



記載の記事は宇宙線研究所ホームページ (http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/ICRR_news) からでも御覧になれます。

XMASS 実験……………鈴木洋一郎	1	2008年度柏キャンパス一般公開における広報室の活動報告……………伊藤英男	11
地球の固有振動の観測……………田村良明	5	お知らせ……………	12
元宇宙線研究所長戸塚洋二先生を偲ぶ……………梶田隆章	8	自己紹介／人事異動……………	13
戸塚先生を偲ぶ……………中畑雅行	9	ICRR-Seminar／Report ……	14

研究報告

XMASS 実験

神岡宇宙素粒子研究施設 鈴木 洋一郎

XMASS 実験のそもそもの発想は、98年のニュートリノ振動の発見以降に、神岡で次にどのようなことをやるかという議論の中で生まれた。そのころは、まだ太陽ニュートリノ問題が解決していなかったので、最初はスーパーカミオカンデ (SK) で観測できない pp-ニュートリノなどの低エネルギー太陽ニュートリノを観測するために、ガドリニウムを使った実験を考えた。これは、現在話題になっている、ガドリニウムを水に溶かして中性子を同定する能力を SK に付与するものではなく、敷居値244keV の $\nu_e + {}^{160}\text{Gd} \rightarrow e^- + {}^{160}\text{Tb}^*$ 反応を利用した新しい低エネルギーニュートリノの検出器のことである。しかし低エネルギー太陽ニュートリノに特化した実験は、productivity が大きくなく、またこのガドリニウム検出器では高性能な実験とすることが難しかった。

次に注目したのがキセノンである [1]。キセノンはいくつかの大きな魅力を持っている。それ自体が、NaI と同程度の大発光量を持つシンチレーターである。液体キセノンを容器に入れて、そのまわりを光電子増倍管で囲めば、水を液体キセノンに変えただけで、お馴染みの SK と同じ構造をした測定器

になる。測定光量を稼ぐ工夫をすれば、低いエネルギーまで分解能良く観測することができる。ただし、発光波長は真空紫外光の175ナノメートルであるので、検出に光電子増倍管は使えるが、窓材での吸収、キセノン中での散乱や吸収等の減衰に注意が必要だ。液体キセノンの密度は3gで原子番号Zは54、したがって、その自己遮蔽能力は外入ガンマ線に対し強い力を発揮する。たとえば10keV ガンマ線は、20cm のキセノンを通過すると 10^{-5} に減衰する。これにより、我々の売り物である「パルス波形識別 (PSD) 等をしなくても 10^{-4} /keV/kg/day (dru) までバックグラウンドを低減できる」というキャッチフレーズが出来上がった。キセノンのもうひとつの魅力は、同位体分離が容易であることだ。キセノンの同位体分布は、(5%以上の主なもので) ${}^{129}\text{Xe}$ (26.4%)、 ${}^{131}\text{Xe}$ (21.2%)、 ${}^{132}\text{Xe}$ (26.9%)、 ${}^{134}\text{Xe}$ (10.4%)、 ${}^{136}\text{Xe}$ (8.87%) であるから、2重ベータ崩壊核の ${}^{136}\text{Xe}$ を濃縮することや、131と132の間で分離することにより、奇核と偶核をそれぞれ濃縮したキセノンを作ることができる。奇核と偶核の分離は、ダークマター (DM) のスピンに依存した相互作用と依存しない相互作用を分けて研究するときに重要なポ

イントとなる。また、ニュートリノを発生する2重ベータ崩壊は、その崩壊寿命によっては、低いエネルギーに信号をもつpp-ニュートリノやダークマター(DM)のバックグラウンド(BG)になる。その場合には2重ベータ崩壊核である ^{136}Xe をdepleteしたキセノンが有用になるなど、同位体分離が様々なところで生かされる。キセノンを用いることで、DMを探索することが可能な低いエネルギーまで観測でき、同時に低エネルギーの太陽ニュートリノ、2重ベータ崩壊も研究の対象となる。そして、同位体分離を用いれば、さらにそれぞれの研究に対して、多様な攻め方が可能となるのだ。

濃縮したキセノン求めて、2000年の真冬の3月にシベリアのKrasnoyarskに降り立った。気温はマイナス30度。車に乗せられすぐ着くものと思ったが、延々5時間ほど、シベリアの大地を走り続けた。時折、行き交う車もあったが、それ以外には変化のないところである。突然、林が現れ、都市が目の前に現れた。ゲートがあり簡単な検査を受け、人口3万人といわれるKrasnoyarsk45(今はZelenogorskと呼ばれている)に入る。なぜ45なのかとの質問には、CIAが探すのに1から順番に探してゆくと、到達するまでに時間がかかるからだと言っていた。かつてのウラン濃縮工場であるが、今は、民生用に様々な同位体の生成をしているところで、ECP(Electro Chemical Plant)と呼ばれている。人口3万人のうち1万5千人が工場で働き、残りが都市としての機能を維持する人達だ。町には、学校やスーパーマーケットもありバスも走っている。ソ連崩壊後だったので教会の再建作業も行われていた。

ここで、使われている遠心分離機は、1つが、直径15cm長さが50cmほどのもので小さいが、それが1000万に近い数使われているという。遠心分離機の置かれている「部屋」の長さは1km以上あり、先が見えなかった。働いている人達は自転車を使って移動していた。1000万という数が本当かどうか、空間の大きさと、一個の分離機の大きさから計算した。分離機「集合体」が置かれている断面を幅50m高さ5m、奥行1kmだとすると、1500万という数字がでるのでまんざら嘘ではなさそうだ。キセノンの分離にはこの巨大な装置は使わずに教室ほどの部屋のものを使うそうである。ロシア以外の研究者で、この工場に来たのはお前が始めてだと言われた。2日ほどの滞在であったが、びっくりするほどの待遇であった。宿泊施設は、クラスノヤスク川「凍っていて真っ白であったが」の川辺の一戸建て2階建ての建物であったが、食事を作るメイドさん、掃除をするメイドさん、そして、メイドさんを監督する(私を監視する?)メイドさん。そして、通訳と称して若い子が一人付ききりであった。

遠心分離機は莫大な電気を消耗する。火力発電だ。近くに巨大な炭坑があった。露天掘りの炭鉱であたかもカルデラのようであった。反対側までは何キロもあるのだろうか、霞んでいてよく見えない。露天掘りの底まで、何百メートルかあるが、そこまで、鉄道がループを描きながらおりてゆき、底で直接貨車に石炭を積み込み上ってゆく。この炭鉱の町では電気代金は只ということだ。ここから、Krasnoyarsk45まで、何本もの送電線が引かれていた。この時に10kgの ^{136}Xe を購入している。

XMASSのアイデアを出した頃、国際会議でR. Raghavanにキセノンは汚くて駄目だと言われた。汚さの原因はクリプトンである。自然界には存在しなかった放射性物質のクリプトン85が大気圏内核実験や原子炉で作られた。これが、空気から分離して作られるキセノンを汚してしまったのだ。しかしクリプトンを除去するための装置の話をしたら納得した。

