

CONTENTS

- P.1.
SN1987A ニュートリノ
検出 30 周年
・ ・ ・ 中畑 雅行
- P.5.
イベント報告
- P.7.
人事異動
- P.8.
ICRR Seminar

MASAYUKI NAKAHATA, ICRR - Super-Kamiokande

研究紹介



宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設長
中畑 雅行

SN1987A ニュートリノ検出 30 周年

1987年2月23日、Kamiokande 実験は大マゼラン星雲で起きた超新星爆発(SN1987A) (図1)にともなうニュートリノを観測した。今年はその観測から30年目にあたる。現在では世界で多くの超新星ニュートリノを受けられる観測装置が稼働しており、次の超新星爆発を待ち構えている。SN1987Aの観測を振り返るとともに将来への展望を紹介する。

1 Kamiokande 実験

1980年代初頭、大統一理論を直接検証するために陽子崩壊を探索する実験が世界各地で建設された。水槽に純水を貯めて陽子崩壊の際に発せられるチェレンコフ光を光電子増倍管(PMT)で捉えるタイプの実験(水チェレンコフ型実験)では、アメリカで7,000トンの容積を持つIrvine-Michigan-Brookhaven(IMB)実験が1982年に観測を開始し、日本では3,000トンの容積を持つKamioka Nucleon Decay(Kamiokande)実験が1983年に観測を開始した。当時の理論予想では陽子の寿命が $10^{30} \sim 10^{31}$ 年と予想されていたので、1,000トンあたり年間30-300事象が観測されるはずであった。しか

し、残念ながら理論は正しくなく、陽子崩壊は見つからなかった。(Kamiokandeの25倍大きいSuper-Kamiokandeにおいても未だに見つかっていない。)

IMB実験装置はKamiokande実験装置に比べて容積が何倍も大きく、実験も先に進んでいたため、Kamiokandeでは直径50cmの大型PMTを使用して水槽内面の20%をPMTの光電面で覆うことによって、高いエネルギー分解能を持たせ、また、粒子の識別ができるという特徴を持たせた。陽子崩壊の最初の発見はIMB実験かもしれないが、その後陽子がどのような粒子に崩壊するか分岐比を測れば、大統一理論のモデルを特定できるであろうと考えたためであった。

20%という高い光電面被覆率は、エネルギーの低い事象も捉えることにも有効であることが初期の観測データの解析から分かった。そこで、太陽ニュートリノの観測のために装置を改良することとなった。その当時、太陽ニュートリノ観測においては、アメリカのデービスらが行ったホームステーク実験が観測された太陽ニュートリノ強度が予想の1/3程度しかないという「太陽ニュートリノ問題」を提唱していたが、その原因は実験の問題なのか太陽モデルの問題なのかよくわかっていなかった。デービスらの実験は太陽ニュートリノによって生まれたアルゴン原子を数か月おきに回収して計測するという方法（放射化学法）による実験であったが、Kamiokandeは太陽ニュートリノと電子との散乱をリアルタイムでとらえようと考えた。しかし、そのためには装置を低バックグラウンド化する必要があり、1984—1985年に外水槽の建設、その後の数年間は水中のラドンを取り除く改良がおこなわれた。また、1985年からはペンシルベニア大学が加わり、時間を記録できる電子回路を導入した。こうして、太陽ニュートリノ観測のための準備が整った頃に、SN1987Aからのニュートリノが訪れた。

2 SN1987A との遭遇

南米チリのラス・カンパナス天文台でIan Sheltonは1987年2月23日の深夜から24日の2:40頃まで3時間かけて（世界時では2月24日1:30頃から3時間）、25cm口径の小さな望遠鏡を使って大マゼラン星雲の写真を撮った。それを現像したところ、見慣れない明るい点があることに気づき、外にでて見上げたところ大マゼラン星雲に本当に明るい星があることを肉眼で確認し、SN1987Aの最初の発見となった。超新星爆発ではまずニュートリノが放出され、その後衝撃波が中心から光速の1/30程度の速さで星の中を伝搬し表面に届いてやっと光始めるため、光学的望遠鏡で見えるのはニュートリノ放出後数時間から1日程度後になる。実際、SN1987Aの場合、

