

## **Modul 6**

### **Partikel Detektor berbasis Webcam**

#### **6.1 Pengantar**

Tujuan dari dokumen ini adalah untuk menggambarkan penggunaan webcam komersial sebagai detektor partikel. Kami akan menunjukkan bahwa, dari webcam biasa, seseorang dapat membuat detektor "biaya rendah" untuk dapat mendeteksi partikel beta, radiasi gamma dan sinar kosmik. Perangkat ini dapat digunakan untuk membuat eksperimen menarik di radioaktivitas dan membuat pengukuran kualitatif sumber radioaktif.

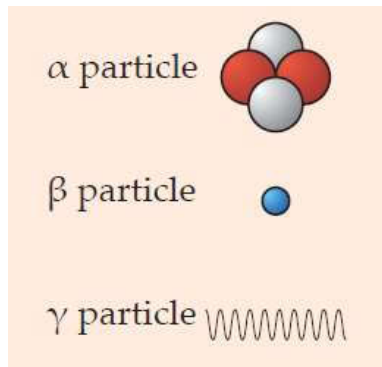
#### **6.2 Radioaktivitas**

Radioaktivitas adalah fenomena dimana beberapa inti atom, tidak stabil, berubah menjadi partikel atom jenis lain dan memancarkan radiasi. Radioaktivitas tidak diciptakan oleh manusia, tetapi sebaliknya, manusia terus terkena radioaktivitas dari saat kemunculannya di Bumi. Radioaktivitas adalah setua alam semesta dan hadir di mana-mana: di Bintang, Bumi dan di tubuh kita sendiri.

Isotop yang terjadi di alam yang paling stabil. Namun, beberapa isotop alami, dan hampir semua isotop buatan, memiliki inti tidak stabil, karena kelebihan proton dan/atau neutron. Ketidakstabilan menyebabkan transformasi spontan menjadi isotop lain, dan transformasi ini disertai dengan emisi partikel. Isotop ini disebut isotop radioaktif atau radioisotop, atau radionuklida.

Transformasi radioaktif dari atom timbal untuk produksi atom lain, yang juga dapat bersifat radioaktif atau stabil. Hal ini disebut peluruhan radioaktif atau disintegrasi. Rata-rata waktu yang dibutuhkan untuk menunggu perubahan tersebut bisa sangat pendek atau sangat panjang. Dikatakan "hidup rata-rata" dari radioisotop, dan dapat bervariasi dari sepersekian detik hingga miliaran tahun (misalnya, kalium-40 memiliki kehidupan rata-rata 1,8 miliar tahun). Selain itu karakteristik radioisotop adalah "waktu setengah", yaitu waktu yang dibutuhkan untuk setengah dari atom radioaktif awalnya mengalami transformasi spontan.

Ada tiga jenis peluruhan radioaktif, yang berbeda dari jenis partikel yang dipancarkan sebagai akibat dari pembusukan: partikel Alpha, Beta partikel dan radiasi Gamma.



Gambar 1.

### **Radioaktivitas alpha ( $\alpha$ )**

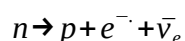
Partikel alpha, sinar alpha adalah bentuk radiasi pengion dengan penetrasi yang rendah karena interaksi dengan penampang atau permukaan benda. Partikel Alpha terdiri dari dua proton dan dua neutron terikat bersama oleh gaya kuat, mirip dengan inti  ${}^4\text{He}$ . Dari sudut pandang kimia mereka juga dapat diidentifikasi dengan simbol  ${}^4\text{He}_{++}$ . Peluruhan beta dimediasi oleh gaya lemah, sedangkan peluruhan alpha dimediasi oleh gaya kuat.

Partikel Alpha biasanya dipancarkan dari nuklida radioaktif dari unsur-unsur berat, misalnya isotop uranium, thorium, radium, dll, dalam proses yang disebut peluruhan alpha. Kadang-kadang peluruhan atom ini meninggalkan inti dalam keadaan tereksitasi, dan akibatnya kelebihan energi dapat dihapus dengan emisi sinar gamma. Partikel alpha, karena muatan listrik mereka, sangat berinteraksi dengan materi dan oleh karena itu mudah diserap oleh material dan dapat melakukan perjalanan hanya beberapa sentimeter di udara.

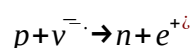
### **Radioaktivitas beta ( $\beta$ )**

Radiasi beta adalah bentuk radiasi pengion yang dipancarkan oleh berbagai jenis inti radioaktif. Radiasi ini didasari oleh partikel beta ( $\beta$ ), yang disebut elektron energi tinggi atau positron, dilepaskan dari inti atom dalam proses yang dikenal sebagai peluruhan Beta. Ada dua jenis peluruhan beta,  $\beta^-$  dan  $\beta^+$ , yang memancarkan elektron atau positron.

