

いうと、直接干渉の方が技術的に難しい代わりに構成が単純で、感度が高く、さらに光のリサイクリングが可能で、構成が単純であることは、重力波天文台の実現には重要なことです。

光源としては、最初 LIGHTWAVE 社 (米) の出力 300 mW の半導体励起 Nd:YAG レーザー (波長 1.06 μm) を使います。このタイプのレーザーは、出力 1 W が限界であることがわかっていますが、その波長安定性は抜群で、市販されている状態で線幅 5 kHz 以下を誇っています。もちろん、重点領域では光源開発も一つの柱となっていますから、これに取って替わる光源の登場を期待しています。

光学部品としては、高反射・低損失ミラー、ビームスプリッター、アイソレーター、光変調素子等があります。ミラーに関しては、現在フィネス 10,000 以上の FP が市販されているにもかかわらず、単体で高性能なものは日本では手に入れることができません。これについては、国際協力を期待しています。光変調素子に関しては、波面の乱れを極力少なくし、損失も少ないものが絶対必要です。できれば、電気的な変調素子を使う代わりに、ミラーの弾性を利用した機械変調を取り入れることを一つの目標にしています。

周辺装置としては、真空排気系と、データ記録・解析装置があります。真空槽は、表面処理されたアルミカステンレスが適していますが、重量や熱勾配の点ではアルミの方が優れています。データ記録・解析装置は、リアルタイム OS を搭載した UNIX ワークステーションと

VME バスで接続された AD コンバータの組合せが良いと思われ、さらに、正確なタイミングによるデータ取得を目指して、天文保時室の原子時計に接続される予定です。

4. 期待される成果

まず、どれくらいの感度が 20 m FP で得られるかを計算してみます。仮定として、レーザー光源の周波数雑音や出力雑音、地面振動、電気系の雑音等が充分低減化され、光の持つ原理的な雑音、ショットノイズが実現できたとします。FP 型干渉計の感度は、重力波の振幅 h で表して、

$$h_{\min} \sim \frac{1}{4IF} \sqrt{\frac{2\pi\hbar\lambda c}{P} \Delta f}$$

ですから、レーザーパワー P を 300 mW、フィネス F を 8,000、バンド幅 Δf を 1 kHz とすると、 $h_{\min} \sim 10^{-19}$ となります。つまり、我々の銀河団で起きる超新星爆発 ($h \sim 10^{-18}$) ならば、必ず検出できる感度というわけです。さらに、SN 1987A の距離 (60 kpc) であれば検出可能な感度です。

また、重力波検出器は極限技術の集積のようなものですから、開発途中で生み出される副産物も多いでしょう。超高安定・高出力レーザー、光検出器、精密光学部品等々、現在考えられるものだけでもかなりの数になります。

最後に、多くの方々のご協力をお願いします。

100 m デイレーライン型レーザー干渉計建設計画

河 島 信 樹*

10 m クラスのアンテナの感度がショットノイズに近づいて世界的に km クラスのアンテナ建設が全く夢物語ではなく少し実現への兆しが見えてきた3年ほど前の国際会議で 100 m クラスの必要性を主張したところ、なぜ、そのような中途半端なものをつくるのかと多くの研究者から批判された。「それで重力波が検出できる可能性は非常に少ないのに」という。しかし、それから3年間の 10 m クラスのアンテナの技術的な進歩を見る限り、それほど、楽なものではない。このごろ、ようやく同種の 100 m クラスの提案が他の国からも出てくるようになってきたし、また、現在 km クラスを推進しよう

としているグループの中にも、「いや、本音は 100 m クラスをやってから km に進みたいよ。しかし、それでは、重力波は受からないだろうとして予算が通らないからね。」と本音を明かすようになってきた。

100 m アンテナの位置づけは、後に述べるように、それですぐに重力波が世界で初めて受かることを主目的にしているものではない。現在の 10 m クラスのアンテナから、重力波が受かると予想されている km クラスの本格的な重力波アンテナへの段階的な発展の中間ステップであることが重要である。

100 m デイレー・ライン型重力波アンテナ (TENKO-100) は、宇宙科学研究所で現在稼働している 9.7 m 102 回折り返し型のレーザー干渉計 10 m 重力波アンテナ

