

■談話室

高エネルギー屋さんを目指して ～退職教員雑記～

京都大学複合原子力科学研究所（元京都大学大学院理学研究科）

谷 森 達

tanimori.tohru.6e@kyoto-u.ac.jp

2022年（令和4年）11月20日

1 序

私は2000年まで高エネルギー物理学を専門としてきたが、京大で宇宙線の教授となり宇宙線研究者会議や高宇連に活動の場を移したので「退職教員雑記」を依頼されたことに感動した。

今は高エネルギー実験屋が宇宙、特に重力波、宇宙背景放射や暗黒物質(DM)を研究するのは普通になったが、私が宇宙線物理学を開始した1985年当時はかなり異質だった。また今まで新しい検出器や測定手法の開発とその応用、今でいうイノベーションを30年前から実践してきた。他分野にチャレンジするとき、新しいもの好きの精神が「高エネルギー屋」だと勝手に思い込み、これらを実践してきたつもりである。定年したこの機会に、その一端を紹介する。

2 素粒子から宇宙線へ

2.1 KEK-PS 時代

私は1985年東大物理で博士号を取得しKEKの助手になった。学生時代にKEKの12 GeV陽子シンクロトロン(PS)で陽子・反陽子反応測定を行った。学生でも検出器開発から解析まで全工程に関与できた。欧米ではすでにコライダーに移行し、日本でもトリスタンが建設中だった。私もPS実験は基礎習得の機会と考え、就職は大型実験へと考えていた。ただD3の時、実験で出た結果を基に改良実験をKEKに提案、採択という幸運に恵まれ助手に採用された。実験は1年で終了、その間今後の方針を考え、以前から自分で実験を考え実行するの

が夢だったので、PSでの新実験、または新分野参入を考えた。PSでは世界最先端を目指すのは困難で、行き詰っていたときにKEKの高橋主幹から「PSに囚われず物理学を探したらよい」とアドバイスされ、宇宙と素粒子の境界である宇宙線を勉強し、超新星爆発による元素合成と宇宙線加速等の非線形現象に興味を持ち、当時まだ小グループだったKAMIOKANDE実験(KE)に86年から参加した。

2.2 KAMIOKANDE での経験

87年には超新星(SN)SN1987Aが爆発、ニュートリノ検出という偉業があった。すぐに当時のペンシルバニア大が開発した回路の置き換えをKEKが担当することになり、唯一の若手研究者であった私が担当した。実はこの回路は1秒に15発以上のバーストが来ると記録できず、もしSN1987Aが天の川銀河で発生したら100発以上のニュートリノがヒットすることで記録できなかった。本当に大マゼラン雲というジャストな距離での爆発であった。そのため早急に銀河内SNへの対応が可能な回路、さらに検討が始まったSuper-KAMIOKANDE(SK)の回路の雛形も兼ねた開発となった。私自身は回路やオンラインには弱く、学生時代は実験に手薄な箇所を割り出し、それを調整し実験が確実に遂行できることを心がけていた。この回路開発は1人で出来る規模をはるかに超え、回路の専門家ではなく私のような人材が適任であると考えた。東芝に設計製作を依頼、ただし要のアナログ設計は小型化のためASICの導入が必要でKEKの専門

家に依頼した[1]. また SK の大規模化で PMT と回路間のケーブルが 100 m を超える問題も回路をタンク上面に分散する方法を考えケーブル長を約半分に短縮出来た. さらにタンク上に分散した回路をネットワークで接続するアイデアを出した. 当時普及しだした UNIX による割り込み処理オンラインを行い回路毎に小型 UNIX を配置することも考えた. RISC プロセッサの高速性でオンライン性能が無い UNIX でも疑似的割り込みが可能ではという素人発想である. どれも KEK の専門家や大学院生の頑張りで実現できた[2]. ただ KE, SK はこれらの開発が軌道に乗った 95 年に TeV γ 線天文学に集中するためグループを離れた. 約 8 年と短期間だが大型システムの開発を習得でき, また KE 成功の秘訣である大面積 PMT や上記の米国の回路導入など小柴先生の先見力を直に勉強できた.