XMASSの基本的な開発研究をしていた時、それまでの2重ベータ崩壊やDM探索の実験のスケールが小さいことを、家内工業的だからもっと大きくしなくてはいけないと言ったら、この家内工業という表現に、ずいぶんお叱りをいただいた。ただ、そのころ1トンだ10トンだと言い出したことは大きな刺激だったらしい。早稲田大学で簡単な打ち合わせをしていた時に、たまたま居合わせたコロンビア大学のE. Aprileが1トンキセノンの話を聞き「われわれには技術があるからぜひ一緒にやりたい」と言ってきた。いろいろな噂もあったので、あまり乗り気がなくて丁寧にお断りしたら、同じようなプロポーザルをDOEに出しても良いかと言ってきた。良いと言ったら、何年かの歳月を経た後に、今日のXENON10実験になっている。もし、その時に一緒に始めていたらもう少し違った展開になっていたかもしれない。

低エネルギーのpp-ニュートリノを観測するためには、最低でも10トンの質量が必要である。2重ベータ崩壊の探索には、自己遮蔽が有効でないので、簡単な測定器では難しいし、ある程度の質量も必要である。これには、時間とお金がかかる。したがって、最初のステップとして、1トン全質量で100kgの有効質量をもつ、ダークマター探索専用の測定器(XMASS フェーズI)を開発することを決めた。もちろん、その次のステップでは、ダークマターのさらなる高感度実験をめざすとともに、2重ベータ崩壊の探索が中心になる。その時に同時にpp-ニュートリノが測定できることは、探索だけでなく「測定がある」という意味で重要である。測定からは何かunexpectedが出ることも考えられる。2重ベータ崩壊探索に必要な測定器の技術は、現在、我々

が採用しているフェーズ I 検出器の技術では難しい。 ^{136}Xe の 2 重ベータ崩壊の信号は、2.47MeV であり、その辺りのエネルギーでは BG に対する自己遮蔽があまり効率的でない。探索には新たな測定器のデザインが必要である。しかし、その場合でも、ダークマター (DM) や pp-ニュートリノの研究と一緒に測定できるようにすることが最も良い選択である。このあたりは、神岡施設の森山氏が将来に向けて真剣に考えているところである。

2001 年のスーパーカミオカンデの事故は、SK だけでなく、並行して開発研究を進めていた XMASS の進行にも影響を与えた。さらに、フェーズ-I 推進のための科学研究費を応募してもなかなか通らない。不採択理由の一つに所長がやるのはけしからんという意味合いのことが書いてあったので、翌年には代表者を変えて出したら、今度は、実際の代表者を隠すのはけしからん、ということと言われた。あれやこれやで、数年間、先に進めることができなかった。ようやく昨年 4 月に、ありがたく採択していただいた。私もめでたく今年の 4 月に研究に戻れた。

ダークマター (DM) の存在は、宇宙のあらゆる階層で示されている。WMAP 衛星の観測によれば、宇宙に存在する物質・エネルギーのうち 73% は宇宙の加速膨張の源である正体の知れないダークエネルギーであり、23% が重力のみでしかその存在を知ることができないダークマター、そして、われわれの知っている物質はわずかに 4 % である。ダークマターの存在は、かねてから、銀河の回転速度の観測からも知られていた。そして、安定で質量が重く (おそらく陽子の 100 倍以上)、電荷をもたないダークマターは、新しい素粒子であると考えるのが普通である。したがって、ダークマターの直接観測によるその正体の解明は、ダークマターがその任を負っているとされる宇宙の構造生成の起源を知るだけでなく、新しい素粒子の発見にもつながる。

XMASS 実験は、キセノンにダークマター (DM) が衝突した時に出る光を検出することにより、DM の直接検出、発見を目指している。事象の頻度とエネルギースペクトルを測定することにより、DM と物質との散乱断面積、DM の質量など、正体解明に必要な情報を得ることができる。

XMASS 実験フェーズ-I は光電子増倍管 642 本が、ほぼ直径 80cm の液体キセノン 857kg の球体を囲むように配置されている。光電子増倍管の被覆率は 64% である。最近、キセノンガスの急激な高騰のため、泣く泣く測定器のサイズを一回り小さくした。性能は変わらないが有効質量が少し小さくなる。中性子・ダークマター (DM) などに起因する反跳原子核や、電子等が引き起こす電離・励起により作られたエキシマが基底状態に戻るときに発光する。1

重項からの発光が 3 ns、3 重項からの発光が 27ns の減衰時間をもつ。直接励起エキシマができる場合もあるが、多くの場合は、イオン化したキセノンが再結合してエキシマになり発光する。再結合時間が、反跳原子核では短く、電子・ガンマ線の場合は長いので、この時間差により DM による反跳か、電子やガンマ線による事象かも、区別することが可能となる。XMASS の事前の性能評価には、この要因は入れていないので、実際の解析で PSD を用いると、さらに性能が上がるのが期待される。

XMASS の売りは大光量と低バックグラウンドである。検出可能光量が多ければ、エネルギー数値を下げることもできるし、分解能も上がる。DM の信号は数 10keV 以下の低いエネルギーにピークを持っているので、観測可能エネルギーが低いほどよい。XMASS では、1 keV あたり、8 光電子の検出ができ、5 keV までの観測を目指す。10keV でのエネルギー分解能は 15%、位置分解能は 6.5cm である。測定光量を上げるためには PMT の被覆率を上げる必要がある。そのため増倍管の形は六角形として、できるだけ稠密になるように配置する。球形に PMT を並べるのは、実際には困難であり Pentakis-dodecahedron という多面体 (12 個の 5 面ピラミッドからなり、それぞれのピラミッドは 5 つの 3 角面からなっている) を使って、PMT を配置している。PMT は、キセノンの中に沈める。これまでのテストチェンバーでは、PMT は小窓を通して液体容器の外側に配置されていた。窓による反射や透過率のロスなどを考慮して、PMT をキセノンに、じゃぼ浸けにする設計に変えた。

図 1 に示すように、液体キセノンと光電子増倍管 (PMT) は内部容器 (IVC) に入れられる。IVC は真空容器 (OVC) に入れられる。この PMT は、新たに XMASS 実験のために開発した。稠密に配置するために六角形にしたのみでなく、この開発の最大

