

CONTENTS

P. 1.
研究紹介

・・・川崎 雅裕

P. 5.
イベント報告P. 7.
受賞P. 8.
人事異動P. 9.
ICRR Seminar

MASAHIRO KAWASAKI, ICRR - Theory Group

研究紹介



東京大学宇宙線研究所
川崎 雅裕

Q ボール

超対称性理論に基づいて宇宙の物質・反物質の非対称性を説明するアフレック・ダイン機構では、Qボールと呼ばれるソリトンが生成されると考えられています。ここでは、多くの方にとって馴染みがないと思われるQボールについて紹介します。

1 はじめに

Qボールは $U(1)$ 対称性を持つスカラー場の理論で現れる球状のソリトンで、1985年にColeman[1]によって詳しく調べられQボールという名前がつけられました。1998年Kusenkoたち[2]によって、Qボールが宇宙の物質・反物質の非対称性(バリオン数生成)を説明するアフレック・ダイン機構に伴って生成されることが示されたことから注目を集め、盛んに研究されるようになりました。Qボールは宇宙のバリオン数の生成に関係するだけでなく、Qボール自身やその崩壊によって放出された粒子がダークマターになる可能性があります。

2 スカラー場の理論
におけるQボール

スカラー場は時空の各点で値を持つ場ですが、その値が複素数である場合を複素スカラー場と呼びます。複素スカラー場の位相を変化させる変換を $U(1)$ 変換と呼び、複素スカラー場を φ で表すと、 $U(1)$ 変換で φ は $\varphi e^{i\alpha}$ に変換されます(α は変換のパラメーター)。この $U(1)$ 変換をしても理論が変わらない場合、その理論は $U(1)$ 対称性があるといえます。具体的には理論がスカラー場の絶対値の2乗、つまり、 $|\varphi|^2$ だけに依存すると、上の $U(1)$ 変換をしてもスカラー場の絶対値の2乗は変わらないので理論はこの変換に対して不変になります。 $U(1)$ 対称性を持つスカラー場には保存するチャージがあることが知られています。こ

こでのチャージは電磁場で現れるチャージ (=電荷) とは異なることに注意してください。電磁場も $U(1)$ 対称性を持つことから電荷が保存しますが、電磁場の $U(1)$ 対称性は変換のパラメータ α が時空の各点で異なっていますが、今考えている $U(1)$ 対称性は α が時空の点によらない定数の場合に成り立つ対称性で、区別するために、前者を局所 $U(1)$ 対称性、後者をグローバル $U(1)$ 対称性と呼びます。話を元に戻すと、グローバル $U(1)$ 対称性を持つスカラー場には保存する (グローバル) チャージが存在します。

さらに、スカラー場はその値によってポテンシャル・エネルギーを持ちます。素粒子理論ではこのポテンシャル・エネルギーが最低の状態を真空と呼びます。例えば図1で示したポテンシャルではスカラー場がゼロのところエネルギー最低で、全空間でスカラー場がゼロになっている状態が真空となります。いま、簡単のため真空でスカラー場のポテンシャル・エネルギーをゼロとします。また、スカラー場が持つエネルギーはポテンシャル・エネルギーだけではなく、スカラー場の値が時間変化 (空間変化) することから生じる運動エネルギー (勾配エネルギー) があります。

ここで、空間のある領域でスカラー場が存在し、あるチャージ Q を持っているとします。このチャージ Q を一定に保ったまま、スカラー場の値を変化させ、スカラー場の持つエネルギーが最小になるようなスカラー場の配位を求めるとい問題を考えると、スカラー場の配位が球対称、つまりスカラー場の値が中心からの距離だけに依存して、図2のようなプロファイルを持つときにエネルギーが最小になることがわかります。ただし、エネルギーが最小になるような配位が存在するためにはポテンシャルがスカラー場の値が大きくなると $|\phi|^2$ よりも平坦になっていることが必要です (図1)。スカラー場が局所的に安定な配位を持つときその配位を一般にソリトンと呼び、今考えているような $U(1)$ 対称性を持つ理論で現れるソリトンを Q ボールと呼びます。

