

Web カメラを粒子検出器として利用した教材について

武田彩希

京都教育大学大学院 takeda@hep.kyokyo-u.ac.jp

キーワード: Web カメラ, CMOS イメージセンサ, 粒子検出器, 素粒子物理学

(受付: 2010 年 2 月 1 日)

I. はじめに

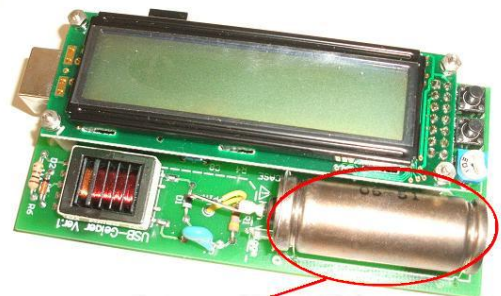
私たちをはじめとする生命や、身のまわりの物質全てを構成するものは素粒子であり、これらの存在や振る舞いなどを研究対象としている分野が「素粒子物理学」である。近年、この分野がメディアに取り上げられる機会が増えている。それに伴い、世間一般にもその中身について知られるようになってきた。また、理科教育では、高等学校物理に素粒子物理の話題が組み込まれつつあり、中学校理科では関連分野となるが、放射線を含む原子力の学習が行われている。話題に上ることは増えているが、内容が高度であるため学習するには難しいことも事実である。最先端の研究分野であるが、新たな視点から興味を持ってもらえないか。そして学ぶきっかけを与えることができないか。これが本研究の動機である。本論は、Web カメラを粒子検出器として利用した教材について、その概要を紹介したものである。教育現場に限らず、素粒子物理に対し興味・関心を持つきっかけとなる教材となれば幸いである。

II. 新たな素材を利用した教材開発

この分野の既存の教材としては、「霧箱」や「ガイガーカウンター」が有名である。霧箱で α 線を観察すると、粒子の飛跡が雲となって確認できる(図1)。図2はストロベリー・リナックス社から販売されているガイガーカウンターのキットである。



図1 霧箱で観察した α 線



GM 計数管 (ガイガー・ミュラー計数管)

図2 ガイガーカウンターのキット

GM（ガイガー・ミュラー）計数管にて放射線（ α 線、 β 線、 γ 線）が検出でき、データを USB 端子経由でパソコンへ転送できる。簡単な放射線の学習に適したキットである。他には、簡易放射線測定器「はかるくん」がある。これは、文部科学省委託事業の一つであり、身のまわりの放射線を体験してもらうという、学校教育支援を目的とし教育機関へ無料で貸し出されている。これらの教材により、放射線などの「見えない粒子」を可視化するという試みは既になされており、実際に何らかの形で目に見えないものを見ることの教育効果は高いようである。これを踏まえて教材開発を進めたが、その過程では、素材選びを重視した。ポイントとしては、最近話題になっており入手しやすいもの、素粒子物理に関係するもの、という条件を満たすことである。そこで、携帯電話に付属するカメラをはじめとし、最近デジタルカメラ等の撮像素子としてよく用いられるようになってきた、「CMOS イメージセンサ」に注目した。

Ⅲ. CMOS イメージセンサと半導体検出器

CMOS イメージセンサ（Complementary Metal Oxide Semiconductor Image Sensor, 相補性金属酸化膜半導体イメージセンサ、以降 CMOS センサ）は、CMOS による固体撮像素子である。原理は 1960 年代後半に考案されたが、実用に耐え得る製品が実現したのは、半導体プロセスの微細化が進んだ 1990 年代後半である。他の固体撮像素子としては、CCD イメージセンサ（Charge Coupled Device Image Sensor, 以降 CCD）が有名である。1970 年頃に発明され、1980 年代初頭に製品化された、CMOS センサと同じ半導体素子である。CCD は撮像性能が高く今でもよく利用されているが、製造プロセスが特殊であり、高価な半導体素子となっている。近年、CCD に代わる撮像素子として注目されているのが CMOS センサであるが、それにはいくつか理由がある。CMOS センサは CCD と比較して、高速読み出しが可能、部分読み出しが可能、低消費電力、製造コストが安価、などの利点がある。これらにより進歩してきた機能として、デジタルカメラの手ぶれ補正やデジタルズームなどがある。2000 年以降、低消費電力が要求される携帯電話を中心に普及し始め、撮像性能も高くなりつつある。CMOS センサは、通常の CMOS プロセスにより生産できるため、LSI などの半導体素子の製造ラインにて量産できる。これから開発される製品は CCD に代わって CMOS センサとなるため、今後さらに需要が高まるであろう（CQ 出版株式会社、2009）。

