

# 稀なペンギンを追いかけて

退職教員探検記

KEK 研究協力部 国際企画課 / 元 大阪大学 理学研究科

山中 卓

taku@post.kek.jp

2023年9月23日

## 1 学生時代

飛行機のパイロットか設計技師になろうと思っていた私が物理の道に方向転換したきっかけは、高校での二つの出会いである。一つは、物理の矢野淳滋先生の授業。毎回実験を行い、その結果をもとに法則を導き出し、物理の体系を構築していった。これが実に面白かった。もう一つは、「物理の散歩道」という本。一見複雑に見える身近な現象を単純な物理のモデルで解き明かす、その美しさに魅了された。刺激されて自分でも、コインがテーブルの上でくるくる回る現象や、つる巻きバネのバネ定数が何で決まるのか、実験をして調べた。

しかし大学に入り、進学振り分けで物理学科には進学できたが、勉強が難しくなり、落ちこぼれかけた。3年生の学生実験も高校の頃ほど面白くはなかった。

そうした私を支えたのは、ワンダーフォーゲル部だった。さまざまな学部の仲間と、夏は道のない山を登り、薪を集めて火を起し、3月にはスキーを履いて雪山を縦走した。自然の美しさと厳しさ、様々な事態への備えや対処、チームの率い方など、教室で学べないことを多く山で学び、どこでも生きていける自信がついた。

4年の専門分野は迷わず素粒子の実験を選んだ。助手の千葉順成さんに、うちに来ればLSI-11というミニコンピュータを使わせてあげると言われて藤井釜江研に入ると、まずデータ収集システムで必要となる割り込み処理を教えられた。大学院も、藤井釜江研と小柴研の間で迷っていたら、千葉さんがうちに来なよと言うので、藤井釜江研を志望した。ただし、筆記試験の結果はかなり際どかったようである。その後の面接試験で体力はあるかと聞かれたので、ワングルだから自信はありますと答え、笑われた。大学院の同期は峠暢一君と谷森達君。よほどうるさかったのか、三羽鳥と呼ばれていたらしい。

しかし当時、正直なところ実験は辛かった。4年生のとき、NaIの結晶をKEKに持ち込んで $e, \pi, p$ などを当てる実験をしたが、作った「万能」のデータ収集プログ

ラムが役に立たず、貴重なビームタイム中に大幅に書き換えることになり、そのプレッシャーに押しつぶされそうになった。M2の時に東大原子核研究所で実験した時も、失敗してはいけないというプレッシャーで胃が痛くなった。しかし、そうした実験への向き合い方を変えてくれたのは、千葉さんだった。一年上の影山達也さんの修論実験に参加したとき、千葉さんが持ってきたパズルを解いたり、event displayを教えてもらって作ったりして、実験は気楽に楽しめばいいんだということ学んだ。

修士では、 $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ 崩壊で重いニュートリノを探索する実験に参加した。 $K^+$ の静止標的を覆うNaIの検出器の設計、業者との交渉、組み立てまで一学生の身分ですべて任せられ、驚いた。

D論のテーマで悩んでいたとき、山崎中井研の助手の早野龍五さんが、 $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ 崩壊の $\mu^+$ のヘリシティを測って右巻き弱カレントを探そうと私を誘いに来た。それならわかると、即そのテーマに決めた。この実験は学生が主体で、学生たちが話し合い、手分けして準備を進め、走らせていた。と少なくともわれわれは思っていたが、お釈迦さまの手の上の孫悟空みたいなもので、そのような育て方だったのだろう。実験が始まる頃には、時間のプレッシャーの下、問題の原因を早く突き止め、ふっと思考を自由にして解決策を思いつき、少々不恰好でもいいから、早く対処するというスリル感が楽しくてしかたなくなっていた。ようやく、勉強ができなくても自分の活躍していける居場所を見出した。

