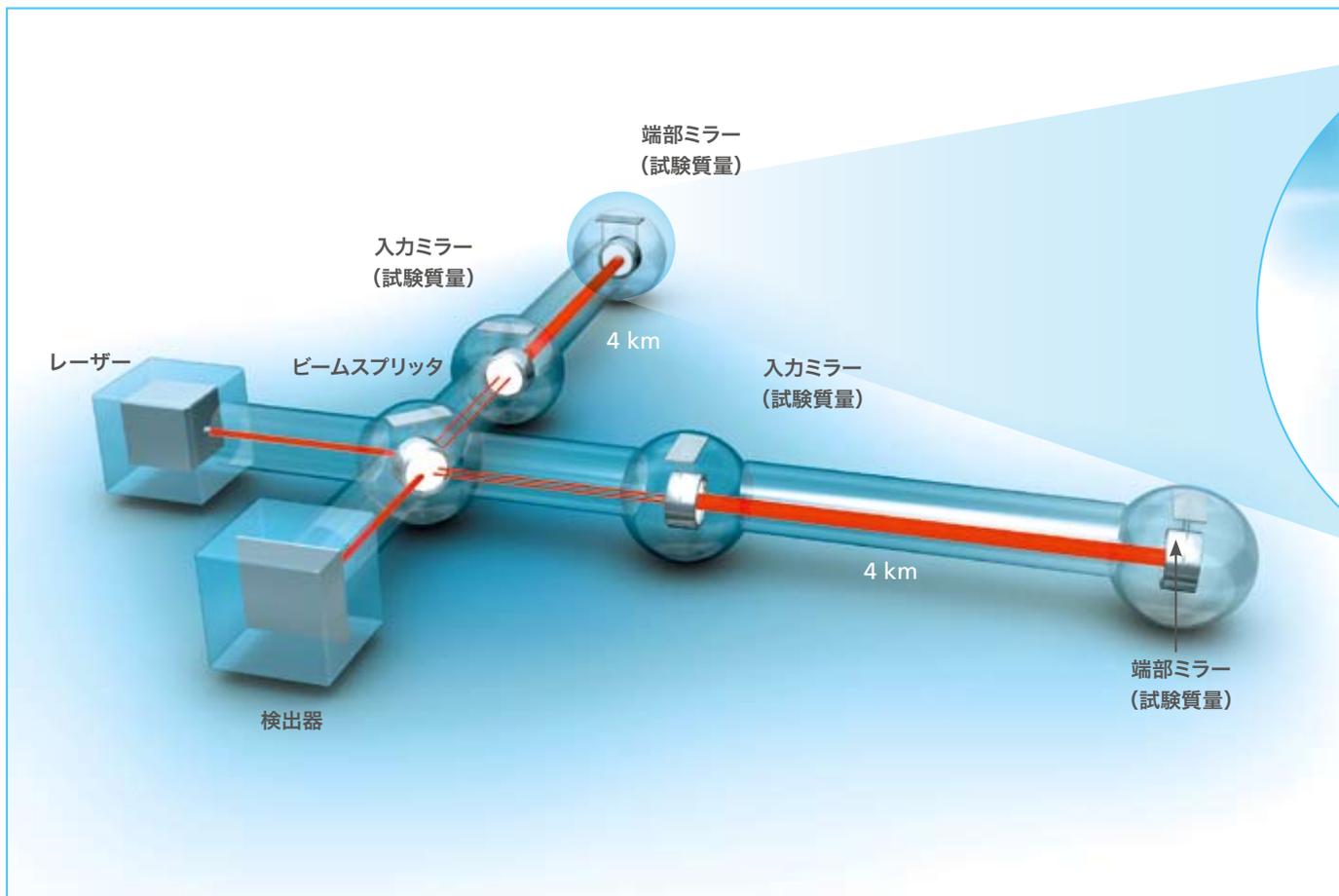
ハードウェアとソフトウェアの使いやすい組み合わせによって、実際の実験に完全に集中することができ、簡単に計画通りに進めることが可能になりました。人工的に生成された外乱信号を用いた試運転が何度か実施され、制御システムが適切に実行されていることが検証されました。

