



記載の記事は宇宙線研ホームページ (<http://icrsun.icrr.u-tokyo.ac.jp/index-j.html>) からでも御覧になれます。

研究紹介 1

ダークマター・アクシオンの等曲率揺らぎと宇宙背景輻射

川崎 雅裕

1. アクシオン

素粒子の強い相互作用を記述する量子色力学 (Quantum Chromodynamics: QCD) において、そのラグランジアンの中にCP対称性を破る項が一般には存在することが知られている:

$$L = L_0 + \frac{\theta}{32\pi^2} F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu} \quad (1)$$

ここで、 L_0 はラグランジアンの中でCP対称性を保存する部分で、 $F_{\mu\nu}$ はグルーオンの場の強さのテンソルで $\tilde{F}^{\mu\nu}$ はその共役テンソルである。また、 θ は理論のパラメーターである。空間反転に対して $F_{\mu\nu}$ は符号を変えないが $\tilde{F}^{\mu\nu}$ は符号を変えるので上の項がCPを破っていることが分かる。少し、理論の複雑な話になってしまったが、要はQCDにおいて、理論的にはCPを保存する理由は無いということである。ところが、中性子の双極子モーメントの測定実験からQCDは非常に良くCP対称性を保存していることが分かっている、上のラグランジアンに現れたCPの破れの大きさを表す θ というパラメーターに対して

$$\theta < 10^{-9} \quad (2)$$

という厳しい制限が付けられている。このように、

QCDにおいてCPが保存することを自然に説明することができないというのが、QCDのストロングCP問題である。

この問題に対して解決方を示したのがPecceiとQuinnの1977の仕事である。彼らはCPの破れの大きさを表すパラメーターである θ を $U(1)$ 対称性を持つスカラー場の位相の自由度に対応させる、つまり、 θ をスカラー場という力学変数とみなしたのである。新しく導入された $U(1)$ 対称性はあるスケール F_a で自発的に壊れその際に南部・ゴールドストーン粒子としてアクシオンが現れるのである。ここで登場したスカラー場をPQスカラー場 (Ψ_{PQ}) と呼ぶことにすると、アクシオン場 (a) との関係は

$$\Psi_{PQ} = |\Psi_{PQ}| \exp(i\theta) \simeq F_a \exp(ia/F_a) \quad (3)$$

のように書ける。

アクシオンはQCDのスケール ($\sim 200\text{GeV}$) よりずっと高いスケールでは質量の無い粒子と考えるが良いが、QCDのインスタントン効果と呼ばれる非摂動的な効果で質量を獲得し、アクシオン場のポテンシャルは図1のようになり、 $a = 0$ で最小値をとる。 $a = 0$ は $\theta = 0$ に対応し、したがって、CPが保存するのである。また、アクシオンの質量は

$$m_a = 0.62 \times 10^{-5} \text{eV} \left(\frac{F_a}{10^{12} \text{GeV}} \right)^{-1} \quad (4)$$

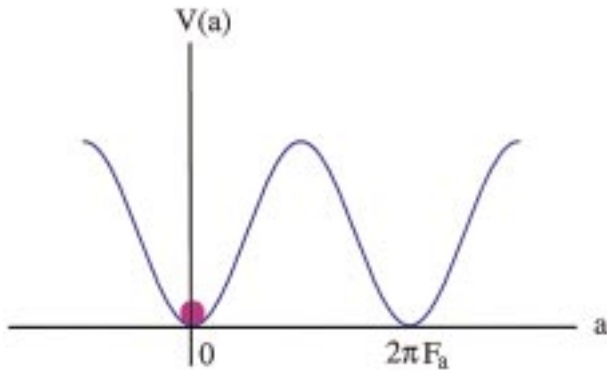


図1：アクシオン場のポテンシャル

2. アクシオンに対する制限

アクシオンの質量・他の粒子との相互作用の強さは基本的には Peccei Quinn スケール F_a だけで決まり、その逆数に比例する。加速器実験、星の冷却の議論、宇宙論から F_a は厳しく制限され、許される F_a の値の範囲は

$$10^{9-10} \text{ GeV} \lesssim F_a \lesssim 10^{12-13} \text{ GeV} \quad (5)$$

上の制限の下限はアクシオンが超新星1987Aの中心のエネルギーを星の外に持ち逃げするために神岡・IMBで観測されたニュートリノが作られないという議論からくる制限であり、制限の上限は宇宙におけるアクシオンの密度が大きくなりすぎることからくる制限である。

特に、Peccei Quinn スケール F_a が許される上限に近い場合、宇宙の全密度を担うほどのアクシオンが存在することになり、宇宙物理の大問題の一つであるダークマター問題がアクシオンによって解決される可能性がある。そのような観点からわれわれの銀河のハローにあるアクシオンを地上で観測しようという試みが日本・アメリカで行われているが、残念ながら今のところアクシオンは見つかっていない。

3. インフレーション宇宙と密度揺らぎ

現在の宇宙論では、宇宙のごく初期にインフレーションと呼ばれる宇宙のサイズが指数関数的に増大する時期があったということが信じられている。このインフレーションによって標準ビッグバン宇宙モデルにおける様々な困難、たとえば、なぜわれわれの宇宙は非常に平坦であるか、あるいは、宇宙背景放射はなぜ非常に高い精度で等方的なのかといった問題が自然に解決されるのである。

インフレーション宇宙モデルではインフレーション中のスカラー場の量子揺らぎを基にして宇宙の密

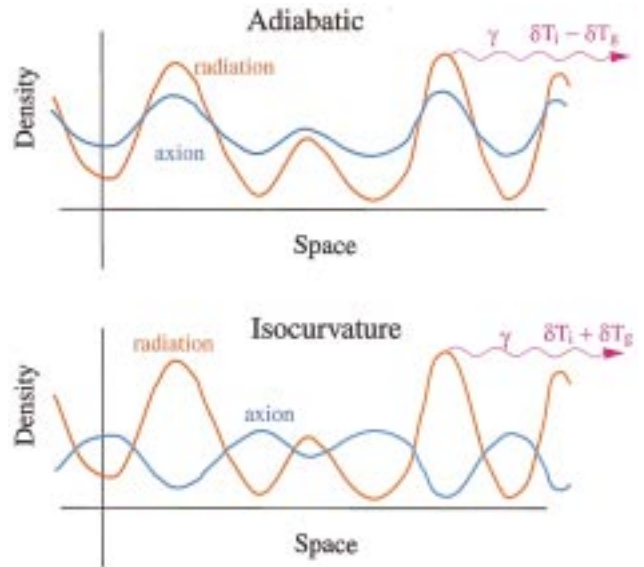


図2：断熱揺らぎと等曲率揺らぎ

度揺らぎを生成することができる。この密度揺らぎが重力不安定性により成長し、銀河や銀河団などの宇宙の構造になったと考えられている。この揺らぎの生成メカニズムは標準宇宙モデルには存在しないものでインフレーション宇宙モデルの大きな利点である。実際、NASAのCOBEという衛星が密度揺らぎの存在の証拠となる宇宙背景放射の非等方性を初めて発見し、そのスペクトルがインフレーション宇宙モデルの予言と合っているを示した。

