

読者の広場

最終講義

ガンマ線と中性子と

甲南大学理工学部物理学科

宇都宮弘章

hiro@konan-u.ac.jp

1. はじめに

東京工業大学を 2017 年 3 月に退職された井頭政之先生の最終講義のタイトルは、「中性子とガンマ線と」でした。中性子ビームを使ったガンマ線測定に研究者人生をささげた先生の最終講義を拝聴しながら、ガンマ線ビームを使って中性子測定を行ってきた自らの研究を振り返り、最終講義のタイトルを「ガンマ線と中性子と」にしようと決めました。

私は京都大学理学研究科物理学第二専攻小林晨作研究室に所属し、理化学研究所サイクロトロン研究室の野村亨先生に研究指導を受け、重イオン核物理の研究で 1981 年 3 月に理学博士（京都大学）の学位を取得しました。その後、米ミシガン州立大学国立超電導サイクロトロン研究所博士研究員、テキサス A&M 大学サイクロトロン研究所常勤研究員等を経て、1991 年 10 月に甲南大学理学部助教授に任用され、1994 年 4 月改組された理工学部の教授となり、2021 年 3 月に定年退職するまで、海外機関に 9 年間、関西私大に 30 年間所属しました。

ここに「ガンマ線と中性子と」のタイトルに関係する私の研究人生を、起承転結に分けて振り返りたいと思います。いろいろな人との出会いがあり、新たな研究分野を作る意気込みで始めた＜起＞と＜承＞の地道な研究は、＜転＞でヨーロッパ連合（EU）の研究戦略に関連して大きな転機を迎え、＜結＞で国際原子力機関（IAEA）の共同研究プロジェクト等によって甲南大学での研究生活に幕を降ろしました。

2. ＜起＞ 1991—2003

甲南大学着任の年に、フランス・ロワール地方の観光都市 Tours（トゥール）市で、甲南大学主催第 1 回 Tours 国際シンポジウムが開催されました。この会議は、甲南学園が

Tours 市に甲南中学校・高等学校を開校したのを記念して、当時理論研究室所属の太田雅久教授が中心となって開催したシンポジウムで、私は第2回会議から主催者の一人として開催に加わりました。太田先生と二人三脚で組織した手作り感満載の会議でしたが、トゥレーヌ県議会の手厚い財政的支援を受け、超重元素合成、不安定核物理、宇宙核物理を主テーマに、会場となったホテル・ユニヴェーで熱心な議論が展開され、豪華なフランス料理のフルコースに舌鼓を打ちました。この会議は若手研究者の登竜門としての役目を果たし、大西明教授(京都大学基礎物理学研究所)が国際デビューを飾った会議でもありました。

Tours 国際シンポジウムは、私が光核反応を研究するための大きな国際舞台を二つ提供してくれました。一つは、2004年にブリュッセル自由大学の Marcel ARNOULD (マーセル・アーヌール) 教授、Stephane GORIELY (ステファン・ゴリエリ) 博士と、宇宙核物理のデータベース NACRE-II」を構築するプロジェクトをスタートさせたことです。NACRE-II は、2013年に出版され [1]、原子核・宇宙・天文物理分野の多くの研究者に利用されています。GORIELY 博士は、その後、私の最良の共同研究者(理論家)として、多くの論文を執筆・発表し、その関係性は現在も続いています。私が実験データを提供し、年二回9月と3月にブリュッセルに同博士を訪問し、1週間の滞在で論文を1編書きあげるという共同研究体制を作り上げてきました。

もう一つは、最後の会議となった、ドイツ・ブラックフォレストで開催された 2012 年の第 12 回会議で、ルーマニア極限光量子原子核研究所 (ELI-NP) のプロジェクトへの参画を求められたことです。これについては<転>で述べます。

この時期の出来事は、レーザーコンプトン散乱 (LCS) ガンマ線ビーム、中性子測定技術、宇宙核物理 (p-process 元素合成) との出会いと、 ^9Be 核と重陽子核の光核分解実験です。LCS ガンマ線ビームには大垣英明博士 (電子技術総合研究所)、中性子測定技術には藤代正敏教授 (大阪府立大学)、そして、宇宙核物理には Peter MOHR (ピーター・モア) 博士 (Darmstadt 工科大学) との出会いがありました。これについては、すでに核データニュース「光核反応に新たな息吹を吹き込む」[2] で紹介しましたので、ここでは省略します。新しい研究インフラとしてのガンマ線源と中性子検出技術に宇宙核物理の三つが揃い、私の研究人生が方向付けられました。甲南大学着任以前に、テキサス A&M 大学で始めた仮想光子 (クーロン分解) による宇宙核物理の研究から、実光子 (ガンマ線) による宇宙核物理の研究に移行した訳です。私は、21 世紀の変わり目に際して、20 世紀に盛隆を極めた光核反応による原子核物理 (巨大共鳴) の研究から、宇宙核物理 (元素の起源) 研究への転換による、光核反応分野の復活を提唱しました。

最初に研究対象に選んだ核種は ^9Be でした。私が中性子測定技術を教わった藤代博士が、熊取の京大原子炉で中性子捕獲反応によって生成した放射性核種をガンマ線源として研究した核です。この核は、超新星爆発時に、 $\alpha + \alpha \rightarrow ^8\text{Be}$, $^8\text{Be} + n \rightarrow ^9\text{Be} + \gamma$ によって合

成されることが考えられますが、合成に係わる核反応は不安定な ^8Be が短寿命 (10^{-16} 秒程度) で 2 つの α 粒子に壊れるので、実験室では直接測定できません。第一段階の ^8Be 合成反応は、理論計算によって評価される合成率の信頼度はかなり高いものの、第 2 段階の反応は、合成に係わる ^9Be の第一励起状態が中性子しきい値のすぐ上に存在することもあって、不定性が大きいとされていました。

原子核物理学に正逆反応の等価性に関する相反定理があり、これを使えば逆反応（光核反応）から正反応（中性子捕獲反応）の反応率を決定することができます。第 2 段階の反応を逆にみると、安定核 ^9Be の光核分解反応であることが直ちに分かります。しかも、実験的に困難なところはありません。こうして、実験を電子技術総合研究所（以下、電総研）（つくば市）で行い、最初の論文を 2001 年 [3] に、反応率の論文を 2002 年 [4] に出版しました。最初に行った ^9Be 核の研究結果を図 1 に示します。 ^9Be の研究には後日談があり、それについては<転>で触れます。

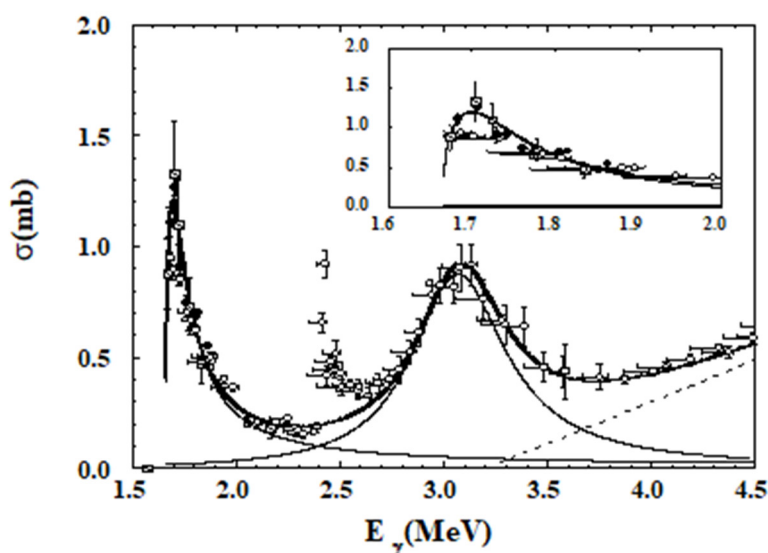


図 1 $^9\text{Be}(\gamma,n)$ 反応断面積（文献[4]から転載）

この時期、相反定理に基づく光核分解実験はもう一つ、ビッグバン重陽子元素合成 $n + p \rightarrow D + \gamma$ の逆反応として、重陽子についても行われたこと [5] を付け加えておきます。