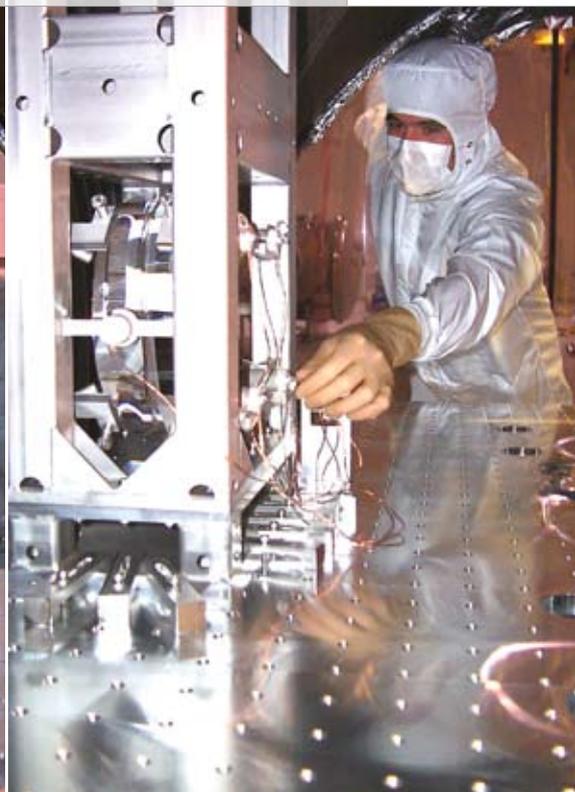
確認専用の第2の観測所

LIGOは、米国の異なる場所（ワシントン州のハンフォードとルイジアナ州のリビングストン）に設置された2つの全く同じ観測所から構成されています。重力波と推定されたものが、本当に単なる局所的な振動ではないことを確認するために、2つの観測所が必要になります。本物の重力波であれば、両方の場所で同じ信号

が観測されますが、局所的な振動の場合は、いずれか一方でしか観測されません。さらに、重力波と推定されるものが発生した場合、（ヨーロッパや日本などにある）他の観測所とも必ず比較が行われます。いずれの場所でも同じ信号が検出されて初めて、重力波が発生したという証拠となるのです。

LIGO 重力波観測装置の単純化したレイアウト。今後予定されている LIGO の最新型へのアップグレードの際には、端部ミラーのサスペンションが、ガラス製の質量と金属製の上部質量の組み合わせを持つ4段の振り子に、制御力をかける際の静穏の基準としての役割を果たす同様の設計の反応連鎖を加えたものとなります。dSPACE システムにより、プロトタイプ向けの制御システムの円滑な設計および導入が可能になりました。サスペンション図提供：グラスゴー大学





LIGO 内でのミラーの調節作業。資料提供：LIGO プロジェクト



宇宙への新しい窓

天文学者は、これまで、光学望遠鏡や電波望遠鏡を使用して宇宙を観測してきましたが、LIGO を用いた重力波天文学によって、宇宙への新しい窓がもたらされました。宇宙の大部分は、可視領域や電波領域にある波では突き抜けられない、暗黒の雲の背後に隠されています。一方、重力波はこのような暗黒の雲を妨げられることなく突き抜けることが可能であり、宇宙の未知の領域に関する新たな情報を私たちにもたらしてくれます。さらに、重力波天文学に

よって、光波や電波による天文学を補完する情報が提供され、ブラックホール、中性子星、衝突銀河などの現象に関する多くの未解決の問題に対する答えが得られるようになることが期待されています。■

Dr. Mark Barton
LIGO Project
Caltech
米国

dSPACE のハードウェアとソフトウェアの組み合わせを使用して、ミラーのアクティブダンピングが行われます。

