

2020.2

～SPring-8で大きく前進～



138億年で1秒もずれない“原子核時計”の実現を目指す ～SPring-8で大きく前進～

現在、世界で最も正確とされる時計は原子時計と呼ばれます。原子がある特定の周波数の電磁波しか放出・吸収しないという性質を利用して作られています。かつて「1秒」は、一日の長さの86400分の1として決められていましたが、現在は、セシウム原子時計によって、セシウムが放出・吸収する電磁波が91億9263万1770回振動する時間の長さとして定義されています。

原子時計には様々な種類がありますが、セシウム原子時計であれば、その精度は 10^{-16} ほどで、数千万年に1秒ずれる程度とされています。さらに高い精度のものの開発も進められていますが、原子時計以上に高い精度が得られる時計として実現が期待されているのが「原子核時計」です。原子時計は、原子の外殻にあたる電子の状態に関係しているため、外部の電磁場の影響を受けやすいのに対して、原子核時計は、原子核内の状態に関係しているため外界の影響を受けにくく、宇宙が誕生した138億年前から現在に至るまでの間でも1秒もずれないほどの精度が実現できると言われています。

そこまで精度の高い時計は日常では必要なさそうですが、実際に作られたら、大きな役割を果たす可能性を持っています（後述します）。そのような原子核時計の実現に向けての大きな一歩となる研究が、岡山大学 異分野基礎科学研究所 吉村浩司教授を中心に、SPring-8を利用して行われました。

「トリウム229」を人工的に励起する方法を確立したい

原子核は、複数の陽子と中性子が強い力で結びついてできています。そして特定の周波数を持つ電磁波によってエネルギーを与えると、より高いエネルギー状態に移移します（「励起」と言います：図1）。

原子核を励起させるには通常、keVからMeV（=eVの1000倍から100万倍）レベルの大きなエネルギーが必要ですが、トリウム229という元素だけは唯一、その1000分の1から100万分の1にあたる、eVレベルのエネルギーで励起可能であることが以前より知られていました。それは、

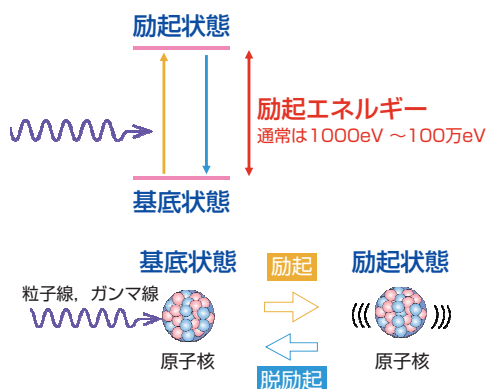


図1 原子核の励起を示す模式図

トリウム229がレーザー光で励起できることを意味し、それゆえに量子エレクトロニクス分野での様々な応用の可能性が考えられます。そのうち最も大きな期待を集めるのが前述の原子核時計の実現です。

ただ、トリウム229を励起するためには、正確にそのエネルギーを持つ電磁波を照射する必要があるのですが、そのエネルギーはさまざまな理由によって特定が困難で、いまま正確な値はわかっていません。そうした中、その正確な特定へとつながる大きな一歩を、吉村さんらの研究チームがSPring-8を利用して実現させることに成功したのです。

第二励起状態を経由してアイソマー状態へと導く

励起した状態は複数あり、その中で最小エネルギーのものを第一励起状態と言います。原子核時計の実現のためにトリウム229を励起させたいのはこの第一励起状態で、この状態は寿命が長いと予想されているので、準安定状態＝アイソマー状態と呼ばれています。

トリウム229のアイソマー状態のエネルギーが、8 eV程度であることは近年わかってきましたが、直接その状態へと励起させるためには、より厳密なエネルギーの値が必要です。レーザーで励起できるか調べるためには、エネルギーを少しずつ変化させながら照射すれば求める値にたどり着きそうにも思えますが、可能性のあるエネルギーの幅が広すぎて、現実的ではありません。