3 宇宙の物質・反物質非対称性

我々の体や地球さらには太陽系は原子から成る物質でできています。また、さらに大きなスケールの銀河や銀河団も物質でできていると考えられます。このように我々の宇宙は物質でできており、反物質はほとんどないということが分かっています。では、この物質・反物質の非対称性がいつ生まれたのでしょうか? 物質を構成している原子は原子核と電子から構成され、原子核はバリオンと呼ばれる陽子・中性子から構成され、各バリオンはバリオン数 + 1 を持ちます。さらにバリオンは3つのクォークから成り、クォークはバリオン数 1/3 を持ちます。一方、反物質を構成する反バリオンはバリオン数 - 1 を持つので、宇宙で物質が反物質に比べて多いことを宇宙は正のバリオン数をもつということが出来ます。宇宙が誕生して約1秒たってヘリウムなどの元素が作られ始めた時期には宇宙は物質からなる、つまり正のバリオン数を持っていたことがわかっています。また、宇宙が誕生した直後にはインフレーションと呼ばれる急激な宇宙膨張が起こってバリオン数はうすめられてゼロになったと考えられます。したがって、宇宙のバリオン数はインフレーション終了から元素が合成される前の間に生成されたこととなります。

宇宙初期にどのようなメカニズムでバリオン数が生成されたかは宇宙論の大問題でまだ分かっていません。これまで、この問題を解決するいくつかの有望なアイデアが考えられています。その中の一つがアフレック・ダイン機構と呼ばれるものです [3]。アフレック・ダイン機構は超対称性理論に基づくバリオン数生成機構で、超対称性理論で予言されるスカラー・クォークがインフレーション中に大きな値を持つことによって宇宙にバリオン数が生成されま

す。超対称性は素粒子のボソンとフェルミオンの対称性で、対称性理論はボソンとフェルミオンがペアで存在することを予言します。バリオンを構成するクォークはフェルミオンなので、それとペアをなすボソンであるスカラー・クォークが存在します。スカラー・クォークはその名の通りスカラー場でクォークと同じバリオン数 1/3 を持ちます。この場合、 $U(1)$ 対称性に関連する保存チャージはバリオン数になります。インフレーション中に大きな値を持ったスカラー・クォークはインフレーション後にポテンシャルの最小に向かって転がり振動を始めます。この時、スカラー場の値が大きくなると、少し $U(1)$ 対称性が壊れて、スカラー場の位相方向に依存したポテンシャルがあるとスカラー場は位相方向にも運動し、その結果、スカラー・クォークの運動は図3のように複素面上を回転します。スカラー場の理論ではこの回転がバリオン数に対応しており、このようにスカラー場の運動によってバリオン数が生成されます。これが、アフレック・ダイン機構と呼ばれるバリオン数生成のシナリオです。アフレック・ダイン機構ではスカ

