

## 上海ガンマ線源の開発

甲南大学理工学部物理学科

宇都宮 弘章

[hiro@konan-u.ac.jp](mailto:hiro@konan-u.ac.jp)

---

### 1. はじめに

甲南大学を定年退職するまでの研究については最終講義「ガンマ線と中性子と」[1]にまとめました。本稿では、定年後の上海でのガンマ線源の開発について記します。上海渡航のいきさつは、2015年に国際評価委員会の一員として上海放射光施設の第II期ビームライン建設計画をレビューし、中国初のガンマ線源（SLEGS: Shanghai Laser Electron Gamma Source）の建設が始まったことに端を発します。

### 2. 上海第1期 2021年4月 - 2022年1月

2021年3月定年を迎え、研究室をたたみながら航空券と180日間有効のFビザを取得し、新型コロナの陰性証明書を手に上海浦東国際空港に降り立ったのは4月13日夕刻でした。混雑した空港で新型コロナウイルスのPCR検査を終え、他の渡航者と一緒にバスで検疫隔離のホテルに直行し2週間の隔離後、中国人同僚の車で居住先のアパートに到着しました。アパートでも1週間の自主隔離があり、上海高等研究院（SARI: Shanghai Advanced Research Institute）に初出勤したのは5月の連休明けでした。研究所では私が唯一の日本人です。中国科学院国際人材の雇用契約、居住許可書、労働ビザへの切り替え、銀行口座の開設、携帯電話の契約等の初期設定に2週間程度かかりましたが、同僚の助けを得て比較的スムーズに進みました。

上海放射光施設は3.5 GeVの電子蓄積リングが発生する放射光を物性研究に利用する施設です。渡航当時、原子核物理の研究に利用するガンマ線源 SLEGS の建設が佳境を迎えていました。ガンマ線は、3.5 GeVの電子とCO<sub>2</sub>レーザーの光子（波長10.6 mm）の散乱によって発生させます。SLEGSの最大の特徴は、放射光利用のため3.5 GeVに固定された電子のエネルギーを変えず、電子と光子の散乱角度を変えるレーザーコンプト

ン斜散乱 (LCSS: Laser Compton Slant-Scattering) によって、発生するガンマ線のエネルギーを可変にすることです。図 1 に斜散乱が示されています。図中の  $q$  が電子ビームと光子ビームの斜散乱角です。

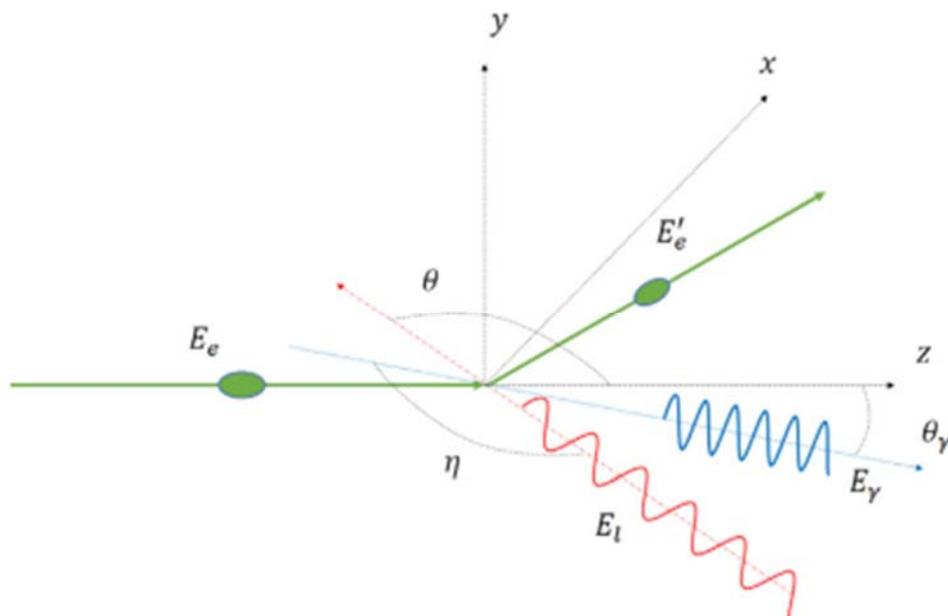


図 1 レーザーコンプトン斜散乱

斜散乱の技術は大垣英明氏（京都大学エネルギー理工学研究所）等によって分子科学研究所極端紫外光施設（UVSOR）で開拓されましたが[2]、散乱角度を変える専用の散乱槽を備えた SLEGS は、完成すれば世界初の LCSS ガンマ線ビームラインです。