この遅延時間はA. Jones (IAU circular 4340) とR.H. McNaught (IAU circular 4316) の情報から1.8~3.1時間であることが後に分かった。

1987年当時、Kamiokande実験のデータ解析は東京大学理学部素粒子物理国際セ

ンターで行われていた。そこへ2月25日にペンシルバニア大学のS. Bludman氏から同大学所属のKamiokandeメンバーであるE.W. Beier氏に宛てたファックスが届き、「大マゼラン星雲で超新星爆発があったようだが、Kamiokandeは（ニュートリ



図1：超新星爆発 SN1987 A の写真。爆発前（右）と後（左）
©Australian Astronomical Observatory

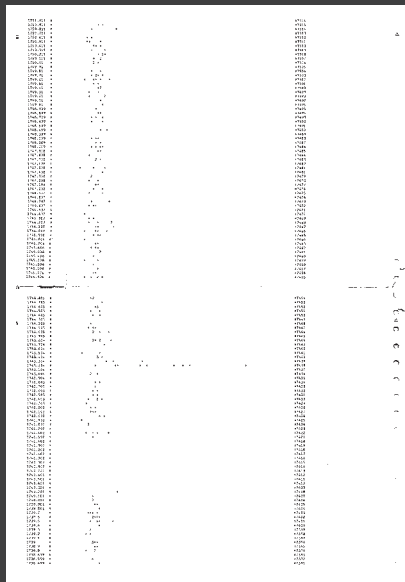


図2：KamiokandeがSN1987Aの信号を発見した最初のプリントアウト。図の縦軸は時間をあらわし（下から上へ流れる）、1ピンが10秒に相当する。横軸は各事象のエネルギーに相当する値（具体的にはヒットしたPMTの本数）。

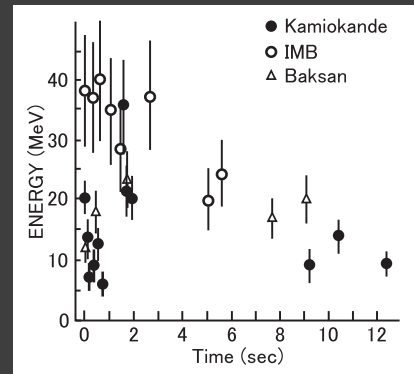


図3：Kamiokande, IMB, Baksan 実験が捉えた SN1987A のニュートリノデータ。ひとつひとつの点はそれぞれの事象をあらわす。

ノによって) みることはできたか？」という内容のメッセージが伝えられた。当時、Kamiokande のデータはオープンリール式の磁気テープに記録されていたが、すぐに最新の磁気テープを神岡から送ってもらうように依頼し、2月27日(金)の午後にそれが到着し、次の日(2月28日(土))の朝になってやっと超新星ニュートリノの信号を捉えていることが分かった。何とも悠長な時代である。その時の最初のプリントアウトを図2に示す。図中の1ピンにエネルギーの高い事象が集中していることが分かる。他実験のデータも含めて爆発の瞬間だけのデータを図3に示したが、2月23日 16:35:35 (世界時で7:35:35、ただし絶対時刻の精度は±1分)からの13秒間に11事象が観測されている。図2を見ていただく爆発の数分前に約2分間のギャップがあることが分かる。これは、電子回路の調整のためにデータをとっていなかった時間であり、もし爆発がその間に起きていたら逃していたと思うと恐ろしくなる。その後、入念なチェックが行われ、3月7日(土)には論文が発表された(文献1)。Kamiokandeによる論文発表後、その時間のデータを解析することによってIMB実験(文献2)でも8事象、Baksan実験(文献3)でも5事象が観測されたとの報告があった。観測されたデータから爆発の際にニュートリノによって放出された