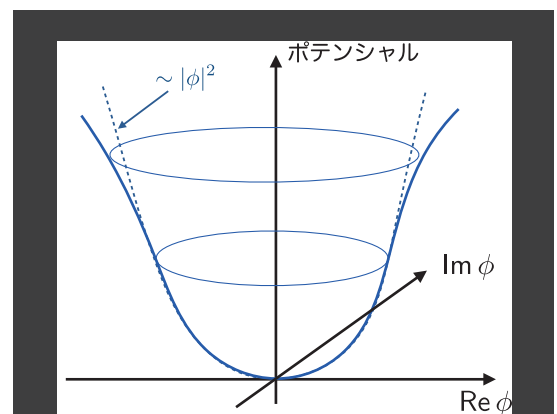


Figure 1 : Q ボールを作るスカラー場のポテンシャル

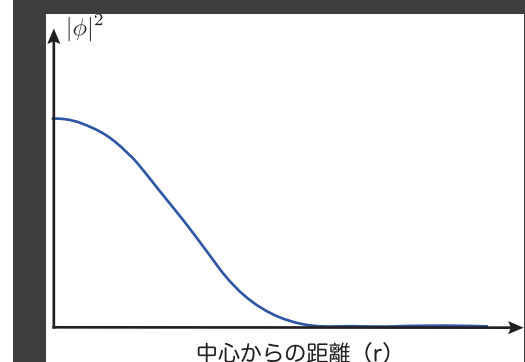


Figure 2 : Q ボールのプロファイル

ラー場の値が大きなところで $U(1)$ 対称性が壊れていることが重要で、この対称性がバリオン数の保存と関係しているので、バリオン数の保存も破れ、バリオン数ゼロから有限のバリオン数を生成することができます。さらに、スカラー・クォーク場の値は宇宙膨張によって小さくなり、バリオン数が生成された後は $U(1)$ 対称性の破れは効かなくなりバリオン数は保存します。

4 スレック・ダイン機構と Q ボール

宇宙にバリオン数を生成するアフレック・ダイン機構ではスカラー・クォーク場というスカラー場が重要な役割を果たします。このスカラー場のポテンシャルはスカラー・クォーク場の値が大きなところで平坦に

なっており、2節で述べたように、Q ボール解を持ちます。したがって、アフレック・ダイン機構ではバリオン数が生成されるだけではなく、その後 Q ボールが生成される可能性があります。実際、スカラー・クォーク場の宇宙論的進化を数値シミュレーションで調べてみると、スカラー場が持つわずかな空間的揺らぎが成長し、図4で示したように、球状のスカラー場の固まり、つまり、Q ボールが生成されます [4、5]。

アフレック・ダイン機構に伴って生成される Q ボールの性質は基となっている超対称性理論のモデルによって異なります。超対称性はそれが予言するスカラー・クォークなどの超対称性粒子がまだ実験で見つからないことからわかるように現実の世界では破れていると考えられます (超対称性が破れてなければペアをなすクォークとスカラークォークは同じ質量ですでに

見つかっているはずですが)。この超対称性の破れの仕方によって、重力媒介型とゲージ媒介型があり、それぞれに対応して、重力媒介型 Q ボールとゲージ媒介型 Q ボールがあります。

重力媒介型 Q ボールは Q ボールの質量 M がバリオン数 B に比例して ($M \propto B$)、バリオン数あたりの質量がスカラー・クォークの質量程度 (陽子の 1000 倍ぐらい) になります。このため Q ボールは古典的には安定ですが量子的効果でバリオン数を持ったより軽い粒子である陽子に崩壊することができます。したがって、重力媒介型では、アフレック・ダイン機構で生成されたバリオン数が一旦 Q ボールに取り込まれ、それが崩壊することによって宇宙に放出されるというシナリオになります。

一方、ゲージ媒介型 Q ボールはその質量 M がバリオン数 B の4分の3乗に比例し ($M \propto B^{3/4}$)、バリオン数あたりの質量はバリオン数が大きなるにつれて小さくなっていきます ($M/B \propto B^{-1/4}$)。したがって、十分大きなバリオン数 (10^{20} 程度以上) を持つ Q ボールはバリオン数あたりの質量が陽子の質量より小さくなり、陽子に崩壊できないので、安定に存在できます。このようにゲージ媒介型 Q ボールは安定なので現在の宇宙にも存在し、ダークマターの候補にもなります。しかし、アフレック・ダイン機構で生成されたバリオン数は Q ボールに取り込まれたままなので、原子を構成するようなバリオンは別途生成する必要があります。

5 バリオン数とダークマター

バリオン数生成の問題と同様に宇宙論で大きな問題となっているのがダークマターの問題です。現在われわれの宇宙には原子などの通常の物質の約5倍のダークマターと呼ばれる物質が存在することがわかっています。このダークマターの正体が未だに謎で、様々なダークマター候補が提案されています。さらに、謎と考えられるのは、バリオンとダークマターの存在量比が1対5でほぼ同じ程度だということです。バリオンとダークマターが全く別のメカニズムで生成されるとすると、生成された量が同