図 2 に SLEGS ビームラインのレイアウトを示します。図中の Interaction Chamber が電子と光子の斜散乱を行う散乱槽[3]です。

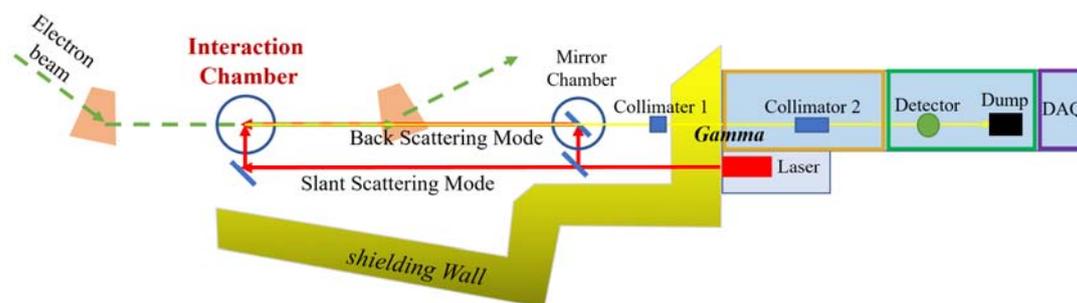


図 2 SLEGS ガンマ線ビームライン

ガンマ線ビームの性能にとって、エネルギー可変性に加えて単色性が重要です。単色性とはガンマ線のエネルギーがどれくらい揃っているかを表す言葉で、単色性を定量化する物理量はエネルギー分解能です。電子と光子の斜散乱で発生したガンマ線のうち、電子ビームの進行方向の小さな角度(図1の $q_g$ )に放出されたものをコリメーターによって選ぶことで高い単色性を実現します。SLEGSには口径の大きい鉛コリメーター(図2 Collimator1: 以後C コリメーターと称す)と口径の小さなタングステン・銅合金のコリメーター(図2 Collimator 2: 以後F コリメーター)が設置されました[4]。C コリメーターは拳銃の回転式弾倉のような構造を持ち9種類の口径を選ぶことができ、F コリメーターはカメラの絞りのように口径を連続的に変えることができるように設計されました。

こうして、王宏偉をリーダーとする建設グループは、ガンマ線生成のカギとなる斜散乱専用の散乱槽[3]とCとFのダブルコリメーター[4]を設置し、エネルギー可変のガンマ線を発生し2021年12月には中国科学院による施設検査とガンマ線の基本性能の検査に合格しました。ただし、F コリメーターは内部の2組の絞り機構が噛み合っていないため、ガンマ線の発生はC コリメーターだけを使って行なわれました。しかし、とにかくこれで行政的には施設は完成しました。

中国政府のゼロコロナ政策の下、中国製ワクチンを2回接種しました。ある日、四川省から上海放射光施設の見学に訪れたグループの中から感染者が出たため、急遽研究所内で所員全員のPCR検査が実施されることになり、全員の陰性が確認され帰宅を許されたのは夜でした。陽性者が出ていれば研究所は封鎖されていたと思います。しかし、数百人の検査を一日で終えるという迅速さには驚かされました。



図3 華清宮(左)、兵馬俑の発見者とともに(中)、大唐芙蓉苑にある西遊記の像(右)

新型コロナの蔓延を警戒するなかでしたが、混雑をさけて10月の国慶節後に4泊5日で西安旅行に行きました。西安は秦の始皇帝の兵馬俑が有名ですが市内の史跡の多くは唐代のものです。地下鉄とバスを乗り継いで、兵馬俑、華清宮、鐘鼓楼、大雁塔、大