そのため吉村さんたちは、その一つ上のエネルギー状態（第二励起状態）を経由してアイソマー状態へと導くという方法を考えました。

「トリウム229の第二励起状態のエネルギーが29.19 keVほどであることは、すでにある程度精度よくわかっています。私たちの方法は、高輝度X線を用いてまずその状態へと導いていき、そこからアイソマー状態へと遷移させ（図2）、さらにアイソマー状態から基底状態（最もエネルギーの低い状態）へと戻そうというものです。アイソマー状態から基底状態に戻る際、トリウム229は真空紫外光を放射します。その光のエネルギーがアイソマー状態のエネルギーと等しいため、その光を捉え、エネルギーをmeV（=eVの1000分の1）の精度で測定すれば、アイソマー状態のより正確なエネルギーが決定できるというわけです」

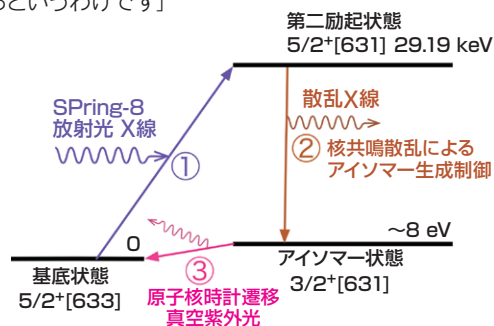


図2 トリウム229をアイソマー状態へ導く方法

とはいえ、人工的に第二励起状態へと励起するのにも、正確にそのエネルギーの電磁波を照射する必要があります、そのエネルギーを、既知の値 (29.19 keV) よりさらに厳密に知らなければなりません。そこで吉村さんたちはまず、SPring-8の高輝度X線を利用し、第二励起状態のエネルギーをより正確に測定することを目指しました。

その測定は、「核共鳴散乱」という現象を利用して行います (図3)。

「原子にX線を照射すると、ほとんどの場合、X線は電子にぶつかって様々な散乱光が放出されます (図3上の青線)。ただ、原子核の励起エネルギーと一致したX線を照射したときには、原子核にぶつかって原子核が励起されて (図3上の赤線)、電子の散乱から少し遅れたタイミングで信号が出ます。それが核共鳴散乱です。その遅れは100億分の1秒ほどというわずかなものですが、その遅れた信号を見ることによって、原子核が励起されたと判断できます。そしてその際に入射したX線のエネルギーを測定すれば、第二励起状態のエネルギーが正確に測定できます」

