

Title	光と旋律を奏でるガンマ線スペクトロメータの開発とサイエンスアゴラ2013での展示
Sub Title	Perceptible detectors of gamma-ray spectrometers with beautiful lights and tones : exhibition at SCIENCE AGORA 2013
Author	三井, 隆久(Mitsui, Takahisa) 寺沢, 和洋(Terasawa, Kazuhiro) 三角, 樹弘(Misumi, Tatsuhiko) 松浦, 壮(Matsuura, So)
Publisher	慶應義塾大学日吉紀要刊行委員会
Publication year	2014
Jtitle	慶應義塾大学日吉紀要. 自然科学 (The Hiyoshi review of natural science). No.56 (2014. 9) ,p.69- 79
JaLC DOI	
Abstract	Gamma-ray spectrometers enable one to detect insensible radiation quantitatively. People unfamiliar to science, however, find it difficult to read results through data of the detectors often. This situation results in their indifference to radiation, though it is of great importance these days. We developed perceptible detectors of gamma-ray spectrometers, in which data of radiation are represented by glittering lights, beautiful tones, Morse code and whack-a-mole games. We held exhibition of the detector in SCIENCE AGORA 2013, and supplied opportunities for nonprofessional people to understand existence of the environmental radiation.
Notes	教育
Genre	Departmental Bulletin Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AN10079809-20140930-0069

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

光と旋律を奏でるガンマ線スペクトロメータの開発と サイエンスアゴラ 2013 での展示

三井隆久・寺沢和洋・三角樹弘・松浦 壮

Perceptible Detectors of Gamma-Ray Spectrometers with Beautiful Lights and
Tones —Exhibition at SCIENCE AGORA 2013—

Takahisa MITSUI, Kazuhiro TERASAWA, Tatsuhiko MISUMI and So MATSUURA

Summary— Gamma-ray spectrometers enable one to detect insensible radiation quantitatively. People unfamiliar to science, however, find it difficult to read results through data of the detectors often. This situation results in their indifference to radiation, though it is of great importance these days. We developed perceptible detectors of gamma-ray spectrometers, in which data of radiation are represented by glittering lights, beautiful tones, Morse code and whack-a-mole games. We held exhibition of the detector in SCIENCE AGORA 2013, and supplied opportunities for nonprofessional people to understand existence of the environmental radiation.

1. はじめに

目に見えないものでも、計測器を用いれば定量的計測が可能である。ガンマ線スペクトロメータはその典型例であり、環境にある放射線の定量計測ができる。このような計測器の、研究者における有用性はいうまでもないが、一方で、一般の方々には数値やグラフで表示された計測結果は理解しがたい場合が多いようである。また、多くの大学教員が、他の研究者や学生に理解してもらえるような説明方法や教育的効果の高い実習機器（計測器）について真剣に検討しているが、一般の方々を対象とした場合についてはそうした経験が少ない。私たちは慶應義塾大学初年度の学生を対象とした放射線計測実習として必要な計測器について検討を行い、パソコン制御デジタルオシロスコープを用いたガンマ線スペクトロメータの開発を行った^{1,2)}。本計測器はすでに3年間実習用として使い、十分な性能を有し教育効果をあげている。

2011年に原子力発電所の事故があり、一般の方々の放射線や放射性物質に対する関心が高まっている。一方で、適切な理解がなされていない現状を鑑み、私たちにも何かできることが

慶應義塾大学日吉物理学教室（〒223-8521 神奈川県横浜市港北区日吉4-1-1）：Hiyoshi Department of Physics, Keio University, Yokohama, Kanagawa 223-8521, Japan. [Received April 4, 2014]

あるのではと検討していた。独立行政法人科学技術振興機構（JST）主催のサイエンスアゴラは自然科学を基盤とした一般向けの交流会であり、私たちの目的とも合うので応募したところ採択され、展示を行うこととした。本論文では、今回開発した一般向けガンマ線スペクトロメータとサイエンスアゴラ 2013 における展示について述べる。

2. 一般向けガンマ線スペクトロメータの開発

2-1. ガンマ線スペクトロメータの基本構造と検出信号

人体には放射線を検出する感覚器官はないが、放射線は高いエネルギーを持ち、物質と強く相互作用するので、電離、発光、感光、分子構造の損傷などの現象を利用したさまざまな計測方法が実用化されている³⁾。このなかで、放射線が物質中でエネルギーを落とした際に物質が発光する現象をシンチレーションといい、その物質をシンチレーターとよぶ。