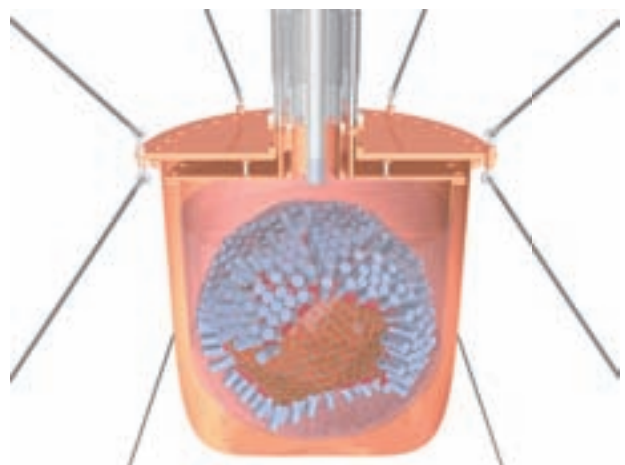


図 1 : XMASS 実験装置 :

のポイントは、PMTに含まれるウランやトリウムなどの放射線不純物を極限まで小さくしていることである。通常のPMTに含まれる不純物量のおよそ100分の1程度にまで減らすことに成功し、PMT一本あたりおよそ1mBqぐらいのバックグラウンドに抑えることができた。これにより、PMT起源による検出器中心部の有効体積内のバックグラウンド(BG)がほぼ 10^{-5} dru/(keV/day/kg)となる。 10^{-5} druとは、DMの信号の領域を10keV幅とすると、XMASS装置100kgの有効質量で、100日に1事象のBGがあることに対応する。これは、目標値 10^{-4} druの10分の1である。検出器の容器からのバックグラウンドも同程度に抑えるためには、慎重にその材料を選ぶ必要がある。材料として数トンに及ぶものを使うためU/Thの混在は数ppt程度以下に抑える必要がある。

XMASS実験の主なBGはPMTからのBGのような外部起源と内部起源BGがある。外部起源はこのPMTからのBGにみられるように自己遮蔽能力(SKではおなじみのことである)を利用して、100kgの有効質量内のBGを低減できる。有効質量は20cmの自己遮蔽厚で100kg、もし、15cmで済む場合には200kgとれる。PMTや容器の中に含まれるU/Th起源のアルファ粒子の反応により生成される中性子によるBGはガンマ線によるものの100分の1程度であると評価されている。また、岩からの中性子は直径10メートルの水槽により低減される。

内部バックグラウンドの典型はクリプトン85である。クリプトンはすでに試作した蒸留装置を2回通過させることにより、0.1pptのレベルまで落とせるであろう。ウランやトリウムも蒸留によりかなり落とせるが、試験機による測定では ^{238}U が、 $(9 \pm 6) \times 10^{-14}$ g/g、 ^{232}Th は、 23×10^{-14} g/gであり、目標値までは、それぞれ、さらに10分の1にまでしなくてはならない。現在、除去のためのカラムを試作テストしている。

これらのBG低減により、BGレベル 10^{-4} druが信号領域において実現される。そして、これは、スピンの依存しない相互作用に対して、 10^{-45}cm^2 の感度を持つ(図2)。これまでの実験の100倍程度よいものだ。キセノンの良いところは、 ^{129}Xe などの奇核を含むことである。スピンに依存する相互作用への感度は 10^{-39}cm^2 である。これも100倍の改善だ。この感度では深い所にいる魚はつれないという悪口をいう人もいるが、DMも光にあたる浅いところが好きかもしれない。その時は、間違いなく釣り上げることができる。確実なことしかやらないということでは、発見はできない。

最近、DAMAグループが自分たちの結果をさら

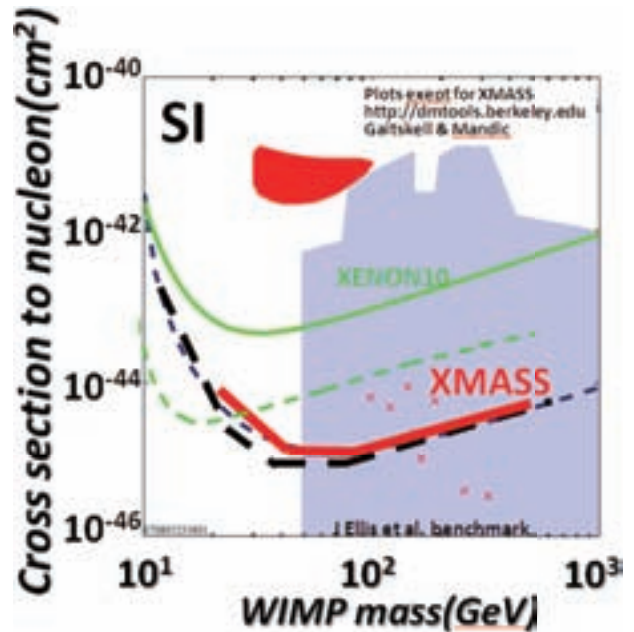


図2：XMASS実験の感度：ダークマターの反応断面積が 10^{-45}cm^2 程度までの探索が可能となる。

に確認した論文を書いた。LIBRAという実験からの結果である[2]。DAMAは、季節変動を観測してDMの質量が数10GeVで、反応断面積がおおよそ 10^{-41}cm^2 のところにあってと言っているグループである。LIBRAの論文は明らかに説明不足な論文であり、言っている領域は、他の実験では否定されている領域ではあるが、否定している実験と核種の違いがあるため、矛盾なく説明することもまだ可能である。慎重な実験的検証が必要で、彼らより感度の高い何種類もの実験を続けてゆくことが大切である。

また、人工衛星に測定器を搭載したPAMELA実験が、10-100GeVあたりに陽電子のexcessを報告している[3]。これが、DMからの信号であるかどうかは、まだわからないが、これが、DMによるものだとすると、直接観測へますます期待が高まる。来年度には、本格的に開始されるであろうLHCからは、DMの候補である超対称性粒子の発見も期待される。今後、ダークマター探索はexcitingな時代にはいつてゆく。

将来、XMASS実験は有効質量を10トンにし、DMだけでなく2重ベータ崩壊や低エネルギー太陽ニュートリノの観測も視野に入れてゆく。XMASS実験から新たな知見が開けてゆくことを期待する。

参考文献

- [1] Y. Suzuki, hep-ph/0008296
- [2] LIBRA: R. Bernabei et al., astro-ph/0804.2741v1
- [3] PAMELA: O. Adriani et al., astro-ph/0810.4995v1

地球の固有振動の観測

国立天文台 水沢 VERA 観測所 田 村 良 明

宇宙線研究所の神岡坑内では、2003年より100m レーザー伸縮計による地殻歪みの観測が京都大学と東大地震研究所のグループで開始されている。これは、レーザー干渉技術によって微小な変位を計測するという技術が重力波の検出技術と共通するものであり、国立天文台構内の重力波望遠鏡 TAMA300 の開発当時から地球物理関係者と重力波関係者の協力が始まったことによる。CLIO サイトの神岡坑道は良好な岩盤中にあり、山の被りが1000m 近いという地球物理観測的にも非常に得難い環境であることから伸縮計を CLIO と並ぶ形で設置したものである。また2004年10月からは、同所の旧重力波実験室にて超伝導重力計 (Superconducting Gravimeter, SG) による重力変化の観測も開始した。「重力波」ではなく地球の重力変化の観測である。宇宙線や高エネルギー物理学とはちょっと畑違いの地球物理観測を共同利用研究の範疇で実施している。この紙面をお借りして、SG とその観測の意義や世界の状況について紹介したい。