唐芙蓉苑、大唐不夜城、明城墙、陝西歴史博物館、大明宮を訪れました。大明宮でのことです。夕闇と閉園時間が迫るなか出口を探して広い園内をさまよいましたが出口が見つからず、ついに3メートルほどの金網のフェンスを乗り越え園外の道路に降り立った時は本当にほっとしました。中国はいたるところに監視カメラが設置されているのでよく捕まらなかったものだと思います。

### 3. コロナ事情による中断 2022年

2022年1月に9カ月の滞在を終えて帰国しました。4月に再渡航を予定していましたが、中国国内で新型コロナが猛威を振るい地域閉鎖（ロックダウン）が深刻になったため一時帰国は延びました。11月にはロックダウンに不満を募らせた市民がいくつかの都市で多発的に蜂起する事態となり、中国政府は12月ついにゼロコロナ政策を放棄する宣言を出しました。市民運動の勝利でしたが、その後当局による市民の逮捕拘束が続きました。

### 4. 上海第2期 2023年3月 - 12月

上海再渡航が実現したのは2023年3月でした。検疫隔離はなく空港から直接自分のアパートにたどり着きました。しかし、留守にしているあいだ電気を止められたため、部屋の電灯は点かず冷蔵庫内の食品は腐り暖房なしで寝るという散々な初日でした。料金未払いのためでしたが、とくに携帯電話で電子マネーを使えないのは困りました。

さて、SLEGSで実験する目的で意気揚々と上海に来ましたが、とんでもないことが判明しました。2021年に故障が判明したFコリメーターが修復されず放置されていたのです。当時、王のグループはCコリメーターで生成したガンマ線ビームを使って測定を繰り返していましたが、Cコリメーターだけではガンマ線の放出角度 ( $q_g$ ) を絞り切れず、生成されるガンマ線はエネルギー広がりが大きく原子核物理実験には適していません。現状では高品質の原子核データを取得することはできないので、Fコリメーターの修復をするか、修復ができなければ代替コリメーターを設置することを優先するように進言しました。しかし、結局、王は7月まで測定を続けました。8月に入って、危機感を募らせた私は、SLEGS施設の現状と今後の進め方について文書をまとめ、中国科学院でSLEGSプロジェクトに責任のある二人の教授（沈文慶、馬余剛）に提出しました。文書の要点は、1)Cコリメーターで生成される低エネルギー分解能のガンマ線は産業利用には適しているものの原子核物理実験には適していないこと、したがって、2)SLEGSは産業利用施設としては完成していると認められるが原子核研究施設としては未完成であること、3)Fコリメーターの修復か代替コリメーターを設置し原子核研究施設としての完成を急ぐこと、4)完成後は、国際基準に則したPAC (Program Advisory Committee) を組織し、国立のガンマ線ビーム施設としてSLEGSの実験利用を図ることの4点です。王

グループのメンバーである范功涛は直ちに文書の重要性を認め、3)の課題に取り掛かりました。結局 F コリメーターの修復は十分できず、代替コリメーターとして T コリメーター（図 4）が設置されたのは帰国 2 カ月前の 10 月でした。

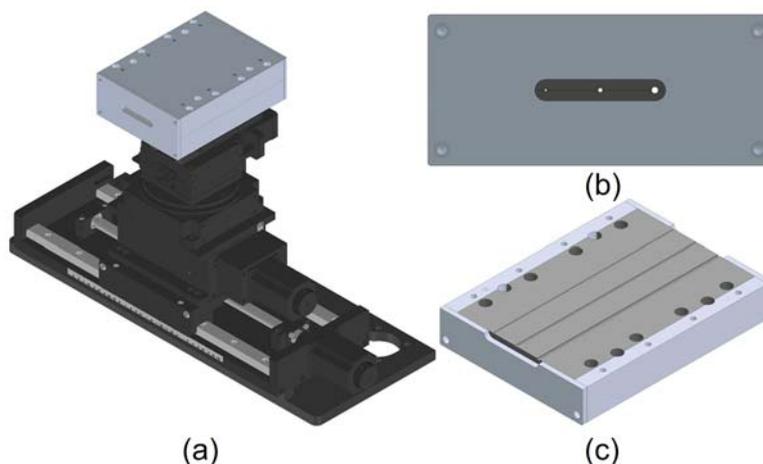


図 4 直径 1, 2, 3mm の口径を持つ T (three-aperture) コリメーター

T コリメーターの設置と並行して、ガンマ線ビームの基本性能（エネルギー分布と強度）を定量評価する研究を行いました。ガンマ線のエネルギー分布と強度は原子核物理実験を行う上で基本的な物理量です。F コリメーター問題の解決とガンマ線性能の基礎研究は、コロナ禍があったとはいえ 2022 年に優先的に行っておくべき研究課題でした。

