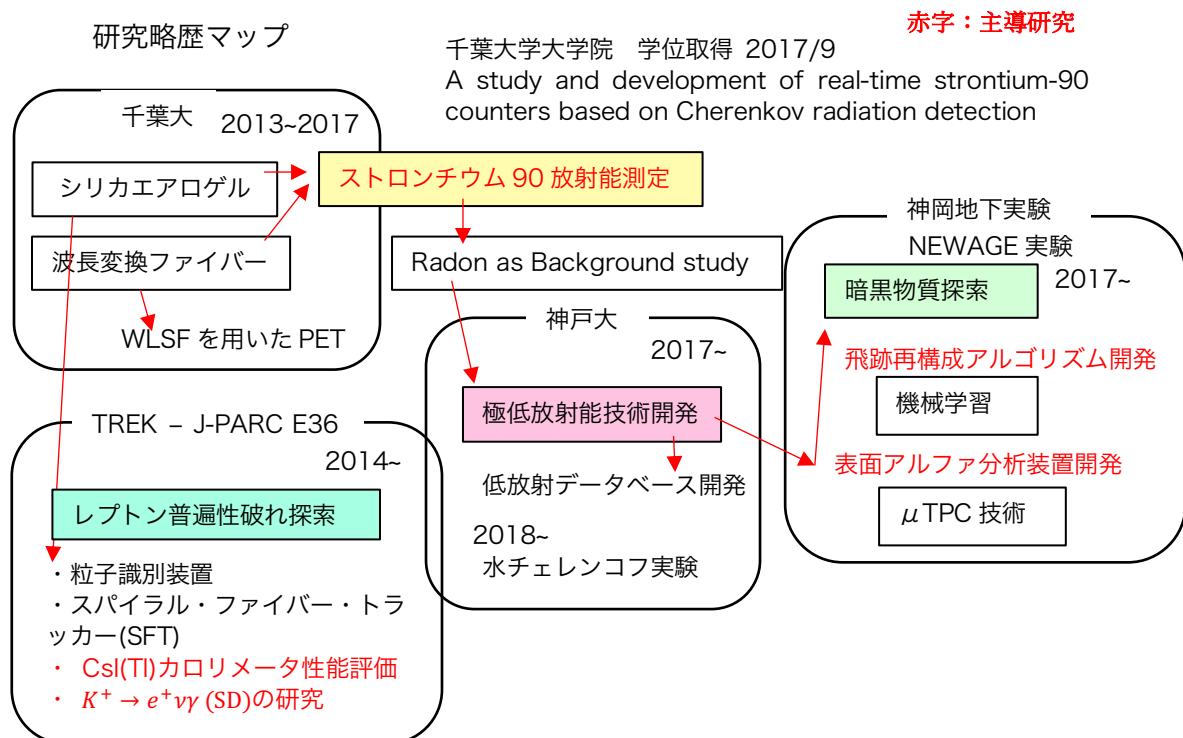


公募番号
第1希望 :素核研 18-8
第2希望 :

研究歴

記入年月日(西暦) 2018年10月31日



(1) 即時ストロンチウム 90 放射能濃度測定器開発

海産物などの試料に含まれるストロンチウム 90(^{90}Sr)の放射能濃度を短時間で測定する装置を開発した(図 1)。これはシリカエアロゲル(屈折率 1.04)と波長変換ファイバー(WLSF)を用いたチェレンコフ検出器(AC)に基づいて、カリウム 40(^{40}K)からの β 線(最大 1.3 MeV)でチェレンコフ放射せず、 ^{90}Sr の娘核であるイットリウム 90(^{90}Y)からの β 線(最大 2.28 MeV)がチェレンコフ放射する仕様に設計された。ここで、サンプル内の ^{90}Sr と ^{90}Y は放射平衡状態であるとする。この AC を覆うようにシンチレーション検出器を実装することで、宇宙線ミュオンによるバックグラウンド(BG)を抑制する。