ガンマ線と物質との相互作用には、光電吸収、コンプトン散乱、電子対生成があり、シンチレーターの発光強度は入射したガンマ線が物質中で落としたエネルギーにほぼ比例する。光電吸収に限らず、ガンマ線がすべてのエネルギーをシンチレーター中で落とせば、発光強度（光子数）を調べることで元のガンマ線のエネルギーを測定でき、エネルギーから核種を推定することができる。ガンマ線のエネルギーを測定できる計測器をガンマ線スペクトロメータとよぶ。

シンチレーションを用いたガンマ線スペクトロメータは、放射線により発光するシンチレーター、微弱発光を電気信号に変換する光電子増倍管、発光の検出と発光強度を求めるための信号処理装置、発光強度の統計処理装置からなる。私たちは、光電子増倍管からの電気信号をコンピュータに取り込むために USB オシロスコープを用い、信号処理と統計処理をパソコンで行う安価で扱いやすい機材の開発を行った¹⁾。本装置はパソコン画面に、発光強度の頻度分布だけでなく時間の関数で表した発光パルス波形が表示され、シンチレーターを用いた放射線検出の原理を学ぶことができ、教育においてきわめて高い効果をあげている。測定精度は高価な市販品と同等なので、研究用途にも用いることができる。

サイエンスアゴラ 2013 では、一般の方を対象とした展示・実演を行う。このため最近しばしば話題にあがる線量当量 (Sv) に関連した情報である吸収線量 (Gy) を表示できるようにした。ここでの吸収線量はシンチレーターが放射線から受けたエネルギーであり、エネルギースペクトルにエネルギーを掛けて積分し、シンチレーターの質量で割ることで求めた。この方法で求める吸収線量は、シンチレーターの吸収線量であり、パルス取得の閾値に強く依存するため、人体にそのまま適用できる値ではないが、増減変化の目安になる。

また今回の展示では、以下に述べるが低ナトリウム塩⁴⁾を放射線源として用いた。一般家庭用食品であり、わずかな量のガンマ線しか出さないため、エネルギースペクトルを見てもすぐにわかるほど大きな変化は見られない。そこで、カリウム 40 のガンマ線の光電ピークを一定時間 (5 秒) 積算し、グラフで示すこととした。これにより、放射線源を近づけた場合と離し

