

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、ランプ励起の高出力 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

- ・基準共振器の徹底的な除振
 - ・入射光の共振器モードへのモードマッチング性能の向上
 - ・レーザー光の空間的なモードの安定化およびビーム方向制御
 - ・高い量子効率で高い光パワーで使用できる光検出器の開発
 - ・散乱光, 不必要な反射光の検出器への混入, およびレーザーへの戻り光を極力小さくする
- などの点をこれから解決していく必要がある。

出力パワー向上に関しては, 数 10 W 以上を越えると半導体レーザー励起 Nd:YAG レーザーを用いてもレーザー媒質の熱的な揺らぎや放熱による振動等の影響が無視できなくなり, 周波数およびモードの安定度向上は非常に難しくなると思われる。このため複数のレーザー光出力をコヒーレントに足し合わせる方法が有望である⁵⁾。これを実現するにはレーザー間の正確な周波数・位相トラッキングや正確なモードマッチングおよびビーム方向制御を行う必要がある, 先の周波数安定化と同様の問題を解決する必要がある。

今後の展望

超高安定レーザー実現に向けて解決しなくてはならない問題点の多くは重力波検出器である干渉計においてもあてはまる共通の問題である。このためレーザーと干渉計を独立に考えることはあまり意味がなく, これからは

両者を一体のものとして基本設計をする必要があるだろう。これは例えば基準共振器およびレーザーまでもを干渉計の一部に取り込んだ構造なども考えられる。こう考えるとこの重力波検出用干渉計の実現は巨大な超高安定レーザーの実現と言っても良いだろう。またこの干渉計は 10^{23} 個もの光子を 1 ms 近くの時間にわたって共振器に閉じ込める事に相当し, 光ストレージリングと言えるかも知れない。この様な観点から考えるとこれから必要なのは光の状態をもれなく測定してかつ任意に制御するための理論および技術であろう。このような問題点が解決されて重力波検出器が実現されればこれは単に物理の基本法則の検証と言う本来の目的だけでなく, 量子光学, 超精密計測, 光デバイス等の幅広い分野の発展に多く貢献するだろう。

参考文献

- 1) A. Schawlow, C. Townes, *Phys. Rev.*, 112 (1958), 1940-1949.
- 2) D. Shoemaker, A. Brillat, C. N. Man, O. Cregut and G. Kerr, *Opt. Lett.*, 14 (1989), 609-611.
- 3) C. D. Nabors, A. D. Farinas, T. Day, S. Y. Yang, E. K. Gustafson and R. L. Byer, *Opt. Lett.*, 14 (1989), 1189-1191.
- 4) O. Cregut, C. N. Man, D. Shoemaker, A. Brillat, A. Menhert, P. Peuser, N. P. Shmitt, P. Zeller and K. Wallmeroth, *Phys. Lett. A*, 140 (1989), 294-298.
- 5) G. A. Kerr and J. Hough, *Appl. Phys. B*, 49 (1989), *Appl. Phys. B*, 49 (1989), 491-495.

高出力半導体レーザー励起固体レーザー

植 田 憲 一*

重力波検出用干渉計のための高安定レーザーに半導体レーザー励起の Nd:YAG レーザーを用いることを考えている。レーザーはコヒーレントな光源で可干渉性が高いとされている。しかし, 市販の He-Ne レーザーを 2 台持ってきて, 互いの光ビートを観測しようとした場合はどうなるだろうか。多分, 光ビートの周波数は非常に高周波で, なおかつビート周波数が激しく変動しているのを観測するに違いない。通常のレーザーはそんなに安定なものではないのである。重力波天文学では 10^{-9} ラジアンという極微量の位相変化を測定する必要があるという。そのためには kW 級の出力を超高安定に発生するレーザーの開発が必須となる。このようなレーザーはかつて人類が開発に成功した超高安定レーザーの出力を

1 万倍に増大し, それによって量子雑音限界を 100 倍以上も改善することによってはじめて可能になる。現状の技術の水準を前提とした開発計画は不適當で, 今後の技術の動向をにらみながら研究を進行することが重要である。

近年, 固体レーザーのルネッサンス, 文芸復興が多方面で主張されるようになってきた。新しい波長可変固体レーザー材料が開発されたことも一因ではあるが, なんといってもその原動力は半導体レーザーの高出力化と固体レーザーの励起への応用にある。Nd:YAG レーザーは希土類のネオジウムイオンを発光中心にしたレーザーで励起のためには, 809 nm 近傍の吸収帯を用いる。幸いなことに 809 nm は GaAlAs 系の高出力半導体レーザーにもっとも適した波長である。半導体レーザーは接合面の微少な体積に電流, レーザー光を閉じ込めることで, 電気入力からレーザー光出力への変換効率が 50%

* 電通大 レーザー極限技術研究センター Kenichi Ueda: High Power LD-pumped Solid-state Laser