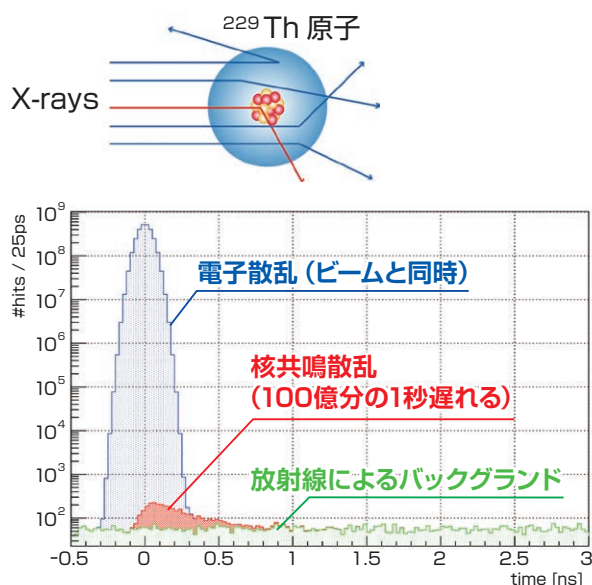


図3 核共鳴散乱

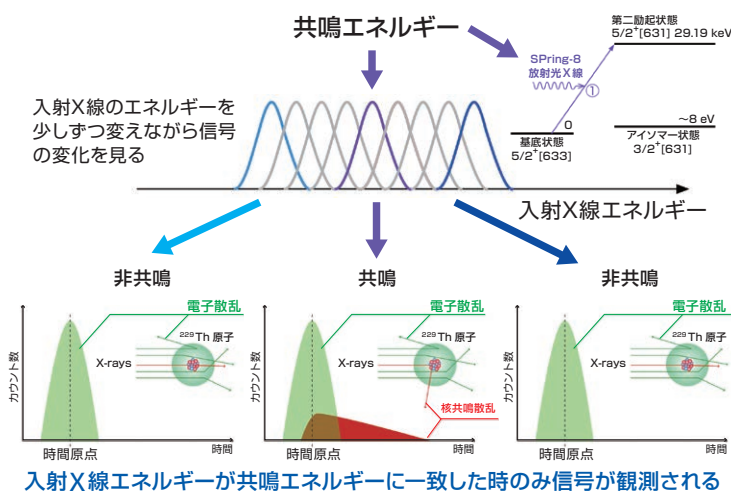


図5 核共鳴の探索方法

“オールジャパン” 態勢で臨んだ SPring-8での実験

核共鳴散乱を利用したエネルギー測定のための実験装置の模式図が図4です。SPring-8のビームラインBL09XUおよびBL19LXUにおけるX線は、まずは2つのモノクロメーター (HMMとHRM) で単色化、すなわち、X線のエネルギー幅が絞られます。そして屈折レンズ (CRL) を通って集光され、ターゲットとなるトリウム229に照射されます。その散乱光を検出器 (Detector) で捉え、同時にエネルギーモニター (AEM) で、X線のエネルギーを正確に測定します。

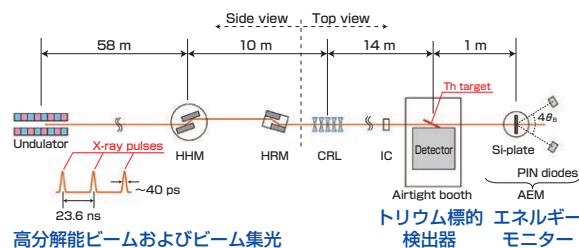


図4 SPring-8 BL09XUおよびBL19LXUでの実験装置の模式図

「各段階でとても緻密な技術が必要で、それぞれ専門家の力を借りました。まず第一に、X線について、輝度の高さ、エネルギーや時間の精度など、すべてが高いレベルで揃っているのが前提となる実験のため、SPring-8の利用とそのスタッフの皆さんの力が不可欠でした。また、レンズによるX線の集光や、標的であるトリウムを0.4 mmというサイズまで凝縮するのに高度な技術を要します。そして、決め手となったのがエネルギーモニターです。ここでX線のエネルギーを極めて正確に測定することができたのは、性質のよくわかったシリコン結晶にX線を当てて反射する角度 (ブラッグ角) を超精密に測る、ボンド法という方法を採用できたゆえです。検出器は我々が開発しましたが、それ以外は、日本中から専門家が結集したからこそ実現しました。まさに、SPring-8を軸とした“オールジャパン” 態勢の実験でした」

この実験装置にて、入射するX線のエネルギーを少しずつ変えながら信号の変化を見ていきます。すると、そのエネルギーが共鳴エネルギーに一致した場合にのみ、少し遅れて核共鳴散乱の信号が観測されることになるはず (図5)。

探索時間: 67時間 (2018.7.19 2:00 - 7.21 21:00)
探索範囲: 8.4 eV (0.1 eV step)
探索点: 113点 (1800 s)

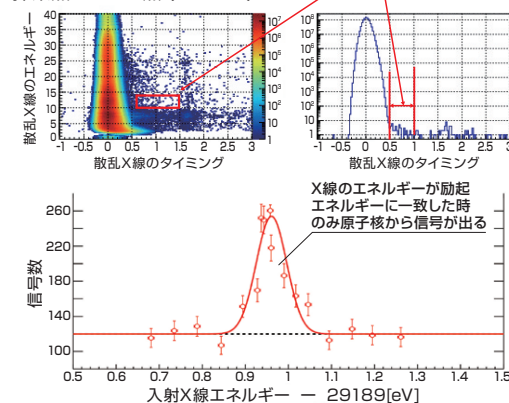


図6 実際の実験結果

「図6が実際の実験結果です。X線がある特定の入射エネルギーの時だけ、僅かながらタイミングが遅れた値が得られ(図中の“信号領域”)、何回繰り返しても同じ結果になることが確認できました。このエネルギー付近での信号を見ると右側の図のように、あるエネルギーでピークになります。つまりこのときに核共鳴が起きていて、このエネルギーの値がトリウム229の第二励起状態のエネルギーだということがわかりました」