ところで、密度揺らぎのは2つのモードがあることが知られている。1つは断熱揺らぎ (adiabatic fluctuation) と呼ばれるモードで、図2のように放射 (フォトン) と物質 (ダークマター) が同じように揺らいている、つまり、放射の密度が高いところは物質の密度も高くなっている。一方、もう1つの揺らぎのモードである等曲率揺らぎ (isocurvature fluctuation) は放射と物質の揺らぎがお互いに打ち消し合って全密度が揺らがないようになっている揺らぎである。通常インフレーション宇宙でインフレーションを起こしているスカラー場 (インフラトン) の量子揺らぎから作られる密度揺らぎは前者の断熱揺らぎである。

4. アクシオンの等曲率揺らぎ

インフレーション宇宙でアクシオンが存在するとどうなるだろうか。インフレーション中アクシオン (a) もインフラトンと同様に量子揺らぎを持っている。その大きさは

$$\delta a = \frac{H}{2\pi} \quad (6)$$

ここで、 H はインフレーション中のハッブルパラメーターである。このとき注意すべきことはアクシオンは質量を持っていないのでアクシオンの揺らぎは宇宙の密度揺らぎには寄与しないということである。アクシオンはインフレーションが終わって宇宙の温度が1GeVぐらいになったときQCDの効果で質量を獲得し、インフレーション中に作られたアクシオン場の揺らぎはアクシオンの密度揺らぎとして意味を持つようになる。しかし、元々アクシオンの揺らぎは宇宙の密度揺らぎに寄与しない揺らぎであったため質量を持ったあともエネルギー保存則からアクシオンの密度揺らぎは輻射の密度揺らぎと相殺されるように作られる。つまり、アクシオンの量子揺らぎ起源の密度揺らぎは等曲率揺らぎなのである。このアクシオン密度揺らぎの大きさ ($\delta\rho_a$) はインフレーション中のハッブルパラメーターとアクシオン・スケール F_a できまり

$$\frac{\delta\rho_a}{\rho_a} \sim \frac{H}{F_a} \quad (7)$$

であたえられる。

もちろん、通常のインフラトンの量子揺らぎ起源の断熱揺らぎも存在するので、結局アクシオンが宇宙のダークマターになっているとすると等曲率揺らぎと断熱揺らぎの両方の揺らぎのモードが混じった揺らぎを持つことになる。2つのモードのどちらが効くかはインフレーションモデルに依存するが、等曲率揺らぎと断熱揺らぎの比を α というパラメーターで表すことにする、つまり

$$\alpha \equiv \frac{(\text{等曲率揺らぎ})^2}{(\text{断熱揺らぎ})^2} \quad (8)$$

5. 等曲率揺らぎの観測

アクシオンの等曲率揺らぎが存在する宇宙の構造形成に大きな影響がある。それは等曲率揺らぎが生み出す宇宙背景輻射の非等方性が断熱揺らぎに比べて大きいことが原因である。このことは次のようにして理解できる。断熱揺らぎの場合には密度の高いところから放出されるフォトンの温度も高い(図2)。しかし、フォトン重力ポテンシャルの深いところからでるために重力による赤方変位を受けて温度が下がり元々の温度の高さをうち消す方向に働く。一方、等曲率揺らぎの場合、密度の高いところから放出されるフォトンの温度は低くさらに重力による赤

方変位を受けて温度が下がるために非常に大きな温度揺らぎが生まれるのである。

したがって、COBEによる温度揺らぎの観測値に合わせると等曲率揺らぎは断熱揺らぎに比べて物質の揺らぎが小さくなるのである。そのため、等曲率揺らぎと断熱揺らぎの比を α が大きすぎると密度揺らぎが小さくなりすぎて宇宙の構造形成が困難になる。しかし、適当に等曲率揺らぎが混ざっていると図3にみられるように理論的に予言されるパワースペクトル ($P(k)$: 密度揺らぎのフーリエ分解の2乗) 断熱揺らぎだけの場合よりも良く観測を再現しているようにみえる。

さらに、上で述べた理由により宇宙背景輻射の非等方性スペクトルは等曲率揺らぎと断熱揺らぎでは大きく異なる。温度揺らぎのスペクトルは天空上の温度揺らぎを球面調和関数で展開してその係数 C_ℓ で表されるが、図4で見られるように断熱揺らぎでは $\ell \sim 100$ に大きなピークがあるが等曲率揺らぎに

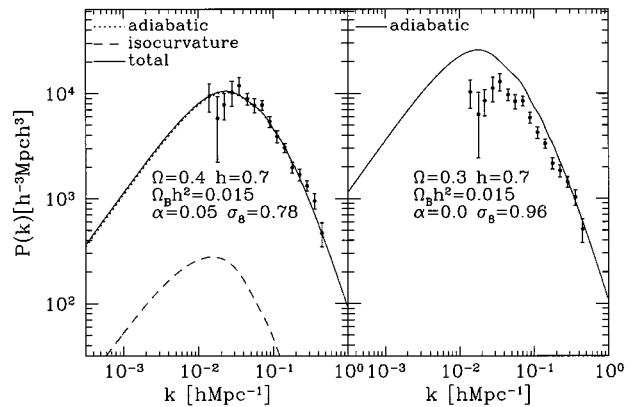


図3：等曲率揺らぎが混じったパワースペクトル

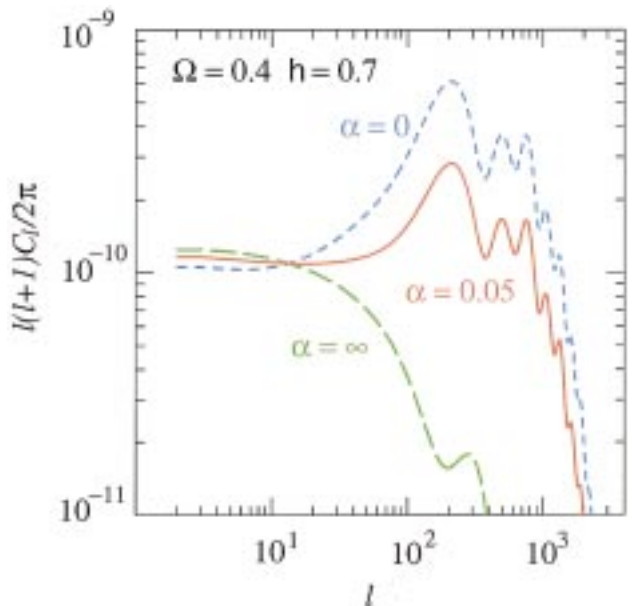


図4：宇宙背景輻射の非等方性スペクトル

はそのようなピークは見られない。したがって、等曲率揺らぎが混じっているとピークが低くなるということから観測的にテストすることができる。COBEで計られているのは $\ell \sim 10$ の温度揺らぎであるが、近い将来打ち上げが計画されているMAPという衛星はCOBEに比べてずっと小さな角度スケール(大きな ℓ)での温度揺らぎを測定することができ(図5)、等曲率揺らぎの存在が確かめられる可能性がある。

6. まとめ

アクシオンがインフレーション宇宙に存在してダークマターになっていれば通常考えられている断熱揺らぎとは異なる等曲率揺らぎを生み出し、それが宇宙の構造形成や宇宙背景放射の非等方性スペクトルに大きな影響を与えることを示した。現在、ダークマター・アクシオンを地上で検出しようとする実験が行われているが、等曲率揺らぎの存在が近い将来温度揺らぎの観測から確かめられれば、他に等曲率揺らぎを作る有力な候補がないことから、間接的にアクシオンの存在を示唆することになると期待される。