D3の頃には天狗になっていて、KEKで学ぶものはすべて学んだので海外に飛び出したいと思った。若いうちは教育はせず研究に専念したかった。日米協力の委員会から来日した米国の研究所の所長たちを釜江常好先生と日光の山に連れていく機会があり、恐れ多くも所長さんたちに相談したら、若いうちは小さな実験をすることを勧められた。KEKでも何人かに相談し、藤井忠男先生に推薦状を頼み、FermilabのポスドクになってE731実験をやることにした。日本とのつながりも将来の保証も

まったくなく、大きな賭けだった。D 論公聴会の 2 週間後の 1985 年 1 月末に、単身、アメリカに飛び立った。

## 2 Fermilab 時代

アメリカでの生活はめちゃくちゃ面白かった。何もわからない真っ白な霧の中で、何か行動するたびに少しずつ霧が晴れて、世界がだんだんと広がっていった。海外での生活がこんなに面白いと、どうして誰も教えてくれなかったんだろうと思った。

E731 実験は、直接的 CP 対称性の破れの存在を調べる実験である。 $K_L \rightarrow \pi\pi$  などの CP 対称性の破れは、 $K^0 - \bar{K}^0$  間の混合に複素位相が入ることによって起きる。複素位相を持ち込む理論としては、 $\Delta S = 2$  の未知の力が持ち込むとする superweak model と、クォークが 3 世代あると自然に位相が入るとする小林益川理論があった。 $\Delta S = 1$  の崩壊における CP の破れ (直接的 CP の破れ) は小林益川理論ならペンギンダイアグラムによって起きるが、 $\Delta S = 2$  にしか関与しない superweak model では起きない。4 つの崩壊の分岐比から  $Re(\epsilon'/\epsilon) = \left( \frac{BR(K_L \rightarrow \pi^+\pi^-)/BR(K_S \rightarrow \pi^+\pi^-)}{BR(K_L \rightarrow \pi^0\pi^0)/BR(K_S \rightarrow \pi^0\pi^0)} - 1 \right) / 6$  を求め、これが 0 から有意にずれていれば、直接的 CP の破れの証明となる。標準理論では gluon と  $Z^0$  のペンギンダイアグラムが相殺し、 $Re(\epsilon'/\epsilon)$  の予測は  $O(10^{-3})$  と小さかった。そのため、E731 実験はありとあらゆる系統誤差に注意を払う、精密測定実験だった。私の D 論の実験なぞ、E731 実験に比べれば子供の遊びだった。

しかし KEK で鍛えた実験の知識と技術と、問題を解決する力はそのまま通用した。まず Fermilab 担当の測定器、トリガー回路、西川公一郎さんから引き継いだ DAQ と、徐々に担当を広げていった。思いついたことは何でもやった。トリガーも、NIM のモジュールとケーブルの山で組むのをやめ、CAMAC のメモリーモジュールを使って、端末から自由に設定できるようにした。

初め、 $K_{L,S} \rightarrow \pi^0\pi^0$  崩壊は崩壊で出る 4 つの  $\gamma$  のうち一つが薄い鉛板で  $e^+e^-$  に変換したものをトリガーで集めていたため、統計量を稼げなかった。ある日、実験責任者の Bruce Winstein が、 $\gamma$  を  $e^+e^-$  に変換せず、4 つの  $\gamma$  のままデータを取ることを提案した。これを実現するには、新たなトリガーの手法と、より大量にデータを取れる DAQ が必要である。トリガーについては、Princeton 大の Gollin 氏と電話で議論しているときにふと、格子状のカロリメータのヒットパターンに対し、各格子点の周りの  $2 \times 2$  のパターンに従って与えた値を足し上げるだけで簡単にクラスターを計算できる方法を思いついた。このアイデアはそのまま、シカゴ大の回路室で実現された。DAQ は、Computing Department に相談し、一人で CAMAC から FASTBUS に切り替えた。FASTBUS のコントローラーのマイクロコードを書