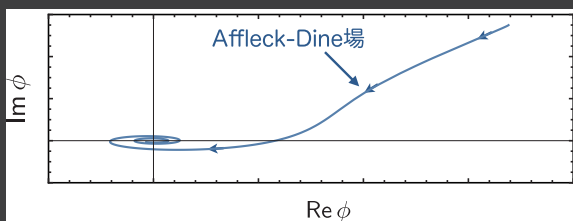


Figure 3 : アフレック・ダイン機構におけるスカラー場の運動

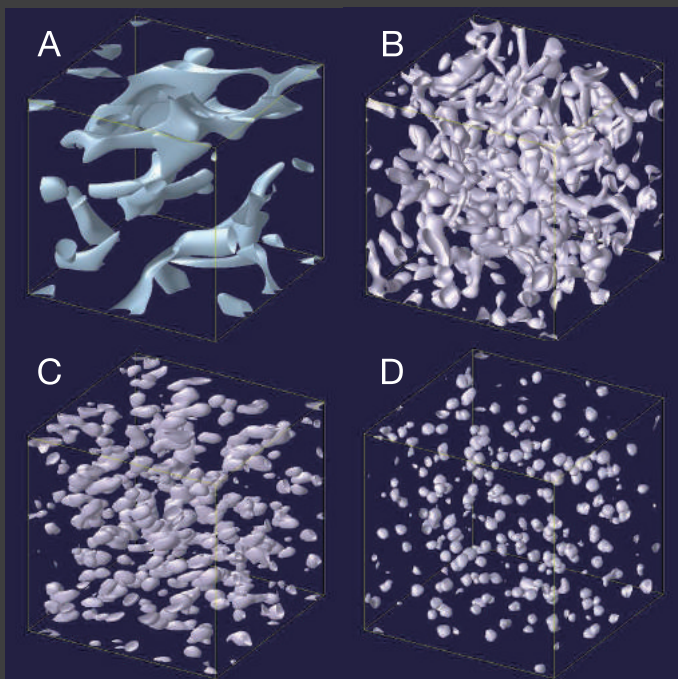


Figure 4 : アフレック・ダイン機構における Q ボール生成のシミュレーション。A → B → C → D と時間が経過するにつれてスカラー場 (白色) が球状に凝縮していく。

程度というのは不思議なことです。これが、「バリオン・ダークマターの一致」の問題です。

この問題に対して、Q ボールはその答えを与える可能性があります。重力媒介型 Q ボールの場合、Q ボールの崩壊によってバリオンが宇宙に放出されます。この際に、Q ボールはスカラー・クォークより軽い超対称性粒子にも崩壊し、放出された超対称性粒子はさらに軽い超対称性粒子に崩壊し、最終的に最も軽い超対称性粒子が生成されます。最も軽い超対称性粒子は安定なので、ダークマターになることができます。したがって、同じ Q ボールからバリオンとダークマター粒子が生成されることになります。この場合、同じ起源から作られているのでバリオンとダークマターの存在量が同程度になるのは不思議ではないということになります。実際に Q ボールの崩壊過程を詳しく解析した結果、実際にバリオン数とダークマターの両方をうまく説明で

きる可能性があることがわかっています。

6 最後に

超対称性理論において宇宙のバリオン数を説明するアフレック・ダイン機構に伴って Q ボールというソリトンが生成され、それは宇宙のバリオン数やダークマター、あるいはそれらを同時に説明できることを説明しました。ここでは、スカラー・クォークが Q ボールを作っているとして話をしてきましたが、超対称性理論に現れるスカラー場としては電子やニュートリノのようなレプトンと超対称性のペアをなすスカラー・レプトンの場や素粒子の標準模型にあるヒッグス場があり、一般に、Q ボールはそれらのスカラー場の組み合わせで作られます。そのような Q ボールとして、スカラー・クォーク場とスカラー・レプトン場からなるゲージ媒介型 Q ボールを考えると、スカラー・レプトン成分だけが電子