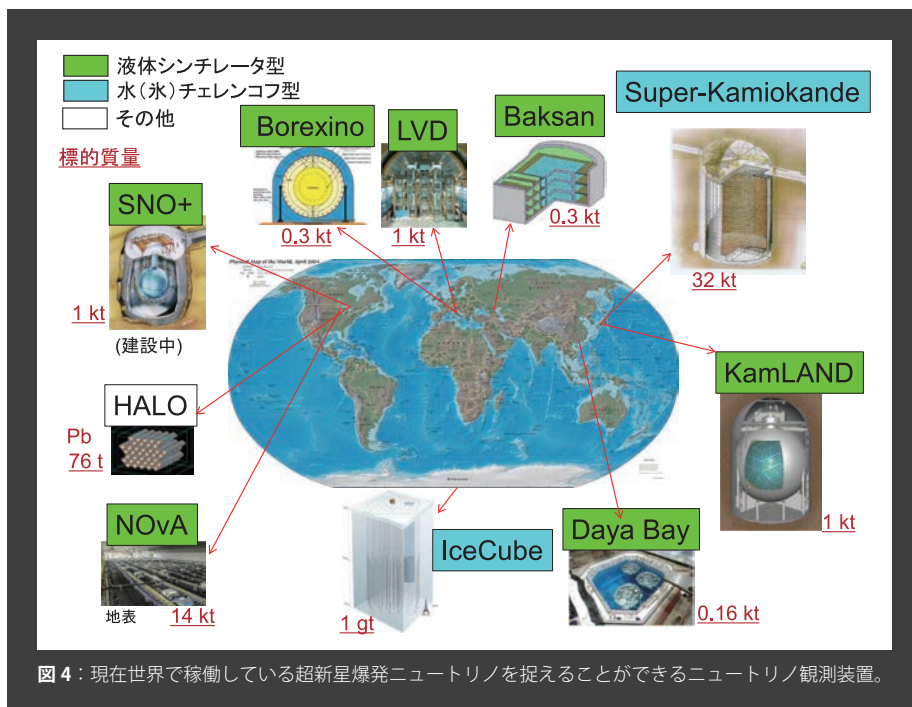
エネルギーを見積もったところ、それは 10^{53} erg (10^{46} ジュール) のオーダーであり、太陽が一生の間に放出する全エネルギーの数百倍に相当するようなどつもないエネルギーである。これは太陽質量程度の鉄の中心核が重力崩壊して中性子星やブラックホールになるという重力崩壊型超新星爆発の理論から予想されるエネルギーと良く一致し、爆発シナリオが基本的には正しいことが証明されたのである。

3 これからの超新星ニュートリノ観測

SN1987Aによって爆発シナリオは基本的には正しいことが証明されたが、その爆発メカニズムはまだ解明されていない。超新星爆発の理論家によると、単純な1次元シミュレーションでは爆発しないらしく、近年は2次元、3次元のシミュレーションを試みたり、星の回転を入れてみたりして爆発を説明しようとしている。それらを実証するためにはもっと詳しい観測が必要である。図4に現在世界で稼働しているニュートリノ観測装置を示した(文献4)。これら以外にも、最近では大型の暗黒物質直接探索装置(XMASSなど)でもコヒーレント散乱によって観測が可能であることが示されている(文献5)。個々の

事象を捉えることができる最大の標的質量をもつ実験装置はSuper-Kamiokande (SK) であるが、我々の銀河系で超新星爆発ができれば、何千もの事象が期待できる。SKでの主たる事象は逆ベータ崩壊反応($\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$) であるが、一部は電子散乱($\nu + e^- \rightarrow \nu + e^-$) による事象であり、それらを使って星の方向を決めることができる。銀河中心程度の距離(10kpc)での超新星爆発ならば5度ぐらいの精度がある。世界の観測装置の中で方向を決められるのはSKのみである。SKではSNWATCHとよばれるリアルタイムモニターが常に走り回っており(文献6)、もし超新星らしい現象が捉えられた場合には関係者の携帯電話等に自動でアラームを送られてくる。関係者はテレビ会議を接続して緊急会議を開き、ニュートリノ信号を受けてから1時間以内に世界へ情報を発信する予定である。IceCubeでは個々の事象は捉えられないが1ギガトンという大標的質量を生かして、全PMTのシングルレートが同時に上がることを利用して超新星ニュートリノを捉えることができる。寄与する事象数が多いため、時間変動に精度の高い観測が期待できる。KamLAND実験は1,000トンの液体シンチレータであるが、エネルギーの低い逆ベータ崩壊反応をも捉えることができるため、超近傍(例えば、ペテルギウスなど)の星が超新星爆発に近づいた時にケイ素燃焼過程からのニュートリノを前兆信号として捉えることができる。ケイ素燃焼過程は1〜2日続くため、超新星爆発を「予報」することができる。