トリウム229の第二励起状態が人工的に生成可能に

そうしてこの実験によって、トリウム229の第二励起状態のエネルギー E_{2nd} は

$$E_{2nd} = 29189.93 \pm 0.07 \text{ eV}$$

であると決定できました。一度この値がわかれば、このエネルギーのX線を照射することで何度でも第二励起状態へと遷移させることができます。そしてこの実験結果の解析によって、トリウム229の第二励起状態の半減期 $T_{1/2}$ も、 $T_{1/2} = 82.2 \pm 4.0 \text{ ps}$ と判明しました。

つまり、基底状態のトリウム229にエネルギーを加えて第二励起状態へと持っていき、最終的には基底状態に戻ることになりますが、この際、その一部はアイソマー状態を経由します。そして経由したトリウム229は、基底状態へと落ちる際に真空紫外光を発します。

「その真空紫外光が持つエネルギーこそが、アイソマー状態のエネルギーになります。これを測定することが、残る最後の関門となります。この実現のためにはまだ越えなければならない壁が少なからずありますが、今回、第二励起状態のエネルギーを決定し、第二励起状態を人工的に生成できるようになったことで大きく前進したことは確かです」

アイソマー状態のエネルギーが決定できれば、そのエネルギーを持つレーザー光を照射することで基底状態のトリウム229を直接アイソマー状態へと励起することが可能に

なります。その手法を確立することが、この一連の研究の最終的な目的です。

トリウム229の第二励起状態のエネルギーを決定した吉村さんらの研究は2019年にNature誌に掲載され、世界的に注目を集めました。原子核時計の実現への大きな一歩だと評価されたゆえでしょう。吉村さんたちは現在、その実現をさらに近づける最後の関門に挑んでいます。

資源探査から宇宙の解明までを原子核時計は可能にする

原子核時計が実現すれば、 10^{-19} の精度、すなわち、宇宙が誕生してから現在に至るまでの間に1秒もずれないほど正確な時計ができると言われています。それだけ正確な時計によって何が可能になるのでしょうか。

「アインシュタインの一般相対性理論によれば、重力の強さによって時間の進み方が変わります。重力が強い場所ほど時間の進み方は遅くなり、その効果は実際に確かめられています。その変化はあまりにも小さいため、私たちは感じることはできませんが、 10^{-18} レベルの精度の時計であれば、1センチ持ち上げただけでもそのずれを検知できます。すなわち極めて高い精度の時計は、重力のちよつとした変化を察知するセンサーとなりうるのです」

この時計を利用すれば、非常に微小な地殻の動きや、地下の状態を知ることができるため、地殻変動の検知や資源探査にも応用できる可能性があります。また、宇宙は現在、膨張を続けていて、膨張とともに様々な物理定数が変化している可能性が考えられていますが、原子核時計によってその変化の有無を確かめることができるとも期待されています。それは宇宙の謎の解明に大きく寄与するはず です。

「原子核時計は、10年以内には完成するのではないかと考えています。私たちはまだその第一のステップを乗り越えたにすぎませんが、自分たちの手で、実現まで道筋を築いていきたいと思っています」

Column コラム

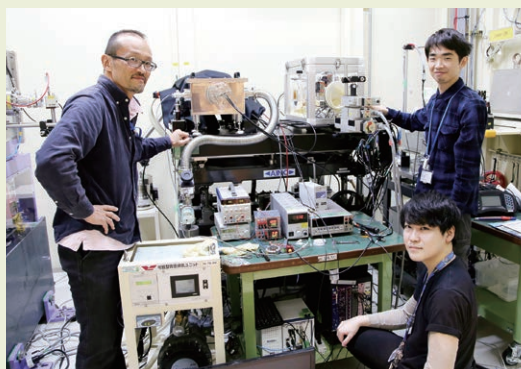
吉村さんの元々の専門分野は素粒子物理学で、以前は、宇宙線の反陽子の測定や、ミューオンという素粒子を使つての実験を行っていました。X線を原子核に照射するというような実験を試みたのは今回の研究が初めてだったそうです。