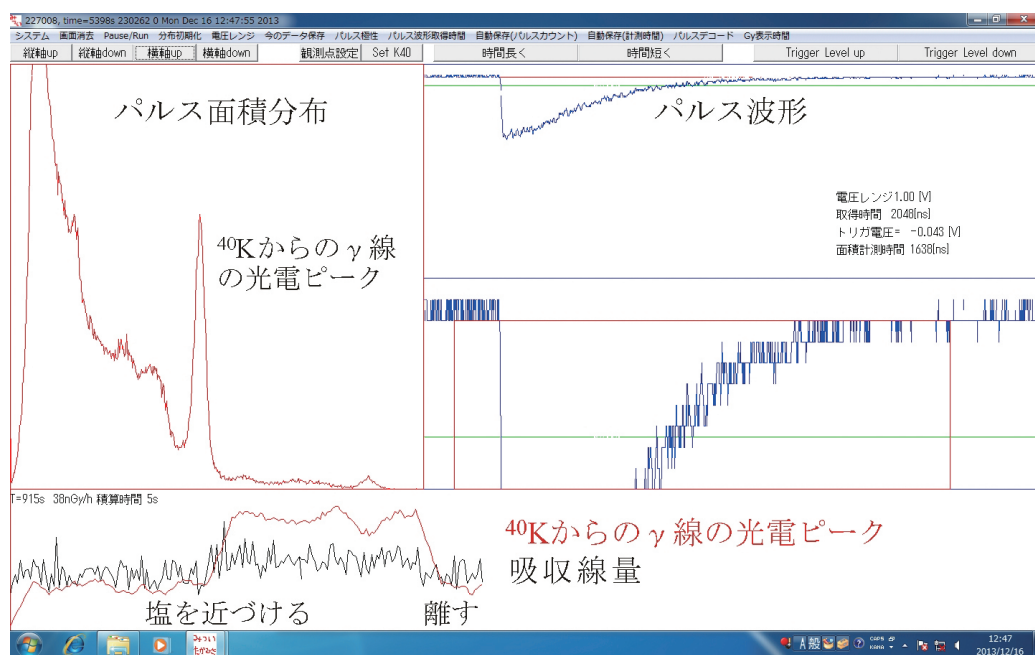


図1. ガンマ線スペクトロメータのパソコンの画面には、パルス波形(青)とトリガレベル(緑)、パルス面積分布(赤左上)、シンチレーターの吸収線量(黒下)、カリウム40からのガンマ線の光電ピークの大きさ(赤下)が表示される。低ナトリウム塩を近づけると、環境由来のカリウム40ガンマ線の3倍程度に増える。このような場合でも、環境放射線はカリウム以外の寄与が大半なので、吸収線量は低ナトリウム塩を近づけてもたいして増えない。この図で表示されている吸収線量は38 nGy/hであるが、これはシンチレーターの吸収線量であること、また発光パルス検出の閾値がガンマ線のエネルギーに換算して約140 keVであることによる。人体にそのまま適用できる値ではない。

た場合の比較ができるようになった。低ナトリウム塩を近づけると光電ピークの大きさが環境放射線の3～4倍に増加するのでインパクトがあり、展示の際は多くの方が低ナトリウム塩からの放射線に驚いていた。危険性を危惧する一般の方々も少しいたが、吸収線量の表示も同時に行い、線量全体としてはほとんど増えていないことの説明を行った(図1)。

パソコン画面を用いたさまざまな表示方法の工夫を行ったが、検討した結果、放射線をグラフや数字で表現するという方法は、一般の方々に、どのような放射線のどのような物理量がどのように表示されているのかを理解してもらうことは困難であるとの結論となり、放射線検出信号の表現方法について再検討を行い、以下に述べるように五感で感じられる方法も併用した。

2-2. 放射線源

放射線計測の展示・実演をするためには、放射線源が必要である。しかし、一般向け展示ではたとえ法的に問題がなくても放射性物質として認識されるものは不適切である。このようなわけで環境放射線を主として用いることとした。環境中には建築物中のコンクリートに含まれ

るカリウム 40 や宇宙線由来の μ 粒子がある。開発した装置では閾値を 140 keV に設定した場合、2 インチのシンチレーターで毎秒 50 パルス程度検出でき、放射線量としては十分である。しかし、増減など制御がしづらいため、別な放射線源があると便利である。当初は塩化カリウム試薬 500 g を天然のカリウム 40 放射線源として用いることとしたが、試薬びんに入った「試薬」は安全性のいかんにかかわらず盗難など管理に注意する必要があること、また一般の方々が警戒する可能性があるので取り止めとした。代わりに、低ナトリウム塩と呼ばれる食卓塩を用いた。低ナトリウム塩は、塩化ナトリウムのほかに塩化カリウムが 50% ほど含まれる塩で、180 g 入りを 10 パック (1.8 kg) 用いることとした。これにより、カリウム 40 ガンマ線の量は環境放射線の 3 ~ 4 倍に増え、展示の説明上は十分であった。

2-3. 一般向け放射線検出信号の表現方法

一般の方々に環境に放射線が存在することや放射線のエネルギーの大小を実感してもらうためには、五感に訴えるような方法が必要である。五感には、視覚、聴覚、触覚、味覚、嗅覚がある。このなかで、味覚と嗅覚は不特定多数の一般の方々を対象とした展示では不適切である。触覚は、携帯電話で用いている振動装置や「感電」などが考えられるが、今回は除外した。したがって、視覚と聴覚に訴えかける方法の探索を行った。

(1) 聴覚を用いた表現

一般の方々が、放射線検出器といえばガイガーカウンターであり、ガイガーカウンターといえば「ピッ、ピッ」と鳴る音である。したがって、音で検出信号を表すのは古くから行われていることである。しかし、単調な音であり、楽しくないため、今回はなるべく楽しい音にすることを目的にさまざまな音で表現してみた。Windows パソコンには Beep 関数があり、周波数 (Hz) と継続時間 (秒) を指定すると正弦波をサウンドポートに出力することができる。今回は、この関数を用いて検出信号をさまざまな周波数の音で表すこととした。