図4に示した実験が捉えることができる超新星爆発は、我々の銀河系が大マゼラン星雲程度の距離(~50kpc)までである。我々の銀河系での超新星爆発頻度は30〜50年に一度程度と見積もられており、長期観測が必要である。一方、宇宙全体を見渡すと約 10^{17} 個もの大質量星があり、それらの超新星爆発からのニュートリノが宇宙を飛び交っているはずである。それを「超新星背景ニュートリノ」とよんでいるが、数十/cm²/秒程度の強度が期待される。SKでは超新星背景ニュートリノが年間数事象予想され、それを確実にとらえるべくガドリニウムを純水に溶かすSK-Gd計画が進められている。



詳しくは文献7を見ていただきたい。

4 まとめ

SN1987Aによって超新星爆発の基本的なシナリオを明らかにすることはできたが、詳細な爆発メカニズムまでは解明できなかった。現在世界には多くのニュートリノ観測装置があり、次回の超新星爆発時には豊富な情報がえられるであろう。それによって爆発メカニズムが解明されるに違

いない。その日が待ち遠しい。

参考文献

- 文献1：K. Hirata et al., Phys. Rev. Lett. **58**, 1490 (1987)
文献2：R.M. Bionta et al., Phys. Rev. Lett. **58**, 1494 (1987)
文献3：E.N. Alexeyev et al., Phys. Lett. **B205**, 209 (1988)
文献4：M. Nakahata, J. Phys. Conf. Ser.

136 (2008) 022042

- 文献5：K. Abe et al. (XMASS Collaboration), Astropart. Phys. 89 (2017) 51–56
文献6：K. Abe et al. (Super-Kamiokande collaboration), Astropart. Phys. 81 (2016) 39–48
文献7：関谷洋之「スーパーカミオカンデーガドリニウムプロジェクトの現状報告」ICRR NEWS No. 96 (2016)

宇宙・素粒子スプリングスクール



宇宙・素粒子分野への進学を目指す学生を対象にした「宇宙・素粒子スプリングスクール」が、2017年3月7日（火）から11日（土）までの5日間、東京大学宇宙線研究所で開かれました。講義や模擬実験などを通じて最先端の研究の雰囲気を感じてもらおうと毎年企画し、今年で6回

目を迎えました。定員30人のところ60人近くの応募があり、日本全国から情熱あふれる学生たちが集まりました。

午前中は、最前線の宇宙物理学や素粒子物理学に携わる研究者たちが登壇。歴史的な背景や最先端の研究、将来の展望などを伝えました。今年は千葉大学ハドロン宇宙

国際研究センター長の吉田滋教授と神戸大学の身内賢太郎准教授が外部講師として招かれました。午後は研究者や先輩の学生のアドバイスを受けながら模擬実験などに取り組む「プロジェクト研究」を実施。ニュートリノや重力波、高エネルギーガンマ線、最高エネルギー宇宙線、観測的宇宙論の各チームに分かれて取り組みました。

初日には集まったばかりの仲間で緊張した表情を浮かべていましたが、宿舎のロビーで夜遅くまで志をともにする仲間たちと語り合ったり、実験を試行錯誤したりしながら、日を重ねるごとに笑顔が増えてきました。いよいよ最終日、5日間の研究成果を発表するプレゼンテーションです。どのグループもやりきった表情で堂々と発表し、宇宙線を使って研究所の建物の構造を調べた最高エネルギー宇宙線チームが優勝しました。最後は苦楽をともにした仲間や先輩、研究者たちと盃を交わしました。



宇宙線研究所×カブリ数物連携宇宙研究機構 合同一般講演会「宙に訊ね理を導く」

東京大学宇宙線研究所 (ICRR) とカブリ数物連携宇宙研究機構 (Kavli IPMU) の合同一般講演会「宙に訊ね理を導く」が4月15日(土)、千葉県柏市のアミュゼ柏で開催されました。春と秋の年に2回開催しており、今回で16回目を迎えました。関東を中心に327人が参加しました。

講演会には宇宙線研究所教授の佐川宏行先生と、カブリ数物連携宇宙研究機構の戸田幸伸先生が登壇。それぞれ「最高エネルギー宇宙線・ユタ州から極高宇宙現象を探る」、「カラビヤウ多様体・物理学がもたらす数学の『予想』」のタイトルで話しました。