Dalam peluruhan  $\beta^-$ , satu neutron diubah menjadi proton, elektron dan antineutrino (anti-partikel neutrino):



Dalam peluruhan  $\beta^+$  (di proton inti besar), satu proton berinteraksi dengan muatan antineutrino untuk menghasilkan neutron dan positron (peluruhan langsung proton dalam positron belum diamati secara eksperimen):



Karena kehadiran neutrino, atom dan partikel beta biasanya tidak mundur dalam arah yang berlawanan. Peluruhan beta dimediasi oleh gaya nuklir lemah. Interaksi partikel beta dengan materi umumnya mencapai panjang sepuluh kali, dan interaksi pengion sama dengan sepersepuluh dibandingkan dengan interaksi partikel alpha. Mereka benar-benar dapat diblokir menggunakan beberapa milimeter aluminium.

### ***Radioaktivitas gamma ( $\gamma$ )***

Dalam fisika nuklir, sinar gamma (sering dilambangkan dengan huruf kecil Yunani  $\gamma$  sesuai) adalah bentuk radiasi elektromagnetik pada energi tinggi, yang dihasilkan oleh pembusukan atau proses subatom. Sinar gamma adalah radiasi paling kuat sehingga mampu menembus lapisan logam tebal dibandingkan dengan peluruhan alpha dan beta, karena cenderung berinteraksi lebih rendah dengan materi.

Sinar gamma dan sinar X dibedakan berdasarkan sumber mereka: sinar gamma diproduksi oleh transisi subatomik nuklir atau lainnya, sementara sinar X diproduksi oleh transisi energi karena elektron bergerak cepat di tingkat energi terkuantisasi mereka. Karena dimungkinkan untuk beberapa transisi elektronik melebihi energi dari beberapa transisi nuklir, energi sinar-x lebih tinggi dan tumpang tindih dengan sinar gamma yang lemah.

### ***Kamera web***

Webcam (kamera web) dapat digunakan sebagai detektor partikel, setelah beberapa modifikasidiubah. Dengan catatan bahwa perubahan yang dilakukan harus reversibel sehingga dapat mengembalikan fungsi asli ketika diperbaiki. Di dalam webcam, hadir sensor CMOS yang merupakan elemen yang sensitif terhadap cahaya atau radiasi elektronik lainnya. Sensor CMOS secara praktis didasari oleh matriks-matrik piksel, dimana setiap pixel adalah fotodiode dan konversi sirkuit/amplifier yang mengubah muatan berasal dari diode menjadi tegangan listrik yang dibaca, pixel per pixel, dan kemudian di digitalisasi menjadi nilai numerik mulai dari 0 sampai 255. Untuk memilih warna warna spesifik, Filter cahaya (merah, hijau dan biru) diposisikan di atas setiap pixel, sehingga menghasilkan "mosaik" piksel berwarna, maka gambar diproses pada waktu yang tepat (interpolasi) untuk merekonstruksi gambar asli.



Gambar 2

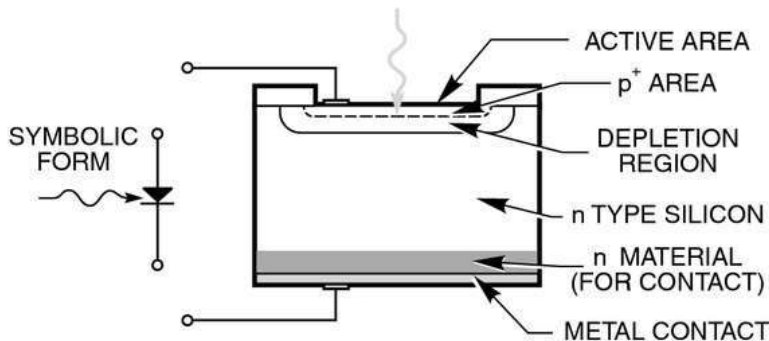
Elemen aktif yang sensitif terhadap radiasi partikel, adalah fotodiode, skematis diperlihatkan pada Gambar 2 dan 3. Partikel pengion masuk ke daerah sensitif dari “atas jendela” dan menghasilkan dalam bagian yang beberapa pasang ratus elektron/hole yang dikumpulkan oleh katoda/anoda dari diode dan menghasilkan sinyal yang kemudian didigitalisasi.

Kami memberikan beberapa data dari literatur tentang sensor diode (solid state):

**Silicon Band Gap = 1.115 eV**

**Pasangan Energi Produksi e / h (300 °K) = 3,62 eV**

**Elektron ionisasi listrik = 80 e / m**



Gambar 3.

