



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

記念行事報告

宇宙線研究所国際シンポジウム「Future Trends in Cosmic Ray Physics」 シンポジウム企画委員会

標記シンポジウムが10月11、12日の両日、柏キャンパスの大セミナー室で行われた。このシンポジウムは、宇宙線研究所が新しい東大の柏キャンパスに移転し、このキャンパスで新たな研究活動を開始したことを記念して開かれたものである。なお、標記シンポジウムに引き続いて10月13日には、柏キャンパス開所記念式典が物性研究所との共催で催されたが、それについては別記事を参照していただきたい。

シンポジウムの内容は、宇宙線研究所が現在、及び将来計画として取り上げているテーマについて重点的に、その分野の世界的現状と、将来の方向性を議論するスタイルを取った。記念式典の日程との関係でシンポジウムが行われたのが平日であったにもかかわらず、外国人を含め約120人の参加を得て非常に活発な議論が行われた。以下にシンポジウムの議論の内容の抜粋をまとめる。

10月11日

まず、戸塚所長による、「Cosmic Ray Physics: Past, Present and Future」と題する講演が行われ、1910年代に始まる宇宙線研究がその初期の段階では新粒子発見を通して素粒子物理学を誕生させ、その後天文学に果たして来た大きな役割と、現在の宇宙線研究のトピックスである、ニュートリノ、高エネルギーガンマ線、最高エネルギー宇宙線の各研究が紹介された。最後に、今後の研究の方向として、上記3テーマの更なる研究と、超高エネルギーニュートリノ、陽子崩壊、ダークマター、重力波が紹介され、これらの研究の重要性が示された。

続いて各研究テーマごとの議論になり、カリフォルニア大のSobel氏は、ニュートリノ質量について非加速器実験の結果の現状について講演した。まず、トリチウムのベータ崩壊や、ダブルベータ崩壊から来るニュートリノの質量についての情報をまとめた。次に、太陽ニュートリノ問題については、1960年代に始まる太陽ニュートリノ観測と太陽ニュートリノ問題の現状をまとめた。1990年代の観測、特にスーパーカミオカンデにおける太陽ニュートリノの精密測定により、だいぶ太陽ニュートリノ問題の理解がすすみ、現在の世界中のデータは混合角の大きいニュートリノ振動で説明ができる事を示した。また、大気ニュートリノについては、 μ -振動で、全てのデータが非常にうまく説明できる事を示した。最後に、ニュートリノ実験は今やニュートリノの混合マトリクスの全体像の理解を目指す全く新しい時代に入っていることが強調された。引き続き、京都大の西川氏は、加速器を使ったニュートリノ振動実験の現状と、将来の加速器を使った長基線ニュートリノ振動実験でどこまでの物理が視野にいつているかについて話した。特に、大気ニュートリノより精密な振動パラメータの決定や、CPなどの物理量の測定について講演した。

ドイツ・マックスプランク研究所のVölk氏は地上チェレンコフ望遠鏡による高エネルギーガンマ線観

測実験の現状について講演し、パルサー、超新星残骸、活動銀河核などにおける高エネルギー天体の観測結果、特に星間赤外線による活動銀河核起源のガンマ線の吸収や超新星残骸からの陽子加速起源のガンマ線放射などについて議論した。またアフリカのナミビアにおける大型チェレンコフ望遠鏡アレイを用いた次期ガンマ線実験計画（H.E.S.S.）の最新状況を説明した。大阪大の高原氏は「ガンマ線天文学の理論的側面」と題し、宇宙の高エネルギー観測と粒子/ガンマ線加速・伝搬の基礎過程についての理解をまとめた。活動銀河核、ガンマ線バーストなどの高エネルギー天体を比較検討。特に、宇宙線起源の鍵となるハドロン加速の寄与に重点をおきつつ、将来の観測感度ではどういう知見が得られるのかまで触れた講演となった。

初日の講演の後、柏キャンパス内の食堂を借りきってシンポジウムのパーティが開かれ、参加者一同和やかに歓談した。

10月12日

ニューヨーク大学のFarrar氏は現存するGZK-cutoff（宇宙背景放射と、 10^{20} 電子ボルトの宇宙線陽子が相互作用することにより50Mpc以上の距離を伝播できないため、宇宙線スペクトルがここで切断される）前後のエネルギーの宇宙線データによって、既に最高エネルギー宇宙線の起源にかなり強い制限が与えられることを議論した。観測データの特徴は、GZK-cutoffが見られず、その到来方向はほぼ等法的であるということとまとめられる。これを説明するいろいろなメカニズムが提唱されているが、彼女によれば、ほとんどの理論では上記の事実を自然には説明できない。一方、最近の測定によって示唆された強い銀河外磁場に着目し、磁場による宇宙線の散

逸過程を考えると、約5 Mpc程度の近傍に宇宙線源があれば説明可能であるとした。さらにこのモデルの予言として、GZK-cutoff以下の宇宙線の到来方向の非一様性を指摘した。引き続き、宇宙線研究所の福島氏が 10^{20} 電子ボルトを越えるエネルギーを持つ宇宙線の観測の現状を、明野観測所のアガサのデータを中心に説明し、今後の最高エネルギー宇宙線観測計画である、テレスコープアレイでは、この最高エネルギー宇宙線の謎が解明されるであろうと講演した。