そもそも、イメージセンサは光を電気信号に変換するものである。読み出し回路や信号処理の仕組みに違いはあるが、風景をデジタル画像にするという役目としては CCD と CMOS センサは同じである。以下で、その仕組みについて簡単に説明する。構造としては、光を電気信号へ変換するフォトダイオードを格子状にたくさん並べたようなものであり、シリコン結晶でできている。光が電気信号へ変換される簡単なモデルは図 3 と図 4 に示す。光（エネルギーを持った粒子）がシリコン結晶へ入射すると、そのエネルギーに比例した電子正孔対（電気プラスとマイナスの対）が生成される（図 3）。このままでは対生成後すぐに結合し消滅してしまうが、それに電場をかけることで、電子正孔対の電氣的な移動、つまり電気の流れが起こる（図 4）。これが回路的にみた電気信号であり、結果として光の入射が電気信号へと変換できるのである。実際のデジタル画像は、この仕組みを基に情報

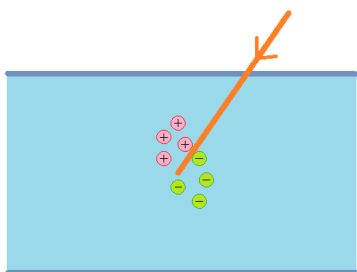


図3 シリコン結晶へ入射した光

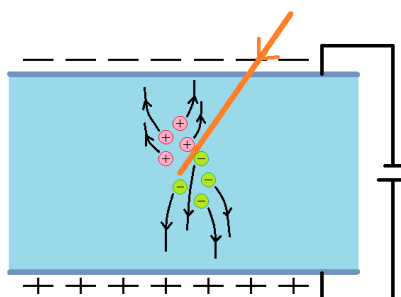


図4 シリコン結晶に電場をかけた様子

を得ている。明暗は入射する光量により、色はシリコン結晶に RGB フィルタを付けることにより認識している。明暗はデータフォーマットによるが、例えば 8bit (8 桁の 2 進数) ならば、 2^8 で 0~255 までの 256 段階で表わされる。RGB フィルタは、名前の通りの赤・緑・青のカラーフィルタであり、各フォトダイオードに 1 つずつ、格子状に配列されている。図 5 はそのイメージ図であり配列の一例である。そして、通過するフィルタにより光の色が識別される (図 6)。この明暗や RGB の情報をまとめて 1 ピクセル (pixel) の情報とし、これらを並べることで 1 つの画像ができる。これが風景をイメージセンサによりデジタル画像へと変換する仕組みである。

素粒子実験では、半導体検出器がよく利用される。これは、高い位置分解能を持つなどの大きな利点があり、実験で生成された粒子の飛跡や崩壊点、衝突点等を精度よく把握することができる。二次元平面の情報を得ることができるピクセル型半導体検出器と CMOS センサは、用途が異なるだけで基本的な構造は同じである。そこから、身近で入手できる CMOS センサを粒子検出器として利用することができないかと考えた。デジタルカメラは可視光を対象とするが、それを暗幕等で遮光した状態にし、放射線を入射させれば、同じ原理で信号として見えるはずである。それを実践した。