Seperti yang Anda lihat dari data yang ditampilkan di atas, elektron yang berjalan 10 m menghasilkan sekitar 1000 muatan, dan dengan demikian sinyal mudah terdeteksi menggunakan chip diode.

Sebenarnya sensor CMOS tidak dioptimalkan untuk mendeteksi radiasi partikel dan oleh karena itu efisiensi deteksi agak rendah, terutama karena fakta bahwa wilayah sensitif yang merupakan penipisan lapisan persimpangan sangat tipis. Partikel-partikel alpha tidak terdeteksi karena sensor dilindungi oleh lapisan kaca (atau bahan transparan lainnya) yang benar-benar menghalangi partikel alpha. Partikel beta sebagian diserap oleh permukaan perlindungan tetapi persentase yang tinggi mencapai bagian sensitif dan terdeteksi. Sinar

kosmik, adalah partikel muon energi tinggi, yang terdeteksi praktis 100%. Untuk radiasi gamma sensitivitas agak rendah dan tampaknya lterdeteksi ebih besar pada energi partikel yang rendah, ini juga karena ketebalan daerah sensitif dari sensor CMOS yang tipis.

Sensor CMOS di Logitech C270 webcam fitur data sebagai berikut:

**Resolusi sensor = 1280 x 960**

**Pixel Dimensi = 2,8 m x 2,8 m**

**Sensor Dimensi = 3,5 mm x 2,7 mm**

**daerah sensor = 9,45 mm<sup>2</sup>**

**Resolusi gambar = 640 x 480**

**Gambar Pixel Dimensi = 5,6 m x 5,6 m**



Gambar 4 dan Gambar 5

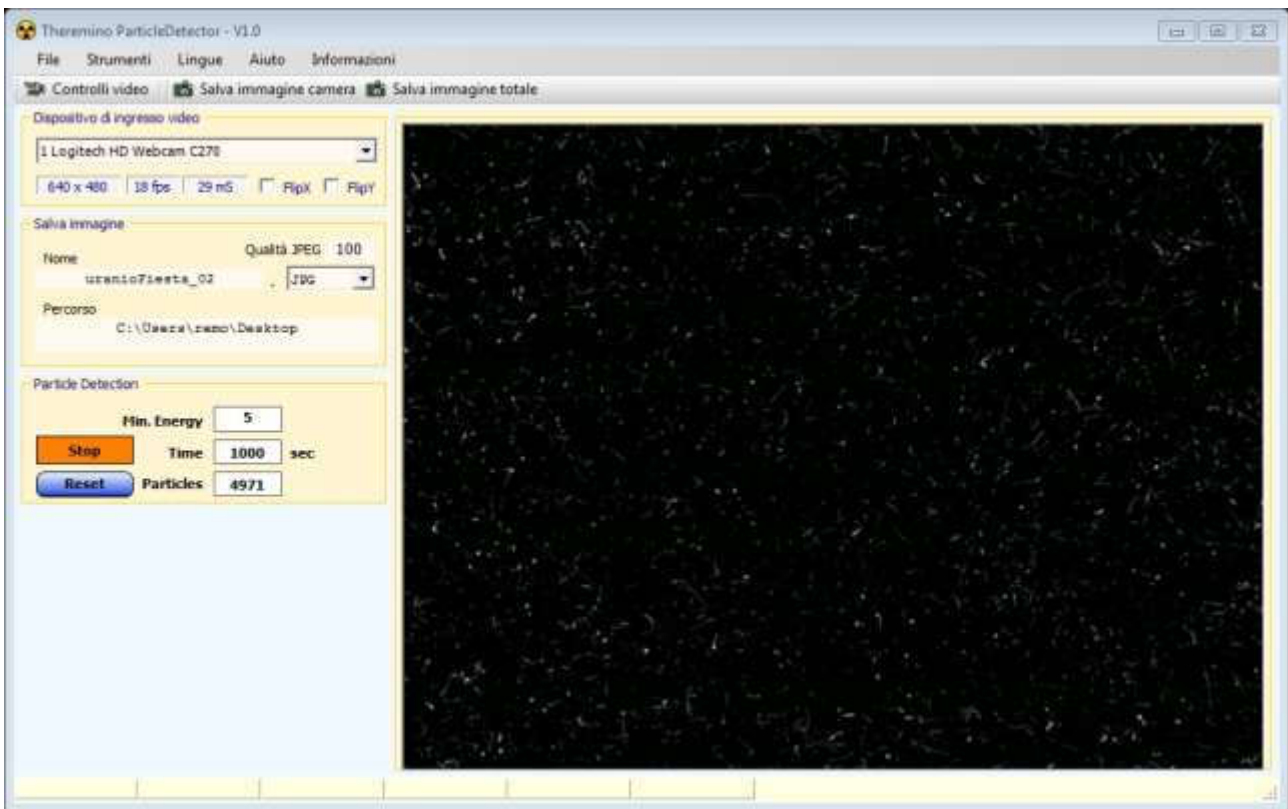
### ***Memodifikasi webcam***

Memodifikasi Webcam sangat sederhana. Pertama, cover depan harus dihilangkan dengan obeng, kemudian membongkar dasar yang mendasari dengan menghapus tiga sekrup kecil. Webcam terbuka ditunjukkan pada gambar 4 dan 5:

Untuk mencegah bahwa sensor CMOS terkena cahaya LED lebih baik untuk melepas LEDnya dengan pemotong kawat atau dengan solder. Selain itu, lensa webcam juga harus dilepaskan seperti yang terlihat pada Gambar 4 dan 5.

Untuk menghindari bahwa sensor CMOS tercapai oleh cahaya ambient perlu untuk secara memadai melindungi permukaan sensor cahaya dengan lembar aluminium dan

perekat, seperti yang ditunjukkan pada gambar 4 dan 5. Pada akhirnya tutup webcam dapat dipasang lagi, dan webcam sebagai sensor radiasi partikel dapat digunakan.



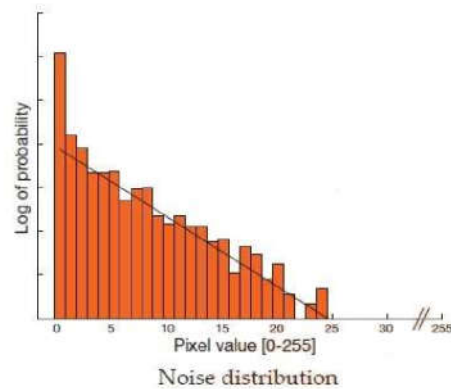
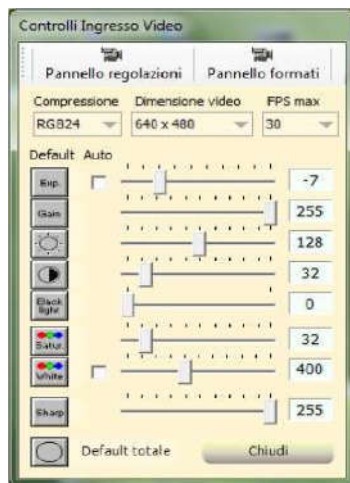
Gambar 6 Theremino Particle Detector

### ***Theremino Particle Detector***

Ketika radiasi sinar partikel mengenai permukaan sensor akan menyebabkan terbentuknya citra digital hasil interaksi antara partikel dengan pixel-pixel dioda membentuk titik atau lintasan cahaya. Citra digital tersebut dapat direkam dengan menggunakan webcam dan software ***Theremino Particle Detector***. Perangkat lunak tersebut melakukan integrasi gambar sehingga mencapai semacam "paparan panjang". Dengan cara ini lintasan partikel tidak terhapus pada setiap siklus akuisisi tetapi menumpuk frame demi frame, seperti terlihat pada Gambar 6.

Aplikasi ini memberikan kemungkinan untuk mengatur energi minimum (0-255) agar tidak menghitung kondisi palsu yang disebabkan oleh noise (kebisingan) sensor CMOS. Dengan satu kontrol START/STOP dapat memulai dan berhenti rekaman dan penghitungan. Dengan satu kontrol RESET dapat mengatur ulang waktu integrasi dan perhitungan.

Selama software merekam peristiwa yang disebabkan oleh deteksi radiasi dihitung dan ditampilkan dalam kotak "Partikel", waktu perekaman total ditampilkan dalam kotak "Waktu". Rasio antara dua nilai berkorespondensi ini untuk kuantitas "Hitungan per detik", yaitu CPS (counter per seconds).



Gambar 7 Pengaturan Dan Distribusi Kebisingan

Dalam rangka untuk mendapatkan hasil terbaik disarankan untuk mengatur Webcam dengan parameter yang ditunjukkan pada gambar samping. Parameter berikut adalah penting:

**Resolusi = 640 x 480**

**Paparan = -7 (sesuai dengan 1/10 s)**

**Gain = 255**

**Tajam = 255**

Perlu juga disesuaikan dengan parameter "energi minimum", digunakan untuk mengecualikan dari survei peristiwa karena noise (kebisingan) dari sensor CMOS. Dari studi literatur distribusi noise memiliki tren eksponensial, seperti yang terlihat dalam grafik semilog disajikan di Gambar 7. Dengan menetapkan batas ini dengan nilai-nilai yang terdiri antara 5 dan 20 sebagian besar dari noise (kebisingan) dapat dibatalkan.

