

共振器の長さをできるだけ短くすることにより相対的に周波数ゆらぎの効果を小さくすることができる。検出器のもう一つの主な雑音源は熱雑音によるアンテナのブラウン運動であるが、これはアンテナに働くホワイトなスペクトルをもった外力として扱うことができる。設計の指針としては、レーザーのショット雑音とアンテナのブラウン運動の2つによって決まる感度をまず想定し、その他の雑音源はこれに対して無視できるような設定を考える。次に具体例でこれを示そう。アンテナは直径 2 m、質量 1,700 kg のアルミ製とする。共振周波数 1.2 kHz で Q 値は 2×10^5 とし、これを室温 (300K) で運転する。レーザー干渉計の光源は波長 1064 nm の Nd:YAG レーザーとし、各共振器に 100 mW のパワーを入射する。光検出器の量子効率率は 0.8、ファブリー・ペロー共振器に用いる鏡の反射率が 99.9%、間隔は 1 mm を予定する。この様なパラメータで計算すると、まずショット雑音で決まる等価雑音変位は 1.3×10^{-19} m/Hz^{1/2}

であり、ブラウン運動による雑音力としては 7.4×10^{-10} N/Hz^{1/2} となる。この2つの雑音をもとに検出器の感度を計算すると、最小検出可能な重力波パルスの振幅として $h_{\min} = 4 \times 10^{-18}$ 、このときのバンド幅として 1.2 kHz のまわりに 80 Hz が得られる。これ以外の雑音の寄与も計算されるが、これを上の感度の計算に効いてこないように抑えることは現在の技術でもそうむずかしくないと思われる。さらにもしアンテナをヘリウム温度まで冷やす場合には、 h_{\min} として室温と比べて約 1 桁の感度向上が予想される。

現在、東大理学部ではこれまで述べたような原理の重力波検出器のプロトタイプを製作して実験中である。直径 60 cm のアルミ製の円板型アンテナにレーザー干渉計を組み込み基本的な動作と特性の研究を行っているが、ほぼ計算通りの性能が得られている。今後これを発展させて銀河系内モニター用の室温重力波検出器を実現する計画である。

共振型検出器

鈴木 敏 一*

1. 共振型検出器の構成

地上の実験室における共振型の検出器で対象とする重力波は通常数 10 Hz ~ 数 kHz である。検出器の大きさは、精々 10 m 以下であるから、重力波の波長は検出器に比べて十分に大きい。また、地球の重力場は一定で、時空の曲率半径にして約 1 光年であり、このことから、実験室内の一点を原点を取った固有基準座標系における記述を用いて、重力波と検出器の相互作用を Newton 力学的に扱うことが可能になる。重力波は検出器に対して、時間的に変化する潮汐力の外場としてはたらく。

共振型の検出器は、1960 年代に J. Weber が開発して以来今日まで発展を続けており、アンテナとトランスデューサー (以後 TRD と略記) から構成される。アンテナは、質量 M 、共振周波数 $\omega_0/2\pi$ 、有効面積 A_G 、振動の Q 値、温度 T の諸量によって特徴付けられる振動子で、重力波の作り出す潮汐力を受けて振動を起こす。TRD はアンテナと電気系を結合する。アンテナが潮汐力を感じるためには、振動によって、あるモードの質量四重極能率の変化することが必要である。通常そのような重力波に活性なモードのみに着目するので、アンテナの振動を散逸を持った1つの調和振動子として扱う

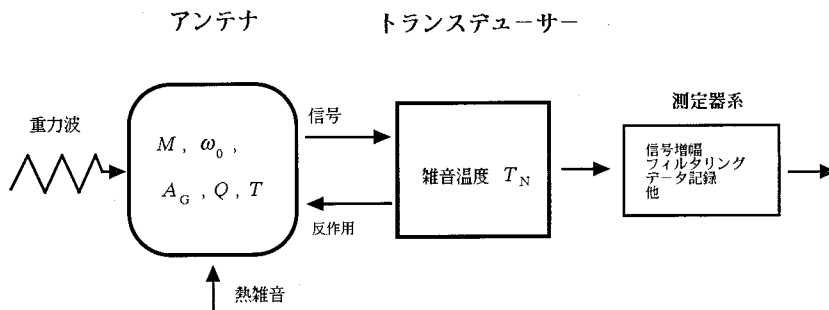


図 1 共振型検出器の基本的構成

* 高エネルギー物理学研究所 Toshikazu Suzuki:
Resonant Mass Detector

ことができる。アンテナには重力波による力の他に、アンテナが有限の温度で散逸を持つための熱雑音力と TRD の雑音力が働くので、検出の限界が存在する。共振型の検出器ではこれらの外力の下にあるアンテナの振動状態を計測することになる。測定対象となる振動の大きさの目安は、アンテナの熱振動のレベルで、 $M=5$ ton, $\omega_0/2\pi=1$ kHz, $T=4.2$ K のアンテナで 2×10^{-17} m の程度である。普通の実験室の環境では、床振動、音響、電磁場、構造体の不安定性等に起源を持つ外来の雑音力が目的とする信号のレベルよりはるかに大きいので、これらの外来雑音は適切な手段により十分に防除されなければならない。