超伝導重力計 (SG) とは

重力加速度の測定方法には、絶対測定と相対測定 の2種がある。前者は真空筒の中で落体の落下距離と時間を測定し、文字通り重力加速度の絶対値を求める方法・装置である。後者は時間的な重力変化や、空間的な重力差を求める方法・装置である。超伝導重力計 (SG) は相対重力計の1つであり、定点に設置して微細な重力変化を観測する。SG の原理は、液体ヘリウム温度に冷却された超伝導コイルによる磁場でニオブ球を浮上させ、その上下位置変化をコンデンサーの容量変化として検出し、重力変化を捕らえるものである。SG は超伝導電流の安定性とセンサー部分が極低温に冷却されて熱雑音が小さいことにより、高安定性と高分解能を得ている (図1)。

重力の測定では、伝統的に μGal という単位を使っており $1\mu\text{Gal}=10^{-8}\text{ms}^{-2}$ である。私が GeV と言われてもピンとこないように、多くの方にとってはこの単位には馴染みがないと思う。 $1\mu\text{Gal}$ という大きさは、地上重力の 10^{-9} 、高さ 3 mm 離れた場所の重力差、1 m 離れた150kg の質量が及ぼす引力である。SG は何らかの振動現象が数日間継続すれば



図1：神岡構内に設置された超伝導重力計。
(後列向かって左が筆者。)

n Gal (10^{-11}ms^{-2}) レベルの変動を捕らえる能力があり、地球の種々の変動を捕らえる重要な観測装置の1つとなっている。

地球の内部を見る目

地球の内部を観測する手段に、地震波、電磁気的手法、重力観測、あるいは高圧物性試験といった実験的手法がある。最近宇宙線の地殻による吸収を詳細に調べることにより内部構造を探る「宇宙線ラジオグラフィー」という手法が実用になってきたので、宇宙線研究と地球物理研究は案外仲良く手をつなぐことができるのかもしれない。

さて、地震波の走時解析から地球の3次元構造を示す図 (トモグラフィー) が昨今多数作成されるようになってきた。地球内部を知る上で地震波の解析は強力な手法であることは確かであるが万能というわけではない。震源地が偏在するし、地震波からは密度や粘性といった情報は直接決定しにくい。一方、SG は密度の観測に強いとか、非弾性の効果が顕著になるような長周期 (日~月) の現象の観測に強いといった特色がある。

ある程度の規模の地震が発生すると、地球の自由振動というものが励起される。この振動には半径方向の伸縮モード (Spheroidal モード、図2 参照) と捻れモード (Torsional モード) がある。これらの振動周期は、地球の弾性常数の分布と密度分布によ

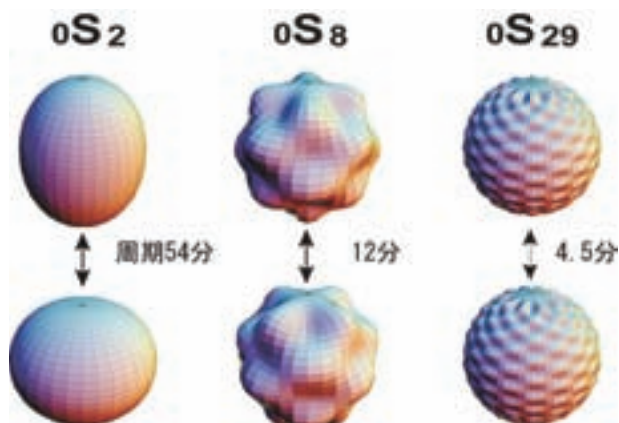


図2：地球自由振動のイメージ。
(図は広島大学須田直樹氏による。)

て決まるものである。SG は数 mHz より長い周期では地震計よりも高い精度で自由振動の観測が可能であり、低次の地球内部構造（密度や弾性定数の分布）や、コアモードと呼ばれる地球深部に振動エネルギーが卓越する振動の解析により深部の構造に新たな拘束条件が与えられるものと期待している。

地球の自由振動の観測例

地震による地球自由振動の観測例を図3に示す。これは2004年末のスマトラアンダマン地震発生から1日経った時点で、神岡で観測された重力変化のスペクトルである。多数のモードが励起されていることが容易に見て取れる。これらの振動のうち、 ${}_0S_0$ と呼ばれる周期約20.5分の振動は、地球全体が同位相で膨張縮小するモードでQが5500と非常に高く、地震発生後90日以上その振動が観測された（図4）。神岡を含む世界11地点の ${}_0S_0$ モードの解析からは、その振幅が緯度依存性を示していることの他、

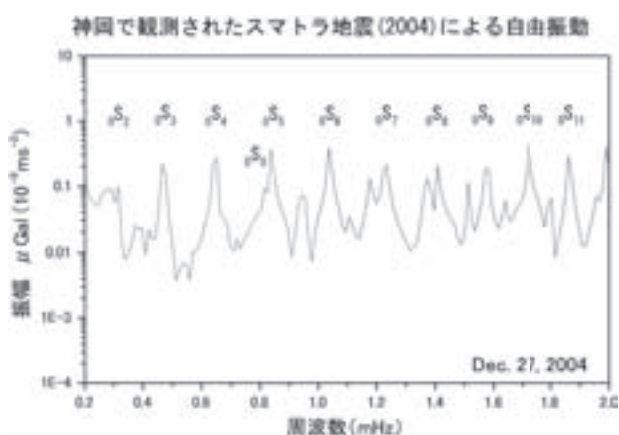


図3：スマトラアンダマン地震（2004）により励起された地球自由振動。神岡における重力変化のスペクトル。多数のモードが励起されている。

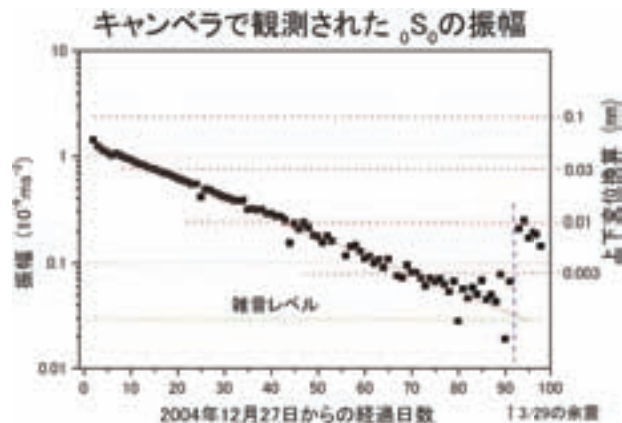


図4：スマトラアンダマン地震（2004）による ${}_0S_0$ モード。GGP 観測点の1つであるキャンベラのSGデータより。90日間以上その振動が観測された。