【Talk 1】

まずは佐川先生が、アメリカ・ユタ州の砂漠に設置した検出器で最高エネルギー宇

宙線を観測するテレスコープ・アレイ実験について紹介。最高エネルギー宇宙線はどこからやってくるのだろうか？どうやって観測するのだろうか？などを説明し、特定の方向から多く来ている「ホットスポット」を発見した実験結果を公開しました。観測範囲を4倍に拡張する「TA×4実験」の将来計画についても話しました。

【Talk 2】

次に戸田先生が、カラビヤウ多様体が予想されてから証明されるまでの代数幾何学の流れを紹介。物理学において究極の統一理論として期待されている超弦理論における微小な6次元空間との関連性について説明し、数学と物理学の理論のつながりにも触れました。

【Dialog】

最後は2人の講師が問いを投げかけ合うトークセッションが開かれ、会場のお客様からの質問も交えて講演内容を掘り下げました。「太陽系外の他の惑星で宇宙線が観測できたらどんなメリットが考えられるのか」、「数学的な問題設定とアプローチの方法は」。物理学者と数学者の異分野の視点で質問が飛び交いました。また参加者から質問ボードに貼られた質問からは「悪いふるまいをする球面とはどんなもの？」などが取り上げられました。

講演後は多くの参加者が会場外のロビーにて登壇者を囲み、実験装置の一部の実物を一緒に触れたり、数式や図を紙に描きながらの解説を受けたりしながら、たくさんの質問をぶつけていました。



人事異動

| 発令日 | 氏名 | 異動内容 | 職 |
|----------|-------------------|------|--------------------|
| H29.2.28 | 山元 一広 | 退職 | 助教 |
| H29.2.28 | 佐藤 立子 | 任期満了 | 特任専門員 (URA) |
| H29.3.1 | 佐藤 立子 | 採用 | 特任専門員 (URA) |
| H29.3.31 | 手嶋 政廣 | 早期退職 | 教授 |
| H29.3.31 | 大岡 秀行 | 定年退職 | 技術専門職員 |
| H29.3.31 | 林田 将明 | 任期満了 | 特任助教 |
| H29.3.31 | 中嶋 大輔 | 任期満了 | 特任助教 |
| H29.3.31 | 大山 祥彦 | 任期満了 | 特任研究員 (研究所研究員) |
| H29.3.31 | 佐古 崇志 | 任期満了 | 特任研究員 (研究所研究員) |
| H29.3.31 | 田阪 茂樹 | 任期満了 | 特任研究員 (シニアフェロー) |
| H29.3.31 | 鈴木 敏一 | 委嘱終了 | 客員教授 |
| H29.3.31 | 大林 由尚 | 受入終了 | 協力研究員 |
| H29.3.31 | 上泉 眞裕 | 任期満了 | 特任専門職員 |
| H29.3.31 | 古田 元 | 任期満了 | 技能補佐員 (研究支援推進員) |
| H29.3.31 | 道上理英子 | 任期満了 | 臨時用務員 |
| H29.3.31 | 青田 晶子 | 任期満了 | 事務補佐員 |
| H29.3.31 | 老田 芳人 | 転出 | 附属神岡宇宙素粒子研究施設事務室係長 |
| H29.3.31 | 矢島 祐樹 | 転出 | 予算・決算係主任 |
| H29.3.31 | 大塚 浩一 | 転出 | 総務係一般職員 |
| H29.4.1 | 手嶋 政廣 | 採用 | 教授 (クロスアポイントメント) |
| H29.4.1 | 大岡 秀行 | 採用 | 技術職員 (再雇用) |
| H29.4.1 | 下平 英明 | 昇任 | 技術専門員 |
| H29.4.1 | 齋藤 隆之 | 採用 | 特任助教 |
| H29.4.1 | 牛場 崇文 | 採用 | 特任研究員 (ICRR フェロー) |
| H29.4.1 | 利川 潤 | 採用 | 特任研究員 (研究所研究員) |
| H29.4.1 | 中野 佑樹 | 採用 | 特任研究員 (研究所研究員) |
| H29.4.1 | 鈴木 敏一 | 採用 | 特任研究員 (シニアフェロー) |
| H29.4.1 | 吉田 龍生 | 新規委嘱 | 客員教授 |
| H29.4.1 | 山元 一広 | 新規委嘱 | 客員准教授 |
| H29.4.1 | 大林 由尚 | 受入開始 | 協力研究員 |
| H29.4.1 | 佐古 崇志 | 受入開始 | 協力研究員 |
| H29.4.1 | 武石 隆治 | 受入開始 | 協力研究員 |
| H29.4.1 | 田阪 茂樹 | 受入開始 | 協力研究員 |
| H29.4.1 | 中嶋 大輔 | 受入開始 | 協力研究員 |
| H29.4.1 | ZIEMBICKI, Marcin | 受入開始 | 協力研究員 |
| H29.4.1 | 上泉 眞裕 | 採用 | 学術支援専門職員 |
| H29.4.1 | 野澤 則行 | 採用 | 技能補佐員 (研究支援推進員) |
| H29.4.1 | 早河 秀章 | 採用 | 技能補佐員 |
| H29.4.1 | 大坂真理子 | 採用 | 臨時用務員 |
| H29.4.1 | 大浦 輝一 | 配置換 | 副事務長 |
| H29.4.1 | 清水 昭彦 | 転入 | 附属神岡宇宙素粒子研究施設事務室係長 |
| H29.4.1 | 赤井田洋平 | 転入 | 予算・決算係一般職員 |
| H29.4.1 | 篠原由香梨 | 採用 | 総務係一般職員 |
| H29.4.1 | 千田 藍 | 育休復帰 | 事務補佐員 |
| H29.4.16 | 八崎須美子 | 採用 | 臨時用務員 |
| H29.4.19 | CREUS, William | 受入終了 | 協力研究員 |