3. <承> 2004—2009

21 世紀の変わり目に提唱した光核反応研究の復活は、相反定理に基づく軽い核の合成の研究で口火が切られましたが、光核反応の本丸の研究はこの時期に進められた p プロセス重元素合成でした。MOHR 博士が世界に先駆けて Darmstadt 工科大学の制動放射ガンマ線を使って研究した p プロセスとは、 s プロセスと r プロセスで合成された重元素を

光核分解することで、核図表の安定線の上側に存在している天然存在量の少ない、セレン ($Z=34$) から水銀 ($Z=80$) に至る 35 種の中性子欠乏核を作る重元素合成です。そこでは、光核反応が文字通り主役を務めるために、電総研で生成される LCS (レーザーコンプトン散乱) ガンマ線の利用研究では欠かせないテーマです。

LCS ガンマ線の発生原理を図 2 に示します。レーザー光子を相対論的速度の電子に衝突させると、エネルギーが eV のレーザービームは、 MeV のガンマ線ビームに変換されます。電子が静止している場合はよく知られたコンプトン散乱に他ならないですが、電子が動いているこの散乱を逆コンプトン散乱と呼びます。逆コンプトン散乱によって、レーザー光子はエネルギーが 1000 万倍増幅され、ガンマ線になります。私はこれを光子加速器と呼んで国際会議で宣伝しました。もちろん、通常の加速器は、質量を持つ粒子を加速して、速度を、したがって、エネルギーを大きくするのですが、レーザーコンプトン散乱では、質量がゼロの光子の速度は一定で (アインシュタインに逆らうことはできません)、エネルギーが大きくなります。こうして生成される LCS ガンマ線は、低バックグラウンドの準単色ガンマ線であり、光核反応の実験的研究では、連続分布の制動放射ガンマ線に対する優位性は誰の目にも明らかでした。当時、電総研 (後に産業技術総合研究所に改組 ; 以下、産総研) の研究員であった、大垣英明博士 (後に京都大学エネルギー理工学研究所に転出) と豊川弘之博士に実験をサポートしていただきました。

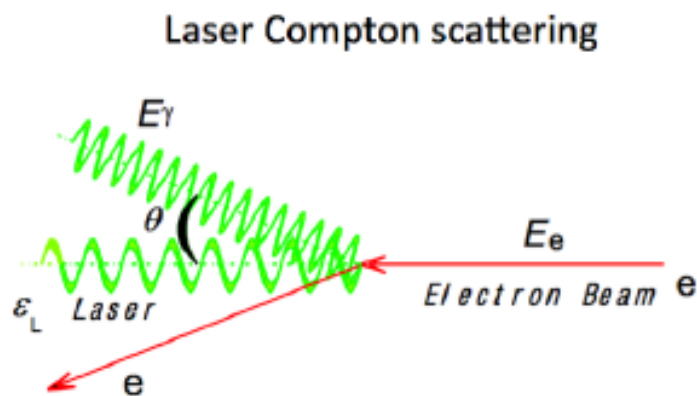


図 2 レーザーコンプトン散乱の概念図 (文献[26]から転載)

研究対象に選んだ核種は ^{180}Ta でした。この核種は、天然存在量の少ない p プロセス核の中でも最希少核種で、天然に存在する唯一の核異性体として知られ、その起源はよくわかっていませんでした。恒星内部は高温の熱浴でありそこにはプランク分布に従う黒体輻射が存在します。第二世代以後の恒星には s, r プロセス起源の核種である ^{181}Ta はあらかじめ存在しているので、それから中性子 1 個を剥ぎ取れば ^{180}Ta が生成されます。光

核反応には反応しきい値（中性子しきい値）が存在するので、光子のプランク分布と光核反応断面積の積で定義される“光核反応のガモフピーク”は、中性子しきい値のすぐ上に存在します。したがって、LCS ガンマ線のエネルギーを中性子しきい値から変えながら中性子放出の反応断面積を精密に測定する必要がありました。結果を図3に示します[6]。測定結果は、IAEA ライブラリー1999年版の評価値によく一致し、中性子しきい値のすぐ上に反応断面積の増加が見られました。反応断面積の増加は、当時話題になり始めたピグミー共鳴成分と解釈されました。測定された反応断面積を用いて、重い恒星の酸素・ネオン層での p プロセス元素合成計算を行った結果、 ^{180}Ta の p プロセス由来を支持する結果となりました。一方、超新星爆発時に発生する大量のニュートリノによる中性子の剥ぎ取り反応（ニュートリノプロセス）も寄与する可能性があります。 ^{180}Ta 核の元素合成が起こる宇宙環境と合わせて、さらなる研究の発展が期待されます。

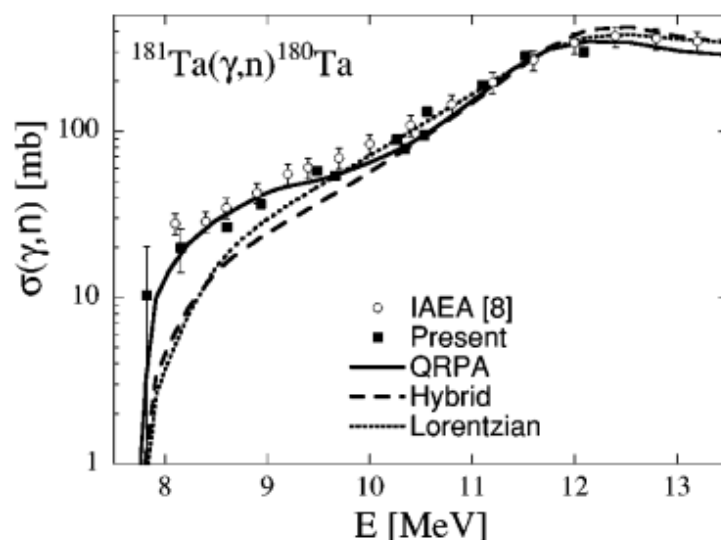


図3 $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}$ 反応全断面積（文献[6]から転載）

^{180}Ta の起源について、もう一つ研究を行いました。それは、光核反応の行先として ^{180}Ta の核異性体（励起エネルギー75 keV, スピンパリティ 9⁻、寿命 $>1.2 \times 10^{15}$ 年）と基底状態（寿命 8.15 時間）を分けて測定したことです。先述の測定は、反応の行先を指定しない ^{181}Ta の全光核反応断面積の測定でした。先の研究では、p プロセスが起こる高温の環境下では、 ^{180}Ta の核異性体と基底状態は熱平衡状態にあると考えられるので、分離測定は不要でした。しかし、 ^{180}Ta の起源として、特殊な s プロセスの可能性が指摘されていたため、 ^{180}Ta 生成の部分反応断面積の測定を行いました。測定の様子を図4に示します。