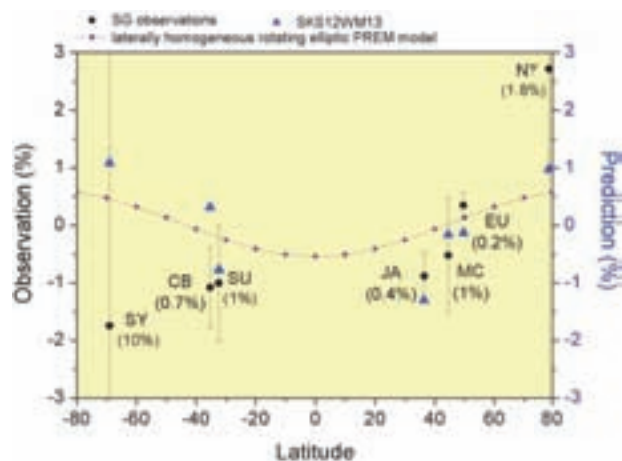


図5： ${}_0S_0$ モードの振幅分布。赤線は回転楕円体モデル。青三角はトモグラフィーモデルに基づいた理論的振幅。黒丸はSGによる観測値。（Rosat, S. et al., 2007, Earth Planet Space, 59, 307-311より）

3次元地震波トモグラフィーモデルを用いた理論振幅との差異も見いだされている（図5）。SGはそのスケールファクターが0.1～0.2%程度の誤差で良く決められており、振動の周期だけではなく振幅からも地球モデルとの比較がなされている。

世界の重力観測網 GGP

SGによる観測はGGP（Global Geodynamics Project）として約20の機関が参加し相互にデータを交換している（図6）。神岡のSGもこれに参加している。このプロジェクトの目標の1つに、内核の並進運動であるスリッターモードの検出がある。スリッターモードとは、固体内核と流体である外核の密度差によって生じる負の浮力を復元力とする内核の振動である。周期は4.5時間から6時間と見積もられており、その周期から内核と外核の密度差を精密



図 6：世界の SG 観測網（GGP 観測網）。

に決めることができる。これは単に密度差を決めるだけではなく、内核の密度つまりは質量を精密に決めることになり、地球の進化モデルへの拘束にもなる重要な観測と言える。

スリヒターモードの検出については、これまでいくつもの研究がなされているが、残念ながらまだ確

実な検出例はない状態にある。このモードは重力だけではなく地殻ひずみ変化としても観測されるので、100m レーザー伸縮計と SG を併設している神岡でその信号を捕らえられれば確実な観測となり、その価値は高い。

おわりに

GGP では観測データを相互に交換し、また潮汐やスペクトル解析といった基本的な解析法も公開されている。つまり手の内を明かしたうえでの国際競争である。神岡は類をみない良好な観測環境にあり、神岡 SG データは内外から期待されている。この競争に勝つためには単に良質な観測データを得る努力だけでは不十分であり、目的とする現象を抽出するためのアイデア・手法の確立、他所にぬきんでた迅速な解析といったものが勝負になっている。

神岡でのレーザー伸縮計・SG 観測は共同利用の範疇で実施しているものの、1～2 年で終了するのではなく継続的な観測を望むものである。

元宇宙線研究所長戸塚洋二先生を偲ぶ

宇宙線研究所長 梶 田 隆 章

ニュートリノ研究で世界的に有名な元宇宙線研究所長の戸塚洋二先生が2008年7月10日に亡くなりました。戸塚先生は1987年4月に退官された小柴先生のあとを引き継いでカミオカンデの実験代表者となりました。そして宇宙線研究所将来計画検討小委員会が1987年に出した答申で最優先課題とされたスーパーカミオカンデを実現するために、1988年に東京大学理学部の素粒子物理国際センター（当時）から宇宙線研究所に移られました。

戸塚先生の努力の結果、当初の予定通り1996年にスーパーカミオカンデは実験開始となりました。戸塚先生をリーダーとするスーパーカミオカンデは、1998年には宇宙線が大気中で生成するニュートリノを観測し、地球を突き抜けてくるミューニュートリノの減少を示してニュートリノ振動を発見しました。引き続きこの結果はスーパーカミオカンデとKEKの加速器を用いた世界初の長基線ニュートリノ振動実験（K2K 実験）で確認されました。更に2001年には、スーパーカミオカンデとカナダのSNOの2実験の太陽ニュートリノ測定値の比較から、太陽ニュートリノ問題もニュートリノ振動によるものだということに決着しました。これらの発見によって、ニュートリノに質量があることが判明し、素粒子の標準理論を超えてより深く自然法則を理解するための実験的な手がかりが初めて得られました。これらは科学史に残る偉大な成果と言えるでしょう。



1998年暮れ。スーパーカミオカンデ実験が朝日賞受賞の知らせを受けて撮った記念写真。写真中央が戸塚先生。

戸塚先生についてあえて一言で言わせてもらうならば、どんな立場になっても最大限の努力をしてその職を遂行されてきたということかと思います。ちなみに「最大限の努力」という言葉は戸塚先生が特に気に入って使っていた言葉で、先生の生き方が凝縮されていると思います。2001年にスーパーカミオカンデが大きな事故にあった際には、おそらく前年のご病気からまだ回復しきっていなかったのかと思いますが、全身全霊を傾けて復旧に取り組み見事に復旧を軌道に乗せられました。現在の宇宙線研究所があるのは戸塚先生のご尽力によるところが非常に多いと思います。来年春には戸塚先生が実現を心待ちにしたJ-PARCと完全復旧したスーパーカミオカンデ間のニュートリノ振動実験（T2K 実験）が始まります。戸塚先生がこの実験の開始を見ることなく亡くなられたのは本当に残念です。

このようにニュートリノ研究で顕著な科学的成果を挙げられた戸塚先生ですが、それとともに宇宙線研究所関係では宇宙線研究所附属神岡宇宙素粒子研究施設長、宇宙線研究所長などを歴任され、日本の非加速器素粒子物理学、宇宙線研究などの発展のために尽力されました。1990年台前半に組織された宇宙線研究所将来計画検討小委員会では、吉村太彦委員長（当時東北大学教授、後に宇宙線研究所長）のもとで幹事を務められ、最高エネルギー宇宙線の研



2000年カンガルーII望遠鏡の完成式典での戸塚元所長（右から3番目）。オーストラリア・ウーメラにて。右から2番目は木舟正教授（当時）。

究 (TA 実験) と重力波観測 (LIGO 計画) をスーパーカミオカンデが実現された後の宇宙線研究所の将来計画の基幹として位置づけられました。戸塚、吉村、鈴木歴代所長の強力なバックアップと、福島先生をはじめとする TA グループの努力の結果 TA 実験は今年無事に完全な形で観測が開始されました。今後の研究の展開が楽しみです。一方、重力波研究の計