* 宇宙科学研究所 Nobuki Kawashima: 100 m Delay-Line Interferometer

(TENKO-10) (図1=表紙)を基礎にして高エネルギー研究所, 愛媛大学, 都立大学などの研究者と協力して行われる。

TENKO-10の建設は, 1984年から始められた。当時, すでに10mクラスのアンテナとして, カルフォルニア工科大学, マックスプランク研究所, グラスゴー大学で実験が始まっていたが, まだ, わが国はもちろんのこと, 世界的にも, レーザー干渉計に対する関心は薄かった。30cm干渉計からはじめ, 80cmと段階的に技術を積み重ね, 1986年から10mの重力波アンテナTENKO-10の本格的な建設を始めた。Max Planck研究所のR. Schilling博士の協力を得て, 1989年には, 上記世界の10mアンテナの仲間入りを果たすことができた。

丁度, TENKO-10建設をほぼ完了したところから, 世界的にレーザー干渉計の大型化に対する実現性の期待が高まり, これに呼応してわが国でも重点領域のグループがつくられ, 急にわが国の重力波アンテナ研究が, レーザー干渉計一色になってしまった。

現在ある10mクラスのアンテナで検出可能な重力波は, 例えば我々の銀河系の中で超新星爆発が起きた場合で, その可能性は, 数10年ないし100年に1度位だと考えられている。重力波がなんとか地上で検出されるためには, 少なくとも1年に4~5回の検出の必要性が必要で, そのためにはアンテナの感度として $h=10^{-21}$ が必要と考えられている。

これを実現するためには i) アーム長を数kmまでに大きくする ii) ショットノイズで決まる干渉計の感度をあげるため, レーザー発振器の出力をあげる。また, 干渉計内部でのレーザー光の強度をあげるために RECYCLINGの技術を確立する iii) レーザー干渉計の通常感度の量子限界を上げる SQUEEZINGの技術を適用することが主要な課題である。特にアーム長を長くすることは, i) アメリカ (Caltech-MIT 連合) [LIGO] ii) イギリス (Glasgow 大学)-西ドイツ (Max Planck 研究所) 連合 [GEO] iii) イタリア-フランス連合 [VIRGO] などが, 総額100億円から300億円計画として予算要求がなされている。

世界的にも大型化の実現の可能性が少し見えてきたのは喜ばしいことではある。しかし, 技術的には, まだ10mクラスから一気に数kmクラスと2桁以上のジャンプをするほど確立されたものではない。一般的に, 大型化が技術開発の柱である場合に, 一挙に2桁のスケールアップは, エンジニアリング的には大きなリスクがある。とくに10mクラスでまだ, 原理的ノイズであるショットノイズまでに原因不明のノイズがどこ装置にも存在し, これがもしkmクラスにそのまま残ったら大

表1 TENKO-100 諸元

レーザー	タイプ	アルゴンイオンレーザー
	波長	5145 Å
	有効パワー	500 mW
	モード	シングルモード
	付属部品	エタロン (シングルモード用) PZT・ボッケルスセル (周波数安定化用)
ファイバー		偏波面保存型
主干渉計	タイプ	ディレーライン型
	アーム長	100 m
	折り返し回数	100
	全光路長	10 km
	計測方法	変調ダークフリッジ方式
ローカルコントロール	テストマス	ミラー自身
	位置検出	LED・光検出器
	駆動系	磁石・コイル
周波数安定化	レファランス (粗)	フアブリペロー (60 cm)
	レファランス (精)	ディレーライン (1 km)
	到達安定度	$10^{-17} \text{ Hz}^{-1/2}$ (kHz 領域) 以下
真空装置		ターボ・ポンプ イオン・ポンプ

変なことになる。

TENKO-100 (表1)は, 将来のkmクラスの本格的な重力波アンテナの建設を照準において, 技術的に段階的な開発を行うことを目的として建設するもので, 今回の重点領域の大きな柱になっている。

TENKO-100建設にあたって特に力点を置くところは, 10mクラスから, kmクラスへの本格的な重力波アンテナへの橋渡しとして (i) レーザー干渉計重力波アンテナの大型化に欠かせないスケールアップの確立 (ii) 長時間安定に作動するレーザー干渉計である。この2つは, これまで10mクラス・レーザー干渉計に欠けていた大きな課題である。この開発に主要な役割をもって成果を上げてきた人たちが, 実験室での小さな物理実験と同じセンスから脱却できないことが, 一つの要因であるが, これから, 100億円以上の大プロジェクトを遂行するには, この2つは, 是非とも確立しなければならないのである。