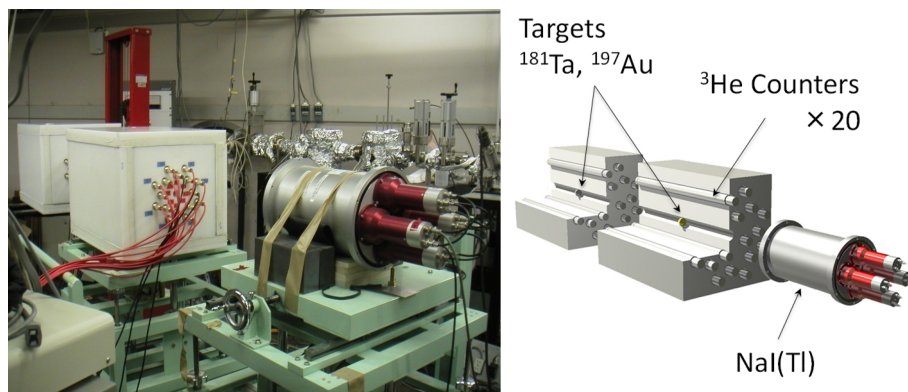


図 4 ^{181}Ta の光核反応部分断面積測定実験

この測定では、中性子検出器を 2 台使い、1 台には ^{181}Ta 標的を、他の 1 台には ^{197}Au 標的を設置し、ガンマ線ビームで 2 つの標的を串刺しにしました。 ^{181}Ta 標的では、中性子の直接測定によって全反応断面積を、放射化実験によって ^{180}Ta の基底状態へ分岐する部分反応断面積を測定しました。 ^{180}Ta の核異性体へ分岐する部分断面積は、それらの差で得ました。同時に行った ^{197}Au 標的を使って放射性核種 ^{196}Au を生成する実験は、放射化実験の較正目的で行いました。この実験で、初めて、 ^{180}Ta 核異性体を生成する反応断面積の測定に成功しました [7]。結果を図 5 に示します。このデータは、同時に、 ^{180}Ta の核準位密度が、励起エネルギー 5 MeV 以下の低エネルギー領域で、従来使われていたフェルミガス模型の核準位密度よりもスピンの 5 以上の励起状態がより多く存在していることを示唆し、Combinatorial 模型の核準位密度を使った統計計算によって、よく再現されることが示されました。

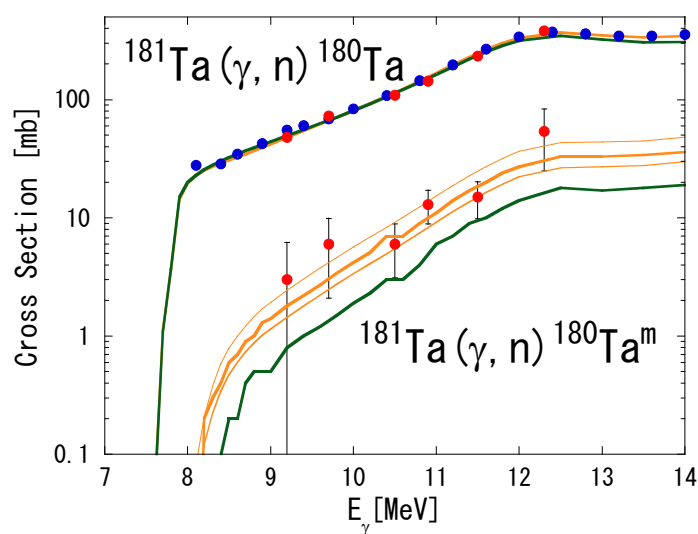


図 5 $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}$ 反応全断面積と $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}^m$ 反応部分断面積 (文献[7]から転載)

^{180}Ta 核種の起源の研究によって、Nuclear Physics 誌からレビュー論文 [8] の執筆依頼が来ました。宇宙核物理学における光核反応の重要性が国際的に認識されるようになった瞬間でした。また、日本物理学会誌から「最近の研究から」の執筆依頼もあり、記事を書きました [9]。

この時期に、ガンマ線強度関数 (γSF : γ -ray Strength Function) を用いてプロセス元素合成の研究を行うという、新しい物理の発展がありました。私たちが中性子しきい値以上で測定した $(\gamma, 1n)$ 反応断面積は、重い核では中性子崩壊が優勢であるため、直ちに γSF に焼き直すことができます。したがって、私達の光核反応データは、中性子しきい値以下の γSF の絶対値を規格化する役目を果たすことができます。重要なことは、中性子しきい値以下の γSF は、中性子捕獲反応を決定する重要な統計的物理量であるということです。こうして、s プロセス元素合成の研究への道が開かれました。この研究は、次の三段階を踏んで行われます。第一段階では、多くの安定同位体に対して $(\gamma, 1n)$ 反応断面積を測定します。第二段階では、測定した $(\gamma, 1n)$ 反応断面積を γSF の理論モデルを規格化する実験的制約として用いて、既知の中性子捕獲 (n, γ) 断面積データを最もよく再現するモデルを選択します。第三段階では、同じ γSF の理論モデルを用いて不安定同位体に対する中性子捕獲反応断面積を計算します。＜起＞では、 (γ, n) と (n, γ) 反応の相反定理に基づいて、核準位密度の小さい軽い核の元素合成研究を行いました。＜承＞では、原子核の統計模型に基づいて、 (γ, n) と (n, γ) 反応のガンマ線強度関数の等価性 (Brink-Axel 仮説) を使って、s プロセス重元素合成に必要な (n, γ) 反応断面積を導出しました。

私は、この研究手法をガンマ線強度関数法 (γSF 法) と名付け、産総研で Pd [10], Zr [11], Sn [12], Mo [13] 等の多くの同位体核種に研究を広げました。一方、オスロ大学の Sunniva SIEM (スニバ・シエム) 教授、Magne GUTTORMSEN (マグナ・グトームソン) 教授等が、オスロ法と呼ばれるガンマ線の多重同時計測によって、中性子しきい値以下のエネルギー領域で γSF を導出する手法を開発し、精力的に研究を進めていました。2007 年にギリシャのクレタ島で開催された国際会議 FINUSTAR2 で、私は GUTTORMSEN 教授と当時大学院生の Ann-Cecilie LARSEN (アン・セシル・ラーセン) に出会い、直ちに双方の研究が相補的であることを認識し、共同研究を行うことを約束しました。クレタ島の 9 月の午後、気持ちの良い風を受けながらテーブルに座って、 γSF という地味な研究に携わる仲間を得た喜びに浸りながら、議論したことを思い出します。後に、LARSEN は GUTTORMSEN 教授と結婚したことを知り、そういうこともあるのかと感心しました。

オスログループに提供し共同研究の発端となったのは、Sn 同位体に対して測定した $(\gamma, 1n)$ 反応断面積でした。特に、 ^{117}Sn 核のデータは、当時、オスログループが Physical Review Letters 誌に論文を投稿したものの、レフェリーから疑問を呈されていたガンマ線強度関数の余剰成分の存在を実証するデータとなり、それにより論文が掲載決定したため、大いに感謝されました。図 6 に、 ^{117}Sn 核の $(\gamma, 1n)$ 反応断面積を、図 7 に、私達の光

核反応データとオスログループのデータを中性子しきい値 6.94 MeV で接合して構築した、 ^{117}Sn 核のガンマ線強度関数とモデル計算値を示します。HFB+QRPA (Hartree-Fock Bogoliubov + quasiparticle random phase approximation) モデル計算値に、8 MeV 付近にピグミー共鳴による余剰成分をガウス関数で加えると、実験値をよく再現します。一方、ローレンツ関数型のガンマ線強度関数は、実験値を過大評価しています。

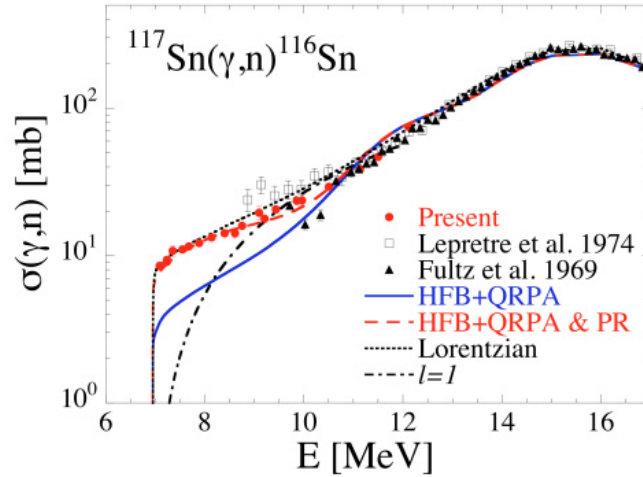


図 6 ^{117}Sn 核の $(\gamma, 1n)$ 反応断面積 (文献[12]から転載)