に崩壊し、Q ボールが電荷を持ち、その結果、大きな電荷を持った Q ボールがダークマターになるという面白い可能性も考えられています [6]。

References

- [1] S.R. Coleman, Nucl. Phys. B 262 , 263 (1985)
- [2] A. Kusenko and M.E. Shaposhnikov, Phys. Lett. B 418, 46 (1998)
- [3] I. Affleck and M. Dine, Nucl. Phys. B 249, 361 (1985). doi:10.1016/0550-3213(85)90021-5
- [4] S. Kasuya and M. Kawasaki, Phys. Rev. D 61, 041301 (2000)
- [5] T. Hiramatsu, M. Kawasaki and F. Takahashi, JCAP 1006, 008 (2010)
- [6] J.P. Hong, M. Kawasaki and M. Yamada, JCAP 1608, 053 (2016)

明野観測所 40 周年記念講演会・記念式典

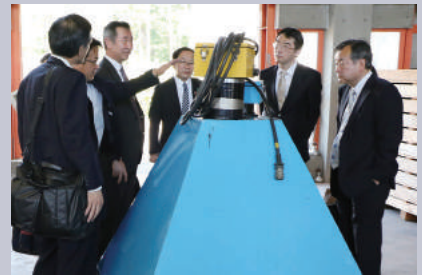
東京大学宇宙線研究所附属明野観測所の設立 40 周年を祝う記念講演会と記念式典が 9 月 8 日、山梨県甲府市のホテル談露館で開かれました。文部科学省学術機関課長や明野観測所の建設や研究に携わった研究者や地元の企業や住民の皆さま、大学関係者ら 120 人が参加し、これまでの研究のあゆみを振りかえりました。

講演会と式典に先立ち明野観測所の見学ツアーを開催しました。ハヶ岳のふもとに白くくっきりとした入道雲が高みをめざして昇るなか、晩夏を感じさせない強い陽ざしを浴びた大型バスが、参加者を乗せて明野観測所に到着。2つのグループにわかれて、研究施設を見学しました。夏空のように澄んだ青いボディーが特徴的な、2004 年まで用いられた広域空気シャワー観測装置「AGASA」の検出器や、米国ユタ州で観測中の望遠鏡アレイ（TA）の地

表検出器の展示を見たり、スペイン・カナリー諸島ラパルマで建設が進むチェレンコフ望遠鏡アレイ（CTA）についての解説を聞いたりしました。

その後、会場をホテルに移して記念講演会を開催。宇宙線研究所の梶田隆章所長のあいさつを皮切りに、東京大学名誉教授の木舟正先生、神奈川大学特任教授の垣本史雄先生、宇宙線研究所の手嶋政廣教授が登場し、これまでの明野観測所での研究成果や思い出を振り返り、現在に脈々と受け継がれている最先端の研究について話しました。

その後の記念式典では、東京大学理事・副学長の松木則夫様、文部科学省学術機関課長の西井知紀様、北杜市明野総合支所長の小尾民司様からご祝辞をいただき、これまでの研究観測でお世話になった、地元の北杜市、東光区、浅尾原財産区、清水兼壽様に梶田所長から感謝状が手渡されました。



柏キャンパス一般公開

東京大学柏キャンパスの一般公開が、2017年10月27、28の両日に開かれました。近隣に住んでいる家族や中高生の団体、この日のために遠方から旅行に来た人などで賑わい、宇宙線研究所には約2,600人が訪れました。宇宙線研究所では、「話す」「体験する」「見る」「買う」を切り口にした12種類の企画を実施しました。今年は初めてオリジナルグッズを販売しました。スーパーカミオカンデの写真をあしらったジグソーパズルは発売前からTwitterで話題となり、当日は長い行列ができました。

〈話す〉28日にトークイベントをふたつ実施しました。ひとつは「〈知的興奮カフェ〉研究者の生き様をたどる！」です。研究者が知的興奮した瞬間を熱をもって語る、そんな企画です。望遠鏡グループの藤井俊博・特別研究員、チェレンコフ宇宙ガンマ線グループの岡崎奈緒・技術職員、高エネルギー天体グループの衣川智弥・