3 独自の実験手法を求めて

3.1 KE の技術から量子線ビーム画像へ

この KE に関与したことがそれ以後の私の研究の基礎となった. 1 つは ASIC 開発で学んだ微細加工技術で新型ガス検出器 Micro Strip Gas Chamber (MSGC) と μ PIC (μ Pixel gas Chamber) 開発とその応用に繋がる. 今の量子線ビーム応用の先駆けである. 東工大に異動した 89 年当初は学生の遊び道具と考えたが, 会議で同席した化学の教授と意気投合し, 当時建設中の SPring-8 に X 線時分割画像解析という従来の画像解析に時間軸を加え, 結晶構造のダイナミクスを見る画期的な手法へ発展させた. 化学, 生命の方々とは時分割法にチャレンジし博士論文を 3 編だした. 2000 年には MSGC の脆弱性を克服した μ PIC を開発, 2006 年まで X 線解析への応用を検討した. しかし X 線解析に大型 Si ピクセル検出器が活用されはじめガス検出器が利用者に利点が小さいと判断し, 当時始まった J-PARC のパルス中性子施設の時間によるエネルギー弁別型中性子画像装置開発に移行した. μ PIC を基にした TPC を用いて ($^3\text{He}, n$) 反応の 3 次元計測を実現,

100 μm の位置分解能と 1 μs の時間分解能を同時に実現, 今は中性子施設で共用画像装置として多数のユーザーが利用している. X 線, 中性子応用は物理学会誌の 2 つの記事に詳細がある[3, 4]. ガス装置は古いと思われている. しかし半導体や量子検出器でも単に粒子反応エネルギーを電荷で測定する点は同じである. ガスの希薄性を生かし keV \sim MeV の粒子反応の 3 次元形状を捉え多数の物理計測を一度に行う革新的な計測法を実現, 「トポロジカル計測」と物理学会誌で紹介した. この方法で Compton Scattering (CS) する MeV γ 線, いわゆる放射線 γ 線の完全可視化と低雑音化という 2 つの難題を同時に解決する電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC) を開発, MeV γ 線天文学の開拓を始め放射線計測にイメージングを実現できた. この開発では粒子多重散乱を考えればガスの希薄性が本質である. なにが本当の革新, 最先端なのかを常に考え, 単純な真実を見つけることが大切と思う.

私は KE 実験を離れた後, 宇宙線, 特に TeV γ 線天文学, さらに MeV γ 線天文学に移動し, 並行して X 線・中性子構造解析や核 γ 線を用いた核医学診断, 粒子線治療, 福島除染や廃炉の γ 線画像解析等の分野を独自の切り口で開拓してきた[5, 6]. なぜ異なる複数の分野で研究できたか, 全く個人的観点で述べる. 私は従来, 何でも興味を持つ性格で TV 教養番組が大好きである. たまに自分の知識が有効でないかと感じるときは皆さんもあると思う. そう思うと関連の入門書や WEB で調べ, その分野での未解決問題に注目, その分野の計測にない新しい自由度の導入による効果を考える. 同時にその分野のキーとなる専門用語を数十個暗記し, その分野の専門家と話ができるようにし, その分野でチャレンジングな研究者を探しアイデアを聞いてもらう. そして自分のアイデアの修正を行っていく. 最も重要なことは基本的に自分の実験技術を用い, 対象分野へは切り口の斬新さを売りにした. 多数の μ PIC 応用はすべて ETCC の

μ TPC 技術で回路も全く同じである。1 つの技術を多方面に活用することで、開発資金を得、それを 1 つの技術開発に集中させ基本技術である ETCC を継続的に発展させた。基幹技術が進歩すれば応用分野へのアイデアも実現しやすくなった。複数の分野から資金を集めることで開発を継続出来、基幹技術が共通なためどの分野も発展されることが出来た。もし ETCC を天文学のみで開発したら 10 年も継続出来なかった。