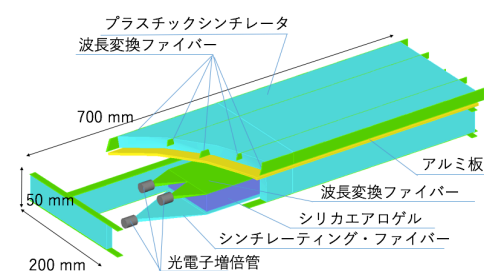


図 1. ストロンチウム 90 カウンターの概観

シリカエアロゲルから発光するチェレンコフ光のスペクトラム、WLSF の吸収・再発光スペクトラム、PMT 量子効率を内包した光学模型を開発し(図 2(a))、宇宙線試験データと比較して装置仕様に最適化した(図 2(b))。

さらに環境中からの BG も調査した。上面以外を鉛遮蔽し BGO 検出器を用いて、室内と研究棟屋上における γ 線スペクトラムを比較した(図 2(c))。ここで、ミュオン事象はデータから排除されている。結果として、室内天井のコンクリート壁などに含まれる ^{208}Tl , ^{214}Bi からの γ 線(2.26, 2.60 MeV)を観測した。この γ 線は本装置にとって BG になるため、外装を鉛と真鍮で覆った。また空気中の ^{222}Rn 由来の ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi がサンプルに付着することで、特に ^{214}Bi からの β 線が致命的な BG になることも発覚した。そこでサンプルは密閉して管理する。

線源を用いた性能試験では放射能と計数頻度の関係に相当する応答関数模型を生成し検出限界を見積もった。図 2(d)に BG と 10Bq ^{90}Sr における count rate (hr^{-1}) 確率分布を示す。BG 3σ を閾値にした場合、10 Bq ^{90}Sr の検出効率は $91.6 \pm 0.3\%$ であると見積もった。この時、サンプル有効面積は $30\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ で許容するサンプル質量は 5g、1 時間測定である。このように ^{90}Sr 放射能における検出効率の関係を調べ、従来検査器と比較できるように 3σ 閾値における 50% 効率に相当する放射能を検出限界と定義し、結果として検出限界は 96 Bq/kg と見積られた。これは試作機として十分な性能を示す。学位取得後も試作機による土壌試料による試験、有効面積拡張など装置改良に向けた研究が継続されている。

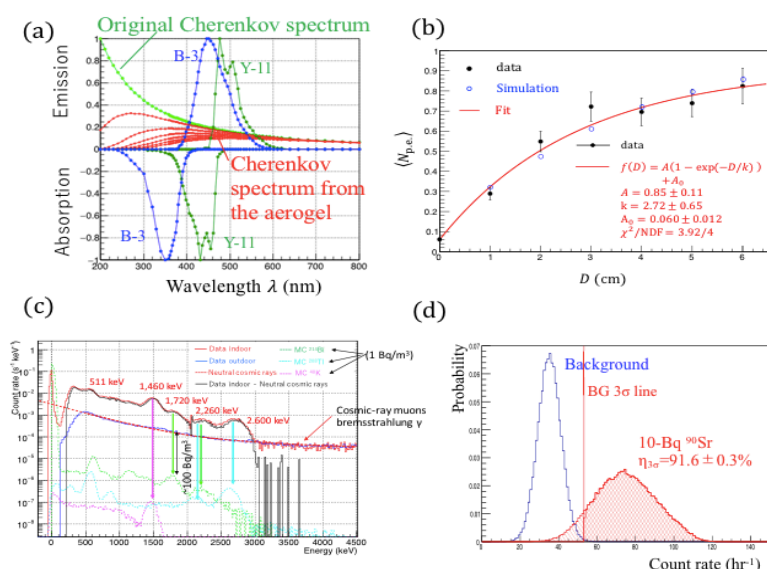


図 2. (a) 光学波形スペクトラム.(b)宇宙線測定データとシミュレーション.(c)BGO による γ 線スペクトロスコピー.(d)応答関数模型による BG と ^{90}Sr count rate 確率分布