き、事象ごとにはコンピュータに割り込みをかけないようにして、deadtime を 1/10 にした。早野さんに昔頼まれて、CAMAC の命令を実行できる PDP-11 のエミュレータのマイクロコードを書いた経験が役立った。

最終的に得た  $Re(\epsilon'/\epsilon)$  の結果は 0 と矛盾がなく、0 と  $3\sigma$  離れるという競争相手の CERN の NA31 実験の結果とは食い違った。実験の手法がまったく異なるため、ことあるごとに互いの系統誤差について攻めあったが、結果の違いを説明することはできず、どちらもより精度の高い新たな実験を建設することになった。

時は戻って 1986 年ごろ、BNL から  $K_L \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$  が 1 事象発見されたという話が流れてきた。標準理論では  $\gamma$  や  $Z^0$  のペンギンダイアグラムによって起きるが、その予測よりも 4 桁も大きな崩壊分岐比となる。E731 のデータをシカゴ大のポスドクの Yau Wah がすぐに解析し、この分岐比を否定した。そのとき、800 GeV という高いエネルギーの陽子を使って稀な  $K$  の崩壊実験を行うアイデアが浮上した。当時の稀な崩壊の実験は、BNL の 24-30 GeV の低エネルギーだが高い強度の陽子ビームを使うものが主流だった。しかし多体崩壊の場合、高エネルギーの陽子で生成した高いエネルギーの  $K$  を用いた方が、崩壊後の粒子がより前方にブーストされるのでアクセプタンスが大きい。また、 $\gamma$  を含む崩壊の場合、 $\gamma$  のエネルギーが高い方がエネルギー分解能は高いし、余分な  $\gamma$  を veto するのも容易である。そこで  $K_L \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$  探索の実験を Fermilab にいっしょに提案しようと、Wah が誘ってくれた。2 $\pi$  崩壊に特化していた E731 用のモンテカルロのコードを基礎から書き換えてどんな崩壊でも扱えるようにし、導入されたばかりでユーザーの少ない Amdahl の大型計算機を我が物顔で使って多くのバックグラウンドのシミュレーションを行い、実験提案書を書いた。何回かの厳しい PAC とのやりとりを経て、E799-I 実験として承認を得た。E731 のビームラインと測定装置を変更し、 $K_L \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$  以外にも  $K_L$  の多くの稀崩壊について結果を出した。しかし、ビームの外に広がる粒子のレートが高く、狙ったほど感度は上がらなかった。よりクリーンなビームラインと、高いレートに耐える測定器群が必要だった。

そこで二つの実験の要求を合わせ、新しいビームラインと測定器群を作り、KTeV 実験 ( $\epsilon'/\epsilon$  用の E832 と稀崩壊の E799-II) を行うことになった。

この頃、阪大から助教授の公募が出た。それまでやりたい放題研究に打ち込んできていたので、それを切り上げて教育や雑用も始めることには迷いもあった。しかし阪大に行けば優秀な学生がいるので一人でできないことができるし、日米科学協力事業の予算などを自分で取って KTeV 実験に貢献できると思いなおして応募した。幸い採用され、1992 年 3 月末、7 年間いたアメリカを離

れ、4人に増えた家族で大阪に移った。

阪大では KTeV E799-II 実験の責任者として、日米科学協力事業と科研費の予算を獲得し、データ収集システムの設計と開発、新たな CsI 結晶を用いる電磁カロリメータ用の PMT の開発と試験も担当した。実験の立ち上げ時に実験責任者が現場にいないでは話にならないと、長島先生に無理をお願いし、1995年からは1年半家族を引き連れ Fermilab に常駐して、実験を立ち上げた。

KTeV E832 実験では 1999 年に  $Re(\epsilon'/\epsilon)$  が 0 から 7 $\sigma$  離れていることを発表した。これにより Superweak model を排除し、小林益川理論を支持した。CP の破れが B 中間子でも発見される前のことである。