3.2 KE から TeV γ 線天文学へ

以下 γ 線天文学の話をする。独創性が高い MeV γ 線を主に話したいので TeV γ 線天文学は簡単に述べる。きっかけはやはり SN1987A である。当時宇宙線加速起源は、観測的根拠は無いが、理論的には超新星残骸(SNR)による衝撃波加速が有力であった。銀河磁場に影響されない TeV γ 線探査が以前から注目されたが、 γ 線より 3 桁多い宇宙線が作る空気シャワーと TeV γ 線が作る空気シャワーの弁別が困難なため 1987 年当時 TeV γ 線観測は風前の灯であった。1989 年、米国 Whipple 望遠鏡が、空気シャワーが発生するチェレンコフ光を約 30 本の PMT による画像検出器を持つ 10 m 径望遠鏡で捉え、シャワーの画像解析で γ 線と宇宙線の弁別を行い、カニ星雲(Crab)の TeV γ 線検出に成功し状況が変わった。東大宇宙線研の木舟氏と共に KE で開発した回路を基にして安価かつ小型の PMT 300 本用の回路を実現、当時最高の高解像度カメラを開発。望遠鏡は国立天文台の古い 3.8 m 鏡を修理した(図 1)。観測地は SNR やパルサー星雲など宇宙線起源候補天体が多い南半球に絞り、豪州アデレード大との共同研究を実現、南豪州のウーメラに 300 本 PMT カメラを持つ 3.8 m 望遠鏡を 92 年に設置し観測を開始した(CANGAROO 実験)。南半球の観測と当時最高の画像分解能の 2 つの特徴を持たせた。ただ望遠鏡が暗くカメラの性能を生かしきれなかった。しかし Crab からの 50 TeV 以上の γ 線検出、さらに SNR の RX J1713.7-3946 から世界



図 1 豪州ウーメラに建設中の 3.8 m 径 TeV γ 線望遠鏡とその焦点に付けた 256 PMT カメラ

初の TeV γ 線を検出し[7], SNR が宇宙線加速源の可能性を示した。これらの成果で 1998 年から 10 m 望遠鏡 4 台に拡張できた。ただ安全性から鏡に割れない CFRP を用いて型成形で製作した。しかし型成形では必要な面精度を得られず集光能力が大きく低下、当時ドイツのグループが南半球に 12 m 望遠鏡 4 台を建設、我々はこの装置の数分の 1 の感度しか得られず、このグループの結果の追認観測に終始した。そのため 2010 年で観測を終了。天体観測では光学性能が最重要であることを痛感。それでも SNR からの TeV γ 線検出、南半球の開拓など TeV γ 線天文学の基礎となる重要な貢献ができた。

4 MeV γ 線天文学の開拓+ α

4.1 なぜ MeV γ 線で宇宙をみるのか

宇宙では地上では不可能なマクロな高エネルギー現象が起こる。一番はビッグバンであるが、天体では SN, γ 線バースト、ブラックホールなどがある。しかしビッグバン以外の有限な系では温度が MeV になると光子が電子・陽電子対に変更し、 $e^+e^- \leftrightarrow \nu\bar{\nu}$ 反応を経てニュートリノとしてエネルギーが逃げ、それ以上高温にならない。宇宙遠方で検出可能性を考えると MeV γ 線が有力な探査可能粒子になる。また宇宙線起源天体探査では、陽子加速を証明する必要がある。確実な方法として光子数スペクトルの 70 MeV (π^0 質量の半分) ピー

クが存在と、加速天体周囲の C や O と陽子衝突で出る MeV 脱励起 γ 線の観測があり、宇宙線起源にも MeV 観測は重要である。これらの点から MeV γ 線天文学に強い興味を持った。99 年 MSGC 開発中に数 mm の α 線の 3 次元飛跡が偶然取れ、軽微な回路で粒子飛跡をサブ mm 間隔で捉える μ TPC、それをういコンプトン散乱方程式(CSE)を解き γ 線方向が決定できる ETCC を思いついた[3, 4].

4.2 MeV γ 線完全可視化の実現

当時から MeV γ 線可視化のためにはコンプトンカメラ(CC)があった。90 年代の γ 線天文台衛星(CGRO)の MeV γ 線望遠鏡 COMPTEL に採用され、今も多くの研究が行われている。しかし CS の反跳電子方向が測定不可能で CSE が解けず、入射 γ 線方向(方位角と仰角で定義)の仰角しか決まらず方向は数十度に広がった円環となり、円環の重ね合わせから放射線源を推定する。そのため複数の点源や広がった放射源の形状の決定は困難である。他の波長領域の望遠鏡は入射方向の 2 角を決め幾何光学を満たす全単射写像(1 対 1 写像)であり、