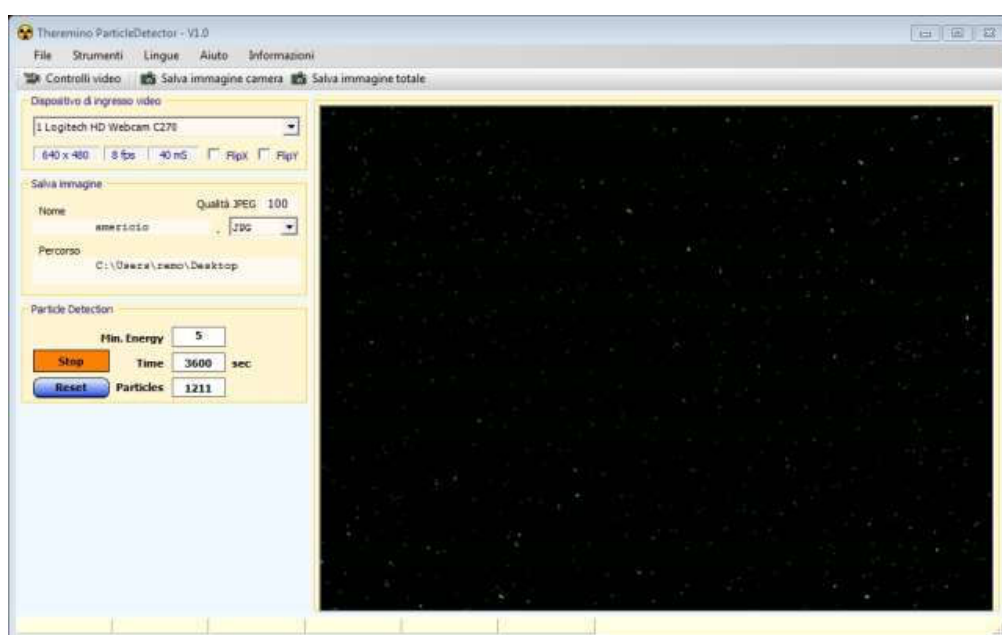
## Pengukuran

Pengukuran telah dibuat dengan menempatkan sumber yang dekat dengan Webcam, Gambar 8 menunjukkan setup khas digunakan. Sumber-sumber umum berikut telah digunakan:

- Mantel gas Thoriated
- Uranium glaze (FiestaWare)
- Radium jam tangan
- Uraninit
- Isotop Amerisium 241 dari sensor asap
- Isotop Cesium 137 - lisensi dibebaskan kuantitatif kecil
- Isotop Sodium (Natrium) 22 - lisensi dibebaskan kuantitatif kecil
- Isotop Strontium 90 - lisensi dibebaskan kuantitatif kecil



Gambar 8 Pengukuran dan Jenis-Beroperasi Sumber radiasi Nuklir.



Gambar 9 Pengamatan radiasi alpha

### **Amerisium 241**

Amerisium adalah suatu unsur kimia dengan nomor atom 95. Simbol Its adalah Am. Amerisium adalah elemen logam sintetis dari keluarga aktinida, diperoleh dengan membombardir plutonium dengan neutron. Meluruh alpha di neptunium - 237 dengan waktu paruh sekitar 400 tahun, di pembusukan yang juga memancarkan radiasi gamma di sekitar 59keV dan 26keV.

Sumber = amerisium (241 Am) 1 $\mu$ Ci

Waktu = 3600s

Partikel = 1211

CPS = 0336

Sensor CMOS tidak mendeteksi alpha partikel, sehingga poin yang Anda lihat dalam gambar adalah karena sinar gamma yang dipancarkan oleh sumber amerisium 1 $\mu$ Ci atau dengan elektron sekunder.



## Cesium 137

Cesium-137 memiliki waktu paruh sekitar 30,17 tahun. Sekitar 95 persen meluruh oleh emisi beta ke isomer nuklir metastabil barium: barium-137m (Ba-137m). elektron Beta memiliki energi maksimum 512keV untuk 94% dan dari 1,174MeV untuk 5,4%, ada foton gamma di 662keV.