画はまだ計画の実施が認められていませんが、今後とも一刻も早い計画の実現に向けて全所的に頑張っていかなければならないと考えられます。

あとに残された我々は、戸塚先生の生き方を学び、宇宙線研究及び宇宙線研究所の更なる発展のために最大限の努力を続けて行くべきと思われます。心より戸塚先生のご冥福をお祈りいたします。

追悼

戸塚先生を偲ぶ

神岡宇宙素粒子研究施設 中 畑 雅 行

戸塚先生のご逝去を悼み、謹んでご冥福をお祈り申し上げます。

私はカミオカンデ実験の建設の頃からずっと、戸塚先生に指導していただきました。先生にはいつも叱咤激励され、ある時はそれが私の研究の推進力となっていました。先生はご自身が置かれたポジションにおいてそれが最大限の効果を生み出すように、常に「全力投球」されていました。先生への感謝の意を表するとともに、私が先生から学んだことをご紹介します。

私が戸塚先生のご指導を仰ぎ始めた1982年ごろは、先生が電子・陽電子衝突実験の分野から地下での素粒子実験の分野に転向される頃でした。先生は1972年頃からドイツハンブルグにある DESY 研究所で、DASP 実験、そしてそれに引き続く JADE 実験に参加されました。当時は装置建設の多くの部分を現地で行わなければならなかったようで、先生は「実験装置の組上げのために現地の技官を使わなければならなかったが、彼らにはドイツ語でしか話が通じないので、毎日朝早く起きて当日指示する内容の原稿を慣れないドイツ語で作らないといけなかった」とおっしゃっていました。先生は電子・陽電子衝突実験で行われていたシステムティックな解析方法を地下実験に導入されました。イベントは「再構成プログラム」によって発生場所、方向、エネルギーといった情報に変換される、実験装置を模擬するモンテカルロシミュレーションによってバックグラウンド事象、信号事象を発生し、実験データと比較することによって信号が有意かどうかを判断する、…といった手法をカミオカンデ実験の最初から導入されました。

戸塚先生はハードウェア（特に、電子回路や高電

圧発生装置）に専門的知識を持ち、何人もの学生を指導して手作りのハードウェアを完成させました。こうした教育によって、数多くの現在活躍している実験家達が育ってきました。先生の指導は非常に厳しく、私の先輩の世代では、「窓からほっぽりだすぞ」といった「叱咤激励」の言葉ももらいながら教育されたと聞いています。当時の学生はそんな言葉に負けないぞと頑張っていました。私自身は、主にカミオカンデのオンライン／オフラインシステムを担当していたため、先生からハードウェアの手ほどきを学生時代に受けることができず、今となっては残念に思っています。

カミオカンデの頃に戸塚先生といっしょにデータ解析をおこなったことが思い出されます。特に、1987年2月28日（土）のことは今でも鮮明に覚えています。超新星爆発が光で見えたという情報が2月

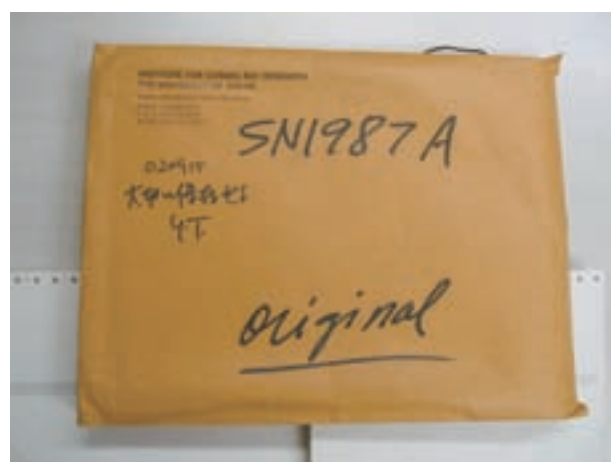


図1：戸塚先生が神岡を去られる時に超新星1987Aの「最初のプリントアウト」をいれた封筒に残されたメッセージ。

25日に入り、すぐにカミオカンデのデータが東大に送られてきました。2月28日(土)の早朝にはSN1987Aの信号が捕まっていることがわかりました。その日は、大学院生が解析プログラムを走らせていろいろな数字を出し、先生がグラフ用紙にデータを手でプロットしました。先生は実験データを非常に大切にされていました。SN1987Aの時の「最初のプリントアウト」はずっと先生が大切に保管されていました。先生が2002年9月15日に神岡を去られる時に、プリントアウトをいれた封筒に残されたメッセージを写真1に示します。

スーパーカミオカンデ実験グループが一丸となって、ニュートリノ振動の結果を次々と出すことができたのも、戸塚先生の強い指導力があったからだと思います。私は精密な太陽ニュートリノ観測のために、LINACによるキャリブレーションを担当していましたが、当初なかなか装置がうまく動かず、1996年の共同実験者の会議では「次の共同実験者会議までに装置を動かさないとお前は首だ」とはっばをかけられました。その年の秋にうまく装置が動いてデータが取れた時には、先生にたいへん喜んで頂き、最初のLINACデータのイベントディスプレイを先生の部屋に飾って頂きました。その時に、単なる厳しさだけでなく心から声援を送って頂いていたのだなということが分かりました。

戸塚先生が最初にガンの手術を受けられたのが2001年でした。その年の11月12日にスーパーカミオカンデの事故がおき、まだ手術から完璧には回復していないにもかかわらず、再建の陣頭指揮を執られました。11月13日に坑内に研究者を集め、「原因をすぐ究明し、半分の密度でもいいから、いち早く装置を再建させよう」と述べ、どん底に落ち込んだ我々を奮い立たせてくれました。その時の姿は今でも脳裏に残っています。

昨年、戸塚先生にお会いした時に、「これが俺のデータだ」と言って見せて頂いたのが、腫瘍マーカー値の時間変化グラフでした。「ここからここまではこの抗ガン剤を使ったんだ」とか、「ここで値が変化しているのはこれこれをしたからだ」など、詳しく説明して頂きました。また、「俺が最初にガンの手術を受けた2001年から5年は経っているので、医者にとっては成功だったんだ」ともおっしゃっていました。なぜ、ここまで自分のことを客観的に見ることができるのだろうと私は驚きました。先生は、

亡くなられる間際までブログを書かれていましたが(<http://fewmonths.exblog.jp/>)、そこにはりっぱな教科書にもなるような「科学入門」というコーナーがあります。(これは、講談社から本としても出版されています。)この一節を書くために、病床中にもかかわらず光のスペクトルについて再度勉強したとおっしゃっていました。