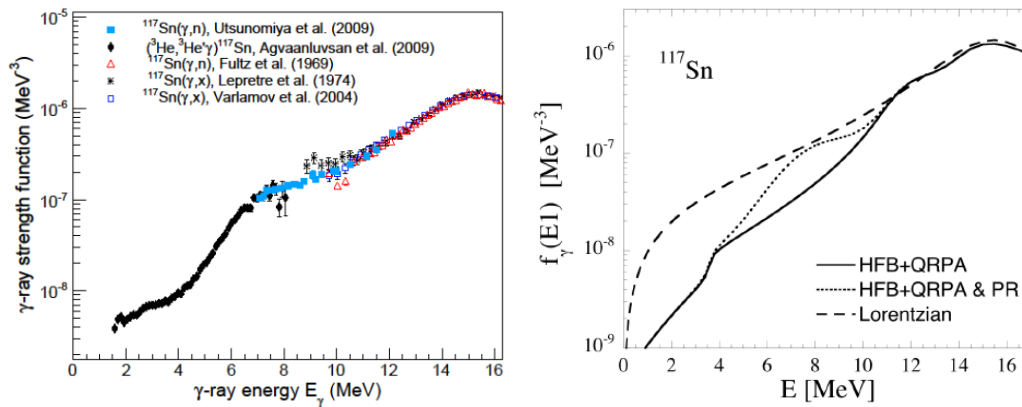


図 7 ^{117}Sn 核のガンマ線強度関数の実験値 (左) とモデル計算値 (右)

図 8 に、 ^{117}Sn 核のガンマ線強度関数の実験値を再現するモデル値を用いて計算した ^{116}Sn 核の中性子捕獲断面積を、実験データと比較して示します。ピグミー共鳴を追加することで、実験データをよく再現していることが分かります。また、ローレンツ関数型のガンマ線強度関数は、中性子捕獲反応データを過大評価することが分かります。

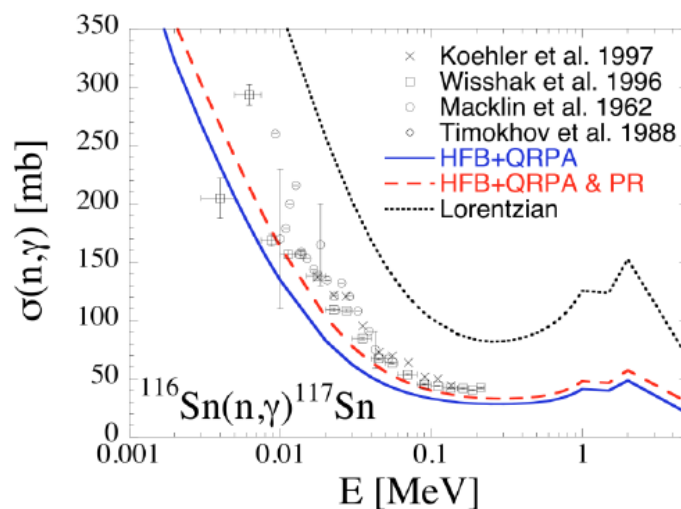


図8 ^{116}Sn 核の中性子捕獲断面積（文献[12]から転載）

この時期の話題として逃せないのは、2005年に始まった原子力特別会計事業（代表者：鬼柳善明北海道大学教授）です。私にとっては、原子力分野の研究に参加することは初めてで、緊張したのを覚えています。この事業の主眼は、革新的原子力システムのための核データに関する研究で、J-PARCの物質生命科学実験施設（MLF）に核データ測定用ビームラインを建設し、マイナーアクチニドと長寿命核分裂生成物の中性子捕獲断面積を直接測定することでした。事業の詳細は、お世話になった井頭政之先生の最終講義[14]に見られます。

私は、この事業では、ゲルマニウム検出器と $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器からなる複合ガンマ線測定装置 ANNRI（Accurate Neutron-Nucleus Reaction Measurement Instrument）の製作責任者の一人であった原田秀郎博士（日本原子力研究開発機構）のグループに属しました。私に課せられた任務は、ガンマ線強度関数法を使って、長寿命核分裂生成核種 ^{79}Se （半減期 ≤ 6.5 万年）、 ^{93}Zr （同 153 万年）、 ^{107}Pd （同 650 万年）の中性子捕獲断面積を決定することでした。研究結果を、2010年に韓国済州島で開催された原子力核データ分野のフラッグシップ国際会議 Nuclear Data for Science and Technology (ND2010) で発表しました。

4. <転> 2010–2014

2011年3月11日に東北大震災が発生し、岩手、宮城、福島、茨城、各県の太平洋沿岸部を大津波が襲いました。福島第一原子力発電所の第1から第3の3基の原子炉は、全電源消失により炉心溶融（メルトダウン）を起こし、また、水素爆発により1,3号機の原子炉建屋が破損し、多くの放射性物質が大気中に放出されました。私も、文部科学省の要請に応じて、2度福島県に入り土壌調査に協力しました。

東北大震災が契機となり、産総研の Teras 蓄積リングに設置されていた LCS ガンマ

線ビームラインは閉鎖されることになりました。ここから、産総研に代わるガンマ線ビーム施設として、ニュースバル放射光施設への研究移行が始まりました。

ニュースバル放射光施設では、兵庫県立大学の望月孝晏、安東愛之助、細野和彦、宮本修治教授等による長年に亘る開発努力により、LCS ガンマ線の生成に成功していました。しかし、ガンマ線ビームラインには小さな照射室しかなく、頭を下げてやっと入れることができるものの、検出器を設置する十分なスペースがありませんでした。そこで、私が最初に行ったことは、十分なスペースを有する実験照射室を設置するため、文部科学省の私立大学等研究設備整備費等補助金を申請することでした。2011 年度の補助金に採択され、実験照射室 GACKO (Gamma Collaboration Hutch of Konan University : 月光) が 2012 年 3 月に完成しました。この施設では、平日昼間は放射光ユーザーが実験を行い、ガンマ線利用は、エネルギーを変えることもあって、平日の夜間と週末に限られていたので、語呂合わせで「月光」と名付けました。図 9 に GACKO 設備を、図 10 にニュースバル放射光施設のガンマ線ビームライン BL01 を示します。



図 9 ニュースバル放射光施設 GACKO 照射室

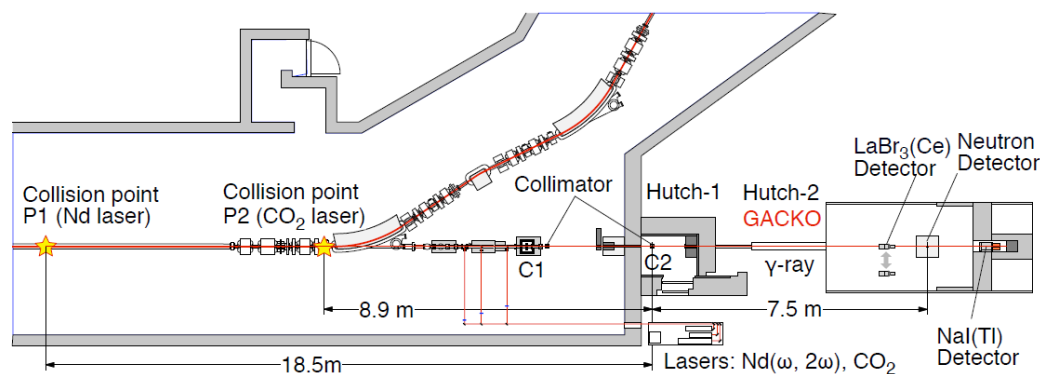


図 10 ニュースバルガンマ線ビームライン BL01 (文献[26]から転載)

西ヨーロッパでは、原子核・素粒子研究は、CERN（欧州原子核研究機構）、GSI（ドイツ重イオン研究所）、GANIL（フランス重イオン研究所）、Gran Sasso 地下研究所（イタリア）等の大型加速器研究所への集約化が進んでいました。これに対して、ヨーロッパ連合（EU）は、2010 年頃、東ヨーロッパにおける研究戦略を新しく策定しました。それは、ガンマ線とレーザーを研究インフラとする研究所を、東ヨーロッパの 3 か国（ハンガリー、チェコ共和国、ルーマニア）に建設するというものでした。