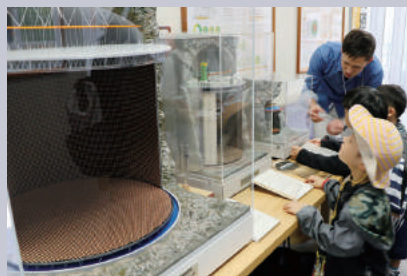
特任研究員がスピーカーとして登壇しました。ふたつめは「梶田先生に直接ききたい!」。梶田隆章所長が宇宙線研究所の研究プロジェクトについてお話した後、30分ほど多彩な質問を受けました。会場を埋め尽くす約250人が訪れ、日ごろの疑問を直接投げかけていました。

〈体験する〉普段は見えない宇宙線の軌跡を霧箱で観察するワークショップや、重力波の観測で用いられるレーザー干渉計を組み立てるワークショップ、屋外での〇×クイズ大会。未知の物質「暗黒物質」を探索する実験装置XMASSのペーパークラフトなどを実施しました。霧箱のワークショップでは、霧が立ち込めるようにアルコールの蒸気が漂うようすに、参加者たちが真剣なまなざしを注ぎ、放射線の軌跡が現れた瞬間に歓声を上げていました。

〈見る〉バーチャルリアリティ（VR）の世界で岐阜県飛騨市の神岡鉱山の中にある

実験施設を探検する企画を実施しました。世界最大の地下ニュートリノ観測装置スーパーカミオカンデと、大型低温重力波望遠鏡KAGRA、暗黒物質を直接探索するXMASSの実験エリアを探検することができます。参加者たちはヘッドマウントディスプレイを装着し、360度を見回しながら楽しんでいました。

〈買う〉今年は初めて宇宙線研究所のオリジナルグッズを開発して販売しました。グッズは広報と寄附を目的として開発し、利益の一部が若手研究者の雇用や研究環境の整備など、研究所の運営資金に充てられます。商品は全部で4種類。スーパーカミオカンデの光電子増倍管が光り輝く写真をあしらったジグソーパズル、チェレンコフ光のデータが銀色に光るノート、宇宙線の空気シャワーが降り注ぐイラストをあしらったマグカップ、研究プロジェクトの画像を詰め込んだ2018年のカレンダーで



す。特にジグソーパズルは、発売前から Twitter で話題となりました。「光電子増倍管を自分でインストールできる感覚が味わえるところが素晴らしい」。「このタマひと

つひとつが浜松の職人さんが丁寧に作ったピースでもあるし……」。たくさんの反響をいただきました。当日はオープンの1時間前から行列ができはじめ、2日間で500

個以上を完売しました。販売は岐阜県飛騨市の実験施設の見学イベントを企画してくれている GSA 実行委員会さんが協力してくれました。ありがとうございました。



受賞

バークレー日本賞 受賞 — 梶田 隆章

宇宙線研究所の梶田隆章所長が、カリフォルニア大学バークレー校の日本研究センターから、「バークレー日本賞 (Berkeley Japan Prize)」を授与されました。バークレー日本賞は海外における日本の文化・科学技術の普及と発展に貢献した人に贈られる賞として2008年に創設され、これまでに村上春樹さん、宮崎駿さん、坂本龍一さんが受賞しました。梶田所長の受賞理由は「ビッグサイエンスにおける日本の知的リーダーシップと国際的プレゼンスを高めたこと」でした。



日本物理学会若手奨励賞 受賞 — 藤井 俊博



宇宙線研究所の藤井俊博・特別研究員が、大気蛍光望遠鏡を用いた極高エネルギー宇宙線スペクトルの研究に大きく貢献した功績により、第12回日本物理学会若手奨励賞を受賞しました。日本物理学会若手奨励賞は、将来の物理学を担う優秀な若手研究者の研究を奨励し学会をより活性化するために設けられた賞です。