高エネルギー加速器機構の中村健蔵氏は核子崩壊実験の現状と将来計画について講演した。陽子崩壊は現在まで観測されておらず、スーパーカミオカンデの現在の $p \rightarrow e^+ \pi^2$ 、 $p \rightarrow \nu K^+$ の90% C.L.の寿命の下限値が 4.4×10^{33} yr、 1.9×10^{33} yrで、理論の予想がそれぞれ $10^{35 \pm 1}$ yr、 10^{34} yrであり、次世代の核子崩壊実験として約1 Mtonの検出器を作り陽子崩壊を観測することが素粒子物理学の発展にとって重要であることが議論された。

京大基研の中村卓史氏は、21世紀に開かれる新しい目としての重力波検出とその源について解説し、連星中性子星やMACHO-ブラックホールの合体時に発生する重力波の観測を行なったTAMA300の現状も報告した。特に、連星中性子星合体時の重力波については数値相対論によるシミュレーションも紹介した。LIGOのRic Savage氏は、いよいよ動き出そうとしているLIGOの2 km レーザー干渉計（4 km はその後になる）の現状を報告した。2 km のファブリーペロー共振器のロックや、マイケルソン部分での制御系のチェックなどが順調に進んでおり、干渉計全体が動くのは時間の問題となっていることが示された。LIGOの次期計画で想定されているLIGOの同時観測にもふれて、将来の重力波観測ネット



写真1：重力波検出器LIGOについて講演するリック・サベッジ教授



写真2：パーティーでの歓談風景

ワークの重要性に言及した。

各講演は非常に良くまとめられており、実際各講演内容は宇宙線研究の現状と今後を考える際の重要な情報を提供しているという印象を受けた。

なお、より詳しい議論の内容は、シンポジウムのホームページ（<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp>より、「公開情報」をクリックしてください。）を御覧ください。また、近日中に、シンポジウムの講演集をProceedingsとして印刷いたします。

宇宙線研究所の竣工披露

事 務 部

宇宙線研究所は、既に4月から柏新キャンパスにおいて研究教育活動を行ってきたが、このたび新キャンパス内の整備等も終了したことに伴い、去る10月13日（金）に物性研究所と合同で竣工披露記念式典及び祝賀会を挙行了した。

記念式典には、文部省、千葉県、柏市及び学内関係者等約300名の出席があり、両研究所長の式辞に続いて、東京大学を代表して蓮實重彦総長の挨拶、来賓の鈴木恒夫文部総括政務次官、沼田武千葉県知事及び有馬朗人参議院議員より祝辞が述べられた。

引き続き、柳澤施設部長の工事概要報告の後、蓮實総長より柏新キャンパス新営工事関係者に感謝

状が贈呈された。

両研究所施設見学の後、特設テント会場において祝賀会が催され、本田晃柏市長、佐藤禎一日本学術振興会理事長の祝賀に続いて、鏡割りが行われ、有馬参議院議員の発声により祝杯が挙げられた。祝宴の中、ノーベル物理学賞受賞者のDr. Heinrich Rohrer、小田稔東京情報大学長、小林俊一理化学研究所長の祝辞があり、東京大学三極構想の一極としての「新たな学術研究拠点となる柏新キャンパス」の門出を祝って、地元柏市の「北総太鼓」が華を添え、最後に戸塚宇宙線研究所長が謝辞を述べて、盛会の裡に幕を閉じた。



写真1：竣工披露記念式典で挨拶をする蓮實東大総長



写真2：祝賀会で謝辞を述べる戸塚宇宙線研究所長

ICRR2000サテライトシンポジウム 「高エネルギー宇宙の総合的理解 2000 .10 .14」

木舟 正、梶田 隆章、佐々木 真人

このサテライト シンポは柏キャンパスの竣工披露式典を記念して開催された国際シンポジウムに付け足して 10月14日に宇宙線研大セミナー室で行なわれた。宇宙線研究所には現在のところ4つの研究の流れ(ニュートリノ、超高エネルギーガンマ線、最高エネルギー宇宙線、重力波)がある。それぞれ独自の立場からそれぞれの研究を推進し将来を展望しているわけであるが、ともすると相互の「有機的結合」が欠ける懸念がなしとしない。各研究テーマの間の「風通し」を良くして、「共通のサイエンス」を議論する場を作りたいということが一つの目的である。

その内容は付記するプログラム、詳しくはトラペのコピーの集録を御覧いただきたいが、概略と企画の意図についてのべておくことにする。

個別領域よりも総合的展望を取り上げたいという観点に立って、まず、宇宙線研での「多波長」(、
、cosmic rays、重力波)を横断できるテーマをひとつトピックスとすることにした。思い浮かぶ最も適当な天体としてガンマ線バーストがあり、これをテーマのひとつとしてとりあげた。超新星爆発(Hypernova etc)、Magnetar、(unseen) Compact Object (BH...)etc、およびOrigin of Cosmic Raysなどのさまざまな天体、(既製の)描像との関係など広い発展可能性を今後も機会を設けて議論する必要があると考える。京大の中村卓史さんに、このような視点からのoverviewをお願いした。

個別領域の現状の報告とまとめを聞く必要もあり、前述した他の二つの企画との関係もあり、鈴木洋一郎、手嶋、谷森の3氏の講演がそれである。また、4つの流れ(、
、cosmic rays、重力波)を用いた研究方法の将来の展望あるいはそれらの将来計画の後を模索する必要性を感じた。一つのexampleあるいは議論のきっかけとして、佐々木と川村さんによる講演を設定した。