| 発令日 | 氏名 | 異動内容 | 職 |
|----------|--------------------------------|------|----------|
| H29.4.30 | 菊地 理恵 | 任期満了 | 特任専門職員 |
| H29.5.1 | 田越 秀行 | 採用 | 准教授 |
| H29.5.1 | Bronner Christophe Pierre Yves | 採用 | 特任助教 |
| H29.5.1 | 内潟 那美 | 採用 | 学術支援専門職員 |
| H29.5.1 | 菊地 理恵 | 採用 | 特任専門職員 |

ICRR Seminar

2016 年度

2017.3.7

Dr. Hiro Ejiri (RCNP Osaka University)
"Search for cold dark matter by measuring X and γ rays"

2017.3.21

Dr. Masato Shiozawa (ICRR)
"Hyper-Kamiokande project"

2017.3.31

Dr. Hayato Shimabukuro (Observatoire de Paris)
"Analysing the 21cm signal from epoch of reionization with artificial neural networks" (ICRR & IPMU Joint seminar)

2017.3.31

Dr. Stefan Ritt (Paul Scherrer Institut (PSI), Switzerland)
"Fast waveform digitizing for the search of the $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ decay"

ICRR Seminar

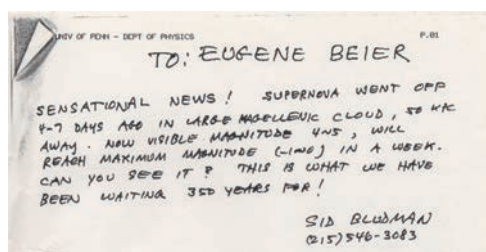
2017 年度

2017.4.14

Dr. Tsuguo Aramaki (SLAC)
"Hunting for Dark Matter With SuperCDMS" (ICRR & IPMU joint seminar)

2017.4.28

Dr. Ryo Namba (McGill University)
"Magnetic fields of primordial origin" (ICRR & IPMU joint seminar)



超新星爆発ニュートリノ検出から 30年

超新星爆発 SN1987A が肉眼で観測された2日後の1987年2月25日、一通のFAXが届きました。ペンシルバニア大学から東京大学へ超新星爆発を知らせる内容でした。戸塚洋二先生はすぐに、カミオカンデのデータが記録された磁気テープを送るように神岡の研究者に連絡しました。(当時はネットワークが発達していなかったので、データは物理的に宅配便で送られていました。)

No. 99

東京大学宇宙線研究所

2017 spring

〒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/cat-icrr/>

編集 広報室