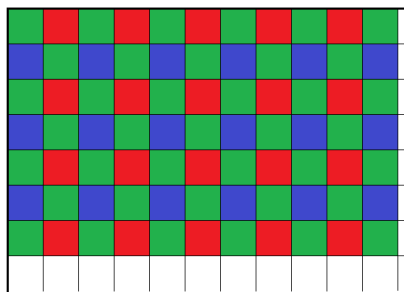


図5 RGB フィルタの配列の一例

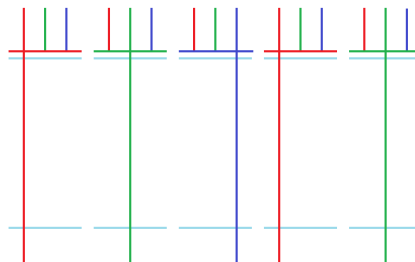


図6 各フィルタを通過する光



図7 使用した Web カメラ



図8 露出させた CMOS センサ (中央)

IV. Web カメラを粒子検出器に

1. 身近で入手可能な CMOS センサ「Web カメラ」

身近で入手できる CMOS センサとして「Web カメラ」を利用した。家電量販店で安価に購入でき（1台数千円程度）、USB 端子によりパソコンと接続し使用する。Web カメラを使う利点はいくつかあり、例えば入手しやすいこと、パソコンと簡単に接続でき映像として見られること、フリーソフトを利用し録画することで動画として記録できることなどが挙げられる。この手軽に試することができる点が重要である。

2. Web カメラでの粒子検出

今回使用した Web カメラは「BUFFALO 社の BSW3K03H シリーズ」で（図 7）、購入時の参考価格は 1,300 円ほどである。性能は、30 万画素 1/4 インチの CMOS センサで Windows 標準ドライバにより動作するため、何もインストールすることなく使用できる。Web カメラと接続するパソコンは何でもよいが、今回の実験では「Lenovo 社の IdeaPad S10e」を使用した。これはいわゆるネットブックである。最初は単にパソコンと接続し、レンズの位置に線源を置き観察した。線源として、キャンプ用のランタンの芯（マントル）を使用した。セットアップ後、Web カメラを暗幕で覆い映像を確認した。しかし、可視光が遮光された黒い画面から変化は見られなかった。マントルからは、 α 線、 β 線、 γ 線が出ているが、現状では線源から CMOS センサに至るまでにレンズがある。より確実に、線源を接触させるため、CMOS センサが実装されている内部基板を露出させた。手順としては、本体外装のネジを外し、中のレンズを取り外す作業が必要となる。実際に露出させると、基板中央には $2\text{mm} \times 2.5\text{mm}$ ほどの CMOS センサを確認することができる（図 8）。これで粒子がセンサへ入射する確率が上がり、粒子が吸収される物質が減少することで、検出できる可能性が高まる。この際重要なのが、動作確認用 LED を切り落とすことである。この LED は電源回路に対し、並列に接続されているため動作に影響がない。残してしまうと、暗幕で覆った中の光源になってしまう。もちろん、これは機種によって異なるため、存在しないものもある。また、表面実装のタイプで取り外すことが困難な場合は、



図9 セットアップ前掲



図10 パソコンへ接続したWebカメラ



図11 CMOS センサ上に置いた線源



図12 Web カメラを暗幕で覆った様子

黒いビニルテープを巻きつける方法もある。そして加工後、マントルからの放射線を再度観察した。図9はパソコンとWebカメラを接続したセットアップの全景、図10がパソコンへ接続したWebカメラ、図11がCMOSセンサ上に置いた線源、マントルである。図12はWebカメラを暗幕で覆った様子であり、この状態でWebカメラからの映像を確認した。すると、白い輝点が現れるようになり、1分間に数個程度、白い粒子の軌跡が確認できた(図13)。センサ面に対し鉛直方向に入射すれば点となり、水平方向に入射すれば線となる。放射線は可視光を制限するRGBフィルタに関係なく通過するため、RGB値が同じ状態、つまり白色になると考えられる。線源を置かずに観察すると、このような輝点が現れない。よって、これは放射線の軌跡であると考えられる。この実験を通して、Webカメラにより放射線を検出できることが確認できた。