宇宙線研究所での研究テーマが「高エネルギー宇宙」の「総合的研究」の中で、よって立つ「基盤」をできるだけ広い立場から考察することを研究会の柱とすることにした。すなわち(1)宇宙初期の高温・高エネルギー現象をまず概観し、(2)それらが現在の

宇宙の高エネルギー現象にどうつながっているかをとらえ、さらに(3)未来(今後のわれわれの研究)にどうかかわってくるか模索する試みを行なうことにした。このようないわば無鉄砲な「ambitious vision」に対応してくださった講演者に重ねて感謝したい。すなわち、佐藤勝彦さん、柳田勉さんのお二人に、それぞれ宇宙論と素粒子論からの展望をお願いし、比較的若い世代の杉山さんと戸谷さんには少し観測に接近するスタンスでのトピックスの講演を頂いた。

幸い、シンポジウム最後のdiscussionで、来年度以降も同様の研究会を継続したいとの合意が得られた。「省庁改変」、「独法化」など今後の研究推進は予測困難な状況にある。不透明な視界の中で将来の研究方向をどのように見据えるかについて、われわれの手に余る不定性が多いと考えざるをえないが、少なくとも、われわれ自身の研究の基盤を支える「サイエンス」を検討することをわれわれの手に握ろうとする一層の努力があって然るべきであると、研究会を終えてまた一層痛感している。

尚、講演トラペ集は印刷されますので希望者はご連絡ください。

研究所Webページ(<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/index.html>)から“ What's New ? ”に下ると、トラペ、スナップ写真が掲載されたページがご覧になれます。

木舟 正	Introduction / 問題提起
鈴木 洋一郎	非加速器実験の現状と将来
手嶋 政 廣	超高エネルギー宇宙線観測の現状
谷 森 達	宇宙ガンマ線観測の現状
中 村 卓 史	ガンマ線バーストの物理
杉 山 直	CMBの揺らぎとダークマター
戸 谷 友 則	宇宙の進化と高エネルギー現象
佐々木 真人	多波長観測から多粒子観測へ (高エネルギーニュートリノ)
川 村 静 児	短距離型スペース重力波アンテナ
佐 藤 勝 彦	初期宇宙と「将来の宇宙線観測」
柳 田 勉	素粒子物理学と「将来の宇宙線観測」

表1：講演者(敬称略)と講演題目



写真1：講演中の佐藤彦彦氏



写真2：講演中の柳田勉氏

研究紹介 1

始動しはじめたTAMA干渉計

黒田 和明、藤本 眞克

1. はじめに

重力波は、Einsteinの一般相対性理論で予言された時空の波動であり、その存在は連星中性子星の公転軌道縮小の観測により間接的に確認されているものの、直接検出には何人も成功していない。この重力波の直接検出により、重力理論の基礎である一般相対性理論が強い重力場で検証されるばかりでなく、宇宙観測の新しい道具として光や電波では見えない銀河の中心付近や遠くで起きる現象を観測できるようになる、と期待されている。このため、世界では米国のLIGO計画や仏伊合同のVIRGO計画などkmスケールの基線長を有するレーザー干渉計や英独合同の600m基線長GEO計画が進行中である。日本では、国内の重力波グループが共同で国立天文台三鷹キャンパスで300m基線長のTAMA干渉計の建設を進めてきた（代表：古在由秀）。最近、TAMAをかなり良い感度で動かすことができるようになったので、ここでその報告をする。TAMAの目標は、kmスケールの検出器のための実証型検出器を実現することであり、これによりまれではあるが近傍銀河系で起こる重力波イベントを捕らえようとする。

日本国内では、70年代から共鳴型重力波アンテナの開発とこれによる観測が東大理学部で進められてきたが、90年代に入って、国立天文台、電通大レーザー研、宇宙科学研究所、高エネルギー物理学研究所（現在高エネルギー加速器研究機構）の各グルー

プなどとともに重点領域「重力波天文学」（代表：中村卓史）に結集して、100mDelay-Line型レーザー干渉計、20mFabry-Perot干渉計などのプロトタイプを開発して、大型レーザー干渉計に必要な基礎技術の習得、開発に努めてきた。この成果は、現在のTAMAの開発で活用されている。TAMAで新たに開発された技術には、non-baking真空ダクト、10Wレーザー光源、超高性能ミラー、ダンピングマグネットを用いた2段振り子懸架装置、X振り子低周波防振装置などがある。これらを含めた詳細については、これまでいくつかの邦文による報告がなされているのでここでは省略する（参考文献1 - 6）。

2. 検出原理とレーザー干渉計の動作

重力波は、電磁波と同じ光速で伝播する横波であり、天体などスケールの大きい質量の加速度運動で発生する。連星中性子星合体が起こる場合のように重力波の波形が精密に予測されているものもある。重力波の周波数は合体の瞬間の3分前くらいに数十Hzであったものが数kHzまで振幅の増大とともに高まっていくと予想されている（参考文献7）。観測では、この間の振動波形を捕らえることになる。このような重力波が地上に到達するとき、重力波は自由な2つの質点間の距離を波動の周期に合わせて変動させる。従って、それらの質点間の距離を精密に計測する装置を用いれば、重力波による空間の歪みを検出することができる。重力波を発生する源とな