Sumber = Cesium (137Cs) 0,25 $\mu$ Ci

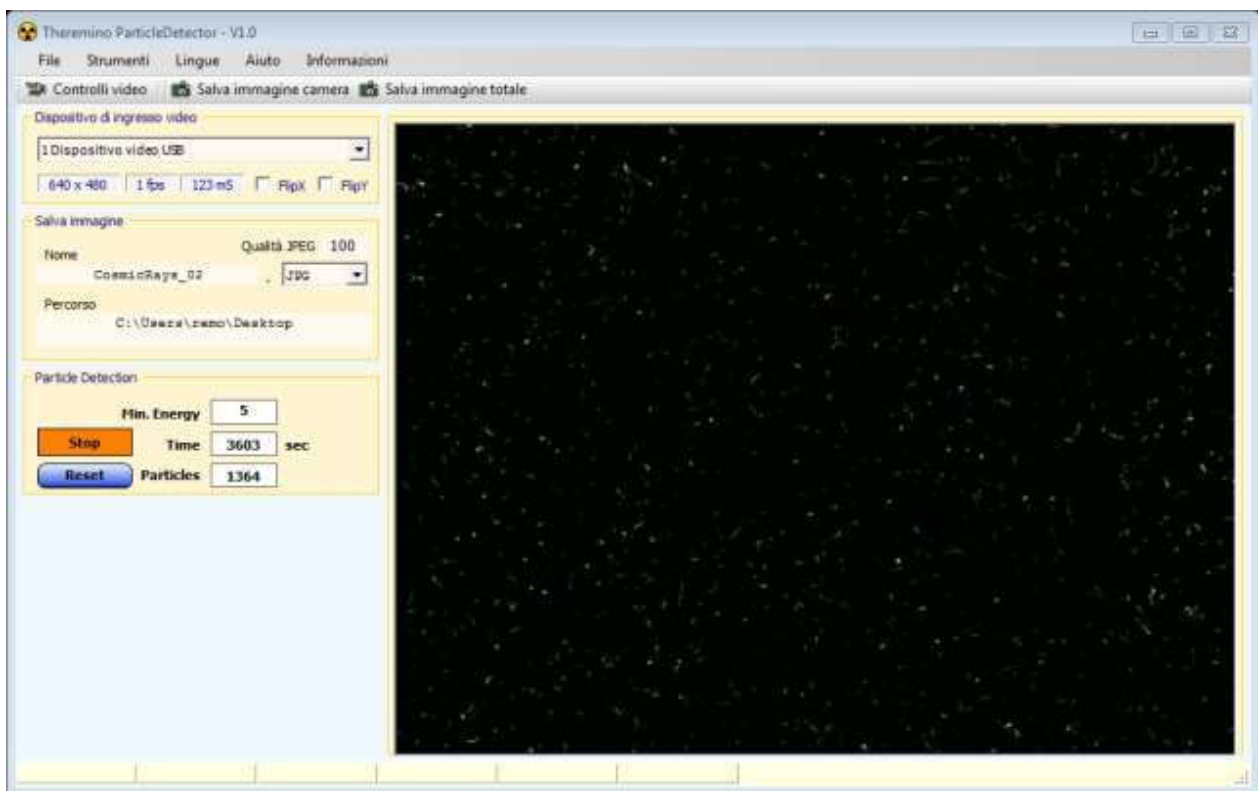
Waktu = 3600s

Partikel = 1364

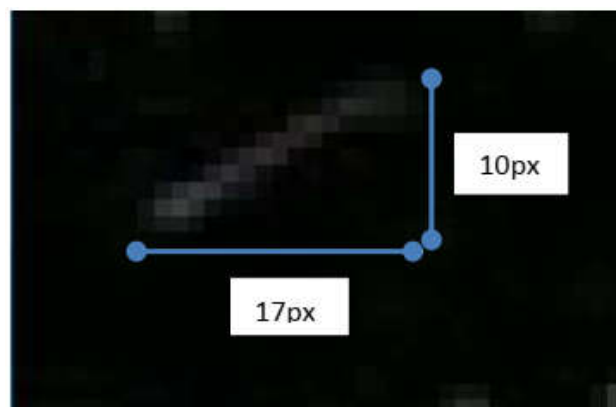
CPS = 0379

Jejak Panjang = 20px \* 6 $\mu$ m = 120 m

Sensor CMOS mendeteksi radiasi beta dipancarkan oleh peluruhan cesium. Dalam gambar samping Anda melihat gambar diperbesar dari jalur elektron.



Gambar 10 Pengamatan radiasi emisi saham beta



Gambar 11. Hasil temuan pengamatan lintasan radiasi beta berupa interaksi dengan elektron

## Sodium (Natrium) 22

Isotop Na-22 meluruh (di 99,95% kasus) dengan paruh 2,6 tahun, dengan emisi positron atau menangkap elektron untuk keadaan tereksitasi pertama  $^{22}\text{Ne}$  1274 keV (yang kemudian relaks dengan memancarkan gamma foton). Positron yang dipancarkan oleh sumber pada energi 544 keV. Ketika mereka memusnahkan, mereka menghasilkan dua foton gamma energi 0,511 MeV setiap.