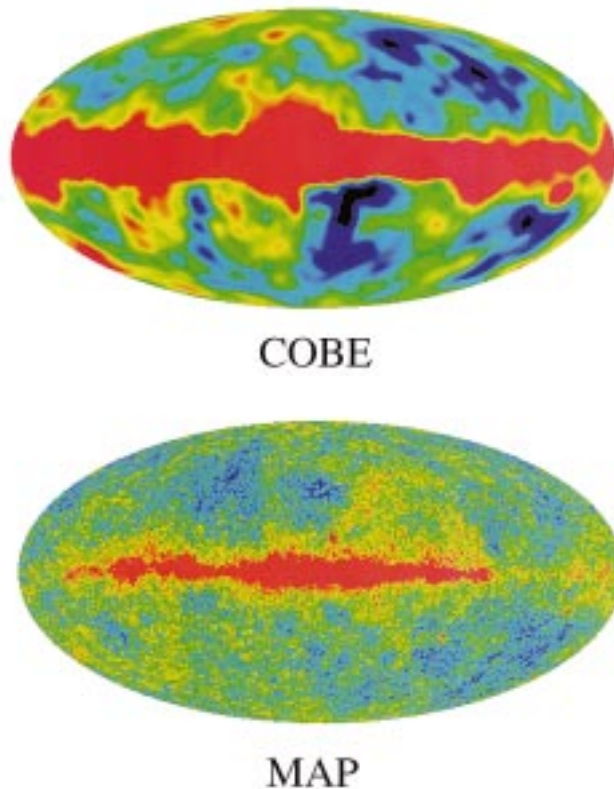


図5: COBEとMAPによる温度揺らぎの全天マップ(MAPは予想図)

研究紹介2

低温重力波望遠鏡計画の現状

Large scale Cryogenic Gravitational wave Telescope

黒田和明

1. はじめに

21世紀初頭には、世界で3つのkmスケールレーザー干渉計(LIGO、4km、2基及びVIRGO、3km)並びに2つの中規模レーザー干渉計(GEO、600m及びTAMA、300m)が近隣の銀河系で起こる重力波イベントを観測するために運転されているはずである。これら検出器の感度は、鏡の位置で 10^{-17} mといった微小変位を検出できるものであるが、これでもまだ2重中性子星合体の信号を捉える確率は低く、一月に数個の割合というにはほど遠い。このため、さらに高い感度を達成できる計画が話題に上っている。特に米国のLIGO計画では、現在建設中の検出器が2002年に完成し2年の観測を遂行した後に施す改善策などを立案している。日本の重力波グループは、TAMA(国立天文台に建設中)で培った技術蓄

積と現在手にしている最高の技術を駆使することにより、それに匹敵するか上回る感度の検出器を実現できる段階に達した、と考えられる。ここで計画している3km基線長の干渉計は、TAMA干渉計の構造を継承し、他のどこよりも高出力のレーザーを適用し、レーザー鏡を極低温に冷却し、これを神岡鉱山の地下深い静かな場所に設置する、というものである。これらの特徴は他の計画にはないもので高い感度と安定性で観測が可能できると期待される。この計画を推進するため、TAMAに結集した研究者を中心に計画推進のためのグループを組織しつつある。この計画の全容については、ICRRニュースの特集号ですでに報告されているので、ここでは、計画を概観した後、高エネルギー加速器研究機構(KEK)低温工学センターと共同で進めている低温鏡技術の開発と見通しについて述べる。

2. 計画概要

重力波の直接検出には、強い重力場の下でのアインシュタインの一般相対性理論の検証が初めてなされる物理的意義、並びに、重力波でしか観測できない天文現象を捉える新しいツールの確立という意義がある。光の望遠鏡は、物質に覆われた銀河中心や物質に阻まれた遠方の銀河を観測しにくい。重力波では途中の物質の有無に関わらず重力波イベントを観測できる。また、感度の距離スケールがリニアであることは、遠くのイベントを見るのに有利である。雑音のない理想的な検出器が3台あれば、一般相対性理論の枠内では重力波源の位置が完全に決まる。しかし、雑音と指向性により現実的には少なくとも4台の同等な感度の検出器が必要とされる。現在有力なターゲットとして考えられている2重中性子星の合体では、観測波形から中性子星の質量などの力学的なパラメーターが算定され、高い精度で合体が起こった距離を推定できる。

TAMAで開発される技術は、外国で目標とされる技術レベルと同程度のレベルを目指している。これが完成するとアンドロメダ星雲でのイベントを $S/N = 3$ (当初 $S/N = 10$)で観測できる。しかし、この発生イベントは千年に1回にも達しないと予想されており、天文学として意味のある観測を行うにはさらなる感度向上が必要である。そこで、我々はTAMAの基線長を一桁スケールアップし、かつ、レーザー鏡の低温化を盛り込んだkmスケールの低温鏡干渉計計画(LCGT)を本年2月に提案した。本計画LCGTの目標は、LIGOの第1期計画やVIRGOを1桁以上凌ぐ感度を達成し、観測を行うことである。2重中性子星合体のレートは、我々のような銀河あたり 10^6 年に1回と見積もられている。銀河の分布は、1Mpcあたり1個であるから、半径200Mpcまでをカバーすれば、1月に2.5個の割合で検出が可能となる。この距離は、乙女座銀河団までの距離20Mpcの10倍の距離であり、米国LIGOの第1期計画で目標とされる感度より10倍高いところに位置する。

本計画では、感度そのものを向上させることに第一の重点を置き、TAMAで開発される技術を向上させ、かつ、確実に感度を上げるための低温化技術を導入することを前提に、2002年に完成見込みのLIGOの第1期感度を10倍程度向上させる感度を目標とする。この計画に必要な未達成の技術は、レーザー光源の高出力化技術及び鏡懸架系の低温化技術である。さらにオプションとして信号リサクリングや可変性の狭帯域化による高感度化の技術などにも意欲的に

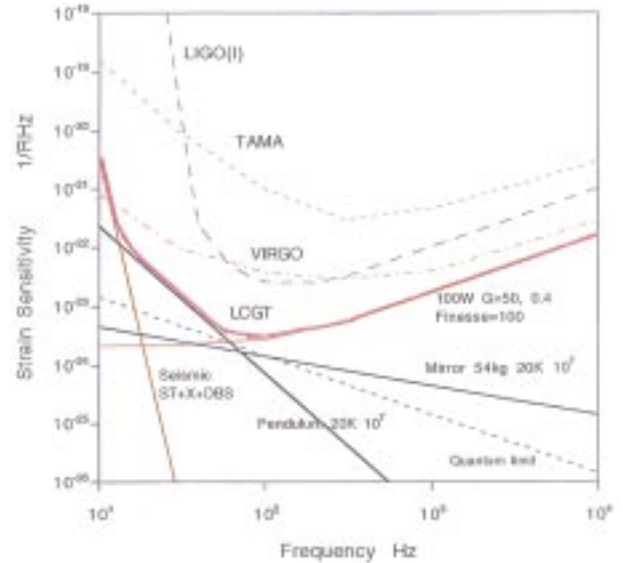


図1：LCGT感度曲線

取り組み、感度向上の余地がある限り感度を高める努力を続ける。図1は、オプションなしの場合の仕様パラメーターで達成される目標感度であり、比較のため、TAMA及びLIGO第1期、VIRGOの各計画の目標感度を載せた。