ルーマニアの首都ブカレスト近郊のマグレール（Magurele）では、極限光量子原子核研究所（ELI-NP : Extreme Light Infrastructure-Nuclear Physics）の建設が始まりました。甲南大学主催の Tours 国際シンポジウムは、2012 年にドイツ・ブラックフォレストで開催された会議が最後になりましたが、一日のプログラムが終了した夕方、GSI の Christoph SCHEIDENBERGER（クリストフ・シャイデンバーガー）教授から、ELI-NP の Victor ZAMFIR（ビクター・ザムフィア）教授を紹介され、同教授から ELI-NP プロジェクトへの参画を求められました。

2012 年にマグレールで開催されたワークショップに招待され、私は電総研と産総研で行ってきた光核反応実験を紹介しました。午後には、研究グループ毎に分かれてミーティングが行われました。参加した中性子グループのミーティングで、私はコンヴィーナー（convener）への就任を依頼されました。正直、コンヴィーナーは何をするのかよくわかっていなかったのですが、日本の私学に身を置き研究活動に強い制約を受ける身で、果たして責任をもって引き受けられるか迷いました。そして、断るつもりで、「私はアジア人である。これはヨーロッパのプロジェクトだから、ヨーロッパ人がリーダーになるのがいいのではないか。」と言いました。ここまではよかったのですが、続いて、「しかし、どうしても言うなら引き受けます。（But, if you insist, I accept it.）」と余計なことを言っ てしまい、直ちに「We do insist.」と返され、引き受けてしまいました。

中性子グループは、GANT（Gamma Above Neutron Threshold）グループと呼ばれ、グループには、ホリア・フルベイ原子核研究所（IFIN-HH）の Dan FILIPESCU（ダン・フィリペスク）研究員と当時ブカレスト大学の大学院生であった Ioana GHEORGHE（イオアナ・ギョルギ）がメンバーとして入っていました。ちなみに、二人は後に結婚します。FILIPESCU 研究員は GANT グループの若い責任者で、私の研究経験に目をつけ、あらかじめ白羽の矢を立てていたのですね。

私は、早速、コンヴィーナーとして、甲南大学と IFIN-HH 研究所の間で研究協力協定（覚書）を結び、人材の育成と ELI-NP プロジェクトを進めました。そして、2013 年からニュースバル施設で LCS ガンマ線を利用した共同実験を開始しました。この共同実験は、その後、年 2 回のペースで行われ、＜結＞で述べる大型の国際共同実験に発展します。共同実験の初期メンバーには、GANT グループの FILIPESCU 研究員、GHEORGHE 大学院生の他、＜承＞で述べたオスロ大学との共同研究のため、SIEM 教授の大学院生、

Hilde-Terese Nyhus(ヒルダ-テレーサ・ニフス)、Terese RENSTRØM (テレーサ・レンストローム) がいました。ガンマ線強度関数法に基づいて Sm 同位体 [15]、および Nd 同位体 [16]の測定を行いました。

2013 年に国際会議 ND2013 がニューヨークで開催されました。この会議で、モスクワ大学スコベルツィン原子核研究所から参加した Vladimir VARLAMOV (ウラジミール・バーラモフ) 博士と出会いました。スコベルツィン原子核研究所は、マイクロトロン加速器が生成する制動放射ガンマ線を使って光核反応断面積を測定し、データライブラリーを作成していた光核反応研究の拠点の一つで、博士は核データ評価を担当する専門家です。私は、この会議に 3 日目から参加しましたが、VARLAMOV 博士は、初日から旧知の日本人参加者に「宇都宮はどこにいる」と聞き回っており、私が講演した会議 4 日目のセッションで待ち構え、ついに会えることとなりました。私は、それまで、あまり注目されることなく、知る人ぞ知る程度の地味な仕事を自分なりに進めてきたと自覚するばかりでしたが、私をこれほどまでに探し求める研究者がいることを知ったという点で、この出会いは衝撃的でした。

セッションが終わった後、二人でソファに腰かけ議論したと言いたいところですが、実際のところは、VARLAMOV 博士が自分の仕事をひたすら私に語り続け、気が付くと 2 時間を優に超えておりました。博士がこのとき語ったことは、これまでアメリカ・リバモア研究所とフランス・サクレ研究所で取得された光核反応データには、大きな不一致があり、どちらか一方が正しく他の一方が間違っているというような単純なことではなく、どちらも間違っている可能性があるということでした。私の実験家としての腕を見込んで、将来、光核データ分野の発展に貢献することを期待したようです。

しかし、ここに一つ実験技術的な壁が立ちます。リバモアとサクレのデータの不一致を解消するには、放出される中性子の数（これを中性子多重度といいます）毎に反応断面積を測定しなければなりません。しかし、私はこれまで、光核反応のうち中性子が 1 個だけ放出される ($\gamma, 1n$) 反応断面積しか測定していませんでした。私は、2014 年にスコベルツィン研究所に招かれセミナーを行い、そのセミナーの質疑応答で、中性子多重度 (x) 毎の反応断面積、すなわち (γ, xn) 反応部分断面積を如何にして測定するかという議論が起きました。ここでの議論が、後に、国際原子力機関のプロジェクトでカギとなる、検出効率が中性子のエネルギーに依存しない平坦効率中性子検出器のアイデアにつながりました。

2014 年には、東京大学原子核研究センターが主催する国際サマースクールの講師に招待されました。このサマースクールで、講師として来日した David M. BRINK (デイビット・ブリック) 教授と出会いました。私は GORIELY 博士と一緒に、Brink-Axel 仮説 [17] に基づいて多くのガンマ線強度関数の論文を書いていたことが、＜承＞の図 8 で示したように、ローレンツ関数型のガンマ線強度関数は中性子捕獲断面積を過大評価すること

を指摘しておりました。BRINK 教授が、「ローレンツ型のガンマ線強度関数を提唱したのはよくなかった」と言われたので、私は「特定の関数形は問題ではありません。本質的なことは先生が等価性を提唱されたことです」と答えました。貴重な思い出です。等価性とは、BRINK 教授の学位論文では、原子核の基底状態からと励起状態からの光励起で、ガンマ線強度関数は同じであるという仮説です。この仮説は、原子核の励起状態から巨大共鳴を励起する研究を刺激したという歴史的経緯があります。この等価性は、原子核の異なる励起状態からの脱励起、また、原子核の励起と脱励起に対しても適用されます。

この時期に行った研究として、＜起＞で述べた ^9Be 研究の後日談に触れます。 ^9Be の光分解反応は、デューク大学にある HIGS ガンマ線施設でも測定され、結果が 2012 年に発表されました [18]。結果は、光分解反応断面積は、私達が発表したものより、 ^9Be の第一励起状態のピーク断面積で約 30% 大きいものでした。そこで、私達は再測定をニュースバル放射光施設で行い、結果を 2015 年 [19] に発表しました。再測定の結果は、2001 年に発表したものと変わりませんでした。結果を図 11 に示します。

図 11 には、 ^9Be の巨大共鳴の下に幅の広い強い共鳴状態の存在が見て取れます。私はこれを、2 体 ($^8\text{Be}+n$) または 3 体 ($\alpha+\alpha+n$) の Cluster Dipole 共鳴 (CDR) と呼んでいます。ただし、Cluster Dipole Sum Rule [20] では 2 体と 3 体の区別はつきません。実験的に区別する研究が必要です。また、 ^9Be の $1/2^+$ 第一励起状態は、共鳴状態か仮想状態かという決着がついていない論争があることを指摘しておきます。 ^9Be 光核反応データは、今後も、ガンマ線施設にとって新旧を問わず、重要なベンチマークテストの役割を果たすものと思われます。