音で表現する放射線の検出信号は、放射線によるシンチレーションの直後に得られるパルス面積に比例する数値である。それ以外に、パルス波形なども考えられるが、今回は利用しなかった。使用したのは 2 インチの NaI (Tl) シンチレーターで、パルス検出閾値を 140 keV にしたとき、50 パルス/秒程度になる。これをすべて音に変換すると鳴りっぱなしになる。このため、適当な規則を定めて間引く必要がある。本装置では、高エネルギーパルスのみ音に変換することで、数パルス/秒になるようにした。音に変換する方法は多数考えられるので、メニューで選べるようにして複数実装した。以下、 S を検出されたパルス面積、 $k40p$ をあらかじめ設定したカリウム 40 からのガンマ線の光電ピークに対応したパルス面積とする。

- ・主として μ 粒子に対する音： $S/k40p > 1.3$ に対して、周波数 [Hz] = $1000S/k40p - 1300$ 、音の継続時間 0.4 秒。これは、平均で 1 秒に 1 回程度の発音であるが、低い音から高い音まであり、神秘的な旋律になる。
- ・カリウム 40 からのガンマ線のエネルギーが全吸収されたときの音：環境由来と低ナトリウム塩由来のカリウム 40 からのガンマ線の検出は、本展時の重要な課題である。そこで、

このガンマ線の光電効果が生じたとき 800 Hz の音を 0.05 秒発音することとした。発音時間が短いので正弦波特有の単音ではなく、「ポン」というような爪ではじくような特徴的な音になる。低ナトリウム塩を近づけると明らかにこの音の頻度が上がり、放射線を出していることを実感できる。

- ・音階を用いた発音： 発音周波数を西洋音楽で定められた音階（周波数）のみに限定すると、聞きやすい音楽的な音になる。

Windows パソコンの Beep は発音が終了するまで関数は終了せず、処理は戻らない。したがって、パルス信号処理をしているスレッドに Beep を入れると信号処理が滞るので、新たにスレッドを 1 つ立ち上げ、発音や後に述べるさまざまな表現のために用いた。

結果として「現代音楽のような神秘的な感じ」の発音でインパクトがありたいへんよかったが、ここでの発音は正弦波なのでたいへんよく響き、会場内だけでなく会場の外でも聞き取ることができた。他の展示からの苦情はなかったが、今後の検討が必要である。澄んだ音にするためには、そこそこ音質の高いスピーカーシステムを用いる必要があり、音質の悪い機材を用いると伝統的なガイガーカウンターと大差なくなる。

(2) 視覚を用いた表現

パソコン画面にパルス波形とパルス面積の頻度分布が表示されるので、専門家には十分な視覚的効果がある。しかし、パソコン画面は一般の方々にはインパクトがないと思われるので（実際にそうであった）別な方法を検討した。発光ダイオード（LED）は 7 色そろえることができ、放射線パルス信号に合わせて LED の点滅を行うこととした。注意点として、過去にテレビアニメ画面の点滅により気分を悪くした事例があるので、不必要に明るい LED を用いないこととした。

パソコンとの接続は FT245R を用いて USB 経由で 8 bit の並列データ出力で行った。したがって、LED は 8 個点滅させることができる。FT245R は 0 もしくは 5 V を用いてデジタル信号を出力するので、これを 5 k Ω を経て小信号用トランジスタ（2SC2120Y）のベースに接続、エミッタは接地とし、コレクタ、100 Ω 、LED を直列にして 5 V（USB 供給）に接続した。赤系統の LED は電圧降下が 2 V 程度なので 30 mA 程度、白や青系統は 3 V 程度の電圧降下なので 20 mA 程度の電流が流れることになる。発光強度は色によりかなり異なるはずであるが、それほど違和感はなかった。

それよりも重要なのは、直径 5 mm の砲丸型 LED は光放射に指向性があり、前方にしか放射しない。このため、LED 単体では発光が目立たずインパクトがない。この対策として、白濁した樹脂からなる LED 光拡散キャップを付けた。これにより、きれいに発光を見ることができた。