3. 低温鏡の意義

kmスケールのレーザー干渉計型重力波検出器は、人の耳が感じる最低の周波数の数十Hzからソプラノ歌手が出せる最高の周波数の数kHzまでの周波数範囲で感度をもっており、その感度を決めている物理的理由が3つある。一番低い周波数帯域(10Hz-30Hz)では、防振装置からもれてくる地面振動の雑音、これより高い周波数帯域(30Hz-100Hz)では、鏡の振り子運動の熱振動及び鏡自身の熱振動、一番高い周波数領域(100Hz-kHz領域)ではレーザー光の光子散乱雑音により、感度が制限されている。従って、鏡を低温にすることにより感度向上が期待されるのは、上記真真中に位置する周波数領域のみである。もし、これらの外側の周波数帯域での感度向上が図られなかったならば、低温鏡による雑音低下は単に両側の雑音ローブに埋もれるだけに終わってしまう。つまり、感度曲線の形がわずかに変化するだけで目的の感度向上は達成されない。この計画では、この低温化による効果を相殺しないだけの対策がそれぞれの周波数帯域でとられる。それらは、X振り子を用いる超低周波防振装置及び大出力・高安定レーザー光源である。それらについての解説は別の機会に譲ることとするが、低温鏡の開発の意義は、これを突破口として干渉計のすべての周波数領域での感度を向上させるということである。

4 . 低温鏡材料

現在計画されているレーザー干渉計では人工石英材を鏡に用いる。これは、素材的にはいわゆる熔融石英であり、熔融石英材は、低温化とともに機械的なQ（エネルギー散逸率の逆数に比例する）が低下することが知られている。熱振動の大きさは、温度の低下とともに小さくなるが、機械的なQが低下すると、逆に大きくなる性質がある。このため、人工石英は光学的に良好な性質にも関わらず低温では使用できない材料である。これにとって変わる可能性があるのはアルミナの結晶であるサファイヤである。正確には、酸化アルミニウムの結晶であり、青色をしたものがサファイヤと呼ばれ、赤色を帯びたものがルビーとして呼ばれて宝石として珍重されるが、ここで使用するものは色気のない無色サファイヤである。このサファイヤが低温で使用できるのは、その熱伝導率が温度の低下とともに急激に大きくなり、20K付近では室温より2桁以上も上がる性質があること、熱膨張率が0に近づくこと、さらに重力波実験では最も大事なことであるが、機械的Qが室温より2桁以上も上昇することである。このため、もし、3Kで動作できれば、雑音温度の2桁の低下と相まって、熱振動の2桁以上の低下が期待される。

一方、サファイヤには欠点もある。材料としての人工サファイヤは、その強度の高さから戦車の窓材として製造されてきており、直径30cmのサイズに達するものも製造可能である。しかし、結晶成長につきものの欠陥は大きさとともに増えてくるので、光学的に損失が小さく、屈折率の均一な品質の部分は小さい領域に限られる。また、サファイヤにはわずかな複屈折があり、干渉計の鏡として透過光がある場所では、光軸を複屈折が起こらない向きに設定する必要がある。

我々は、その熱的性質、機械的性質、光学的性質を調べ、レーザー干渉計に使用できるかどうかを調べるために、TAMAの鏡と同じサイズの直径10cm、長さ6cmのものを数個購入し、測定を行ってきた。これまでのところ、順調に予想を確認する結果が得られており、サファイヤの欠点もこれを補う干渉計設計によりカバーできるという見通しを得るに至った。

5 . 低温実験と結果

レーザー干渉計鏡は、超高真空の中に地面からの振動を避け、かつ、観測する重力波に対して自由に応答するテスト質量として作用するようにするため

に、振り子状に吊るされるため、もし、鏡の反射面や光の透過する鏡内部で発熱が生じる場合、この熱を逃がすことが問題となる。放射による熱の移動は、絶対温度の4乗に比例するため、極低温では極めて小さく、10K以下では殆ど無視できる大きさとなる。このため、鏡の冷却は、鏡を吊すためのワイヤまたはファイバーによる熱伝導以外には頼れない。機械的Qは低いものの純度の高い銅やアルミニウムは有望と考えられ、熱伝導を受け持つ部分と高い機械的Qを実現する部分とを複合材で実現する計画が、当初、真剣に考えられた。この材料は世の中には存在しないものであるから、開発に着手する前に調査した、高い機械的Qを実現する材料の中に、サファイヤファイバーの存在を見いだした。これは、医療用に使用されるレーザー光を通すための光軸が長さ方向に沿ったサファイヤ結晶ファイバーであり、周囲は円形に研磨してある。太さ0.25mmのものなら楽に10cm直径の鏡に巻き付けられ、吊るすことができるため、実験ではこの太さを使用することとした。引っ張り強度としては、吊るしている重さの10倍程度ある太さである。

鏡の反射損失による発熱をシミュレートするために、foilヒーターを鏡の中央に、各点の温度をモニターするための温度計を鏡周囲にとりつけた。図2に示すようにマウントした鏡は低温のクライオスタットに入れるための真空槽の中に収められる。鏡をマウントするための台座は熱伝導が極めて小さくなるように熱の絶縁体で作った。クライオスタット装着時にサファイヤファイバーが切れる不安をな

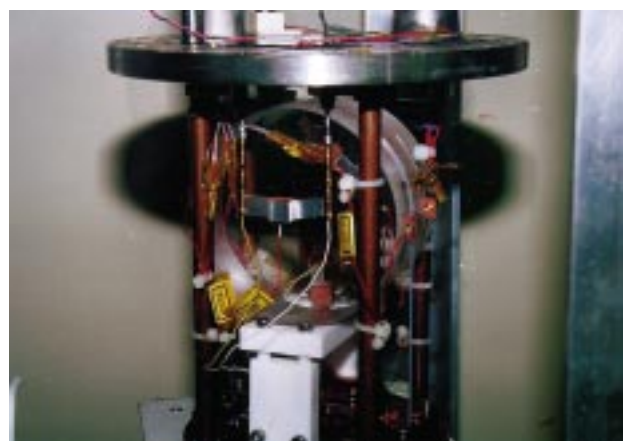


図2：熱絶縁体の台座にマウントされた鏡

中央に熱源をシミュレートするためのヒーターを付けたサファイヤ鏡は低温のクライオスタットに入れるための真空槽の中に収められる。クライオスタット装着時にサファイヤファイバーが切れる不安をなくするために、鏡は吊るされるのではなく台座に乗せるように置かれている。

くするために、鏡は吊るすのではなく、台座に乗せるように置き、振り子で吊るされる際の力に見合ったバネでサファイアファイバーに張力をかけた。発熱の電力を4通りに変え、それぞれ、温度分布を測定した。また、時間的に平衡になる様子も同時に測定した。図3に、発熱が29mWの場合の、温度分布の様子と平衡になる時間変化の様子を示す。温度分布の測定では、温度計の系統誤差が0.2K程度あることを考慮する必要があるが、おおむね、想定した通りの温度分布を示しており、サファイアの高い熱伝導率を示す結果となっている。また、サファイアファイバーと鏡との間の熱抵抗に起因すると考えられるわずかな温度ギャップが存在することもわかった。