るものは質量であり、質量にはマイナスの質量がないことに対応して、電磁波と異なり双極子のパターンをもつ波動は依存せず、4重極子のパターンが基本の波動パターンとなる。このため、図1に示すように地上に水平に置かれたマイケルソン干渉計に天頂方向から重力波がやってくると、ある瞬間にx軸方向の長さが伸びる一方でy軸方向の長さが縮む、といったことが起こる。重力波の波長が半波長ずれば、この伸縮の向きは逆方向になる。マイケルソン干渉計では、原点に置かれたビームスプリッター（BS）でレーザー光は2つに分けられ、それぞれの腕へ進む。それぞれの腕の端に反射鏡Mx、Myが置かれており光はそこで反射する。再びビームスプリッターに戻ってきた光はそれぞれ分割されて進むが、光検出器に進む双方の光は干渉を起こして、強度が強め合う干渉をしたり弱めあう干渉を起こしたりする。それは、2つの腕からの光路差に応じた位相によって決まる。通常、 $1.06\mu\text{m}$ の波長の光を用いるが、その場合、光路差にして2分の一波長ごとに干渉強度が変化する。これを干渉フリンジと呼ぶが、重力波による変化は大変小さく、フリンジが強弱をくり返すといったレベルよりはるかに小さい。乙女座銀座団で発生する典型的な連星中性子星合体の場合、300mの基線長をもつ干渉計の鏡の変位にして 10^{-19}m 程度である。基線長を長くすればそれに比例して感度は上がるが、地上で実現できる長さにするため光を多数回往復させる工夫がなされる。その一つの方法が2枚の鏡からなるファブリーペロー共振器を用いる方法であり、TAMA計画でもこの方式が用いられている。図2は干渉計の光と電気信号

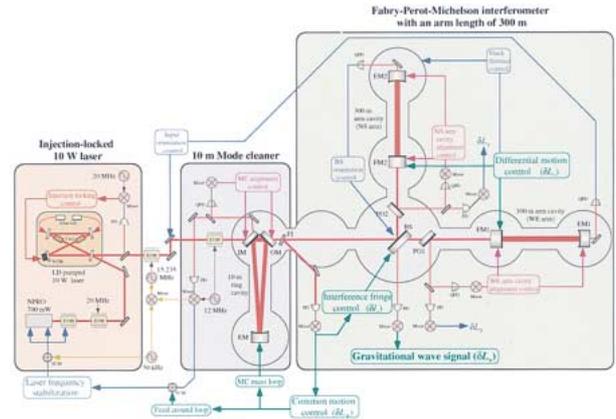


図2：TAMA干渉計の光学系と電気信号の制御を示す。

の制御の様子をまとめて示したものである。レーザー干渉計にレーザービームを入射させる前にモードクリーナーと呼ばれる整形器でレーザー波形を整える。マイケルソン干渉系で言えばそれぞれの鏡に相当するところにファブリーペロー共振器がおかれている。この共振器の主鏡の他に主鏡の傾きを制御するための信号を取り出す補助鏡がそれぞれの腕に配置されている。このファブリーペロー共振器の中では、半波長のきっちり整数倍の波が2つの主鏡の間に閉じこめられるが、この共鳴状態では光は等価的にほぼ300回ほど往復する勘定になっている。地面振動などにより微妙に鏡が揺れると反射の方向が変化しそれが多数回の反射で無視できなくなる揺れの大きさは1秒角の10分の1以下である。揺れが大きいと共鳴が維持できなくなり、これはロックが外れた状態である。鏡の制御は、それぞれの腕のファブリーペロー共振器をロックの状態に置くと同時に2本の腕から反射されて帰ってくる光を安定に干渉させるために行われる。以上の主干渉計部分以外にも、説明を省くが、モードクリーナー、レーザー光源などに種々のフィードバックが用いられており、その総数は、10を超える。これらが発振を起こさずに安定に働いてくれて初めて重力波の信号を取り出す準備が整う仕組みになっている。

3. 達成された感度と観測時間

以上のような複雑なシステムではあるが、昨年夏に初めてテスト観測を行って以来、改良・調整を加えて図3に示すように感度の改善が進んできた。この感度は、雑音のパワースペクトルの平方根で示されており、例えば、雑音変位の実効値を知りたければこの感度曲線を周波数について積分して求めることになる。10kpc先の銀河で起こる重力波イベントで予想される周波数スペクトルを書き込んでいるが、