2. 共振型検出器の特徴

周波数領域で見るとき、検出器の伝達関数はアンテナの共振周波数付近に鋭いピークを持ち、これに比べて拡がった TRD の雑音のために、 S/N から見た検出器の帯域幅は共振周波数の周りの比較的狭い範囲に限られる。このため、バースト波や連星中性子星の合体の際に発生する重力波のようにアンテナの緩和時間に比べて短い時間しか持続しない波に対してその波形まで観測するためには、現在のところは十分な情報は得られない。このような波はアンテナにパルスの力を加える。ある時間幅 Δt の間にアンテナの振動状態の変化を検出するとき、 $\Delta t \ll Q/\omega_0$ であれば熱雑音の寄与は $T\Delta t/Q$ に比例する。一方 TRD 雑音の寄与は、 Δt に比例するアンテナへの反作用の部分と、 Δt で平均される部分とがあるために、 Δt を選んで雑音全体の和を極小化できる。 Q の大きな（散逸が小さい）材料で作ったアンテナを極低温に冷却し、熱雑音の寄与を落とすと検出器全体の感度は、TRD 雑音に支配されることになり、重力波からアンテナの受け取るエネルギーをボルツマン定数で割った値が TRD の雑音温度 T_N より小さければその重力波

は検出できない。

これに対して、連続波のようにアンテナの緩和時間に比べて長い時間にわたって持続する波ではアンテナの振動は飽和しており、その周りに雑音による揺らぎが重なっている。連続波のスペクトルはほぼ δ 関数で近似できるので、検出器の出力を長時間にわたって積分することにより、観測の帯域幅を狭めて雑音の寄与を減らしても波の情報が失われることはない。検出限界は重力波の振幅 h で表した場合、 $h \propto [T_{\text{eff}}/Q\Delta t_{\text{obs}}]^{1/2}$ となる。ここに T_{eff} は TRD 雑音も含めたアンテナの有効温度、 Δt_{obs} は全観測時間を表す。この値は Δt_{obs} を増やせばいくらでも小さく出来るが、実際には源の放射の反作用による周波数変化や、地球の運動による周波数の変調が存在し、実験上は $\Delta t_{\text{obs}} \leq 1$ 年の程度である。アンテナを極低温に冷却すれば TRD 雑音が T_{eff} を支配する。連続波は単純な分バースト波等に比べて情報が少ないが、源がはっきり同定可能であること、波が常時存在していることは重要な特徴で、将来十分に検出器の感度が上がった場合には校正用の基準に出来るかも知れない。

背景重力波に対しては、2 台のアンテナの相関を観ることによって、無相関な雑音の寄与を減少させる。この場合 2 つのアンテナの共振周波数が良く合っていることが重要で、検出限界はアンテナの温度と TRD の雑音温度の一次結合に比例する。

3. 現状と将来

表 1 に主な共振型検出器をまとめた。この中で KEK/Tokyo は連続波、他はバースト波を対象としている。アンテナ形状は KEK/Tokyo が捻れ型 (CRAB 60 Hz) と変形ディスク型であるが、他は全てパー型である。現在のバースト検出器の限界感度 $h \sim 10^{-18}$ は、我々の銀河内の超新星爆発に対して期待される h に達しているが、イベントの頻度を考えると、重力波天文学のためにはま

表 1 主な共振型検出器

	アンテナ材料	M (kg)	Q	$\omega_0/2\pi$ (Hz)	T (K)	Transducer	h の検出限界
Frascati	Al 6061	390	2×10^6	1800	4.2	Capacitor+dc SQUID	6×10^{-18}
KEK/Tokyo	Al 5056	74	2×10^7	60	4.2	Capacitor+FET	2×10^{-21}
	Al 5056	135	3×10^7	3900	4.2	Capacitor+FET	2×10^{-23}
LSU	Al 5056	2270	1×10^7	915	4.2	Inductance+rf SQUID	$5 \times 10^{-18} \#$
Maryland	Al 6061	1200	3×10^6	1700	4.2	3 mode Induc.+dc SQUID	$7 \times 10^{-19} \#$
Rome	Al 5056	2270	1×10^7	916	4.2	Capacitor+dc SQUID	7×10^{-19}
Stanford	Al 6061	4800	5×10^6	840	4.2	Inductance+dc SQUID	2×10^{-18}
UWA	Niobium	1500	2×10^8	703	4.2	10 GHz Cavity+MESFET	$4 \times 10^{-18} \#$
Beijing	AILY 4	1300	1×10^4	1600	300	PZT+FET	3×10^{-17}
Guangzhou	AILY 4	2000	1×10^4	1400	300	PZT+FET	3×10^{-17}
Maryland	Al 6061	3000	1×10^5	1660	300	PZT+FET	2×10^{-17}
Rome	Al 6001	3000	1×10^5	860	300	PZT+FET	8×10^{-17}

(# は予定の値)

だ感度が不足している。連続波では、CRAB Pulsar の 60 Hz 成分に対しては、標準的な予想値にまだ達していない。4 kHz の方は、SN 1987A の後に残ったと期待される若いパルサーを狙ったものであるが、パルサーの存在がまだ確定はしていないので、kHz 帯の連続波に対する基礎実験の結果である。