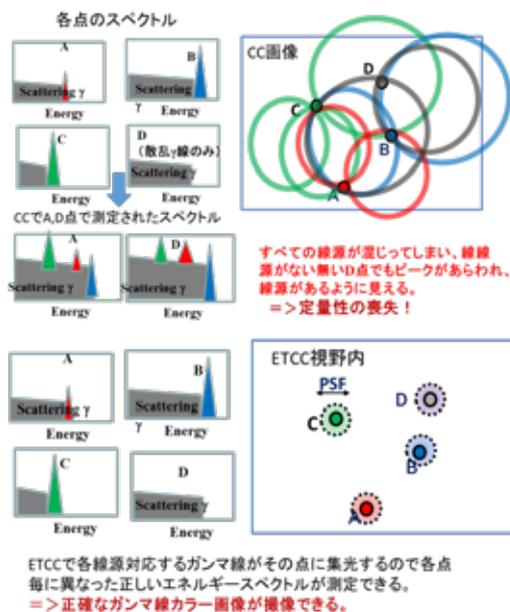


図2 CCおよびETCCでの複数点源の撮像の模式図。CCでは各点源のスペクトル(情報)が混在する非線形画像となるが、ETCCでは明確に分離され、各位置の情報が見られる線形画像となっている[9].

解析的に逆写像が得られる。つまり線形な画像である。しかしCCは画像内で各方向の情報が混在し(図2)非線形画像になり定量性が担保されない[8, 9]. TeV 観測では光学系の重要さを実感し、CCでは MeV γ 線観測は困難と強く感じた。望遠鏡の焦点での 2 次元広がり Point Spread Function (PSF)が画像評価の基本だが、CCでは定義できない[8]. GeV γ 線では CGRO の GeV γ 望遠鏡 EGRET が対生成を捉え方向を完全に求め、約 300 天体を発見。一方 COMPTEL は 30 天体と少ない。EGRET の PSF は数度である。MeV でも同様な PSF を得るには反跳電子方向を 20 度で決める必要がある。ガスではサブ mm サンプリング 3 次元読み出しで可能だが、固体ではサブ μ m に対応し、ガスのみが技術的に実現可能性がある[10].

4.3 電子飛跡検出型コンプトンカメラの実現

この考察に基づき、2000 年から図 3 のような μ PIC を用いた TPC の周囲を GSO 結晶アレイで取り囲み電子飛跡 3 次元計測および散乱 γ 線方向とエネルギー、つまり CS の全物理量の計測できる ETCC を開発した。さらに電子飛跡の dE/dx や散乱のトポロジー等の余剰物理量があり CSE とは独立な事象判定を可能し、2 桁以上の雑音除去を実現した。10 cm 角立方 ETCC から始まり、現在銀河 γ 線が数時間で観測できる 30 cm 角、医療、原子力等の

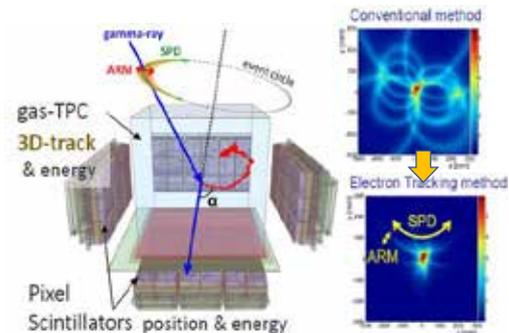


図3 左は ETCC の原理図、ガス TPC と GSO ピクセルアレイから構成される。電子飛跡は実測。右は電子方向を加えることで γ 線方向が明確に収束することを示す実測のデータ。

20 cm 径可搬型などへ展開した。この ETCC の重要な要素は μ TPC のピクセル読出しをストリップ読出しに変え、30 cm 角 ETCC の約 100 万ピクセルを千チャンネルに削減した点である。装置サイズの 3 乗で回路が増えるところを 1 乗に抑えることが出来た。これが 1 研究室で開発出来た理由である。特に宇宙実験では軽量化、低電力化は至上命題である。