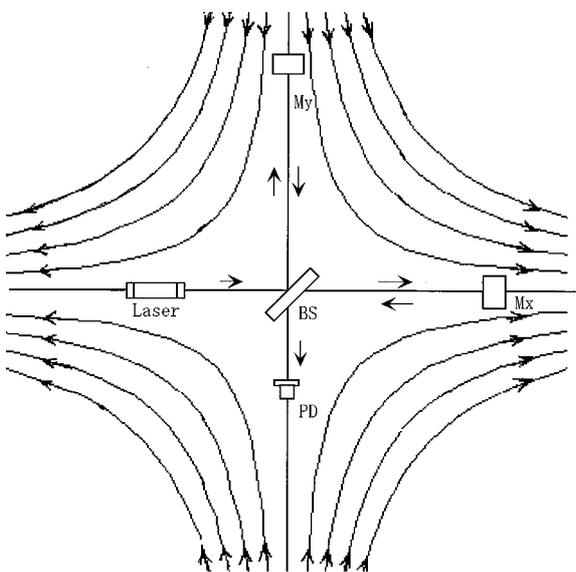


図1：重力波の検出原理

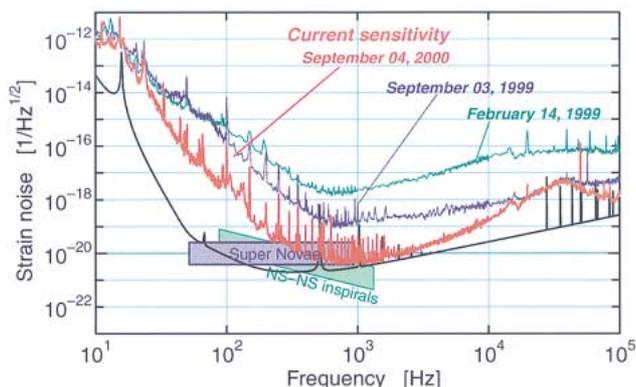


図3：検出器感度の向上の様子。縦軸は変位のパワースペクトルの平方根である。

最適な信号フィルターを用いると、この図の場合、信号対雑音比は20以上になることが示されている。

ここで達成された感度は、歴史的にも世界でもっとも高感度なレーザー干渉計であると言えるものである。また、図4にこの8月から9月にかけて行った観測で干渉系のロックがかかって安定に信号が取得されている状況の割合を示す。ロックの外れは、現在はマニュアルにより復帰させられている（1晩あたり4 - 5人のシフト要員が活躍）。ロックがなぜ外れるのかは第2節で述べた通り、地面振動による鏡の大きい揺れが誘発されると考えられる場合があることがわかっているが、それ以外にも外れることがあり、その原因は究明中である。いずれにせよ、このような初期の段階にあるにもかかわらず、この期間のほぼ50%の稼働率で160時間を超える間、観測のための信号が取得できたことは特筆に値する。また、観測テストを開始した昨年と比べて、ロックが連続的に維持できる長さも飛躍的に改善された。

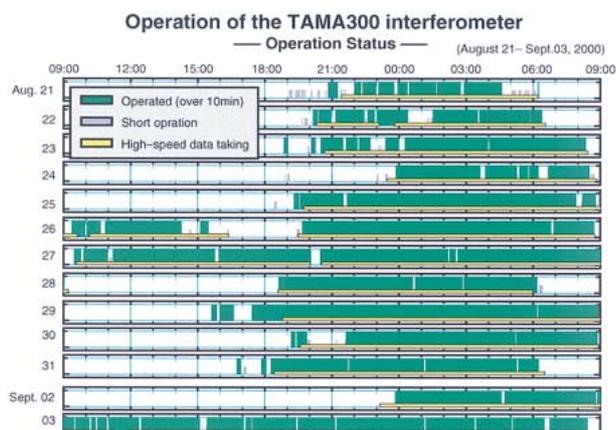


図4：2000年8月から9月にかけて行われた観測実験でのファブリーペロー共振器の鏡のロックの状態とデータ取得状況

4. データ解析の方法

地上の重力波レーザー干渉系で捉えることのできる重力波イベントは、超新星爆発からのバースト波、パルサーからの連続波、連星中性子星からのチャープと呼ばれる信号などが挙げられるが、このうち、理論的に信号波形が解明されつつあるチャープ波形がもっとも有望なターゲットである。すなわち、その波形そのものをテンプレートとすれば、一見雑音に埋もれた重力波も信頼性高く抽出が可能となる。現実には重力波信号が捉えられれば、合体の際の高密度物質の振る舞いについて新たな知見が得られるであろうし、合体後にブラックホールができればその瞬間の固有振動が観測できる。また、そのようなチャープ波形が抽出できれば、1台の検出器であっても合体前の連星中性子星の質量が決められ、これによって発生したと考えられる重力波の「光度」が計算できる。これにより現実には検出された「光度」からかなりよい精度でその連星中性子星までの距離が計算できる。この方法は、天文学にとって重要な基本量である距離決定に、従来とは独立な新しい方法を提供する。もしも、複数の検出器が国際的に同時に稼働するようになれば、観測ネットワークを構築することにより、重力波源の位置決定も含めて天文学的な情報が得られるようになり、文字通り重力波天文学が開始されることとなる。

しかしながら、テンプレートによる当てはめには、質量、初期時間、振幅の自由パラメータを変化させながら計算を行う必要があり、現在のところこの当てはめ計算を実時間で実行できる高速計算機は存在しないため、時間を短縮してかつ見落としがないより効率的な当てはめを行うアルゴリズムの開発も世界的に進められている。

また、バースト波については、その扱いについてまだ確立されたものがないが、連続波については、共鳴型検出器で開発された手法がそのまま適用できると考えられる。

今回取得されたデータは、精力的にその解析が進められているところである。

5. 今後の予定

最高感度を達成したとは言え、目標の極限の感度はまだ達成されていない。すなわち、20Hzより低い周波数では防振装置からもれてくる地面振動により感度が制限され、300Hzより高い周波数ではレーザーパワーで決まる散射雑音が感度を制限し、中間の周波数領域では鏡や防振振り子の熱雑音が制限し

ている、という極限の感度の状態ではなく、技術的な不備による要因で感度が決まっている状態であるので、改善の余地が十分残っている。特に300Hz以下の周波数での目標感度との開きは大きい。このため、地面振動から起こっていると思われる問題を改善するために、i) 振り子のワイヤ位置の変更、ii) アクティブ防振装置の装着をこの秋に行い、来春早々からの観測を予定している。

最後に、短期間とは言え、これまで行われた重力波観測は、従来の天文の領域に属する観測と異なり、昼夜を問わず、晴れていようと雨が降ろうが関係なく観測できるこの重力波の観測手段が神岡で始まったニュートリノ天文学と同様に新しい時代の到来を彷彿とさせるものであることを付記しよう。