この結果により、LCGT干渉計において鏡の発熱は鏡を吊るすファイバーの熱伝導により冷却することが可能であることが示された。

次に、この鏡の機械的Qが低温でも高く維持されるかどうかを調べる実験を行った。実験は、図4に示すように、熱伝導に用いたものと同じ大きさのサ

ファイア鏡をサファイアファイバーで吊るして行った。機械的振動は、鏡の端面の動きを静電容量の変化を通して検出する方法で記録された。鏡の振動を励起するには、鏡の他方にピエゾ素子を押しつけ、励起電力を加えることにより、機械的に励起させる。一旦励起したら、ピエゾ素子は鏡の端面から離される。また、熱測定の際もそうであったが、クライオスタット挿入時に大きい衝撃が加わる恐れがあるため、吊るされた鏡は、鏡が冷却される前には揺れることができないようにバネでサファイアファイバーに一方向的に押しつけられており、液体窒素の温度以下になって始めて振り子が自由に揺れるようにバネ部が緩められる。これは2種類の形状記憶合金を用いたバネで実現された。鏡の振動モードは、予め、計算機を用いた有限要素法による解析でモードの振動パターンとその固有振動数が求められた。測定では、鏡端面の大部分が並進運動をする軸対称のモードに感度が高いことと計算された固有振動数を頼りに振動モードの決定を行った。実験開始当初は、な

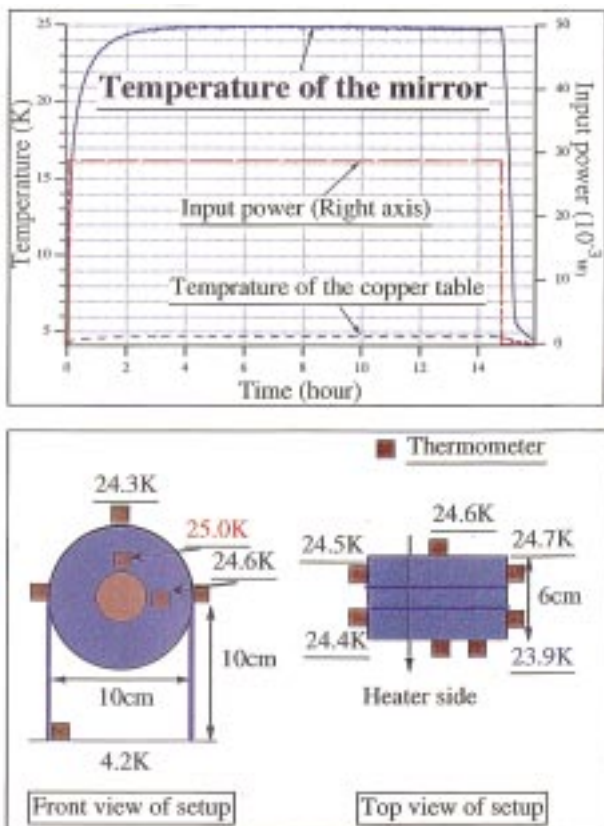


図3：サファイア鏡の温度分布測定結果

発熱が29mWの場合の、温度分布の様子と平衡になる時間変化の様子を示す。温度分布の測定では、温度計の系統誤差が0.2K程度あることを考慮する必要があるが、おおむね、想定した通りの温度分布を示しており、サファイアの高い熱伝導率を示す結果となっている。



Exciter



Q measurement setup

図4：機械的Qの測定実験

サファイア鏡は、直径10cm、長さ6cmのサファイア鏡を2本のサファイアファイバーで吊るされた。機械的振動は、鏡の端面の動きを静電容量の変化を通して検出する。鏡の振動を励起するには、鏡の他方にピエゾ素子を押しつけ、機械的に励起させる。一旦励起したら、ピエゾ素子は鏡の端面から離される。

かなか励起中心周波数を決められなかったが、これが固有振動数の温度変化のためであることが判明してからは順調に測定が進み、これまで、基本的な2つの振動モードについて、機械的Qの温度による変化を測定することができた。図5は、この結果を示すが、このような大きさの振動体で億の単位の機械的Qが測定されたものはありふれたものではない。しかしながら、このQの大きさは理論的な限界ではない。このような結晶体の機械的なQを決める原因として、熱弾性効果（物質内部の伸び縮みによる発熱でエネルギーの散逸が起こる効果）が挙げられているが、もし、その効果がQを制限しているとする、この測定値より4桁以上大きくなる。また、2つの振動モードでQに差があるのは、吊るされたファイバーの位置における振動変位の大きさの違いを反映していると推測される。このように不明なことはいくつかあるが、LCGTに应用されるとするとこのQでのみ制限される雑音は量子限界に達しており、干渉計の鏡としての適格性にはなんら問題がないことがわかった。

次に問題となるのは、吊るされた振り子の熱雑音を決める振り子モードの機械的Qの大きさである。

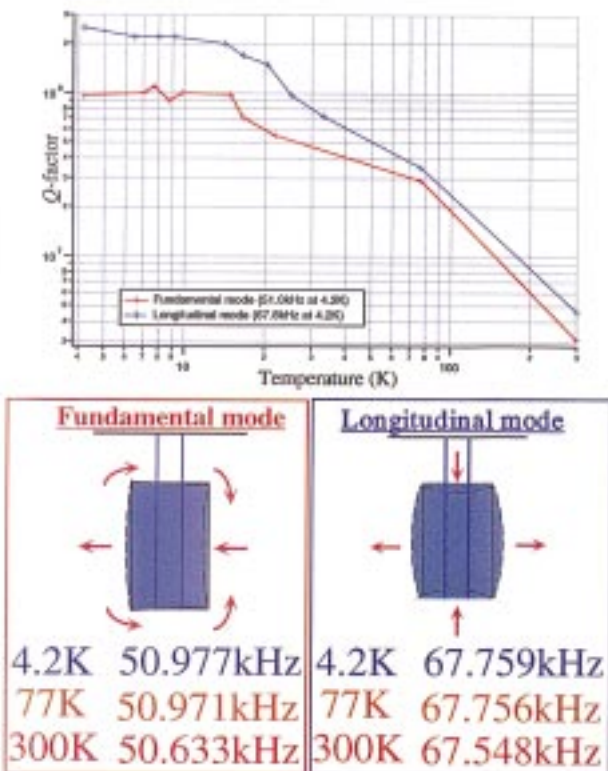


図5：機械的Qの温度による変化
液体窒素温度で室温の場合より1桁上昇し、液体ヘリウム温度でさらに1桁上昇した。このように高いQはありふれたものではない。

これを直接測定することは、振動の周期が1秒程度となり、振り子の支持体部分の機械的損失などとの分離が難しく困難なため、室温のシステムでも行われてはいない。その代わりに、吊したファイバーの弦振動モードの機械的Qを測定して振り子のQを推定するといったことが行われている。この測定について、これまで予備実験を済ませたところであり、室温での結果はサファイアの熱弾性効果による損失が支配的で機械的Qは大変低い値であるが、低温になるとこの効果は急速に低下して機械的Qが回復することが分かっている。これは、サファイアの熱膨張率が温度低下とともに0に近づくためである。現在、機械的Qの数値を確定するための測定を準備中である。

以上の実験により、サファイアファイバーで吊したサファイア鏡はLCGTの要求を首尾良く叶えられるシステムであることが明らかになりつつある。これに基づき、LCGTにおける鏡懸架系の概念を設計したものを図6に示す。