KTeV E799-II 実験では  $K_L \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$ ,  $K_L \rightarrow \pi^0 \mu^+ \mu^-$ ,  $K_L \rightarrow 4e$ ,  $K_L \rightarrow ee\mu\mu$ , など多くの稀な崩壊について崩壊分岐比の上限値を下げたり精度を上げたりし、PDG の  $K_L$  のページの大部分を書き換えた。千代勝実君は、 $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- e^+ e^-$  崩壊の  $\pi\pi - ee$  の崩壊面の間の角度分布から初めて CP 対称性の破れを示した。

### 3 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$

$K_L \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$  にはペンギンダイアグラム以外に、長距離力による  $K_L \rightarrow \pi^0 \gamma^* \gamma^* \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$  などの寄与もあり、それらの効果を引かねばならない。それに対し  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊の場合関与するのは  $Z^0$  のペンギンダイアグラムだけである。そのため、標準理論の予測の誤差も小さく、予測される崩壊分岐比も  $3 \times 10^{-11}$  と小さいため、新物理の寄与によるズレが見えやすい。しかし現象としては、何も無いところから  $\gamma$  が 2 個現れるだけなので実験は非常に難しい。1988 年の Snowmass Workshop で BNL の Laurie Littenberg からこの崩壊について初めて聞いたときは、さすがに無理だろうと思った。しかし、次第にそのシンプルさと難しさに惹かれていった。初めは Littenberg が過去の論文の図から読み取って出した  $BR < 7.6 \times 10^{-3}$  という上限値しかなかったが、その後われわれの E731, E799-I 実験が上限値を下げた。KTeV 実験を始めてしばらくして中家剛君が、 $\gamma$  が 2 個だけ電磁カロリメータに入る事象を集める 1 日だけの特別ランを提案した。このデータにより、 $BR < 1.6 \times 10^{-6}$  まで上限値を下げた。その後、花垣和則君が  $\pi^0$  の Dalitz 崩壊 ( $\pi^0 \rightarrow e^+ e^- \gamma$ ) を用いて  $\pi^0$  を同定する方法で  $BR < 5.9 \times 10^{-7}$  まで上限値を下げた。

KTeV の後は、120 GeV の Main Injector の大強度陽子ビームを用いて  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  を探索する KAMI 実験に参加する予定であった。しかし 2001 年に教授になり、さあこれから日米協力で KAMI 実験をやっていくぞと思っていた矢先、KAMI 実験は 1 回目の PAC であっさり却下されてしまった。ショックだったが気を取り直して Wah とともに KEK の稲垣隆雄さんに頼み、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$

に特化した KEK E391a 実験に入れてもらった。E391a 実験では坂下健君が標準の解析コードを作り上げ、1 回目のランのデータで  $BR < 2.1 \times 10^{-7}$  を得た。E391a 実験は最終的に  $BR < 2.6 \times 10^{-8}$  まで上限値を下げた。

そのうち、J-PARC が建設されることになり、山鹿光裕君のシミュレーションをもとに  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  を探索する KOTO 実験を提案した。測定器の大部分は E391a のものを流用したが、電磁カロリメータは 7 cm 角のものから、KTeV の 2.5 cm 角と 5 cm 角のものに変えたかった。KTeV の CsI が欲しいと、事あるたびに Fermilab の首脳部に伝えていたら、ある日急に使っていないよと言われた。おねだりはしておくものである。佐藤和史君らが毎月 Fermilab に飛んで CsI の結晶を真空パックし、大阪に空輸し、李栄篤君らが中心になってすべての結晶を検査し、J-PARC で 2716 本の結晶を直径 2 m のシリンダーの中に積み上げた。

CsI の結晶が積み上がった 1ヶ月後、東日本大震災に襲われた。ハドロンホールに入れるようになってすぐ、李君と損害を調べに行った。結晶が全体に数ミリ、シリンダーからはみ出していたが、幸い結晶に損傷はなかった。その後 PMT を取り付け、電磁カロリメータだけを真空に引いたところ、光量が半減した。外川学君が原因を究明した結果、ケーブルから可塑剤が蒸発して CsI 結晶と PMT の間のシリコンの板に吸着し、CsI からの紫外光を吸収していたことがわかった。最終的には、可塑剤の入っていないケーブルに取り替えた。