参考文献

(1) 藤本 眞克、重力波検出が要求する光の技術と

物理、応用物理64、769 772 (1995)

(2) 三尾 典克、レーザー干渉計による重力波検出...TAMA300の光技術...、応用物理66、939 945 (1997)

(3) 藤本 眞克、重力波天文学、天文月報91、8 13 (1998)

(4) 黒田 和明、重力波検出を支える1 Hz領域の防振技術、応用物理67、544 550 (1998)

(5) 大橋 正健、レーザー干渉計型重力波検出器用超高性能ミラーの開発、応用物理、68、663 666 (1999)

(6) 坪野 公夫、21世紀の重力波天文学...TAMAプロジェクトの現状...、日本物理学会誌54、328 336 (1999)

(7) 中村 卓史、最後の3分間 - 連星中性子星の合体と重力波...、日本物理学会誌50、448 455 (1995)

研究紹介 2

神岡地下実験室における暗黒物質探索実験

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 身 内 賢太郎

1. はじめに

暗黒物質の検出は、素粒子、宇宙物理にまたがる大きな課題であり、直接、間接を合わせて、数多くの実験が現在までに行われている。我々、東京大学理学部衰輪研究室を中心としたグループでは、LiFをターゲットとしたボロメータを用いた暗黒物質検出器を開発、現在神岡地下実験室で測定を行っている。本稿では、暗黒物質探索実験の世界状況に軽く触れた後で、我々の検出器の開発について述べ、最後に神岡地下実験室での測定を紹介する。

2. 暗黒物質直接探索実験の世界状況

現在世界で行われている暗黒物質直接探索実験は、いずれも暗黒物質と原子核の弾性散乱を利用、原子核に与えられた反跳エネルギーを何らかの方法で捉える、という手法が用いられている。

2.1 DAMAグループ、CDMSグループの実験結果

1998年頃からイタリアのミラノ大を中心とするDAMAグループが、暗黒物質の候補である超対称性粒子ニュートラリーノの直接検出に成功した、と報告している。彼らはNaIシンチレーターによって

得られたスペクトルの季節変動を検出の証拠としている。

一方で、2000年になってアメリカのCDMSグループが、DAMAグループの主張するパラメータ領域にニュートラリーノがある可能性は極めて小さい、という報告をした。CDMSグループは、Ge及びSiをそれぞれ半導体検出器及びボロメータとして同時に使い、 γ 線によるバックグラウンド事象の弁別を行っているため、比較的浅い深度の実験室で行われた実験ながら、DAMAグループと同程度の感度を得ている。

2.2 我々の実験の持つ意味

ニュートラリーノと原子核の弾性散乱は、スピンの依存しない項とスピンに依存した項の和であり、どちらが観測にかかりやすいかは、超対称性理論のパラメータ依存となるため予言することはできない。上に述べた2グループの実験は、いずれもニュートラリーノと原子核のスピンの依存しない散乱断面積に感度の高いものである。我々は、スピンに依存した相互作用による検出を目指して、LiFボロメータを開発してきた。以下に我々の検出器の特徴を述べる。

3 . LiFボロメータの特徴

我々の検出器は、

- 1 . ボロメータである
- 2 . フッ素を用いている

という2点に特徴がある。以下に述べる様な理由から、同質量、同閾値のNaIシンチレーターと比較して、LiFボロメータでは、質量50GeVのニュートラリーノに対して、約20~300倍のイベントが期待できる。

3.1 ボロメータのメリット

ボロメータでは、ダークマター等の粒子がターゲット物質に与えたエネルギーが熱化されたものを、高感度温度計で検出する。絶縁体、半導体の低温での比熱は T^3 に比例するため、ターゲット物質を極低温に冷却することで、低閾値、高分解能な検出器とすること可能である。ニュートラリーノによって原子核に与えられる反跳エネルギーは、数keVから数十keV程度であることが予想され、そのスペクトルは低エネルギーに向かって立ち上がる形をしている。このため、閾値の低いボロメータでは、より多くのイベントが期待できるため、ダークマター検出器として、有利である。

また、シンチレーターや、半導体検出器などのダークマター検出器では、原子核反跳で観測されるエネルギーは電子反跳のものに比べて数分の一から、数十分の一になるという、クエンチングと呼ばれる現象があるが、ボロメータではそれがない。これも、実効的に閾値を下げる意味があるので、やはりダークマターの検出には有利である。

さらに、ボロメータの最大の特徴として、ターゲット物質を比較的自由に選ぶことができる、という点があり、フッ素を用いた検出器を用いた実験を行なうためにはこの特徴は重要である。

3.2 フッ素を使うことのメリット

原子核とニュートラリーノとのスピンの依存した散乱断面積は表1に示す $\lambda^2 J(J+1)$ の値に比例する。 J は核スピン、 λ は、核スピンに対する核子スピンの寄与を表す指数。表1によると、

- 1 . ^{19}F の $\lambda^2 J(J+1)$ はシェルモデル依存性が比較的小さい
- 2 . ^{19}F の $\lambda^2 J(J+1)$ は大きい

ため、検出器として用いることができれば、高カウンtrateが期待できると同時に、実験結果のモデル依存性も比較的小さくなるので、信頼できる実験を行なうために非常に有利である。