「2013年に岡山大学に赴任した後にこの研究に着手したのですが、当初この分野に関しては全くの素人で、1年ぐらいい結果が出るんじゃないかと簡単に考えていました。最初のころは、人に見せるのも憚られるほどの拙い実験装置で、思い出すと恥ずかしいです。それから様々な壁にぶつかって悩み、いろんな方の力を借りてようやくここまで来られました」

大学時代はラグビーばかりやっていたという吉村さんはスポーツが好きで、いまは趣味の一つが自転車とのこと。岡山大学からSPRING-8まで片道70キロほどを自転車で往復したこともあるそうです。

「2回ほど自転車で走りましたが、途中の狭いトンネルでトラックがすれ違ふと生きた心地がしないほど怖くて、これはあと何回かやったら死んでしまうと思ってやめました(笑)」

しかしそんなチャレンジ精神が、今回の研究でも壁を乗り越える力になったのではないのでしょうか。2019年は、本研究の論文がNature誌へ掲載されたこと、そしてラグビーワールドカップでの日本の活躍によって、一生で一番興奮した一年だったかもしれないと吉村さん。今後、トリウム実験の最後の部分が成功すれば、さらに大きな興奮が待っているそうです。



実験装置を前に。
左から吉村さんと研究室の平木さんと岡井さん。

利用者のみなさまへ

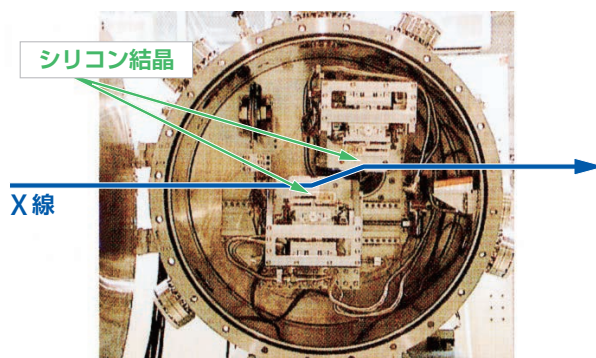
高精度モノクロメータ

「研究成果・トピックス」で紹介された研究は、SPring-8の高輝度X線を使って行われました。この実験では高度に単色化されたX線が必要でした。X線は光の仲間です。虹を見ればわかるように、太陽の光にはいろいろな「色」が含まれています。色の違いは、光の波長の違いであり、光のエネルギーの違いでもあります。トリウム原子核の励起には、特定のエネルギーを持ったX線を照射する必要があります。そのエネルギー以外のX線を照射しても励起は起こらず、熱になってしまいます。

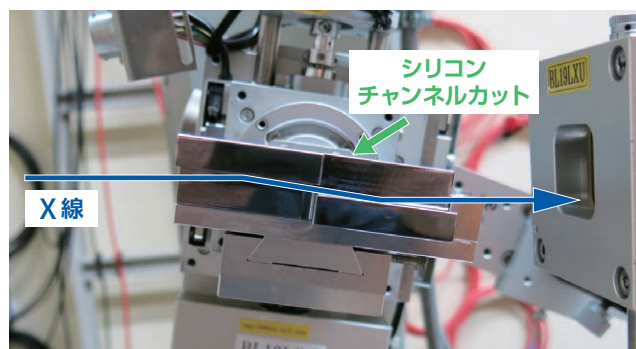
特定のエネルギーのX線を放射光の中から取り出すということは、光でいえば虹の七色の中から一つの色だけを抜き出すということです。これにはX線の場合はモノクロメータ（単色器・分光器）を使用します。X線を結晶に特定の角度で入射すると、特定のエネルギーのX線だけが回折するという現象があります（ブラッグ反射）。これを利用して特定のエネルギーのX線を選び出すのがモノクロメータです。