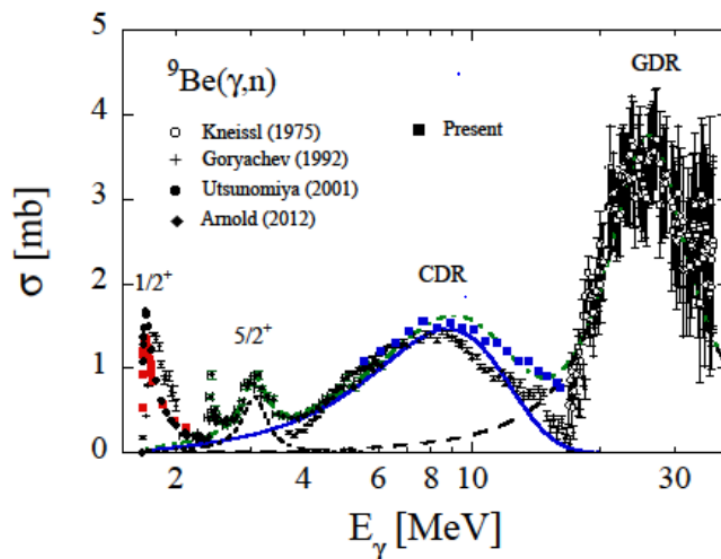


図 11 ^9Be 光核分解再測定の結果 (文献[19]から転載)

5. <結> 2015—2020

ELI-NP プロジェクトで、GANT グループのコンヴィーナーとしての最大の責務は、グループの TDR (Technical Design Report)、つまり、研究計画書を作成し提出することでした。私、Franco CAMERA (フランコ・カメラ: イタリア・ミラノ大学教授)、VARLAMOV 博士、FILIPESCU 研究員を中心に議論を重ね、本文 100 ページ超、付録と文献を入れた総ページ数が 191 に及ぶ TDR を、2015 年 4 月に提出しました [21]。研究対象の物理は、1) p プロセス元素合成、2) 巨大共鳴の核構造 (巨大共鳴の中性子崩壊とガンマ崩壊)、3) ピグミー共鳴と M1 共鳴の核構造、および、4) 巨大共鳴の全反応断面積および部分反応断面積のデータベースの 4 つです。製作する検出器は、I) 熱中性子検出システムと、II) 中性子-ガンマ線検出システムの 2 つです。

熱中性子検出システムは、前年にモスクワ大学スコベルツィン研究所で行ったセミナーで着想を得た、平坦効率中性子検出器です。ポリエチレン中性子減速材中に ^3He 比例計数管を三重リング状に配置した検出器で、2014 年 12 月から 2015 年 1 月にかけて、全検出効率が検出する中性子のエネルギーに依らずできるだけ一定になるように、GEANT4 モンテカルロコードを使って、三重リングのガンマ線ビーム軸からの距離と各リングを構成する ^3He 比例係数管の本数を最適化しました。こうして出来上がった中性子検出器を図 12 に示します [22]。中性子-ガンマ線検出システムは、中性子検出器として 33 台の液体シンチレーション検出器と 29 台の Li ガラス検出器、ガンマ線検出器として 34 台の $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ と CeBr_3 検出器からなる巨大な検出器アレイです。検出器の南半球には稀なガンマ崩壊事象の検出のため標的から短い距離にガンマ線検出器が、北半球には TOF 測定のため長い距離に中性子検出器が配置されています。

GANT グループの TDR は、国際評価委員会のレビューを受けた結果、核共鳴蛍光法によるガンマ線測定グループの TDR と双璧をなすと評価を受け、予算も満額に近い回答 (約 2M€) を得ました。



図 12 平坦効率中性子検出器 (文献[22]から転載)

2015 年には、中国でも上海放射光施設「上海光源」の第 II 期研究計画で、ガンマ線ビームラインの建設が提案されました。私は、国際評価委員の一人としてレビューに参加し、中国初のガンマ線ビームラインの建設を強く推奨しました。ガンマ線ビームラインを提案したのは、当時上海応用物理研究所にいた WANG Hongwei（王宏伟：ワン・ホンウェイ）教授のグループでした。

国際原子力機関（IAEA）は、2016 年に、光核反応データライブラリーの更新と光子強度関数の標準データベースを作成する共同研究プロジェクト IAEA-CRP F41032（CRP: Coordinated Research Project）を立ち上げました。前者は、IAEA が 1999 年に作成したライブラリーを 20 年ぶりに更新するもので、後者は初めて作成する光子強度関数（ガンマ線強度関数）のデータベースです。IAEA の統括責任者は Paraskevi (Vivian) DIMITRIOU（パラスケビ・デイミトリウ）で、前者のライブラリーの提唱者はモスクワ大学の VARLAMOV 博士、後者のデータベースの提唱者はオスロ大学の SIEM 教授です。どちらも、私にとって因縁浅からぬ研究者です。私は、IAEA からプロジェクトへの参加を要請され、甲南大学は、2016 年、IAEA と研究契約書を結びました。

私は、IAEA-CRP の機運を横目に見ながら、先行して国際共同実験を進めていました。2013 年の IFIN-HH 研究所（ルーマニア）に続いて、2014 年にはモスクワ大学（ロシア）と、2015 年には上海応用物理研究所（中国）と学術協定書を結びました。そして、2015 年には、IAEA-CRP を先取りして、 ^{209}Bi 核の巨大共鳴の全反応断面積と部分反応断面積の測定を始めました[23]。この実験は、ブカレスト大学大学院生の子学生 GHEORGHE のために博士の学位実験として企画しました。

IAEA-CRP にとって不可欠な実験技術について述べます。光核反応断面積の絶対値測定では、ガンマ線のエネルギー、ガンマ線の個数（フラックス）、ガンマ線のエネルギー広がり精度よく決める必要があります。ニュースバル放射光施設では、これらの物理量を精度よく決定する基本技術を開発しました。

ガンマ線のエネルギーの絶対値較正については、 CO_2 レーザー光子（波長 10.59mm）と電子ビームの衝突により、数 MeV の低エネルギーガンマ線を生成し、エネルギー較正されたゲルマニウム検出器で測定することで、電子エネルギーの絶対値を 10^{-5} の精度で決定しました [24]。ニュースバルの電子ビームは、線形加速器から蓄積リングへ、エネルギー 1 GeV で入射され、蓄積リング内で 0.5 GeV へ減速または 1.5 GeV へ加速します。減速と加速の両プロセスにおいて、蓄積リングの電子軌道はよく制御され制御パラメタの再現性は高い精度で保証されています。こうして、ガンマ線のエネルギーは電子ビームのエネルギーから決定できます。図 13 は、発生したガンマ線の高エネルギー端が電子エネルギーに敏感に依存していることを示しています。ガンマ線の高エネルギー端を再現する電子エネルギーのベストフィット値は 860.72 MeV（青線）であることがわかります。図には、電子エネルギーをベストフィット値から 0.5 MeV、及び 1.0 MeV 増減

させたときの依存性を示しています。

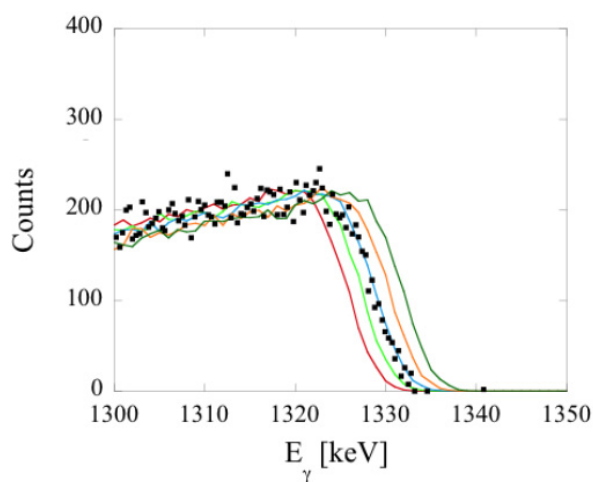


図 13 ガンマ線の高エネルギー端の電子ビーム依存性（文献[24]から転載）

Q-スイッチレーザーによって発生されるパルスガンマ線では、1 パルスあたりに含まれるガンマ光子の数はポアソン分布に従うと考えられます。パルスガンマ線を検出効率が 100%の大型 NaI (TI)検出器で測定すると、検出器は 1 パルスに含まれるガンマ線光子を区別できませんので、個数に応じて波高が大きい事象が記録されます。これを多光子スペクトル、または、パイルアップスペクトルと呼びます。図 14 に示されているように、この多光子スペクトルは、見事にポアソン分布に従っていることが確認できます。このスペクトルをポアソン分布でフィッティングすることで、1 パルスあたりに含まれるガンマ線光子の平均個数を決めることができます。ガンマ線の総数は、この平均個数にガンマ線パルス数を掛けて求められます。ガンマ線個数の決定精度は原理的には 1%以下と非常に高いことが分かりました [25]。