図13 マントルからの放射線の画像



図 14 観察した Ba133 (X 線源) の着色画像



図 15 観察した Sr90 (β 線源) の着色画像

3. 研究用線源による実験

より安定したデータを得るために、研究用の線源を用いて実験を行った。使用した線源は、Ba133 (X 線源) と Sr90 (β 線源) であり、共に 370KBq のものである。この結果、常時安定して粒子を確認することができた。線源を観察した例を図 14 と図 15 に示す。これらは、粒子の軌跡を強調するため画像を着色してある。図 14 が X 線源である Ba133、図 15 が β 線源である Sr90 を観察した様子である。着色は、Web カメラに存在する個体依存のノイズを除いて行った。2 種類の線種による飛跡を比較すると、違いがよくわかる。γ 線源では粒子を確認することができなかった。理由としては、エネルギーが高いため、Web カメラのシリコン結晶内を通過してしまったと考えられる。この線種による見え方の違いについては、今後も調査が必要である。

4. 解析のためのソフトウェア

Web カメラによる粒子の検出ができたため、次の段階として、得られたデータの解析を目指した。まず、そのためのソフトウェアを作成した。現在のスキルでは、リアルタイム動画の解析ができなかったため、録画した動画を静止画へと変換した後、それを解析する方法を取った。使用した開発環境は「Visual Studio. Net 2008 Express Editions」であり、言語は「Visual Basic」で作成した。図 16 は、ソフトウェアのメインウィンドウである。2010 年 1 月現在の最新バージョンは「Rad Graph Analyzer ver.0.40」であり、今後公開を予定している。解析過程で注意すべき点は、変換後に生成された静止画の扱いである。例えば毎秒 30 フレームで録画した時、必ずしもその通りにはならないということがある。環境にもよるが、実際に見ると、平均して連続する 4 枚が同じものであった。大量の画像を解析する場合には気をつけなければならない。このソフトウェアについて紹介すると、まず扱うことができるデータ量は、静止画にすると、1 枚から同一フォルダ内全てという幅広いものである。機能としては、ピクセルの RGB 値の取得、ノイズを除くための閾値の設定、粒子の着色、計数、そしてエネルギーの相対的な見積もりなどがある。これらの値は、テキストファイルとして出力することができる。粒子の持つエネルギーについてで