重点領域でのTENKO-100の開発のスケジュールは, 図2に具体的な作業と感度目標を示したように

平成3年度: 現在の10mアンテナを現在宇宙科学研

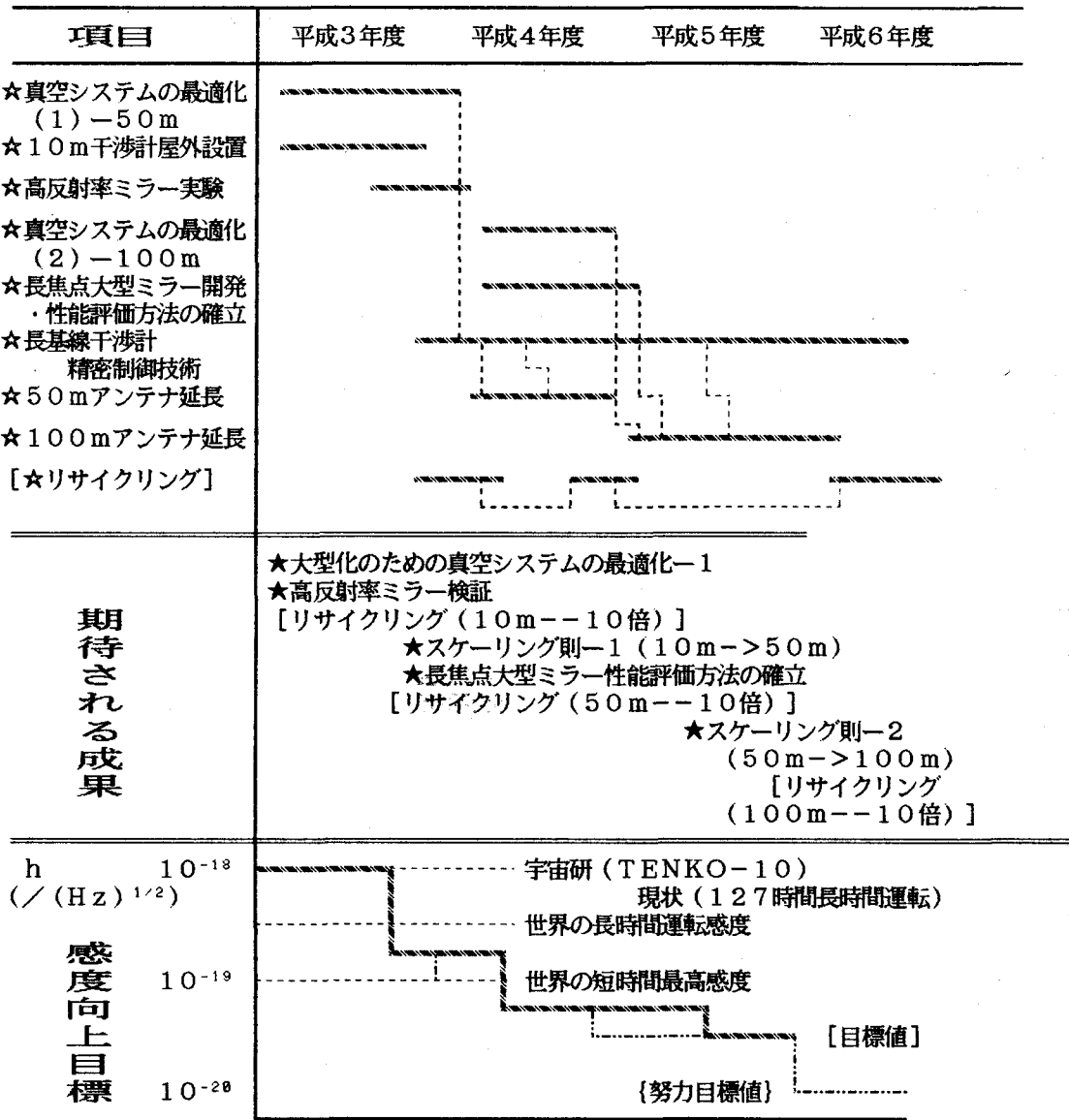


図 2 TENKO-100 開発課題とスケジュール

究所の3階の実験室から、屋外に設置し、高反射率ミラーを使用して感度を上げる

平成4年度: 50m アンテナに拡張する

平成5~6年度: 100m アンテナを完成させる

ことにより、感度 $h=3 \cdot 10^{-20}/(\text{Hz})^{1/2}$ [努力目標として $10^{-20}/(\text{Hz})^{1/2}$] を実現しようとするものである。

わが国では、まだ、km クラスの本格的なアンテナが実現する見通しは厳しい。確かにレーザー干渉計そのも

のの将来に関しても、これまで共鳴型で頑張ってきた人たちがこぞってレーザー干渉計へ鞍替えるほど甘いものではない。しかし、平成5~6年度 (1994~5年) に TENKO-100 が完成すれば、それから数年間は世界をリードして次のステップの礎を築くことができる。100m クラスをクリアして初めて重力波天文学への道が開かれるのである。