戸塚先生を野球にたとえるならば、試合の最後まで投げ続けた直球主体の剛腕投手、かつ4番バッターです。試合の序盤は相手方が優勢でした。相手チームにはJ/ ψ というホームランを打たれ、 $P_c(=\chi_c)$ や3-jetという3塁打で対抗しましたが優位には立てませんでした。中盤で「陽子崩壊」という新しい作戦に替えてみましたが、成功しませんでした。しかし、試合の終盤には、「大気ニュートリノ振動」、「太陽ニュートリノ振動」というホームランが飛び出し、さらに「K2K実験」というダメ押しのホームランもあり、試合は圧倒的優勢に転じました。しかし、戸塚投手は9回裏の最後の打者の最終球まで、剛速球を投げ続けていました。

亡くなられる2週間程前に、あるインタビューで先生は「20世紀は量子力学、相対論が物理の基礎を築いたが、ダークエネルギーはそれを超える新たなパラダイムの兆候かもしれない」とおっしゃっていました。これから新しい物理が生まれてくるかもしれません。先生の遺志を引き継ぎ、研究に全力投球していきたいと思います。

戸塚先生、長い間ありがとうございました。



図2：池の山山頂付近にて。戸塚先生は神岡の自然を愛していました。(1997年10月 片山一郎氏撮影)

2008年度柏キャンパス一般公開における広報室の活動報告

宇宙線研究所広報室 伊 藤 英 男

本年度の一般公開でも、広報室としては一昨年・昨年同様にサイエンスカフェを行った。また、それと同時に霧箱の配布を充実させ、さらに日本人3人のノーベル物理学賞受賞のニュースが世間を騒がせたこともあったので、ノーベル賞コーナーを設置した。

サイエンスカフェでは、例年同様に日本科学未来館にご協力頂き、ファシリテーター役として2名のサイエンスコミュニケーターの方にご参加頂いた。また、今回はスピーカーとしてSDSSの小西君、重力波の斎藤君にご協力頂いた。

サイエンスカフェが何なのか分からない方のために説明を書くと、端的に言えば、カフェやバーなどの飲食店内において、科学者がお客さんに向かって科学の話をするイベントである。元々はヨーロッパでケミカルハザードやバイオハザードが起きた際に、その研究所周辺の住民が科学者に対して説明責任を求めた際に飲食店を借りて行った説明会に端を発している。しかし、このようなボトムアップ的な住民運動は日本ではほとんど起きない。また、周辺住民への危険性という意味でも、宇宙線業界を含む基礎科学系の業界はあまり関係無い場合が多い。それ故、日本における基礎科学側からのサイエンスカフェは、科学者側から周辺住民へのトップダウン形式で行われている場合がほとんどである。このサイエンスカフェという形式が他の講演会など異なる点は、一般の方と科学者が同じ目線で双方向に情報のやり取りを行う点にある。噛み砕いた言い方をすれば、一般の方からすれば、直に科学者に自分の意見や疑問点を投げ掛けられ、それに対して科学者からの即答が得られるということであろう。ただ、サイエンスカフェは「これがサイエンスカフェである」というような定義が今のところ無い。そのため開催者の方針によって印象ががらりと変わる。幸いなことに、今年度行った分を含めた3年間、宇宙線研究所一般公開で行ってきたサイエンスカフェは好評を博していると言える。

24日、25日にそれぞれ1名ずつのカフェを開催したのだが、台風の直撃した昨年度と比べても盛況だったのではないと思う。小西君はSDSSと超新星爆発の説明をし、斎藤君はそもそも重力波とは何

か？から始まり、重力波の検出方法を説明した。2人ともに様々な質問が投げ掛けられており、その様子からも一般の方からの注目度の高さが伺えたのではないかと考えている。もちろん、質問が出るということは、分かり易かったということでもある。分からない部分が分からない、となると一般の方は得てして黙り込んでしまうからだ。

アンケート結果も昨年度までの2年と比較しても遜色の無い充実度があったように感じられた。ただ、今回の失敗点としては、大型バスで見学に来ている高校生を集客出来なかったことがあげられる。これは、バスで帰る時間と、カフェの開催時間が被っていたのが原因なのだが、毎年訪れてくれている高校のようだったので、もう少しそこを配慮すべきであったと反省している。来年度は時間をずらすことで対処しようと考えている。写真は両日それぞれのカフェの風景である。

なお、カフェの参加者の質問などを聞くと、やはり宇宙や相対論に関わる研究に関しては、一般の方からの関心が非常に高いことが分かる。本の売れ行きなどから見聞きしているものと異なり、実際に一般の方からの声が聞こえるのがカフェの良いところである。今回までの3回のカフェで得た一般の方からの声を基に、より質の高い広報活動が出来るのではないかと考えている。

霧箱配布に関しては、昨年の倍以上の集客があった。カフェを開催している時間帯は配布を中断して



図1：サイエンスカフェにおけるSDSSと超新星爆発の説明



図2：サイエンスカフェにおける重力波の説明

いたので、別の部屋で行ってあれば霧箱だけでもかなりの集客効果があったものと考えられる。ただ、別の部屋を準備して行えたかと言えば、今回に関しては不可能であったように思う。霧箱配布には非常に多くの協力者の動員が必要であり、今回も各グループから学生からスタッフまでたくさんのご協力の下に形にすることができた。この場を借りてお礼させて頂きたく思う。ご協力頂いた皆様、ありがとうございました。しかし、それでも人員不足であったことは否めない。人員をもう少し増やし、さらにもっとシステマティックに配布出来るように事前準備を行うなどの下準備が必要であると考えられる。また、今回の一番の失敗は、アルコールを入れるペットが1つしかなかった点である。これは昨年と同じ流れで出来ると考えていた私の失点である。

霧箱配布は、基本的に広報室で準備した霧箱セットを配り、それを組み立て、アルコールを入れ、最

後にドライアイスで冷やすことによって放射線を見もらうという流れで行っている。霧箱キットは小さいため、宇宙線を見るのにはあまり適していない。それ故、霧箱の中心に放射線源を配置し、それに含まれる放射性物質からのアルファ線を観測して頂く。目に見えないものを見えるようにする工夫を目の当たりにしたお客さんからの評判は上々のように感じている。

しかし、霧箱配布はいつか飽きられると考えるべきであろう。そのため、次の何かを考えなければならない。この点に関しては、すでに一つ私にアイデアがあるので、来年度までに形に出来れば行ってみたいと考えている。

ノーベル賞コーナーに関しては、6階の展示コーナーに4枚のパネルを新たに配置したのだが、私はカフェと霧箱配布に付きっきりとなっていたため、実際にどれだけの集客効果があったかわからないというのが正直なところである。6階の展示コーナーは以前から、展示ボックスを配置するなどのこ入れが提案されているので、今回を機に、少しずつ手を入れていこうと考えている。

それぞれ個々の行ったことに関して総括すると、人員および金銭的に手が回っていない実情はあるが、まだまだ集客を伸ばすことは可能であると考えている。また、それを行うことによって、宇宙線研究所を一般により広く認知して貰うことが可能であると考えている。それが今後の宇宙線研究所にとってプラスに働いていくようにしなければならぬので、今後とも皆様のご協力を承りたく存じます。よろしくお願い致します。