(2) J-PARC E36 実験における背景事象 $K^+ \rightarrow e^+ \nu \gamma$ (SD)の研究および CsI(Tl)カロリメータの性能評価

J-PARC E36 実験は静止 K^+ を用いた2体崩壊 $K^+ \rightarrow e^+ \nu$ (K_{e2})と $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu$ ($K_{\mu2}$) 分岐比の比(R_K)を精密に測定することでレプトン普遍性の破れを探索することを目的にしている。 R_K 決定の重要課題は $K^+ \rightarrow e^+ \nu \gamma$ ($K_{e2\gamma}$)の取り扱いである。この崩壊過程は内部制動放射(IB)と構造依存崩壊(SD)に分類されるが、SDは上述の K_{l2} 由来ではないため R_K 決定からは取り除く必要がある。また、 $K_{e2\gamma}$ (SD)の崩壊分岐比は K_{e2} と同程度であるため、最も注意を要するBGになる。放出された γ 線は K^+ 静止装置を取り囲むCsI(Tl)カロリメータで検出される。しかし、カロリメータには荷電粒子が通過する穴が必要であり、 γ がこの穴から抜けた $K_{e2\gamma}$ (SD)事象は K_{e2} と原理的に区別することができず、 R_K の過大評価につながってしまう。

申請者は在学中、J-PARC E36 実験に参加し、検出器開発、キャリブレーション、ビーム測定運転、物理解析を行った。その中でも特にCsI(Tl)カロリメータ(以下CsIと略す)の波形データ解析と $K_{e2\gamma}$ (SD)崩壊事象の研究に注力した。CsIはビーム由来の雑音を除去するために、flash ADCによる波形データ取得が採用された。実験データを再現する波形モデルを開発し、[図3\(a\)](#)に示すようなパイラルアップ補正を成功させた。具体的には、[図3\(b\)](#)に黒線をデータと単一波形フィット関数の差分 dh として示すが、 dh 最大値の時刻に2nd波形があるとしてpileup fittingを施行する。その後、 $K_{\mu2}$ 事象を用いてCsIのエネルギーと時間の較正を行った。エネルギー分解能は2.6% (σ)、時間分解能は9 ns (σ)と評価した。モンテカルロ(MC)・シミュレーションコードを整備し、 $K \rightarrow \pi^+ \pi^0$ 事象についてデータと比較して検出器応答を適正化した。[図4](#)に、(a) e^+ と γ の角度分布、(b) E_γ 分布、(c) K^+ から e^+ と γ の損失質量分布 $M_{e\gamma}^2$ を示す。現時点では解析の途中である