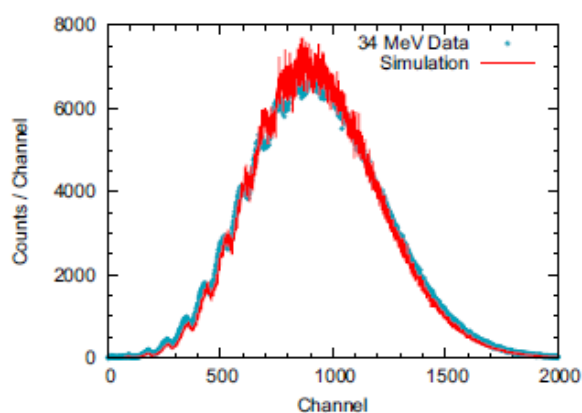


図 14 パルス LCS ガンマ線ビームの多光子スペクトル（文献[26]から転載）

レーザーコンプトン散乱ガンマ線は、単色性は高いものの、コリメーターが有限な散乱角度を見込むためエネルギー広がりがあります。散乱角度の広がり、また、電子ビーム自体が角度を持ってレーザー光子に衝突することでも生じます。衝突領域での電子ビームの空間的広がりとは角度はエミッタンスという物理量で定義されます。LCS ガンマ線を $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器で測定し、得られたエネルギースペクトル（応答関数）データを GEANT4 モンテカルロシミュレーションによって再現します。モンテカルロコードには、レーザーコンプトン散乱の力学が組み込まれ、電子ビームのエミッタンスが未知のパラメタになります。実験で得られた $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器の応答関数を最もよく再現するように、電子ビームエミッタンスを決め、レーザーコンプトン散乱のモンテカルロシミュレーションによって、LCS ガンマ線のエネルギー広がりを見込みます[26]。エネルギー広がり、直径 2mm のコリメーターを使うと、加速器が安定した条件では 1-3% であることが判明しました。図 15 に、 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器の LCS ガンマ線に対する応答関数と、GEANT4 モンテカルロシミュレーションによるベストフィット、及び、LCS ガンマ線のエネルギー分布を示します。

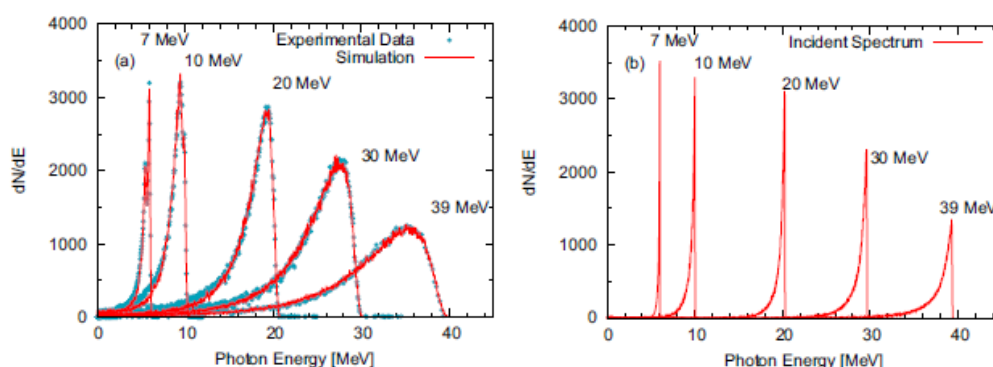


図 15 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器の LCS ガンマ線に対する応答関数と GEANT4 モンテカルロシミュレーションのベストフィット (左)、LCS ガンマ線のエネルギー分布 (右) (文献[26]から転載)

ニュースバル放射光施設で、光核反応断面積を測定するための基礎的な実験技術確立したことで、私は、全精力を掛けて IAEA-CRP に取り組むため、PHOENIX (フェニックス) 国際共同実験を立ち上げました。PHOENIX 実験の目的は、IAEA-CRP のために、光核反応データと光子強度関数データを新たに取得することでした。通常、IAEA-CRP では既測定核データを研究対象にしますが、CRP F41032 では、リバモア研究所とサクレイ研究所が取得した巨大共鳴核データの大きな不一致を解消するため、新たにデータを取得しました。ELI-NP で生成されるガンマ線の最高エネルギーは 20 MeV ですが、

ニュースバル放射光施設ではガンマ線を 76 MeV まで生成できますので、巨大共鳴全体を 40 MeV までの広いエネルギー帯域で励起し、平坦効率中性子検出器を使って中性子多重度を 4 まで測定しました。

光核反応データチームと光子強度関数データチーム、およびデータを取得した核種を以下にまとめます。

光核反応チーム

IFIN-HH ホリア・フルベイ原子核研究所：FILIPESCU 研究員、GHEORGHE 大学院生
モスクワ大学：Sergey BELYSHEV（セルゲイ・ベリシェフ）研究員、Konstantin STOPANI（コンスタンティン・ストパニ）研究員
上海応用物理研究所：WANG 教授、FAN Gongtao（范功涛：ファン・ゴンタオ）博士
11 核種： ^9Be , ^{59}Co , ^{89}Y , ^{103}Rh , ^{139}La , ^{159}Tb , ^{165}Ho , ^{169}Tm , ^{181}Ta , ^{197}Au , ^{209}Bi

光子強度関数チーム

オスロ大学：Gry TVETEN（グリ・トウベッテン）研究員、RENSTRØM 大学院生他
22 核種： ^{13}C , $^{58,60,61,64}\text{Ni}$, $^{64,66,68}\text{Zn}$, ^{89}Y , $^{137,138}\text{Ba}$, $^{156,157,158,160}\text{Gd}$, $^{182,183,184}\text{W}$, ^{185}Re , ^{192}Os , $^{203,205}\text{Tl}$

2 つのチームに共通のメンバー：宮本修治教授（兵庫県立大学）、有泉高志（甲南大学大学院生）

ニュースバル放射光施設での実験経費は、ビーム利用料と加速器運転員への支払いが主なものですが、長坂悦敬甲南大学長が新設したプレミアプロジェクト Research & Education に「元素の起源に関する探究プロジェクト」として採択されたことで、財政的裏付けが得られました。

PHOENIX 実験成功の頼みの綱は、共同研究者の理解と献身的な努力です。手弁当で参加し、平日夜間と週末昼夜間の実験を行い、データを取得してくれました。また、プレミアプロジェクトでは「研究成果が教育に染み出す」との学長の掛け声に応えるため、学部生を対象にしたサイエンスリベラルアーツ教育と国際交流のため、英語講演を引き受けてくれました。

IAEA-CRP F41032 は、2019 年 10 月に出版された光子強度関数の標準データベース [26] と、2020 年 1 月に出版された IAEA 光核反応データライブラリー 2019 [27] の完成によって終了しました。

図 16 に、PHOENIX 実験で取得し、IAEA 光核反応データライブラリー 2019 に収録された ^{159}Tb 核の巨大共鳴データを示します。このデータが、リバモアとサクレイのデータの不一致の解消を端的に示しています。すなわち、私達が取得したデータは、中性子多重度

が 1 の($\gamma,1n$)反応断面積についてはサクレー (Bergele) のデータを支持し、中性子多重度が 2 の($\gamma,2n$)反応断面積についてはリバモア (Bramblett) のデータを支持するという結果になりました。($\gamma,1n$)反応の寄与が大きい全反応断面積は、サクレーのデータにより近いという結果でした。かつて、VARLAMOV 博士がニューヨークで私に言った「リバモアとサクレーのデータはどちらも間違っている可能性がある」という言葉が、耳に鳴り響きました。