2004 年、ETCC で γ 線の集光に成功 (図 3) , 国際学会で報告した。しかし γ 線検出にガス検出器はクレイジーという反応しかなかった。この反応は当初から予想していたが、唯一 COMPTTEL の創始者 V. Schönfelder 博士のみ絶賛してくれた、彼は実際の観測から CC の欠点を痛感されていたと思う。 γ 線では大きい原子番号の固体を γ 線吸収体に使うのが定石であり、物質質量が少ないガスは意味が無いと言う方が多い。しかし CS の断面積は電子数に比例し、光電吸収は原子番号の 5 乗に比例する。CC や ETCC では散乱体での光電吸収が偶発事象の原因となる。重い固体では光電吸収が CS の数千倍大きく、線量の多少の増加で偶発事象が爆発的に増加し雑音源になる。CS では低原子番号で電子が多い炭素分子が最適であり、COMPTTEL は液体シンチレータを使用。ガスでは CF_4 が使え、50 cm 角立方 3 気圧で 1 MeV γ 線有効面積は 110 cm^2 が得られる。宇宙 MeV γ 線の光子数は GeV γ 線より 3 桁多く、100 cm^2 の有効面積に PSF 2 度と完全な雑音除去で、COMPTTEL より 3 桁良い感度が実現する [10]。

4.4 宇宙 MeV γ 線気球観測

我々は 2006 年、JAXA 三陸気球で 10 cm 角 ETCC (SMILE1) 観測を行い、宇宙線雑音を 2 桁以上低減、宇宙拡散 γ 線スペクトルを測定、2010 年医療応用でマウス、うさぎ等の分子イメージングを実現、さらに大型 30 cm 角 ETCC により MeV γ 線撮像に PSF を定義して CC より 1 桁近い感度改善を実証 [10]。また福島を除染地域撮像では世界初の MeV γ

線イメージング分光を実現 [5]、 γ 線の大気散乱スカイシャインの撮像に成功した。これらの成果を踏まえ 2018 年 JAXA 豪州気球に 30 cm 角 ETCC を搭載 (SMILE2+)、28 時間銀河中心 (GC) を含む南天全域を観測した。事象の飛跡例 (図 4) を見れば一目瞭然で雑音と CS が識別できる。これを利用し 2 桁以上雑音を低減、図 5 に示すようにライトカーブに GC 通過時に増加と減衰を確認、GC から拡散 MeV γ 線を 10σ 以上で検出した [11]。この実験では宇宙線雑音は宇宙天体 γ 線と同程度まで低減できたため GC γ 線が視野通過時に顕著に見えたのである。

今まで COMPTTEL や INTEGRAL (欧州の核ガンマ線衛星、現在も観測中) では宇宙線由来雑音が宇

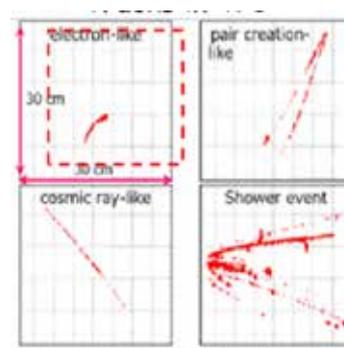


図 4 実際に測定された TPC 内の事象例。CS は TPC 内に始点と終点がある特異な飛跡であり、他の雑音事象と簡単に識別できる [11]。

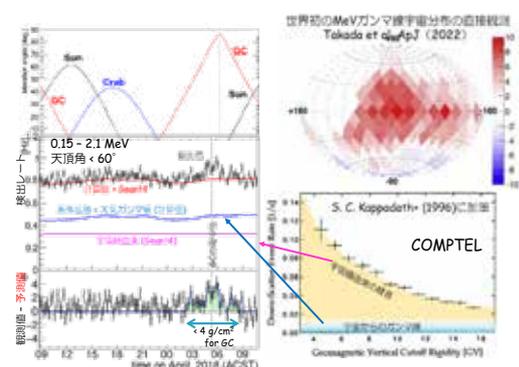


図 5 左は観測されたライトカーブ、銀河通過と共に計数率が増加し減少する。独立に、シミュレーションによる雑音と他のデータから予想された信号 γ 線を表記 [11]、右下に COMPTTEL の同様な図を添付、雑音が信号を凌駕している。右上は世界初の義眼 γ 線の直接撮像 (南天観測のため右上は測定外領域)