現状より検出限界を下げるために、10 mK 台までのアンテナの極低温化と量子限界の低雑音 TRD の開発が中心課題となっており、Stanford 大や Roma 大が具体

的計画を進めている。

バースト検出器では、このようにして検出限界を下げようと、通常の測定では量子力学的限界のために、 $h_{QL} \sim [\hbar/M\omega_0]^{1/2}/L$ (\hbar : プランク定数, L : アンテナの大きさ) が検出限界の下限となり、1 kHz, 1 ton クラスの検出器では $h_{QL} \sim 10^{-20}$ なので大きな問題であるが、量子非破壊 (QND) 測定法が研究され、 h_{QL} 以下の重力波でも原理的には捕えうることが解っている。

超高安定レーザーの実現へ向けて

中川 賢一*・大津 元一*

重力波がもたらす空間の極微小な歪を検出する重力波検出器には極めて高い感度が要求され、現在のところレーザー干渉計による検出方法が最も有望とされている。しかしこの干渉計に用いるレーザー光源には周波数雑音にして $\delta\nu/\nu \sim 10^{-21}/\sqrt{\text{Hz}}$ 程度の極めて高い周波数安定度が要求され、さらにショット雑音による検出限界から光出力 1 kW 程度が必要とされる。しかしながらこの両方の性能を満足するレーザーは現在のところ実現されていない。そこでこのような超高安定・高出力レーザーの実現方法およびその問題点を考えてみる。

レーザーの周波数安定度を決めるもの

単一周波数で発振しているレーザーからの光は共振器内に混入してくる自然放出によってその位相がランダムな揺らぎを受ける。このため次式、

$$\delta\nu = \Delta\nu_0(2h\nu_0/P_0)^{1/2} \quad [\text{Hz}/\sqrt{\text{Hz}}] \quad (1)$$

で表される周波数雑音が本質的に存在する¹⁾。 $\Delta\nu_0$ はレーザー共振器の共振線幅、 ν_0 はレーザーの周波数、 P_0 は出力パワーを表す。この式よりレーザー共振器の Q 値 ($=\nu_0/\Delta\nu_0$) を高くし、さらに出力パワー P_0 を増大すればより低い周波数雑音を得られる。しかしレーザー共振器内には利得媒質やモード選択素子等があるため Q 値をあまり高くできないため、外部のより高い Q 値の基準共振器を用いて制御する方法がとられる。この時のレーザーの周波数雑音の理論的限界は基準共振器の線幅 $\Delta\nu_r$ と制御に用いる光パワー P_r で決まる光検出器の量子雑音によって決まり、先の (1) 式と同様に、

$$\delta\nu = \Delta\nu_r(2h\nu_0/\eta P_r)^{1/2} \quad [\text{Hz}/\sqrt{\text{Hz}}] \quad (2)$$

によって与えられる。ここで η は光検出器の量子効率を

表す。この (2) 式より先に述べた重力波検出器に必要な条件を求めると、波長 $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ のレーザーを用いた場合には周波数雑音 $\delta\nu \sim 3 \times 10^{-7} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ 程度が必要で、このためには線幅 $\Delta\nu_r = 1.5 \text{ kHz}$ の基準共振器で光パワー $P_r = 10 \text{ W}$ が最低限必要になる。

現在の周波数安定化および高出力化の実現状況とその問題点

先に述べたような高い周波数安定度および高出力パワーを実現できるレーザーとしては、高い励起効率、低雑音、高出力化が可能な半導体レーザー励起 Nd:YAG レーザーが現在、最も有望とされている。このレーザーと線幅 $\Delta\nu_r \sim 1 \text{ MHz}$ の基準共振器を用いて周波数安定化を行い、周波数雑音にして $\delta\nu = 10^{-2} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ 程度が得られている²⁾。また高出力化は、ランブ励起の高出力 Nd:YAG レーザーに注入同期を行うことによって 10 W 以上の単一モード出力が得られている^{3)~4)}。このためさらに線幅の狭い基準共振器を用いれば周波数雑音 $\delta\nu = 10^{-4} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ ($\delta\nu/\nu = 3 \times 10^{-19}/\sqrt{\text{Hz}}$) 程度が、またすべて半導体レーザー励起による Nd:YAG レーザーによって出力数 10 W 程度までは現在の技術の延長上で充分可能と思われる。

しかしこれ以上の安定度および出力向上を実現するためには多くの解決しなくてはならない技術的な問題に直面する。先に求めた基準共振器の線幅 $\Delta\nu_r = 1.5 \text{ kHz}$ を実現するには、共振器長 $L = 10 \text{ m}$ でフィネス $F = 10000$ が必要で、注入する光パワー $P_r = 10 \text{ W}$ の時には内部光パワーは実に 30 kW にも達する。このことから周波数安定化においては、

○高反射率、低損失、高いパワーに耐えられるミラーコーティング

* 東京工大総合理工 Ken'ichi Nakagawa, Motoichi Ohtsu: Ultra Stable Laser