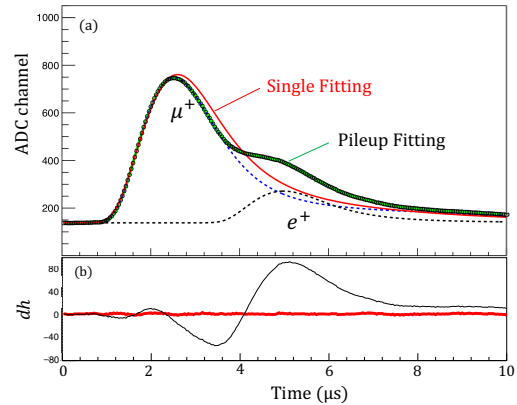


図 3. CsI(Tl)カロリメータにおけるpileup 波形データとフィット結果

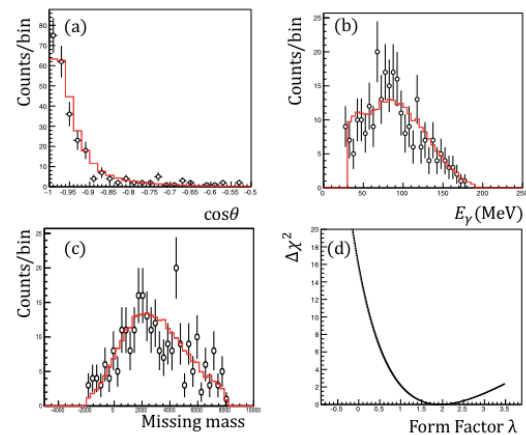


図 4. (a) e^+ と γ の角度分布. (b) γ エネルギー分布. (c) K^+ から e^+ と γ の損失質量分布. (d)形状因子パラメータ λ - $\Delta\chi^2$ 曲線。

が、 262 ± 16 事象の $K_{e2\gamma}$ (SD) を観測した。形状因子パラメータ λ を変えてデータと MC を比較し、最もデータを再現する暫定値は図 4(d) $\lambda - \Delta\chi^2$ 曲線から $\lambda = 1.95^{+0.92}_{-0.68}$ が決定された。分岐比 $\Gamma(K_{e2\gamma})$ は K_{e2} , $K_{e2\gamma}$ それぞれの事象数とアクセプタンスを用いて暫定値 $\Gamma(K_{e2\gamma}) = (1.5 \pm 0.2) \times 10^{-5}$ が得られている。現在、系統的な不確定性を見積もりを進めている。 $K_{e2\gamma}$ の研究は R_K 補正のためにも重要だが、セミレプトニック輻射崩壊について、例えば $P^+ \rightarrow l^+ \nu \gamma$ ($P = K, D, B$) への普遍的なアプローチが可能となるため興味深い。

(3) 地下における宇宙素粒子実験高感度化のための極低放射能技術開発

表面アルファ分析装置

神岡地下で行われている暗黒物質・二重ベータ崩壊探索実験の支配的な BG が検出器や環境中の放射能である。先行している研究グループは放射能不純物が少なくかつ大質量の検出器を使用している。そのため神岡地下実験ではグループの枠を超えて極低放射能技術を開発してきた背景がある。

申請者は、現在の所属機関で、部材表面から放射される α 線を

$\sim 10^{-4}$ counts/h/cm² の精度で測定できる分析装置の開発を担当している。Time projection Chamber(μ -TPC)の技術を用いた装置の概要は図 5(a)に示す。試料からの α 線によって生成された電子群は電場 E でドリフトして μ -PIC で 3 次元飛跡情報を観測される。利点は BG とサンプル領域を同時に測定でき、サンプルの α 線発生分布画像が得られる。

α 線の dE/dx が静止する直前に大きい性質 (Bragg Peak) を利用し、flash ADC 波形解析によって飛跡方向を決定する。これによって、サンプル由来ではない BG を半分排除することができる。さらに μ -PIC の不純物を抑制した Low- α μ -PIC の実装によって、雑音頻度は従来の 10^{-1} a/h/cm² から 10 倍改善された。図 3 (b) は従来 μ -PIC の切れ端サンプルのセットアップ写真である。図 3 (c), (d) は改善された装置による BG 事象とサンプルの α 線分布である。黒破線はサンプル領域を示し、sample run では BG と比べて有意に信号が観測された。サンプルからの α 線は ~ 0.1 a/h/cm²