人事異動

発令日	氏名	異動内容	職
H29.5.31	田中 秀和	任期満了	特任助教
H29.6. 1	田中 秀和	採用	特任助教
H29.6.30	池田紀代子	任期満了	臨時用務員
H29.7.10	VOCCA, Helios	採用	特任准教授（外国人客員）
H29.7.15	苔山圭以子	辞職	特任助教
H29.7.16	苔山圭以子	採用	助教
H29.7.16	森山 茂栄	昇任	教授
H29.7.16	浅野 勝晃	昇任	准教授
H29.7.31	CRAIG, Kieran	任期満了	特任研究員（研究所研究員）
H29.7.31	大岡 秀行	辞職	技術職員
H29.8.1	大岡 秀行	採用	学術支援専門職員
H29.9.1	SCHLENSTEDT, Stefan	採用	特任教授（外国人客員）
H29.9.1	南方 久和	受入開始	協力研究員
H29.9.9	VOCCA, Helios	任期満了	特任准教授（外国人客員）
H29.9.30	小川 洋	任期満了	特任助教
H29.9.30	小林 兼好	任期満了	特任助教
H29.9.30	早河 秀章	辞職	技能補佐員
H29.9.30	武石 隆治	受入終了	協力研究員
H29.9.30	中嶋 大輔	受入終了	協力研究員
H29.9.30	ZIEMBICKI, Marcin	受入終了	協力研究員
H29.10.1	谷 隆志	採用	准教授
H29.10.1	高橋 正博	採用	技能補佐員
H29.10.1	田守 幸雄	採用	技能補佐員
H29.10.1	小川 洋	受入開始	協力研究員
H29.10.1	小林 兼好	受入開始	協力研究員
H29.10.15	小林 兼好	受入終了	協力研究員
H29.10.16	SITAREK, Julian	採用	特任准教授（外国人客員）
H29.10.16	小林 兼好	採用	特任助教
H29.10.16	辻 久美子	採用	臨時用務員
H29.10.27	SCHLENSTEDT, Stefan	任期満了	特任教授（外国人客員）
H29.10.31	八崎須美子	辞職	臨時用務員

(H29.5.1～H29.10.31)

ICRR Seminar

2017 年度

2017.5.9

Dr. Hang Bae Kim (Hanyang University)
"Where is cosmology going?"

2017.6.5

Dr. Ellis Owen (University College London)
"The implications of cosmic ray heating in and around the interstellar medium of high-redshift starbursts"

2017.6.28

Dr. Hideyuki Tagoshi (ICRR)
"Challenges to Gravitational Wave Physics and Astronomy"

2017.7.11

Dr. Elena Aprile (Columbia University)
"First Results from the XENON1T Dark Matter Experiment"

2017.7.26

Dr. Markus Holler (Innsbruck, Austria)
"After the H.E.S.S. I Legacy - Challenges and Prospects for the First Hybrid IACT Array"

ICRR Seminar

2017 年度

2017.8.4

Dr. Christophe Bronner (ICRR)
"T2K neutrino oscillation results with data up to 2017 Summer"

2017.8.9

Dr. Laszlo Olah (Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)
"Application of new variant of gaseous tracking detectors for CR detection and muography"

2017.10.20

Dr. Anatoly Lagutin (Altai state university, Russia)
"Anomalous diffusion of cosmic rays in the Galaxy"

2017.10.25

Dr. Stefan Schlenstedt (DESY Zeuthen and ICRR, U-Tokyo)
"The Medium Size Telescopes for CTA"

2017.11.10

Dr. Andrew J Long (University of Chicago)
"Topics in Axion Cosmology" (ICRR-IPMU joint seminar)



スーパーカミオカンデのジグソーパズル

光り輝く光電子増倍管が並ぶジグソーパズルです。ちょっと試してみましたが、激ムズです。挑戦者の話によると、左上の細かいエリアよりも、右下の光センサーが大きく並んで見えるエリアのほうが難しいようです。広報と寄附を目的に作りました。300ピース、1500円。

No. 100

東京大学宇宙線研究所

2017 autumn

〒277-8582 千葉県柏市柏の葉 5-1-5 TEL (04) 7136-5148

バックナンバー：<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/beta/icrrnews.html>

編集 広報室