

## 日本真空学会企画シンポジウム「重力波観測用巨大干渉計の設計と建設」

筑波大学数理物質系 佐々木正洋

一般相対性理論の検証となる「重力波」の直接観測を目指した文部科学省の最先端研究基盤事業「大型低温重力波望遠鏡 (KAGRA)」の建設がはじまった。KAGRA は、超高真空中に設置された、長さ 3 km の巨大な干渉計であるが、このシンポジウムは、KAGRA 建設に関わる要素技術を紹介し、重力波望遠鏡についての理解を深めることを目的としている。

重力波検出というと科学ロマンの対象として捉えがちであるが、ここで示されたものは、究極の精密計測を実現させるために集結させた、現在実現しうる最高の極限計測技術であった。応用物理学の視点から極めて興味深いものである。以下、個々の講演について簡単に紹介する。

はじめに、東大宇宙線研の三代木伸二氏から、イントロダクトリーとして事業の概要が紹介された。本研究では、極めて質量の大きい連星中性子星の合体などから放出される重力波を直接検出する。重力波は時空の歪みが伝搬する現象で、空間長さの変化として観測される。連星中性子星の合体は、一銀河当たり 10 万年に 1 回しか発生しないと見積もられているため、約 10 万個以上の銀河を内包する 7 億光年の範囲を観測対象にすることにより、年一回以上の重力波イベントの観測を目指す。このとき重力波歪み感度として  $3 \times 10^{-24} [1/\sqrt{\text{Hz}}] @ 100 \text{ Hz}$ 、あるいは歪み量で  $10^{-22}$  の究極的な精密長さ計測が求められる。これを基線長 3 km の巨大な干渉計で実現させる。世界各国が国家プロジェクトとして推進している国際重力波観測網の一角を担うもので、平成 22 年度から事業がはじまり、現在、岐阜県の旧神岡鉱山地下に建設中である。

次に、東大理の麻生洋一氏から、ここで用いられる光学設計技術が紹介された。重力波は、その四重極の性質から直交する二方向空間での差動の伸縮を与える。これを直交する 2 つの腕を往復する光の位相差として検出する (マイケルソン干渉計)。ただし、単純なマイケルソン干渉計だけでは十分な精度は得られず、マイケルソン干渉計の各腕を Fabry-Perot 共振器に置き換え、さらに、パワーリサイクリング技術、resonant sideband extraction 技術を導入する。これで、量子雑音の周波数依存性を目標とする重力波信号に合わせてチューニングする。

次に、高エ研の齊籐芳男氏から、この巨大な干渉計を収める超高真空ダクトについて紹介された。干渉計の光路上にある残留気体によってレーザー光が散乱されるが、気体分子密度の揺らぎがノイズになる。これを低減するために干渉計を超高真空 ( $10^{-7} \text{ Pa}$ )

に保たなければならない。また、壁で散乱される光の影響を無くすために、十分な内径が必要で、ダクトの内径は 796.8 mm とした。すなわち、KAGRA は巨大な超高真空装置である。道路を運べる最長の長さである 12 m のステンレス鋼管ダクト 500 本に分割され、ガスケットを介しフランジにより接合される。ダクトは予め 200°C でベークされており、1000 L/s の排気速度をもつ 30 個のイオンポンプで排気した場合、500 時間で所定の圧力に到達すると予想されている。

次に、東大宇宙線研の高橋竜太郎氏から干渉計を構成している反射鏡の防振システムが紹介された。神岡の地盤は安定しているが、それでも地面からの震動を大幅に抑制させる必要がある。観測対象としている 100 Hz 辺りの振動を十分に抑制させるため、防振台の共振周波数を 0.1 Hz にする。大きくすれば共振周波数を下げることは容易であるが、限られた空間の中に収めるため、ここでは、倒立振り子式が採用された。

KAGRA では、独自の技術として、ヘリウム温度に冷却した反射鏡（低温鏡）が用いられる。次に、東大宇宙研の内山隆氏が、低温鏡に関わる低温技術について報告した。Fabry-Perot 共振器を用いているため、反射鏡での熱振動が計測に大きな影響を及ぼす。これを低温化する効果は大きいはずであるが、低温化によって装置が複雑化しノイズはむしろ増える。温度を下げずに苦勞を惜しまず理論限界まで低ノイズ化した後に、はじめて低温化の効果が実証できた。基本に立ち帰る事の重要性を思い知らされた、教訓的な報告であった。

最後に、光源となるレーザーシステムについて、東大工の大前宣昭氏から報告された。光が強いほど相対的に信号強度の揺らぎが減少するが、逆に強すぎると輻射圧による雑音が増大するため、レーザー光強度に最適値が存在する。ここでは、その最適値である 100 W のレーザー光が照射される。これは極めて高い照射強度であり、低損失化の技術が重要となる。また、安定した計測を実現するため、レーザー光を高度に変調させ、フィードバックによる安定化が図られる。実に、複雑で緻密な装置構成となっている。

本プロジェクトは、距離を高精度で計測するという比較的単純なテーマでの装置開発であるが、目指しているものが究極的なものであるため、全ての部分について、原理に立ち帰った再構築が求められ、実際、それを実践していた。筆者は、この分野の専門ではないが、長大な科学叙事詩をみるようで豊かな知的興奮を覚えた。