Sumber = Strontium ( $^{90}\text{Sr}$ )  $0,1\mu\text{Ci}$

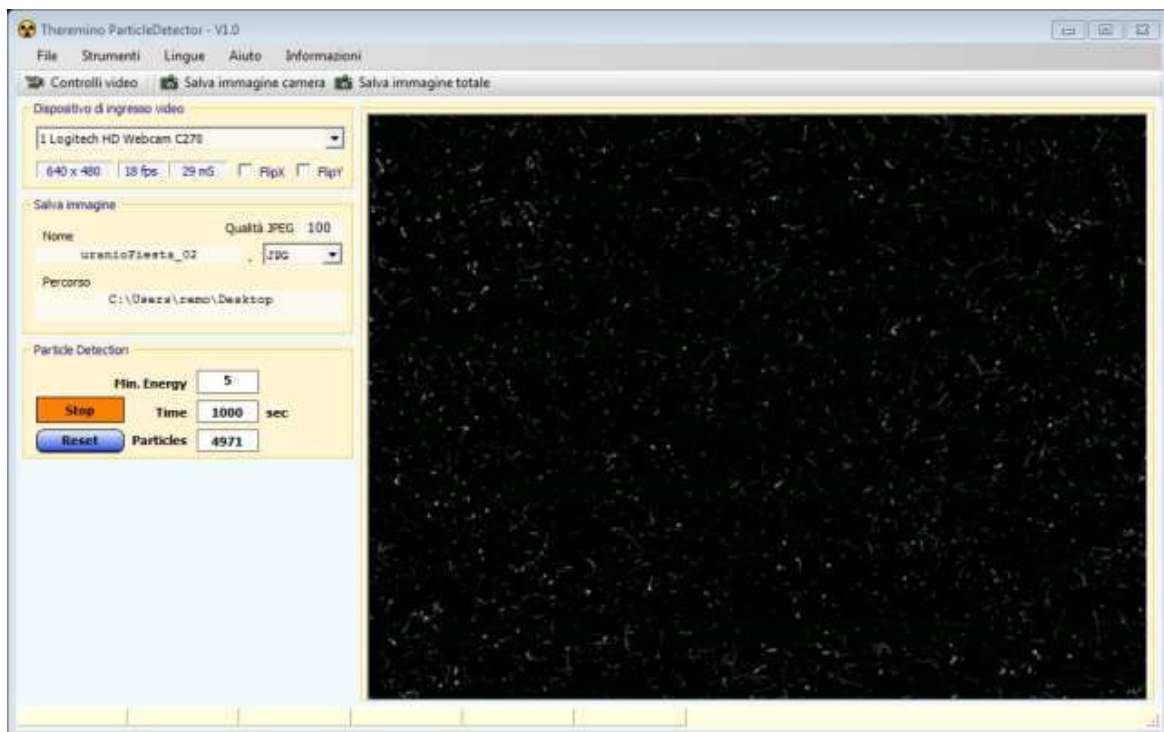
Waktu = 3600s

Partikel = 4971

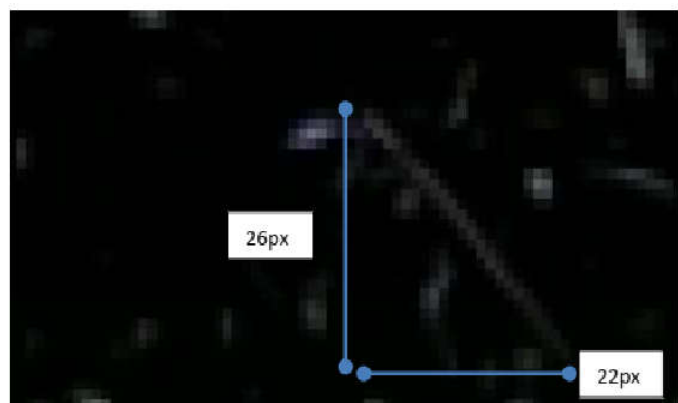
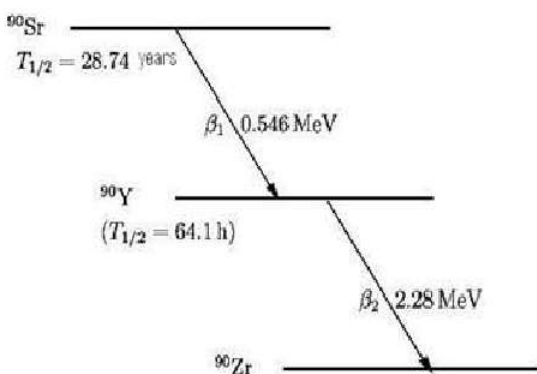
CPS = 1,38

Jejak Panjang =  $33\text{px} * 6\mu\text{m} = 198 \text{ m}$

Sensor CMOS mendeteksi radiasi beta dipancarkan oleh peluruhan strontium. Dalam gambar samping Anda melihat gambar diperbesar dari jalur elektron.



Gambar 12. Pengamatan radiasi sinar Gamma.



gambar 13. Hasil pengamatan lintasan sinar Gamma.