8 個の LED の発光のさせ方はいろいろ考えられるが、下から上に向けて、赤、橙、黄、緑、青、藍、紫、白とし、棒グラフのようにエネルギーに応じて上の LED まで光らせるようにした。さらに、カリウム 40 の光電効果の場合だけ、追加でいちばん上の白色 LED を光らせることとした。これはインパクトがあり、低ナトリウム塩を近づけると明らかに白色 LED の発行頻度

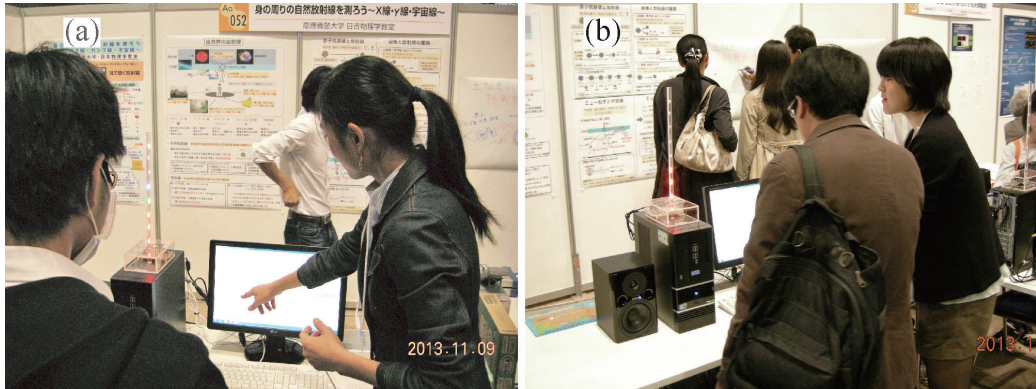


図2. LEDを用いて、検出された放射線を発光で表す方法は、パソコンの画面より一般の人たちに受け入れやすい。あまり明るく点滅させると気分を悪くする可能性があるため、20 mA程度で駆動できる素子を用いた。エネルギーの高い放射線の場合にはすべてのLEDが発光し(a)、エネルギーが低い場合には下のほうのLEDのみが発光する(b)。

が上がり、わかりやすかった。LEDの発光と先に説明した音とは完全に同期しており、音と光で賑やかな表現となった。WindowsのBeep関数は指定した時間音を出し終わるまで制御を返さないため、発光時間の制御は特に行わず、Beep前に光らせ、Beep関数が戻るとただちに消灯するようにした(図2)。

(3) モールス符号を用いた表現

音がピー、プー、ポーと鳴ると、モールス符号のように聞こえることから、モールス符号に変換し、文字で表すことも行った。モールス符号はトンとツーが定められたルールで並ぶ。放射線パルス列をこれに対応させるための定まった規則はないので、適当に定めた。まずはじめに、検出エネルギーの最低値を決め、パルス数の制限を行う。これはパルス波形検出閾値を140 keVにすると、50パルス/秒程度検出され、多すぎることによる。次に、パルスとパルスの間隔の平均時間を測定する。これは30パルス程度の観測で行う。平均間隔が定まったら、トンの長さの上限を平均間隔から適当に定める。これはパルス平均間隔の0.5～2倍程度の値を設定できるようにした。次に来るパルスまでの時間が、この値以下ならトン、2倍以下ならツー、3倍以下なら文字の区切り、それ以上は単語の区切りとした。さらに、モールス符号には欧文と和文があるため、切り替えられるようにした。

実際に行くと、意味のある単語や文にはならないが、欧文はそれほど違和感ないように見える。欧文では、出現頻度が高い文字ほどモールス符号が短くなるようにできているため、短いモールス符号ほど出やすい本方式とよく合っていることによる。意味のあるなしにかかわらず、宇宙線由来の μ 粒子の検出信号をもとに文字を出しているため、(乱数と大差ないが)パソコン画面に次々にタイプされていく文字には不思議な重みがある(図3a)。

なお、異星人が他の星の知的生命体にメッセージを送る場合、可能性が最も高いとされているのは電磁波通信であり、このなかでも水素原子などの吸収が少ない1～10 GHz帯は宇宙を