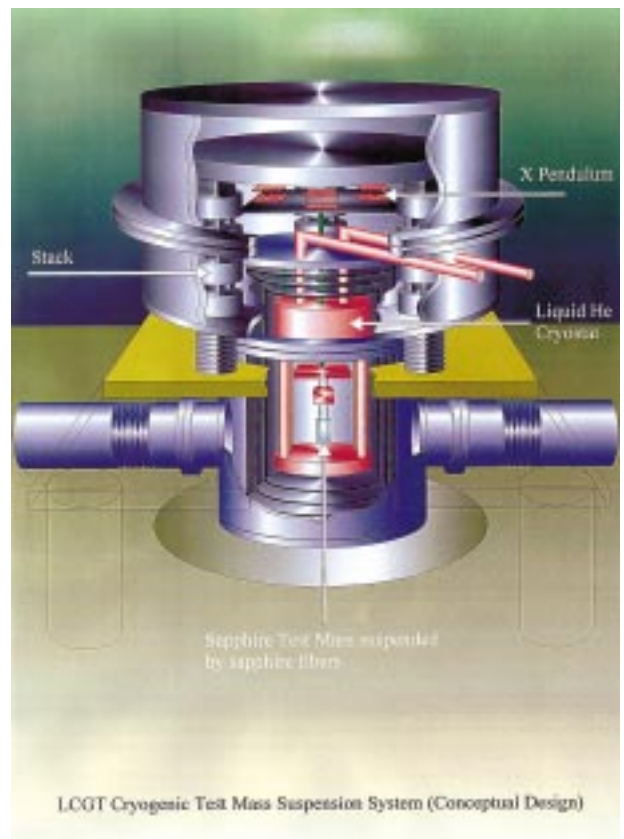


図6：LCGTにおける鏡懸架系の概念図
液体ヘリウム溜が真空内に置かれ、鏡の懸架系はヘリウム溜の中心を通したワイヤにより真空外の超低周波防振装置に支持されている。レーザービームを通すダクトには放射シールドが施される。

6. まとめ

ここでは、LCGT計画概要及びKEK低温工学センターと共同で進めている低温鏡技術の開発について述べた。干渉計技術の開発については、日本でも諸外国でも着々と進められ、高出力・高安定レーザーについては1～2年という時間スケールでLCGTが必要とする光源が手に入ると期待されるなど、本計

画を推進する追い風となっている。本計画は、宇宙線研究所の将来計画の一つの柱となっており、宇宙線研究者のコミュニティからも支持を得ていると信じているが、計画推進にあたっては、多くの人々の協力が必要なことは言うまでもなく、海外との協力が欠かせない。特に国立天文台や高エネルギー加速器研究機構などには更なる協力・支援を仰ぎながら、計画を強力に進めたい。

速報

CANGAROO次期大型望遠鏡

建設真最中

河内 明子

日本・オーストラリア共同のCANGAROOグループは新たに、超高エネルギーガンマ線天体観測を目的とした大型解像型チェレンコフ望遠鏡を現在オーストラリアに建設中であり、平成11年度初頭から稼働を開始するべく大車輪で働いている。今計画では7メートル口径の望遠鏡一台を建設し、CANGAROOグループの現有望遠鏡(3.8メートル口径)より大幅に検出感度を向上させ、 $\sim 200\text{GeV}$ 領域までの観測によって南半球での観測可能天体を飛躍的に増やすことを目標としている。

ここでは主に次期望遠鏡開発の技術的な側面から間近に迫った最終組み上げ、立ち上げの準備状況を報告する。

高エネルギーガンマ線による天体観測は、宇宙におけるガンマ線/粒子の生成機構、加速機構、すなわち宇宙の高エネルギー現象についての情報を与える。近年になってガンマ線検出器を搭載した観測衛星によって多くのガンマ線天体が発見され、高いエネルギー領域での活発な天体現象が確認された。さらに高いエネルギー領域ではより事象頻度が低いため、衛星の検出器では検出面積が小さすぎる。この場合は高エネルギーガンマ線が大気中で作り出すカスケードシャワーから発生するチェレンコフ光を地上で観測する方法が有効である。空気シャワーによる高エネルギーガンマ線の検出可能性は60年代から指摘されており、シャワーのタイミング、パルスの形状の測定など様々な手法が試みられた。しかし、チェレンコフ光の像を多数の光電子増倍管(PMT)で撮像し、シャワーの形状の違いを利用した解析に

よって宇宙線雑音の著しい除去が可能になったのはごく最近であり、アメリカのWhippleグループを中心としたこのイメージ解析の手法の確立によって初めて、微弱な超高エネルギーガンマ線の信号を得ることが出来たのだった。かに星雲を初めとしたパルサー星雲、超新星残骸、活動銀河核といった様々な超高エネルギー(TeV 領域)ガンマ線天体がこれまで6体発見されている(この辺りは宇宙線研森氏の記事に詳しい[1])。

1992年から観測を開始したCANAGAROOグループは、ほとんどの観測所が北半球に集中している中で銀河系内天体の観測に有利な南半球設置という地理的な利点も働いて、高エネルギー宇宙線の起源に対する有力な手がかりとなる超新星残骸SN1006からの検出等の業績を通じてこの分野に豊富な研究対象が潜在していることを示してきた。

こうしたこれまでの開発、業績を踏まえて、さらに進化した次世代の望遠鏡計画が世界的に次々と提案されている。これらの次期計画での基本方針は：

- (1) 集光面積の拡大による感度向上、検出可能閾値の引き下げ、
- (2) 複数望遠鏡観測でシャワージオメトリーを定めることによるガンマ線到来方向、ガンマ線エネルギーの決定精度の向上、観測の効率化、
- (3) 細分化されたカメラピクセルによるシャワー像解析で信号雑音比の向上

である。

10メートル望遠鏡で既に成果を修めているアメリカWhippleグループ、500本のPMTを使用したフラン

スのCATグループや、複数望遠鏡観測を試験的に開始しているドイツのHEGRAグループなど、次世代の先駆けは現れつつあり、既に200 500GeV領域での検出が可能になっている。