Isotope	$\lambda^2 J(J+1)$	
	Odd group	Single particle
^1H	0.750	0.750
^7Li	0.411	0.417
^{19}F	0.647	0.75
^{23}Na	0.041	0.35
^{29}Si	0.063	0.750
^{73}Ge	0.065	0.306
^{127}I	0.023	0.250
^{129}Xe	0.124	0.750
^{131}Xe	0.055	0.150

表1 : ダークマター探索に用いられている様々な原子核の $\lambda^2 J(J+1)$ の値及び、モデル依存性。スピンに依存した散乱断面積は $\lambda^2 J(J+1)$ に比例する。Odd group及びSingle particleは、 $\lambda^2 J(J+1)$ の計算に使用されている代表的なシェルモデルである。

4 . LiFボロメータによる暗黒物質探索実験

4.1 検出器の開発、パイロットラン

我々は、1997年まで本郷構内の地上実験室で、抵抗温度計(サーミスタ)及びボロメータの開発を行った[1][2]。我々はゲルマニウムに中性子を照射することで均一な性質をもった、高感度なサーミスタを大量に制作することに成功した。我々が開発したボロメータは1つ21gのボロメータ8個からなる、約160gのものであり、8個の結晶それぞれにサーミスタが取り付けられている(図1)。

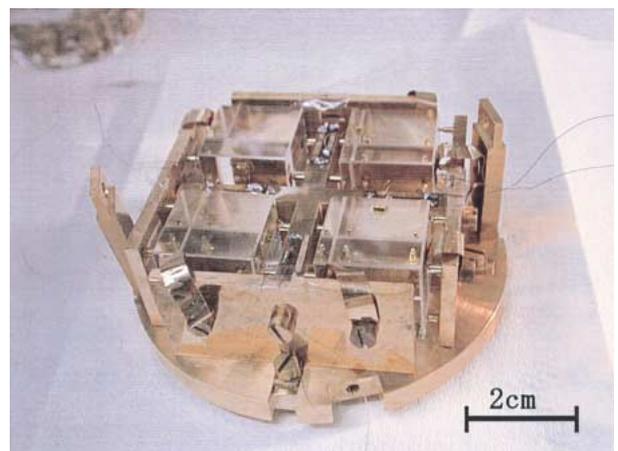


図1 : 我々の用いているLiFボロメータ。無酸素銅ホルダーに、透明なLiF結晶が4つ、スプリングピンで取り付けられている。右手前の結晶の、真ん中よりやや上部に見える黒いものがサーミスタである。現在はこれを2段重ねて使用、合計8個のLiF結晶を検出器として用いている。

その後、1997年より千葉県富津市の鋸山実験室でパイロットランを行い、水深相当15m程度の浅い地下実験室ながら、5 GeV以下の質量を持つニュートラリーノについて世界で最も厳しい制限を与えることに成功した[3]。

4.2 神岡地下実験室での測定

その後、我々は宇宙線研究所共同利用実験として、水深相当約2700mの神岡地下実験室に実験装置を移設、2000年1月より測定を開始している。実験室には図2に示す様にポリエチレン、ホウ酸、鉛、無酸素鋼、ラドン除去のためのエアタイトバッグからなる遮蔽の中に、稀釈冷凍機が設置され、その先にLiFボロメータが取り付けられている。ボロメータは、精製されてから200年以上経つ金沢城起源の鉛によって、極低温部で完全に遮蔽されている。(図2中のold lead)

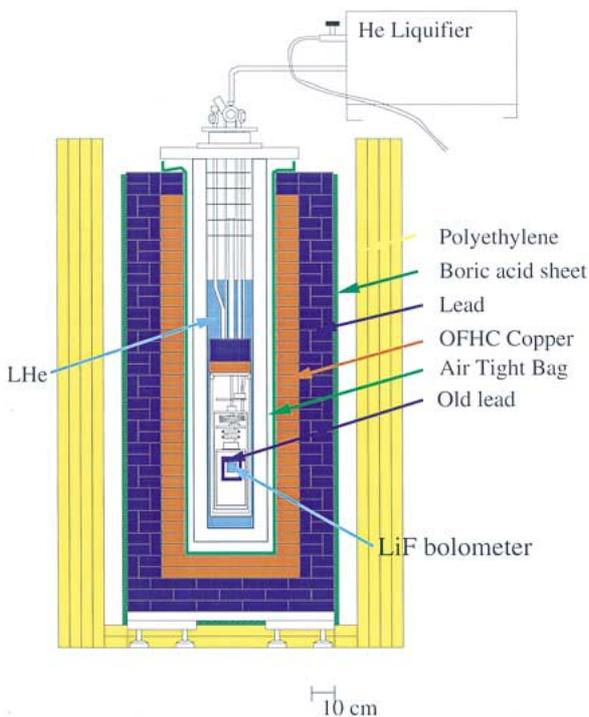


図2：神岡地下実験室でのセットアップ

図3に、2000年8月の測定で得られたエネルギースペクトルを示す。鋸山でのパイロットランと比較して、カウントレートが1/5 - 1/7になっているのが分かる。20keV以上の比較的平らな部分は主に結晶内部に含まれるウラン、トリウムからのγ線、β線によるバックグラウンド、20keV以下の部分での立ち上がりは、極低温部分のアンプ及び配線が拾っているマイクロフォニックノイズであると考えられる。