稀崩壊の実験の難しさと面白さは、背景事象も様々な稀な反応を考えないといけないことである。実験時間に相当するすべての反応をシミュレーションすることは不可能なので、背景事象となりそうな反応を考え、それに絞ってシミュレーションをし、対策をとる。それでも人智を超えた背景事象が現れるので、一步一步それらを理解し、対処していかねばならない。

すべての測定器を組み上げた後、2013年に初めての物理ランが始まった。しかし 100 時間後に、ハドロンホールでの事故のためビームは止まってしまった。ただこれだけのデータでも、約 6ヶ月データを収集した E391a 実験と同等の感度を得、新たな背景事象を見つけた。ビームの外に広がったわずかな中性子が電磁カロリメータに当たってクラスターを作り、そこで発生した別の中性子が 2 個目のクラスターを作る事象である。常磐線の電車の中で南條創君と話し合い、CsI 結晶の上流面に物質量の小さい光検出器を取り付け、下流面の PMT との信号の時間差から結晶内での反応点の奥行きを測り、その分布の違いから  $\gamma$  と中性子を識別することにした。小寺克茂君らが周到に準備し、2018年に約 4000 個の MPPC を現場で取り付け、この背景事象を排除した。

2015年に収集したデータで感度を 1 桁上げ、 $BR <$

$3.0 \times 10^{-9}$  を達成した。外川君らが中心となって崩壊領域を囲む円筒形の  $\gamma$  線検出器を増強した後、2016-2018 年にデータを収集した。篠原智史君と塩見公志君を中心に解析を進め、最新結果を 2019 年 9 月の KAON2019 という国際会議で発表することにした。予測される背景事象は十分少ないし、信号領域の外側にも事象はなかったのだが、信号領域を開いてみると、なんと 4 事象（その後 3 事象に修正）も見つかってしまった。さすがに標準理論の予測より 2 桁多い事象を、すぐに新物理と断言する自信はなかった。信号領域を開いてしまった以上、blind analysis の掟として発表せねばならないが、科学者として確証のないことは発表できない。コラボレーション内で散々議論した末、国際会議では篠原君が「箱を開けたらこうだったが原因はわからないのこれから調べる。まだ分岐比などの物理結果は発表しない」と、ありのままを正直に発表した。発表後のコーヒブレイクで、blind analysis を推奨していた Littenberg が私に聞いてきた。「Taku, しばらく隠しておけなかったの?」

この後、結果を発表をしていないのに勝手に崩壊分岐比を計算して KOTO anomaly と騒ぐ理論の論文がいっぱい出た<sup>1</sup>。それらはもう無視して淡々と原因を探るうち、中性ビームに  $K^+$  が混じっていて、それが  $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$  崩壊して、 $e^+$  が上流に飛んで見失われると背景事象になるのではと、野村正君が指摘し、清水信宏君がすぐにデータでその可能性を実証した。 $K_L$  とコリメータの反応により  $O(10^{-5})$  の割合で  $K^\pm$  がビーム中に混じっていることが判明し、2021 年にそのことも踏まえて論文発表した<sup>2</sup>。今はビーム中に薄いシンチレータを入れて  $K^\pm$  を検出し、この背景事象を排除している。

KOTO 実験の研究を現場で中心となって推し進めたのは、スタッフと大学院生たちである。私は実験責任者の仕事もあったが、できるだけみんなといっしょに作業させてもらったり、学生さんに頼みにくい仕事をやっていた。たとえば、震災の直後には、CsI の結晶が飛び出さないようにカロリメータの前面を押さえる高い強度の布のカバーを設計し、秘書の人からミシンを借りて強い縫い方も開発した<sup>3</sup>。その後、アルミのハニカムを CFRP で挟んだ板のカバーも設計して取り替えた<sup>4</sup>。新たに挿入した円筒形の  $\gamma$  検出器を支える構造はシカゴ大のエンジニアと議論しながら自分で手計算して決め、組み立てに必要な測量システムも設計して作った<sup>5</sup>。ミーティングでもふっと頭を軽くして本気か冗談かわからないアイデアを出し、そのいくつかは採用された。このようにして、せっかくの小さな実験を楽しんだ。