とはいえ次世代の大規模計画になると実現は容易

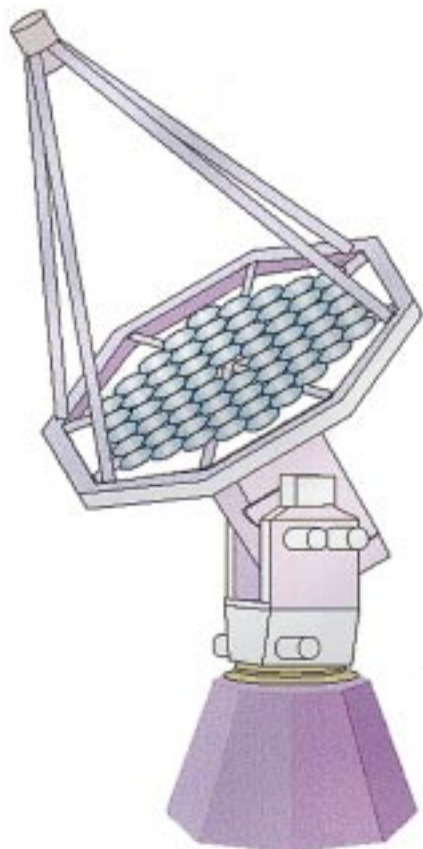


図1：建設中の望遠鏡、CANGAROO の概略図

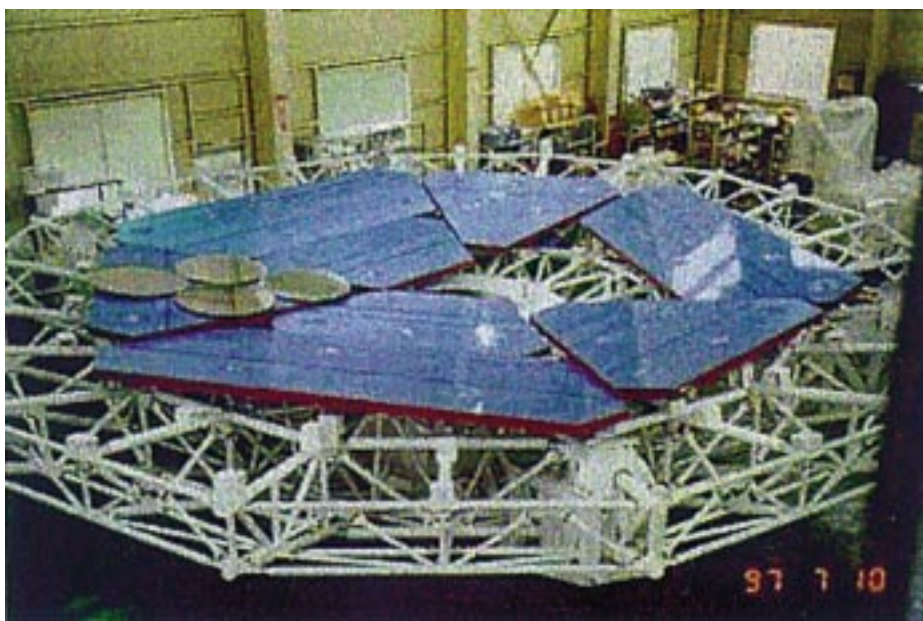


図2：望遠鏡フレーム上に試験的に小型鏡を並べたところ

ではなく、Whippleグループの後継である10メートル望遠鏡9台による観測（VERITAS）は1台分の建設準備が来年から、マックスプランク研究所による16台望遠鏡計画（HESS）は一部予算が認められたところ、自重変形補償をリアルタイムで行なう17メートル口径望遠鏡計画（MAGIC）はスタディ進行中である。

我々CANGAROOグループでも大口径複数台望遠鏡による大規模観測を目指しているが、その第一歩として10メートルに拡張可能な7メートル口径望遠鏡（CANGAROO）を最速で一作り、まずは観測閾値200GeVを確保することを目標とした。一気のジャンプではなく三段飛びでより遠くまでの飛躍を目指したこの計画、カンガルーというグループ名にはよく似合っているかもしれない。

図1にCANGAROOが建設中の望遠鏡の図版を示す。カーボンファイバー製の小型球面鏡60枚（直径80センチ、曲率半径約16.4メートル）で直径7メートル、F比1.1の放物鏡を構成している。フレーム部分はさらに小型鏡を並べさえすれば10メートル口径まで拡張出来るものである。

球面鏡で回転球面を構成するDavid Cottonタイプに比べると、我々の放物鏡は視野の端の方でのコマ収差を持つが、焦点面への光路差がないためシャワータイミングのゲート幅を狭く（数10ナノ秒）とすることが出来る。

CANGAROO では、感度が上がることによって指数関数的に増すミュオン粒子の背景雑音をタイミング同期を狭く取ることによってある程度落とせる

と期待している。焦点面に置かれた512本のPMT（時間特性の良い浜松R4124、

1センチ）は、0.12度のピクセルで視野3度を覆っている。シャワー像の詳細な解析には直径3度程度の広い視野が有利なため、焦点距離、口径比を電波望遠鏡などに比べて大きくとる必要があり、焦点面におかれたカメラ支持部のモーメントは小さく出来ない。PMTの信号は直後のプリアンプ回路で16本単位で処理され、ケーブルの減数による支持部の歪みの軽減を図った。

チェレンコフ望遠鏡によるガンマ線観測の感度向上のためには大口径の望遠鏡が必要であるが、光学観測のような高精度の反射鏡は必要なく、0.1度程度の角度精度があれば十分である。このような中精度の望遠鏡には多数の小型の球面鏡で大口径を構成する複合鏡タイプが比較的安価で一般的であり、Whipple10メートル望遠鏡もこのタイプである。

一方、前述のように焦点距離を長くとったため、自重変形はよりシビアに効いてくる。CANGAROOの反射鏡は出来るだけ安価に軽量に、そして砂漠に野晒しという過酷な環境化で保守が容易、というのが大きな要請だった。プラスチック製の鏡が我々の回答であったが、満足のいく鏡が出来るまでの道のりはたやすくなかった。

プラスチックの小型鏡は金型の上にアルミ板とカーボンファイバーを接着シートを挟んで何層も積み上げ、全体をシールして真空引きで型に密着させながら、窒素加圧した電気炉で焼成する。ロハセルを中心の芯材とし、ねじれに強くする。フッ素で表面コーティングし、反射率は300nm領域まで80パーセント以上を確保している。でき上がった球面鏡は直径80センチで約5.5キロ。片手で持てる重さであり、なにより丈夫である。ガラス製の鏡とは単純に密度だけで比較しても半分の軽さである。砂漠の埃にまみれても水洗いで反射率を回復し、傷にも強いことが確認されている。

型の端からの樹脂流れ、そり、ねじれ等による形成失敗、ロハセル中心に全ての材料の層を対称構造にした現在の材料構成になるまで、三菱電機を中心に2年近くに渡る開発が行なわれた。

金型表面の荒れによるイメージの広がり深刻であることが昨秋分かり、新しい金型が半年近くかけて丁寧に磨いて作られた。新金型で作られた初めて



図3：このサイズで5kg強の軽量、プラスチック製の小型鏡

の鏡は段違いに改善されており、「まるで鏡みたいだ！」と思わず喜んでしまったのがこの4月であった。その後焼成工場を変更して、さらに曲率半径の制御、イメージの改善を目指した改良、開発が行なわれた。平行光のイメージとして光量の半分が入る領域の直径1.0 1.5センチが達成され、設計要請値の曲率半径が作れないと試行錯誤した結果、プラスチック層の合間に挟む接着シートの厚み（接着の粘着度の大小）が曲率半径を決めていることが分かり、一度焼成した鏡の裏面に接着シートをうまく貼ることで曲率半径の矯正も出来るようになった。

今年の夏は、次々と届く試作鏡の曲率半径（約17メートル）を調べるために、宇宙線研本館4階の長い廊下を真っ暗にして測定したのだが、4階の皆さんに大変迷惑をおかけしこちらとしては恐縮するばかりだが、かえって快く励ましていただいたこと、本当に感謝しています。

現在は御殿場のレーシングカー工場で本番に向けて大量生産中。本業はレース参加というこの工場、どんどんアイデアを出しながら改善を進めてくれ、小型鏡の完成にはラッキーな出会いであった。

複合主鏡の組み立て時には、個々の鏡の取り付け設定位置からさらに光軸を微調整する必要がある。それぞれの鏡の裏面に二台のステップモーターを取り付け、二方向に1ステップ1万分の1の精度で軸を回転させる遠隔調整が出来るようにした。