結晶にX線を入射して回折するとX線は進行方向が変わり、実験上具合が悪いので、普通は結晶を二つ用いてX線の進行方向を元に戻します。これを二結晶モノクロメータと呼びます。結晶に普通のシリコン結晶Si (111) を用いると、およそ0.0002の精度^(注)のX線が得られます。しかしこの実験ではこれではエネルギーの幅が広すぎるので、シリコン結晶Si (660) を使って、エネルギーの精度を0.000003まで高めています。この(111)や(660)は面指数と呼ばれ、一般に数が多い方がエネルギーの精度は良くなります。またここでは二つの反射がひとつの結晶で実現できるように、結晶に溝を掘った“チャンネルカット”と呼ばれる構造が利用されています。普通はこのようにエネルギー幅を狭めるとX線フォトンの数も減ってしまいますが、SPring-8の高輝度放射光であれば、これでも実験に十分なX線強度が得られました。このように、モノクロメータにはそれぞれの実験のニーズに合わせて適宜工夫が加えられています。

注) この「精度」は、エネルギーの幅を選択したエネルギーの値で割った値です。



SPring-8での標準モノクロメータ
(二結晶モノクロメータ)



高精度モノクロメータの配置

SPring-8の利用事例や相談窓口 <http://www.spring8.or.jp/ja/science>

SPring-8先端利用技術ワークショップ

SPring-8では様々な分野において“先端利用技術ワークショップ”を開催しています。

	テーマ	共同開催の研究会	開催日	開催地	参加者
第40回	社会的関心分野とSPring-8	—	2019年 5月21日	東京都港区	27名
第41回	大型放射光施設SPring-8の利用について	—	2019年 5月28日	千葉県千葉市	33名
第42回	SPring-8における蛋白質構造生物学研究の現状と将来	大阪大学蛋白質研究所セミナー	2019年 9月 9日～10日	大阪府吹田市	86名
第43回	放射光計測インフォマティクス	SPring-8データ科学研究会（第7回） 兵庫県マテリアルズ・インフォマティクス講演会（第3回）	2019年 9月 4日	東京都港区	77名
第44回	シンクロトロン放射光X線は動物学にどう役立つか？	—	2019年 9月12日	大阪府大阪市	20名
第45回	放射光利用生物物理研究の最前線	—	2019年 9月25日	宮崎県宮崎市	37名
第46回	—	SPring-8次世代先端デバイス研究会（第7回）	2019年11月 7日	東京都港区	25名
第47回	触媒開発の最前線 —放射光を用いた触媒構造・活性発現因子の解明—	第8回SPring-8グリーンサステイナブルケミストリー研究会	2019年12月20日	東京都港区	47名
第48回	鉄鋼材料の放射光利用	第15回SPring-8金属材料評価研究会	2019年12月19日	東京都港区	32名
第49回	高感度型X線分光・非弾性X線散乱計測が拓く 元素選択的電子状態研究の展望	—	2020年 1月 9日	愛知県名古屋	43名
第50回	室温超伝導への道筋とSPring-8での水素化合物研究	—	2019年12月24日	SPring-8	50名
第51回	化学者のための放射光ことはじめ —小角X線散乱による構造解析の基礎と応用—	第3回SPring-8先端放射光技術による化学イノベーション 研究会	2020年 3月22日	千葉県野田市	
第52回	放射光X線小角散乱の現状と将来展望	—	2020年 3月19日	SPring-8	
第53回	SPring-8の放射光パルスを利用した時間分解計測の 最前線	—	2020年 3月15日	愛知県名古屋	

こちらの詳細については、SPring-8 ホームページ (<http://www.spring8.or.jp/ja>) にてご確認ください。

第14回：東京大学大学院 工学系研究科 竹尾 陽子さん

今回は東京大学大学院 工学系研究科 精密工学専攻 博士課程3年生の竹尾さんです。竹尾さんは研究の一環としてSPring-8で使われている“集光ミラー”の研究を中心的に行っています。

Q. 現在の研究について教えてください。

A. 博士論文のテーマは「高精度波面計測法に基づく軟X線集光システムの開発」です。SPring-8では、X線の強度を向上するための集光について、主にX線ミラーが使われています。そのなかでも、特に波長が1 nm以上の軟X線領域のミラーは特殊な形状を必要としており、その実現にはナノメートルオーダーの極めて高い精度の加工技術が求められます。私たちの研究室では、技術開発を行い、軟X線を効率的・効果的に集光できるチューブ状の“回転型高精度X線ミラー（回転楕円ミラー）”を開発しました。私の研究は、その“回転楕円ミラー”と、その発展形の“二段集光システム”における集光性能の評価です。