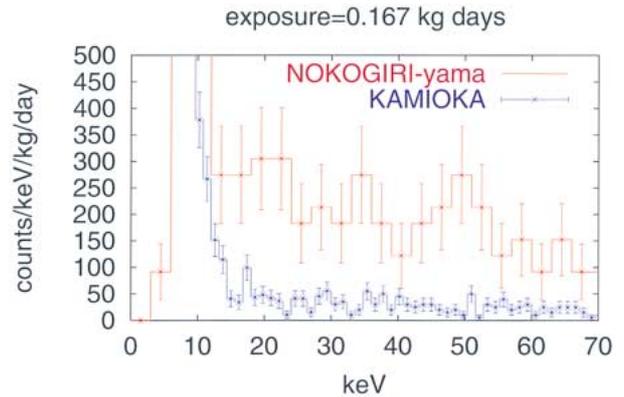


図3：神岡地下実験室で2000年夏の測定で得られたスペクトル

5. 課題

現在我々の直面している課題は以下の3つであり、改善を行っているところである。

1. 結晶内部に含まれるウラン、トリウムの不純物が原罪のバックグラウンドの主な原因となっていると考えられる。現在、原料及び結晶の製造過程を見直して、放射性不純物の含有量が少ない結晶を作成中である。
2. 現在の閾値はマイクロフォニックノイズに制限されているので、振動に強いタイプの低温部アンプを現在開発中である。
3. ボロメータ内部の組み立て時に、空気中のラドンが結晶付近に残留すると、バックグラウンド源になることから、組み立てはラドンの少ない雰囲気中で行なうことが必須である。現在ラドンフリーエア製造装置の製作を進めており、2000年中に完成の予定である。

6. おわりに

我々の神岡地下実験室での測定は、まだ始まったばかりである。今後、検出器の性能向上と測定を繰り返し、最終的には超対称性理論で予想されている領域の探索を行う予定である。本実験を行なうにあたって、宇宙線研究所共同利用実験として採択して頂き、宇宙線研究所関係者の方々に多大なる御協力を頂いたことを感謝する。また、本稿を執筆するにあたって、蓑輪助教授他、ボロメータ実験グループのメンバーに御協力を頂いたことを感謝する。

参考文献

- [1] W. Ootani et al., Nucl. Instr. Meth. A 372 (1996) 534.
- [2] W. Ootani et al., Astropart. Phys. 9(1998)325

[3] W. Ootani et al., Phys. Lett. B 461 (1999) 371.

[4] M. Minowa talk given in Dark 2000 Heiderberg

Jul. 2000 and K. Miuchi talk given in IDM

2000 York Sep. 2000.

ICRR Seminar 2000年度

8月8日(火) 村山 齊(カリフォルニア大)

“ A New Perspective on the Cosmic Coincidence Problems ”

8月29日(火) 鈴木 建(国立天文台)

“ 銀河系宇宙線と軽元素の進化 ”

9月19日(火) 足立 一郎(KEK)

“ First results from Belle experiment ”

10月3日(火) 黒木 経秀(ソウル大)

“ Time Delay at Higher Genus in High-Energy Open string Scattering ”

10月31日(火) 後藤 亨(KEK)

“ 超対称大統一理論にける陽子崩壊 ”

ICRR Report 2000年度

(6) ICRR Report 462 2000 6 (May 2000)

“ ^{16}N as a calibration source for Super-Kamiokande ”

The Super-Kamiokande Collaboration

(7) ICRR Report 463 2000 7 (August 2000)

“ Observation of Atmospheric Neutrinos ”

Takaaki Kajita and Yoji Totsuka

(8) ICRR Report 464 2000 8

“ Studies of Nuclear Components in the Energy region of 10^{15} – 10^{16} eV, Electron Component in the 100GeV–10TeV, Gamma rays in the 30GeV–10TeV, Solar Neutrons and Massive Exotic Particles in the Cosmic Radiation: INCA Workshop at P.N. Lebedev Physical Institute Moscow ” Edited by T. Saito

(9) ICRR Report 465 2000 9 (August 29, 2000)

“ Low Energy Solar Neutrino Detection by using Liquid Xenon ” Y. Suzuki

(10) ICRR Report 466 2000 10 (December 10, 2000)

“ SYMMETRY BREAKING/RESTORATION IN A NON-SIMPLY CONNECTED SAPCE-TIME ”

Hisaki Hatanaka, Seiho Matumoto, Katsuhiko Ohnishi, Makoto Sakamoto

東京大学宇宙線研究所共同利用研究 研究発表会の開催について

東京大学宇宙線研究所共同利用実施専門委員会

委員長 村木 綏

東京大学宇宙線研究所では、昨年度に引き続き、本年度も共同利用実施専門委員会主催で研究発表会を下記の通り開催することとなりました。

平成12年度は、76件の共同研究が採択されています。本研究発表会では、今後の研究の更なる活性化、研究者間での情報交換を目的としています。また、来年度の共同利用査定委員にもご出席頂き、来年度査定に反映して頂く予定です。

研究会の発表者は、実施専門委員会が共同利用研究の中から選出する予定です。

発表会に関する質問等は、委員会幹事の中畑（e-mail: nakahata@suketto.icrr.u-tokyo.ac.jp）まで、お送り下さい。

記

研究会名：東京大学宇宙線研究所共同利用研究 研究発表会

日 付：平成12年12月26日（火）、27日（水）

場 所：東京大学宇宙線研究所 柏 6階大セミナー室

No.42

2000年12月1日

東京大学宇宙線研究所

〒277-8582 千葉県柏市柏の葉5-1-5

TEL (0471) 36-3143又は5104

編集委員 佐々木 梶田