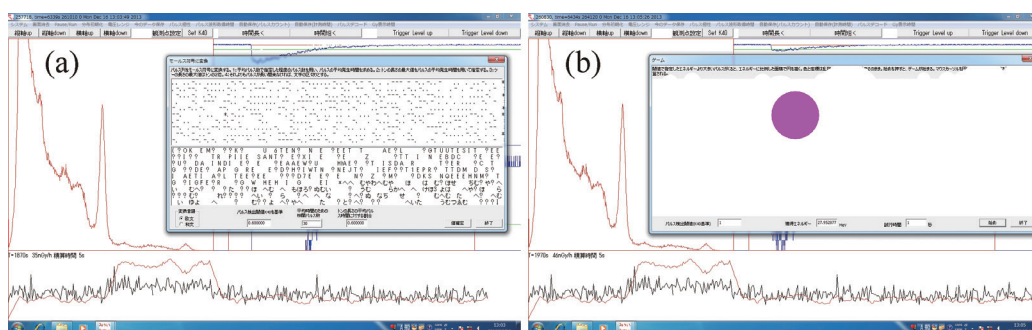


図3. (a) モールス符号表示と欧文・和文への変換, (b) モグラたたきゲームをまねたゲームによる表示。

長距離伝搬できるので、盛んに探索されている。今のところ地球上では高エネルギー粒子を通信に利用していないが、異星人が高エネルギー粒子で通信を行う可能性もゼロではない。通信としての利用法を探索するべきかもしれない。

(4) ゲーム

小中学生に興味を持ってもらうため、コンピュータゲームの検討を行った。ゲームではしばしば乱数を用いるが、放射線検出信号も乱数とみなせるので、ゲームとして利用できる。複雑なゲームは制作時間がかかるので、簡単なモグラたたきゲームとした。放射線パルスを検出すると、エネルギーに比例した面積の円を、次のパルスを検出するまでの間、表示する(図3b)。ただし、円を表示する場所と色は乱数を用いた。円をマウスでクリックすると放射線のエネルギーだけエネルギーを獲得できる。簡単なゲームであるが、何人かの小学生が楽しんでいた。これにより、eVやMeVといった放射線でよく用いられるエネルギー単位にも親しむことができる。

3. サイエンスアゴラ 2013 での展示

3-1. 概要

サイエンスアゴラ 2013 は一般の方々を対象とした科学に関する展示で、日本科学未来館で2013年11月9～10日に行われた。私たちの展示のタイトルは「身の周りの自然放射線を測ろう～X線・γ線・宇宙線～」であり、可能な限り多くの来館者に対応できるよう心がけた。先に説明したガンマ線スペクトロメータ2台と、寺沢が開発した光ファイバーを用いた飛跡観測装置、A0サイズのポスター3枚とホワイトボードを用意した。

来館者に、まずはじめに飛跡観測装置とガンマ線スペクトロメータの説明を行う。教員が行う場合もあるが、多くの場合、医学部の学生が説明を行う。学生の手之余の質問を受けた場合には教員が対応する。大半の来館者は予備知識がほとんどないので、2つの機材の説明と実測体験で十分なようであり、すぐに他の展示を見に移動するケースが多かった。さらに関心のある



図4. 2台のガンマ線スペクトロメータはT字形に配置したテーブルの上に設置した。(a) 低ナトリウム塩, (b) LED, (c) スピーカー, (d) 高圧電源, (e) シンチレーターと光電子増倍管, (f) USB オシロスコープ。

来館者に対して、ポスターを用いて放射線および宇宙線、特に μ 粒子関連について教員が説明を行う。この説明は長い場合が多いが、熱心な来館者が多く、質問が多数出た。

全体の印象として、原発事故により放射線に関する興味は高くなっているが、依然として近寄りにくいテーマのようである。興味深く眺めるだけで立ち寄らない来館者も多くいた(図4)。

3-2. ポスターによる説明

放射線に関連する分野は幅広く、原子核、素粒子、相対性理論、宇宙物理、医学・生物、計測器など多岐にわたる。今回は医学関連の展示が他にあることから医学関連は省き、計測器の説明、放射線の分類、核分裂の分類に重点をおいてポスターを作成した。図5に作成したポスターを示す。

第一のポスター(a)では、放射線に関する基本事項と計測器の詳細について説明した。来館者の一部にはこのポスターによる説明までで止めたが、多くの人が本計測の概要をつかんだ様子であった。