Q. “どのような経緯”で現在の研究に携わるようになったのですか？

A. 私の家族は全員理系で、文系に進むことは想像できず、理系を選んでしまいました。現在の研究は、学部4年時代に私の研究室とSPring-8で共同研究する話が持ち上がり、長期的に取り組まないといけない内容から、当時より博士課程進学を考えていた私が担当しました。ただ、最初の2年間は先輩と一緒に研究を進めていました。

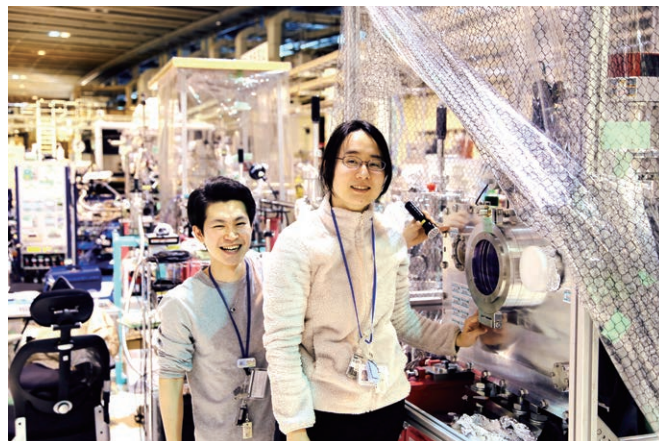
Q. 研究をしていて「うれしい／楽しい」また「しんどい／つらい」と感じるのは“どのようなとき”ですか？

A. 想像以上にミラーの出来が良かったときは、実際にそのミラーを作った共同研究者に結果を伝えるのが楽しみになります。また、新しいミラーの設計式を作ることができた時も、しばらくうれしい状態が続きます。逆に実験後得られたデータを処理中に「このデータを取っておけばよかった」と後悔するときは、つらく感じます。

Q. あなたにとってSPring-8は“どのようなところ”ですか。

A. 日頃の研究の準備状況がさらけ出される怖い場所です。

実験でSPring-8に最長21日も滞在していたことがあるそうですが、まだその全貌はつかめていないそうです。昔販売していた“SPring-8饅頭”を最近売っていないのが悲しいとのこと。バリバリの理系研究者でありながら趣味は刺繍やレース編み、そして“近所の奥様方の雑談を聞く”ことが落ち着くという一面もお持ちの竹尾さん、是非頑張ってSPring-8を活用した研究で博士号を取得してほしいと思います。



BL25SUの実験機器の前で、竹尾さん(右)。左は同じ研究室の島村君。

行事 予告

SPring-8夏の学校と秋の学校

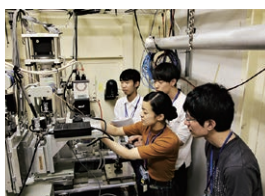
放射光を使って研究しようと考えている学生さんへ

第20回SPring-8夏の学校

開催日
2020年7月12日(日)～15日(水)
(講義2日、実習2日)

対象
大学院修士(博士前期)課程の学生
及び学部4年生

参加費
無料(但し宿泊費・交通費等は自己負担) ※要放射線従事者登録
募集開始時期 2020年4月頃を予定



昨年の実習の様子

放射光を学びたいあなたに

第4回SPring-8秋の学校

開催日
2020年8月23日(日)～26日(水)
を予定(基礎講義2日、グループ講習2日)

対象
大学学部生以上

参加費
有料(但し宿泊費・交通費等は自己負担。大学生については参加費
免除を検討中) ※放射線従事者登録 不要

募集開始時期 2020年6月頃を予定



昨年の集合写真

詳細については、SPring-8 ホームページ (<http://www.spring8.or.jp/ja>) にてご確認ください。



SPring-8 NEWS

No.99 February 2020
SPring-8 Document D 2020-002

編集 SPring-8 NEWS 編集委員会

発行 公益財団法人 高輝度光科学研究センター

Japan Synchrotron Radiation Research Institute
〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都1丁目1番1号

TEL (0791)58-2785 FAX (0791)58-2786

E-mail: jasri-event@spring8.or.jp <http://www.spring8.or.jp/>