ガンマ線ビームのエネルギー分布の決定には新しい手法を導入しました。検出効率 100% の BGO 検出器のガンマ線に対する応答関数を、ガンマ線のエネルギー分布に直接 unfolding する手法です。このため、9 月に中国原子能科学研究院で BGO 検出器のエネルギー較正と単色ガンマ線に対する応答関数を測定しました。11 月に産業利用を想定して C3 コリメーターを使って生成した高強度ガンマ線ビームと、原子核物理実験を想定して C3T2 コリメーター（直径 3mm の C コリメーターと直径 2mm の T コリメーターの組み合わせ）を使って生成した高分解能ガンマ線ビームを BGO 検出器で測定しました。

ガンマ線の強度測定は、エネルギー分布測定と併せて 11 月に行いました。SLEGS で使っている CO<sub>2</sub> レーザーは本来 CW (continuous wave) モードで動作し、出力は時間的に連続分布をしており総出力は 100W です。しかし、外部パルス信号によりレーザーを ON/OFF することで出力にパルスの時間構造を持たせることができます。ガンマ線強度測定はパルス信号の周波数と幅を変えて行いました。

5 月に中国原子能科学研究院、北京師範大学、北京航空航天大学に、10 月には复旦大学（上海）と南華大学（湖南省）に招かれセミナーを行い、多くの研究者・大学院生と議論しました。その機会を利用して、山東省の孔子廟（曲阜市）と泰山（泰安市）、湖南

省の衡山（衡陽市）を観光しました（図5）。



図5 五岳の一つ泰山（左）と衡山（右）

## 5. 今後 2024 -

SLEGS での実験を目指して 2023 年に再渡航したもののその機会は得られず、帰国したのは 2023 年 12 月です。SLEGS の原子核物理実験施設としての完成と生成されるガンマ線の基本性能の研究に力を注ぐ中で、もうここで研究から完全に引退すべきとの思いを強くしました。SLEGS 建設の混乱と研究組織への失望及び先行きに対する不安が原因でした。いくつかの大学・研究所から 2024 年の研究契約を提案されましたがすべて断りました。

一方で、帰国直前の 2 週間足らずで、ガンマ線のエネルギー分布と強度の測定結果を基に 2 編の論文原稿を作りました。エネルギー分布の研究によって、SLEGS 施設で生成されるガンマ線の最高のエネルギー分解能は斜散乱角度に依存し、90 度より後方角で 6 - 10%（半値全幅）、90 度より前方角で 10 - 18% であることが判明しました（図 6）。これにより、SLEGS は中程度のエネルギー分解能を有するガンマ線を生成するレーザーコンプトン斜散乱施設であると結論しました。エネルギー分解能の論文は既に Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A に出版されました[5]。ガンマ線強度の論文は発表予定です[6]。

帰国後 2 編の論文をまとめる作業の中で、私が主導した研究チームがうまく機能したことを再確認したことで、私の心境に変化が出てきました。心残りだった最希少元素

$^{180}\text{Ta}$  の起源に関する実験に挑戦する気持ちが湧いてきました。そこで復旦大学の外国人研究員の誘いを受けることにしました。2名のサブリーダー何建軍（北京師範大学）、范功涛（上海高等研究院）の協力を得て、 $^{180}\text{Ta}$  研究プロジェクトチームを作り準備を進めています。

SLEGS での原子核物理実験は 2024 年から本格的に始まります。現在、馬余剛を中心に PAC 設立の準備が進められています。今後、PAC の国際委員として役目を果たしながら  $^{180}\text{Ta}$  研究計画書を PAC に提出する予定です。