お知らせ

平成21年度東京大学宇宙線研究所共同利用研究公募のお知らせ

宇宙線研究所では、平成21年度共同利用研究の公募を行います。本研究所において共同研究を希望される方は、平成21年1月13日（火）（厳守）までに、電子ファイルにより共同利用研究申請書を提出願います。さらに、印刷した申請書に研究代表者の方の印と所属長印を押印のうえ、平成21年1月30日（金）（厳守）までに郵送等により提出願います。

応募の詳細については宇宙線研究所ホームページ（<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/info/koubo/h21/>）に掲載されています。

応募書類提出及び問い合わせ先

東京大学柏地区宇宙線研担当課予算・決算係
〒277-8582 千葉県柏市柏の葉5-1-5
電話（04）7136-3188

自己紹介



宮原ひろ子
(特任助教)

2008年10月1日付で一次線グループの特任助教に着任しました宮原ひろ子です。学生ときは名古屋大学太陽地球環境研究所に所属し、樹木年輪に含まれる宇宙線起源核種を加速器質量分析計を用いて分析し、太陽活動と銀

河宇宙線の数十～数千年スケールの長期変動について調べてきました。学位取得後は、南極の氷に含まれる宇宙線起源核種の分析も開始しました。現在は太陽ダイナモおよび銀河宇宙線の太陽変調の理論に観測的制約を与えるため世界最高精度のデータを取得すべく研究を進めています。また、それらのデータを通じて宇宙線が地球気候に与える影響の理解にも貢献したいと考えています。どうぞよろしくお願いいたします。



宮川 治
(特任助教)

2008年11月1日付けで特任助教として神岡宇宙素粒子研究施設に着任いたしました宮川治（みやかわおさむ）と申します。学生時代、まだ宇宙線研が田無にあったころから、重力波検出器の開発を行っていました。その後、6年間アメリカのカリフォルニア工科大学

で同じ重力波検出 LIGO プロジェクトの実験を続けてきました。LIGO では主に干渉計光学設計、シミュレーション、ノイズハンティング等に関わってきました。今回は日本の次世代低温重力波検出器 LCGT を実現させるために、アメリカで学んだ技術、特にデジタル制御システムを積極的に取り入れ、LCGT の低温プロトタイプ干渉計である CLIO の感度向上に貢献したいと考えています。LCGT で LIGO を追い越して重力波検出を実現し、米国に一矢報いてやるのが夢です。皆様どうぞよろしくお願いいたします。

人事異動

発 令 日	氏 名	異 動 内 容	現 (旧) 官 職
H20. 2. 18	谷 本 奈 穂	新規採用	特任研究員
H20. 4. 1	平 松 尚 志	新規採用	特任研究員
H20. 4. 1	浅 野 雅 樹	新規採用	特任研究員
H20. 4. 1	清 水 雄 輝	新規採用	特任研究員
H20. 4. 1	梶 裕 志	新規採用	特任研究員
H20. 4. 1	伊 藤 英 男	採用 (職名変更)	研究機関研究員から特任助教へ
H20. 6. 1	武 長 祐美子	新規採用	特任研究員
H20. 9. 30	須 山 輝 明	辞職	特任研究員
H20. 10. 1	中 谷 一 郎	委嘱	客員教授
H20. 10. 1	宮 原 ひろ子	新規採用	特任助教
H20. 11. 1	宮 川 治	新規採用	特任助教

ICRR-Seminar 2008年度

- 4月10日(木) 浅野雅樹氏(宇宙線研究所)
“軽いヒッグスを持つ超対称模型における暗黒物質”
- 4月17日(木) 平松尚志氏(宇宙線研究所)
“Evolution of cosmological perturbations in a braneworld scenario”
- 4月25日(金) 清水雄輝氏(宇宙線研究所)
“ISS/JEMにおける高エネルギー宇宙線実験 CALET の開発”
- 5月9日(金) 櫻井敬久氏(山形大学)
“宇宙線生成核種の時間変動と太陽活動”
- 5月30日(金) 寺田健太郎氏(広島大学)
“高感度イオンマイクロプローブを用いた地球外物質の局所同位体分析”
- 6月17日(火) Venya Berezhinsky 氏 (INFN, Laboratori Nazionali del Gran Sasso)
“Ultra High Energy Cosmic Rays : from Galactic to Extragalactic Cosmic Rays”
- 6月24日(火) Mohammad S. Athar 氏 (Aligarh Muslim University, India)
“Neutrino Nucleus Cross Sections”
- 7月9日(水) 内山 隆氏(宇宙線研究所)
“日本における大型重力波望遠鏡の実現にむけて (CLIO から LCGT へ)”
- 7月9日(水) 山本博章氏 (LIGO, カリフォルニア工科大学)
“Advanced LIGO の現状”
- 7月11日(金) Gary Varner 氏 (University of Hawaii)
“Microwave Radio Detection of UHE Air Showers”
- 9月26日(金) Kumiko Kotera 氏 (Institute of Astrophysics of Paris)
“The Optical Depth of the Universe Seen through Ultrahigh Energy Cosmic Ray Spectacles”
- 10月27日(月) 中西裕之氏(鹿児島大学)
“Square Kilometer Array 計画”
- 11月7日(金) 宮原ひろ子氏(宇宙線研究所)
“宇宙線起源核種による過去1200年間の太陽活動と宇宙線変動”

ICRR-Report 2008年度

- ICRR-Report-526-2008-1
“Search for TeV Gamma-ray Emission from Clusters of Galaxies with CANGAROO-III Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes”
Ryuta Kiuchi
- ICRR-Report-527-2008-2
“Non-Gaussianity from isocurvature perturbations”
Masahiro Kawasaki, Kazunori Nakayama, Toyokazu Sekiguchi, Teruaki Suyama and Fuminobu Takahashi
- ICRR-Report-528-2008-3 (September 16, 2008)
“Non-Gaussianity from Baryon Asymmetry”
Masahiro Kawasaki, Kazunori Nakayama and Fuminobu Takahashi
- ICRR-Report-529-2008-4 (October 1, 2008)
“A General Analysis of Non-Gaussianity from Isocurvature Perturbations”
Masahiro Kawasaki, Kazunori Nakayama, Toyokazu Sekiguchi, Teruaki Suyama and Fuminobu Takahashi
- ICRR-Report-530-2008-5 (October 9, 2008)
“Hilltop Non-Gaussianity”
Masahiro Kawasaki, Kazunori Nakayama and Fuminobu Takahashi
- ICRR-Report-531-2008-6 (October 10, 2008)
“Positron/Gamma-Ray Signatures of Dark Matter Annihilation and Big-Bang Nucleosynthesis”
Junji Hisano, Masahiro Kawasaki, Kazunori Kohri, and Kazunori Nakayama

No.67

2008年11月30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 (04) 7136-5121 又は 0578-85-9609 (神岡)
編集委員 佐川宏行 安部 航