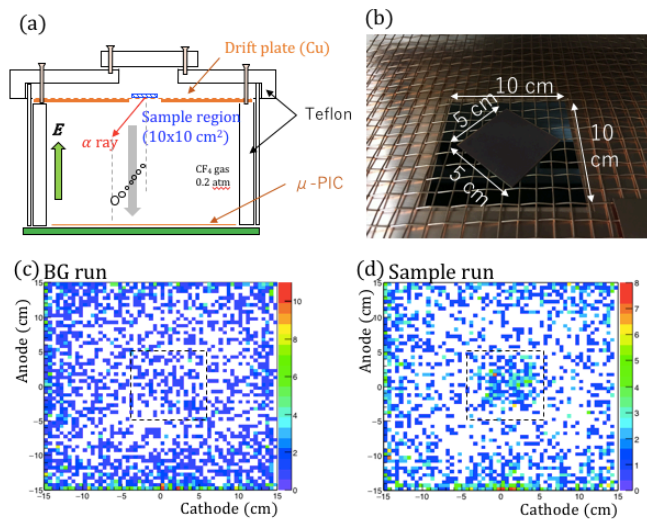


図 5. 表面 α 分析装置によるデモンストレーション

と評価され先行測定結果と矛盾しない。この時、 $T=60\text{hr}$, $S=5\text{cm}\times 5\text{cm}$, $R_{BG}=0.03\text{ a/h/cm}^2$ であった。主な BG は容器内の ^{222}Rn , ^{220}Rn である。今後、冷却活性炭にガスを通しラドンを吸着させることで R_{BG} を 1~2 桁抑制する。

(4) 暗黒物質直接探索研究(NEWAGE 実験)のための基礎研究

神岡地下で行われている暗黒物質直接探索実験 NEWAGE は $\mu\text{-TPC}$ を用いて 3 次元飛跡情報を取得することで、暗黒物質候補の一つである WIMP を観測した際に多くの性質を明らかにする野心的なグループである。WIMP は標的ガス(CF_4)の ^{19}F と相互作用し、原子核反跳によって得られた飛跡情報から再構成される。現在は WIMP-Proton 断面積が $150\text{ GeV}/c^2$ の mass で 557 pb (90%CL)の上限値が記録されている。

本研究では飛跡の方向決定精度が感度に大きく影響を与える。低エネルギー($\sim 50\text{keV}$)の事象は飛跡が短いため、電子ドリフトの影響で方向決定精度が制限され、角度分解能は 40 deg. と評価されている。図 4 に ^{19}F 原子核反跳エネルギー 50 keV に相当する TPC 応答シミュレーションを示す。黒点がシミュレーションによるオリジナルの飛跡点、カラーが XZ, YZ, XY 射影、そして 3 次元の拡散した電子分布を示す。赤線は従来の傾きを決定する際のフィット直線である。

低エネルギー・パターン解析では機械学習が有効であると考え、シミュレーションによる拡散の影響を考慮した解析アルゴリズムを新たに開発している。現在、Python Keras ベースの機械学習アルゴリズムを飛跡再構成に応用して、解析ツールを開発している。

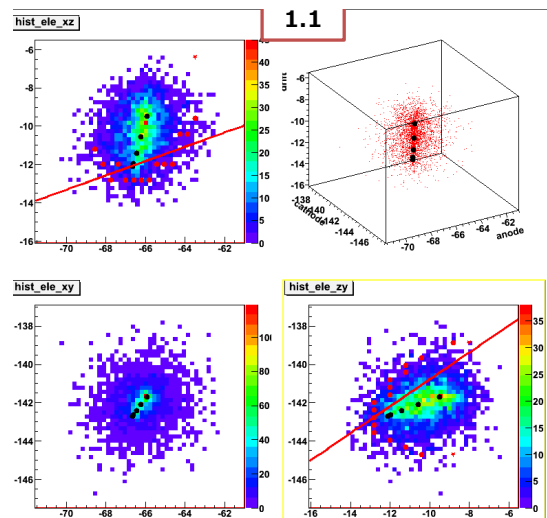


図 4. 50keV の ^{19}F 反跳飛跡における TPC 電子拡散のシミュレーション。

受賞歴

[1] Best Poster Award, International Conference on Advancements In Nuclear Instrumentation Measurement Methods and their Applications (ANIMMA) 2017, "Measuring Radioactivity of ^{90}Sr based on Cherenkov Radiation in Real Time", 30 June, 2017.

[2] 独立行政法人日本学生支援機構 特に優れた業績による返還免除 認定, 2015 年 6 月 30 日