第二のポスター(b)では、日常生活で人間が浴びる放射線の種類について、天然放射線と

身の周りの自然放射線を測ろう

～ エックス線・ガンマ線・宇宙線 ～

放射線測定器

放射線計測器の活用

放射線計測器の活用

目で観る放射線

放射線計測器の活用

放射線計測器の活用

放射線計測器の活用

放射線計測器の活用

放射線計測器の活用

放射線計測器の活用

放射線計測器の活用

自然界の放射線

放射線計測器の活用

放射線計測器の活用

放射線計測器の活用

天然放射線

放射線計測器の活用

放射線計測器の活用

放射線計測器の活用

宇宙線

放射線計測器の活用

放射線計測器の活用

放射線計測器の活用

原子核崩壊と放射線

放射線計測器の活用

放射線計測器の活用

放射線計測器の活用

崩壊と放射線の種類

放射線計測器の活用

放射線計測器の活用

放射線計測器の活用

ミュー粒子は何か?

放射線計測器の活用

放射線計測器の活用

放射線計測器の活用

(a) (b) (c)

図 5. ポスターは A0 サイズで 3 枚作成した。熱心に質問する来館者が多数いた。

宇宙線に分けて説明した。少なからず興味を持った来館者には、このポスターによる説明を行った。ここで示した模式図はとても有効だったようで、細かい説明をせずして自然放射線のイメージをつかんでもらえたようであった。また、シーベルトとベクレルという具体的な数値を用いて日常の被曝量を知ったことで、放射線に対する客観的な見方を獲得できたと述べた来館者も複数見られた。

第三のポスター (c) はより進んだ内容を含むもので、核崩壊の種類と放射線の種類を対応させるとともに、その原理を理解できるように説明を行った。核崩壊の原理については、素粒子物理学に基づいてできるだけ容易に説明するよう心がけた。このポスターの説明を聞く来館者は、科学にとっても興味がある、もしくは大学で科学を学んでいるというように、もともと興味を持って話を聞きに来た人が多かった。 μ 粒子の地上到達の説明に際して、特殊相対論における時間の遅れについても説明を行った。信じ難い、信じられるが原理が分からない、信じられるうえに原理もわかるが気持ちが悪い、という3つの反応に分かれていた。今回の経験から、光速不変の原理に基づき時間の遅れを説明する図を用意しておく必要性も感じた。

4. まとめ

一般の方々に放射線に興味を持ってもらうことを目的として、旋律や光による放射線の表現を行う計測器を開発し、サイエンスアゴラ 2013 にて展示・実演を行った。従来から使われているガイガーカウンターの単調な音と異なり、さまざまな旋律を用いることで多くの来館者の注意を引くことができた。また、旋律と同時に8色のLEDが点滅するので、放射線の検出を実感することができた。

5. 謝辞

サイエンスアゴラ 2013 で一般の方々へガンマ線スペクトロメータに関する説明をしていただいた医学部1年石井公美子さん、伊藤章子さん、三角昂之君、村松俊国君、枝川竣君、貫井紀宏君に感謝します。有用な助言をしていただいた古野泰二教授、青木健一郎教授、機材の搬入・搬出を請け負っていただいた村田佳樹氏(日吉物理学教室)、村田大樹氏(三和陸送(株))に感謝します。USB オシロスコープを用いた信号取得によるガンマ線スペクトロメータの開発は、慶應義塾大学調整予算(平成 20, 21 年度)からの助成金を用いて行われました。

6. 参考文献

- 1) 三井隆久・寺沢和洋：パソコン制御デジタルオシロスコープ信号取得によるガンマ線スペクトロメータの開発と実習への応用，日吉紀要，No. 50，pp. 31-42，2011.
- 2) 松浦壮・坂口真：学生実験開発に向けた環境放射線のスペクトル測定について，日吉紀要，

No. 52, pp. 59-67, 2012.

- 3) G.F.Knoll 著, 木村逸郎・阪井英次訳: 放射線計測ハンドブック, オーム社, 2013年, pp. 889-894.
- 4) 青木健一郎・山本裕樹: 放射能の測定, 平成 19 年度慶應義塾大学日吉特色 GP 活動報告書—文系学生への実験を重視した自然科学教育, pp. 214-218.