建設地では約5キロ離れた空港にライトを特設し、その像を見ながらフィードバック調整を行なう。焦点面上で鏡の像ずれを見る精度を考えて約0.01度程度まで個々の光軸が合わせられると期待される。

望遠鏡フレームのジオメトリーを一部分だけテスト用に作り数枚の鏡を取り付けたセットアップで、モーター調整の直前リハーサルが、大阪は丹後篠山の今田工場で行なわれた。モーターの作動、再現性、望遠鏡枠に取り付いた状態での焦点面での像について確認とチェックが行なわれた。直前お約束の図面や治具のミス現場慣れた工場の方々と調べていくのは建設の醍醐味であった、が、ここがまだオーストラリアでなくてよかったと胸をなでおろしたのも真実である。

カメラピクセルのPMT一本一本の直前には樹脂に高精度のアルミ蒸着を行なった集光鏡が設置され、PMT間の死にスペースを生かす働きをする。この集光鏡は使い捨てカメラのフラッシュ部分の蒸着を行なっている工場が高精度のものを作成してくれ、PMT光電面面積（1平方センチ）の約二倍の光量

を得られる。

放物面上に置かれた個々の小型鏡の精度、光軸微調整の精度を含めたレイトレースを行ない、個々の鏡の反射率、PMT集光鏡の異なる入射角による足し上げによる効果を第一近似で見積もると、主鏡全体に平行光を当てた時の(星像の)PMT 1ピッチ(1.6センチ角)への像の集中度は約50%となる。これらは設計要請に充分であり、プラスチック望遠鏡の実現は間近に迫ったと言えそうである。

建設地では地盤工事が着々と進んでおり、日本側の荷物は12月初頭にオーストラリアへ向けて船出する。来年頭からオーストラリアの砂漠の夏に建設が進められる予定である。今回は実際の望遠鏡イメージ、そして新しい超高エネルギー天体の発見のニュースをお届けしたい。

[1] Parity, 1998 M. Mori

ICRR Seminar

9月22日(火) 榎昌吾(高エネルギー加速器研究機構)

Phase structure of QCD at finite temperature for $2 + 1$ flavors

* 9月22日(火) Katsushi Arisaka (Univ. of California Los Angeles)

“Recent Progress on Advanced Photon Detector for Particle Physics” “Future Prospect of Experimental Astro Particle Physics in the US”

9月25日(金) 戸谷友則(東京大学大学院理学系研究科)

“ガンマ線バーストからのTeVガンマ線放射と超高エネルギー宇宙線”

* 10月9日(金) Hitoshi Murayama (Univ. California, Berkeley)

“Comments on the Super Kamiokande Atmospheric Neutrino Results”

* 10月9日(金) Kevin T. Lesko (Lawrence Berkeley National Laboratory)

“Present Status of SNO”

10月13日(火) Vladimir S. Ptuskin (ロシア科学アカデミー(青山学院大学))

“Acceleration and transport of high energy cosmic ray”

10月14日(水) G. Kanbach (Max Planck Institut für Astrophysik (理研、宇宙科学研究所招聘))

“Galactic Gamma Ray Sources Observed by EGRET”

10月16日(金) 清水康弘(高エネルギー加速器研究機構)

“Lepton flavor violation in the left handed slepton production at future lepton colliders”

10月30日(金) 浅賀岳彦(東京大学宇宙線研究所理論)

“Hadronic Axion Model in Gauge Mediated Supersymmetry Breaking and Cosmology of Late Decaying Saxion”

* 11月6日(金) Ikaros Bigi (Notre Dame Univ.)

“Detecting CP violation in B decay is just as much fun as detecting neutrino oscillation”

* 11月11日(水) 三井唯夫(神戸大学理学部物理)

“宇宙線伝播の精密検証”

11月13日(金) 二瓶武史(高エネルギー加速器研究機構)

“Effect of RRRR dimension 5 operator on the proton decay in the minimal SU(5) SUGRA GUT model”

* 神岡研究施設におけるセミナー

ICRR Report

ICRR Report 425/98/21 (May 1998)

“Hadronic Axion Model in Gauge Mediated Supersymmetry Breaking”

T. Asaka and Masahiro Yamaguchi

ICRR Report 426/98/22 (July 1998)

“Study of Solar Neutrinos at Super Kamiokande”

Yusuke Koshio

ICRR Report 427/98/23 (August 1998)

“A two dimensional low frequency vibration attenuator using X pendulums”

D .Tatsumi ,Mark A .Barton ,T .Uchiyama and K . Kuroda

ICRR Report 428 98 24 (August 1998)
 “Decay Rate Asymmetry of Top Squark ”
 Mayumi Aoki and Noriyuki Oshimo

ICRR Report 429 98 25 (August 1998)
 “Numerical analysis of formation and evolution of global strings in 2 + 1 dimensions ”
 Jun ichi Yokoyama and Masahide Yamaguchi and M .Kawasaki

ICRR Report 430 98 26 (April 1998)
 “Topological Defect Formation after Inflation on Lattice Simulation ”
 S .Kasuya and M .Kawasaki

ICRR Report 431 98 27 (September 1998)
 “Atmospheric neutrino results from Super Kamiokande and Kamiokande Evidence for μ oscillations
 Takaaki Kajita ,For the Super Kamiokande and Kamiokande Collaboration

ICRR Report 432 98 28 (September 1998)
 “Nonlocally Correlated Disorder and Delocalization in One Dimension :Density of States ”
 Ikuo Ichinose and Masaomi Kimura

ICRR Report 433 98 29
 “ Deconstructing the Cosmic Distance Scale ”
 Masataka Fukugita

ICRR Report 434 98 30 (October 1998)
 “Contribution to Xth ISVHECRI(Gran Sasso, 1998)from CHACALTAYA Emulsion Chamber Collaboration ”
 Edited by A .Ohsawa

ICRR Report 435 98 31
 “The Sloan Digital Sky Survey Photometric Camera ”
 J .E .Gunn ,M .Carr ,C .Rockosi and M .Sekiguchi et al .

ICRR Report 436 98 32 (November 1998)
 “Decay rate asymmetry in B Xs as a signature of supersymmetry ”
 M .Aoki ,G . C .Cho and N .Oshimo

ICRR Report 437 98 33 (November 1998)
 “Measurement of TeV Electrons on ISS/JEM ”
 S .Torii ,N .Tateyama ,T .Tamura and T .Ouchi et al .

ICRR報告 118 98 1 (1998年 8 月)
 “ 高エネルギー宇宙線の直接観測と宇宙線元素起源 ”
 世話人 湯田利典他

人 事 異 動

(平成10年 9 月 1 日現在)

発 令 日	氏 名	異 動 内 容	現 (旧) 官 職
平10 . 9 . 1	井 上 進	教務補佐員 (研究所研究員) 採用	理論部
平10 . 9 . 30	大 内 達 美	辞職	教務補佐員 (研究所研究員) エマ ルション部
平10 . 10 . 31	竹 田 成 宏	辞職	COE研究員 空気シャワー部
平10 . 10 . 31	河 内 明 子	辞職	COE研究員 空気シャワー部

No.37

1999年2月1日

東京大学宇宙線研究所

〒188 東京都田無市緑町3-2-1
TEL (0424) 69-9593又は0578-5-9602
編集委員 佐々木 梶田