宙拡散 γ 線の数十倍混入し (図 5), Crab 等数個の点源天体以外に直接観測は困難で, モデルを仮定した推定しか結果は無く, 明確な GC 拡散 γ 線検出は世界初である. 巨大衛星が 10 年の観測でも見えないものを 1 日で捉え, 完全可視化の重要性を明確に示した. まだ PSF は 20~30 度 (50% γ 線が入る半径) と悪い. しかし光学原理に基づき感度予測が可能で, 予定通りの感度で Crab や宇宙拡散 γ や大気 γ 線も測定できた. 今まで CC の宇宙観測は予定感度の数分の 1 しか観測では実現していない. 光学原理を満たし計算の十分な根拠の重要性を示した. 一方 GC γ 線検出は予想外であり, 今までの認識より強力な放射は確実である. 全天で最も明るい Crab を大きく凌駕する可能性が高い. MeV γ 線天体は一般に暗く GC 付近では Crab より 1桁弱い 4 天体のみ観測されている. この GC 放射が天体なら未知の多数の MeV 天体があることになり, 当然 X 線等の他波長放射があるはずだが, 対応する天体は見当たらない. MeV γ 線のみ放射が強い天体は知られていない. 宇宙線の寄与も電子のみで小さいと予想される.

天体以外で探すと, 理論的には軽い DM か原始ブラックホール(PBH)のホーキング放射(HR)が GC の MeV 拡散ガンマ線放射の候補となれる. まだ解析途中で何も言えないが, 特に PBH は高エネルギー一屋としては興味を引く. 最近は重力波放射天体の候補として実在性がにわかに出てきた. 特に MeV 放射 PBH は 10^{16-17} g であり最も軽く DM 候補にもなる. PBH+HR はエントロピー情報問題からホログラフィック理論, AdS/CFT 対応等の量子重力と超弦理論を牽引した Planck スケールを探る高エネルギー物理である. 実は MeV γ 線天文学を始めた動機として HR 検出が秘めた夢があった. 今実験データと多少でも関係あるかと思うと以前理解不能だった理論が身近に感じられる.

次期気球実験 SMILE3 も科研費で可能であり, 若い世代が迅速に答えを出してくれるだろう.

5 今後の展望

私自身は今後何をやっていくか. 放射線産業, 原子力産業には医療以外に画像技術は殆ど導入されていない. 原子力や医療などは法令に基づく定量的評価が必須であり, γ 線完全可視化は定量性を担保できる. イメージングを導入し AI と連動させることで例えば原子炉内の微弱な異常検出など新しいモニタリングの確立を夢見ている. 現在は, 廃炉事業プロジェクトで汚染物質拡散予想システムを開発, 医療では中性子捕獲療法のホウ素薬剤体内可視化と α 線核種を用いた RI 内用療法可視化を行い, イメージングの活用を目指している.

今はこのようなプロジェクトを起こし, その研究費で自分を雇用している. 初めて本当の意味で独立したプロの研究者となった. これからが自分の真価が問われると思っている. 今後どんな研究ができるかな? と期待しているこの頃である.

最後に, 引用文献は著者の主なものに限っている. またこれら研究や成果は多くの方々との共同研究と支援によるものだが紙面の関係から記述をしていない, この場を借りて感謝を述べたい.

引用文献

- [1] T.Tanimori et al., IEEE Trans.Nucl.Sci. 36 497(1989)
- [2] Y. Takeuchi et al., NIM-A 328 526 (1993)
- [3] 谷森達 他 日本物理学会誌 55, No.6 420 (2000)
- [4] 谷森達 他 日本物理学会誌 76, No. 12, (2021)
- [5] D. Tomono et al., Sci.Rep. 7 41972 (2017)
- [6] 谷森達 他 JAEA-Review 2020-044 (2020)
- [7] H. Muraishi et al., A&A. 354 L57 (2000)
- [8] T. Tanimori et al., Sci.Rep. 7 41511 (2017)
- [9] D. Bernard et al., arXiv:2206.08676 [astro-ph.IM]
- [10] T. Tanimori et al., Ap.J. 810 1, 28 (2015)
- [11] A. Takada et al., AJ. 930 1, 6 (2022)