## 4 まとめ

振り返ると、学位を取ってから 38 年、目の前の面白さにとらわれ、グルーオン ( $e'/e$ )、電弱 ( $K_L \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$ )、 $Z^0(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu})$  のペンギンダイアグラムを追いかけてきた。小林益川理論の正しさの実証に貢献し、多数の  $K_L$  の稀崩壊に対して感度を上げた。 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊については、図 1 に示すように、一連の実験で崩壊分岐比の上限値を 6 桁下げた。崩壊観測という登頂はできなかったが、ベースキャンプを作るところまでは来たかと思う。ビームパワーの上がるこれからが本番である。2021 年から KOTO の実験責任者は野村君に替わり、次世代の KOTO II 実験は南條君が率いている。

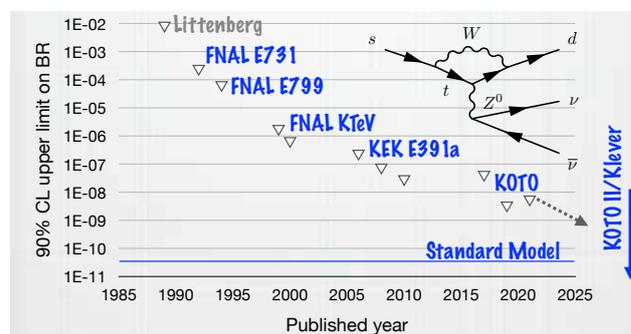


図 1:  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  の崩壊分岐比の上限値の推移

直接指導した学生は博士号までが 12 名、修士号までが 38 名。教授として間接的に指導した学生も含めるとそれぞれ 16 名と 71 名。卒業生は素粒子や加速器の研究者からメーカーやソフトの企業、金融、役所など、様々な分野で活躍している。私の代わりに (?) パイロットになった人もいる。素粒子実験は潰しが効くとは言っていたが、本当だった。定年を記念して多数の卒業生やスタッフたちが集まってくれ、その時になって大学の教員になってよかったとつくづく思った。

定年後は研究の最前線からは退くことにした。散々好き放題やってきたし、研究費や人手、組織の面でも若い人たちのじゃまにはなりたくなかった。そこで、2023 年 4 月からは KEK の国際企画課に移り、サマチャレ等のスクールの支援を通して人材育成を行う、加速器科学国際育成事業 (IINAS-NX) の仕事をしている。事務組織はアメリカ以上にまったく異なる文化や仕組みで、初めは足の置き場もわからなかったが、ようやく霧も晴れてきて、いろいろ改良したくなってきた。多くの若い人たちに物理や素粒子や原子核や加速器の魅力を知ってもらい、人生の方向転換のきっかけを作りたい。

今まで、変わったことをしたがる私をサポートしたり見守ってくださった皆様に、深くお礼を申し上げます。また、両親、妻、子どもたちにも深く感謝します。あ、そうそう、科研費 L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X は続けますのでご安心を。

<sup>1</sup>K 専門の理論家は騒ぎには乗らず、我々の結果が出るのを待った。

<sup>2</sup>J.K. Ahn *et al.*, Phys. Rev. Lett. **126**, 121801 (2021).

<sup>3</sup>山中, 日本物理学会 2011 年秋季大会 19pSE-2.

<sup>4</sup>山中, 日本物理学会第 67 回年次大会 24pFB-9.

<sup>5</sup>村山, 外川, 山中, Lim, 高エネルギーニューズ **35**, 176 (2016).