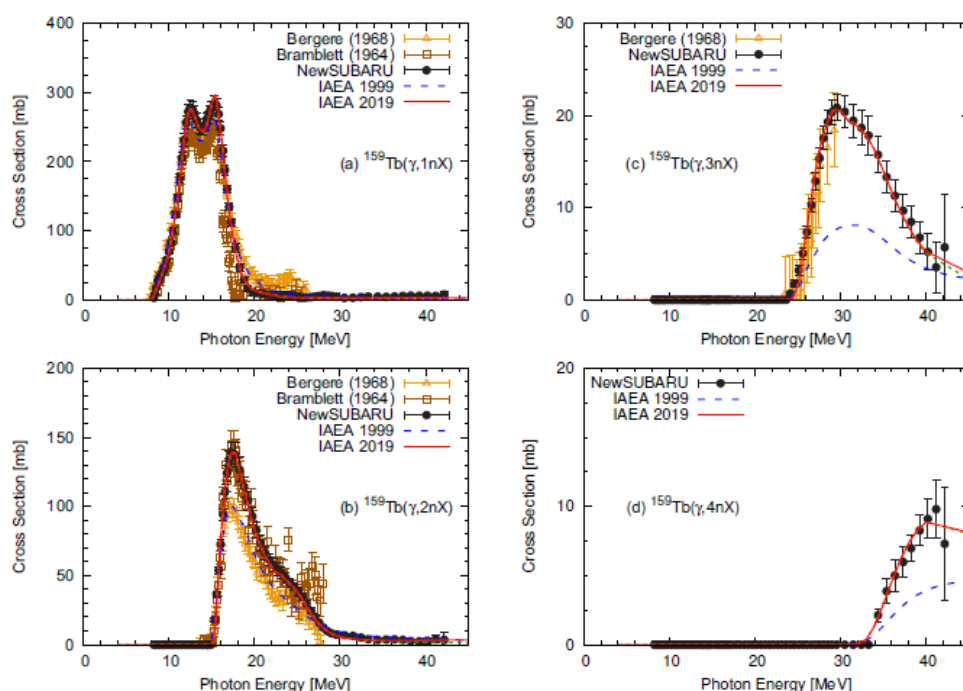


図 16 ^{159}Tb 核の巨大共鳴に対する光核反応部分断面積データ (文献[26]から転載)

6. <それから> 2021-

IAEA-CRP が終わるや否や、2020 年初頭から新型コロナウイルスのパンデミックが起こり、世界は今もその猛威に晒されています。私の定年最後の年は、大学のオンライン授業への対応に追われました。研究では、2020 年 3 月に予定していたブリュッセルとミラノへの渡航は中止となり、私が提案した光核反応データに関する共同研究の機会は失われたかに見えましたが、GORIELY 博士のリーダーシップの下、Skype を通して月 1 回のペースで議論を行い、2020 年 12 月には巨大共鳴の全反応断面積に関する論文 [28] を発表することができました。

そのような中、ニュースバル放射光施設は、2021 年からガンマ線利用を中止するという決定をしました。同施設は、ガンマ線利用において、国際的な Center of Excellence の地位を築いていましたので、この決定は国内外のユーザーに大きな失望感をもたらしま

した。私にとっては、東北大震災後、産総研がガンマ線利用を停止して以来の出来事です。その最中、上海光源でガンマ線ビームラインを建設している WANG 教授から、甲南大学定年後は、ぜひ上海高等研究院に来て欲しいという話をいただきました。「捨てる神あれば拾う神あり」、「渡りに船」とはこのことですね。こうして、中国科学院国際人材計画によって、私は上海に来ることになりました。私の主な任務は、これまでの研究経験に基づいて、上海光源でのガンマ線利用研究の促進と人材の育成になると思います。

7. おわりに

関西の一私学で、ひそかに、しかし、決然と始めた光核反応の研究は、多くの人との出会いを経て、思わぬ進展を遂げました。自らの研究人生を振り返ると、努力という文字が頭に浮かびます。甲南大学では自分なりにベストを尽くしやり切ったという思いがあります。そして、人の縁で 30 年ぶりに海外で研究所勤めを始めます。思えば、29 歳でアメリカに渡り、ミシガン州立大学とテキサス A&M 大学の研究所に勤務して以来の研究所勤めです。今の私にはその頃の馬力はありませんが、少しは知恵がついていると思うので、できるだけ若い人の役に立つように働きたいと思います。再見！

謝辞

甲南大学を定年退職された、原子核研究室の先輩教授、山県民穂先生には、無為にして化すがごとく、我が道を歩ませていただきました。ここに、深く感謝申し上げます。また、最後になりますが、最終講義について執筆の機会を与えていただいた、国際原子力機関の大塚直彦博士に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Y. Xu et al., Nucl. Phys. A 918, 61 (2013).
- [2] 宇都宮弘章：「光核反応の研究に新しい息吹を吹き込む」、核データニュース No.80, p.83 (2005).
- [3] H. Utsunomiya et al., Phys. Rev. C 63, 018801 (2001).
- [4] K. Sumiyoshi, et al., Nucl. Phys. A 709, 467 (2002).
- [5] K.Y. Hara et al., Phys. Rev. D 68, 072001 (2003).
- [6] H. Utsunomiya et al., Phys. Rev. C 67, 015807 (2003).
- [7] S. Goko et al., Phys. Rev. Lett. 96, 192501 (2006).
- [8] H. Utsunomiya, P. Mohr, A. Zilges, M. Rayet, Nucl. Phys. A 777, 459 (2006).
- [9] 宇都宮弘章：「実験室で探る天体光核反応とその周辺」、日本物理学会誌 Vol. 62, No. 1, p.34 (2007).
- [10] H. Utsunomiya et al., Phys. Rev. C 82, 064619 (2010).

- [11] H. Utsunomiya et al., Phys. Rev. Lett. 100, 162502 (2008); H. Utsunomiya et al., Phys. Rev. C 81, 035801 (2010).
- [12] H. Utsunomiya et al., Phys. Rev. C 80, 055806 (2009); H. Utsunomiya et al., 84, 055805 (2011).
- [13] H. Utsunomiya et al., Phys. Rev. C 88, 015805 (2013).
- [14] 井頭政之：「中性子とガンマ線と」、核データニュース No.117, p.81 (2017).
- [15] D.M. Filipescu et al., Phys. Rev. C 90, 064616 (2014).
- [16] H.-T. Nyhus et al., Phys. Rev. C 91, 015808 (2015).
- [17] D.M. Brink, Ph.D thesis, Oxford University, 1955.
- [18] C.W. Arnold et al., Phys. Rev. C 85, 044605 (2012).
- [19] H. Utsunomiya et al., Phys. Rev. C 92, 064323 (2015).
- [20] Y. Alhassid, M. Gai, G.F. Bertsch, Phys. Rev. Lett. 49, 1482 (1982).
- [21] Gamma Above Neutron Threshold, Technical Design Report ed. F. Camera, H. Utsunomiya, D.M. Filipescu, 2015; F. Camera et al., Romanian Reports in Physics, Vol. 68, Supplement, P. S539–S619 (2016).
- [22] H. Utsunomiya et al., Nucl. Inst. Meth. A 871, 135 (2017).
- [23] I. Gheorghe et al., Phys. Rev. C 96, 044604 (2017); I. Gheorghe et al., ibid. C 99, 059901 (E) (2019).
- [24] H. Utsunomiya et al., IEEE Tran. Nucl. Sci., Vol. 61, No. 3, 1252 (2014).
- [25] H. Utsunomiya et al., Nucl. Inst. Meth. A 896, 103 (2018).
- [26] T. Kawano et al., Nucl. Data Sheets, 163, 109 (2020).
- [27] S. Goriely et al., Eur. Phys. J. A 55, 172 (2019).
- [28] S. Goriely et al., Phys. Rev. C 102, 064309 (2020).