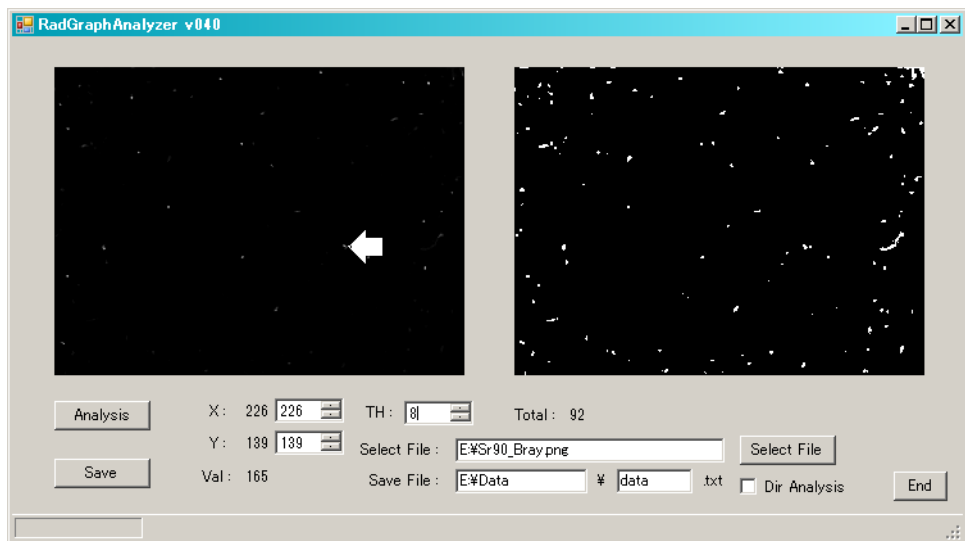


図 16 作成した解析のためのソフトウェア

あるが、各ピクセルの RGB 値を調べると、そのほとんどが最大値である 255 を超えないことから、見積もることができないかと考えた。図 17 は、ノイズを除外した各ピクセルの RGB 値とその個数についてプロットしたものである。横軸が RGB 値 (0~255)、軸がカウントされたピクセル数である。Ba133 の 20 分間の静止画データを解析したが、250 以上のものは、数ピクセル程度となっている。これは、エネルギーに比例して大きくなる RGB 値が相対的な関係を保った状態でほぼ全て記録されていることを意味する。つまり、ある輝点の RGB 値を足し合わせば、相対的なエネルギーの見積もりを行える可能性がある。もちろん、粒子がシリコン結晶内で生成させた電子正孔対についてのみであることを念頭に置いておく必要がある。この仮定よりプロットしたエネルギー分布が図 18 である。横軸が輝点から見積もった相対的なエネルギー、縦軸が個数である。既存の測定器によるものと比較すると近い傾向が見られるが、厳密な評価は行っていないため、今後の課題となる。しかし、このソフトウェアにより単に映像を観察するだけでなく、データ解析を行える可能性がでてきた。

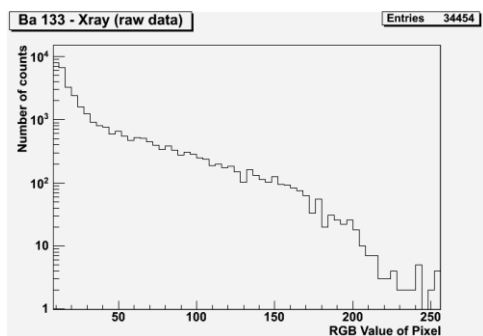


図 17 各ピクセルの RGB 値とその個数

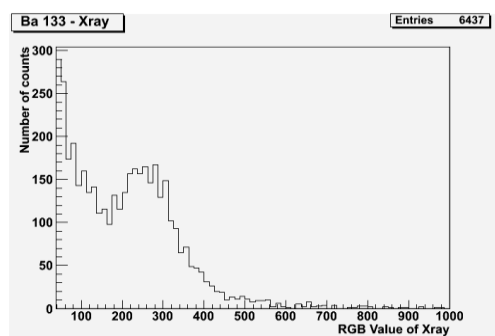


図 18 Ba133 のエネルギー分布



図 19 授業実践の様子



図 20 放射性岩石のベタホ石

V. Web カメラを粒子検出器として利用した教材の授業実践

Web カメラを粒子検出器として利用した教材の現段階での評価を行うため、授業実践を行った。SPP（サイエンス・パートナーシップ・プログラム）では中学生に対し、大学生に対しては、文理芸術混合クラスにて行った（図 19）。授業に目的意識を持たせるため、前半に素粒子物理の講義を行い、後半に教材を用いた実験を行う 60 分間の構成とした。Web カメラは授業中に演示で 1 台のみ外装を取り外し、その他は予め外したものを準備しておいた。線源として、マントルと放射性岩石のベタホ石（図 20）を準備した。講義では、素粒子のみならず、検出器やデジタルカメラ、さらにレントゲンについて話をした。1 分間に数個の輝点が見える程度と、一瞬で真っ白になるほどの放射線量を比較すると、レントゲンの恐ろしさを感じさせることができ、インパクトがあったようである。CMOS センサを露出させた状態でレンズを当てると、ピントのあった像となることも人気であった。大学生に対してアンケートを実施したが、76.9%の学生が授業を受けて興味・関心が高くなったと回答した。自由記述欄の感想には、Web カメラに対するものが多く、手軽に放射線を見ることができたことへの驚きや、カメラの仕組みが分かったことに対する喜びのコメントがあった。携帯電話にも付属する身近な存在であるデジタルカメラが、どのように風景を画像として認識するのかという、日常生活ではブラックボックスとなっている部分に触れる機会であったようである。これらの結果からこの教材に効果があったのではないかという感触を得た。

VI. まとめ

授業実践を通して、この教材が素粒子物理に対する興味・関心を高めることに有効なものである可能性があることが分かった。教材としては未調査な点が多く、多くの課題が残る。しかし、素粒子物理をはじめとした様々な学習に生かせるため、より効果的な教材となるよう研究を続け、これからもその可能性を議論していく必要がある。

文献

CQ 出版株式会社 2009. トランジスタ技術 2009 年 7 月号.