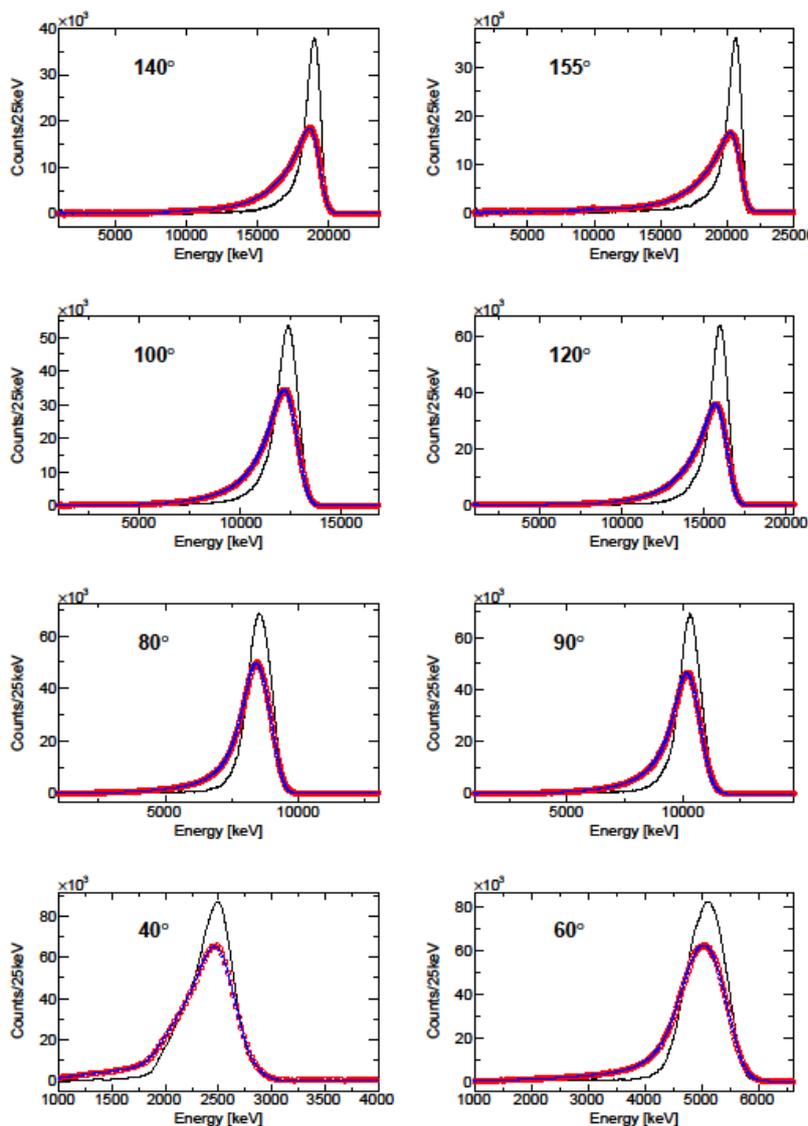


図 6 BGO のガンマ線応答関数（赤丸）、unfolding 法によって得られたガンマ線ビームのエネルギー分布（黒線）、ガンマ線のエネルギー分布を単色ガンマ線応答で folding して得られた BGO 応答関数（青線）

## 参考文献

- [1] 宇都宮弘章：「ガンマ線と中性子と」、核データニュース No. 129、p. 54 (2021).
- [2] H. Ohgaki, et al., Study on energy variable laser-Compton gamma-ray with a fixed energy electron beam, J. Nucl. Sci. Technol. 44 (2007) 698–702.
- [3] Z.R. Hao et al., Collimator system of SLEGS beamline at Shanghai Light Source, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 1013 (2021) 165638.
- [4] H.H. Xu et al., Interaction chamber for laser Compton slant scattering in SLEGS beamline at Shanghai Light Source, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 1033 (2022) 166742.
- [5] L.X. Liu et al., Energy profile of laser Compton slant-scattering  $\gamma$ -ray beams determined by direct unfolding of total-energy responses of a BGO detector, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 1063 (2024) 169314.
- [6] H.H. Xu et al., Gamma-ray flux in Gated CW operation of CO<sub>2</sub> laser at SLEGS, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, in preparation.