## Thorium 90

Thorium adalah suatu unsur kimia dengan simbol Th dan nomor atom 90. Sebuah logam aktinida radioaktif, thorium adalah salah satu dari tiga unsur radioaktif yang masih terjadi dalam jumlah di alam sebagai unsur primordial (dua lainnya makhluk bismut dan uranium).

Rantai peluruhan thorium menghasilkan alpha partikel, partikel beta dan radiasi gamma. Secara khusus, partikel beta yang dipancarkan ditandai dengan energi cukup tinggi.

Sumber = Thorium (mantel gas)

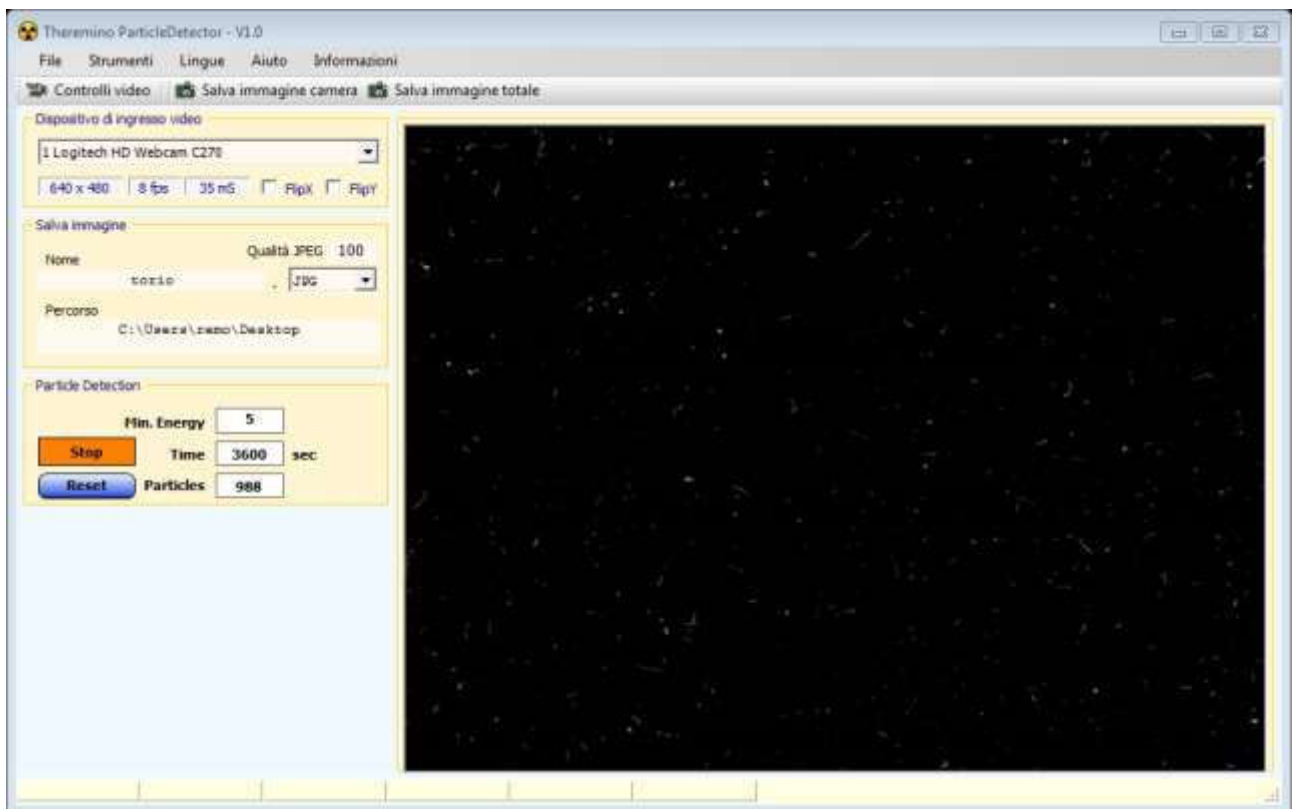
Waktu = 3600s

Partikel = 988

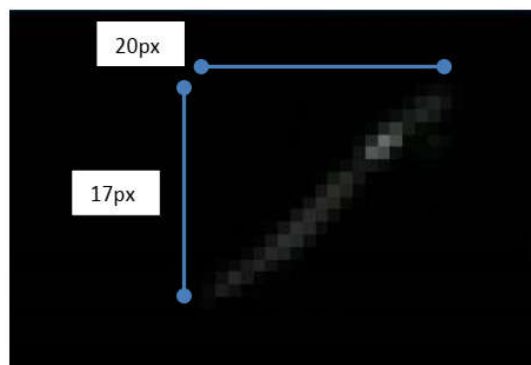
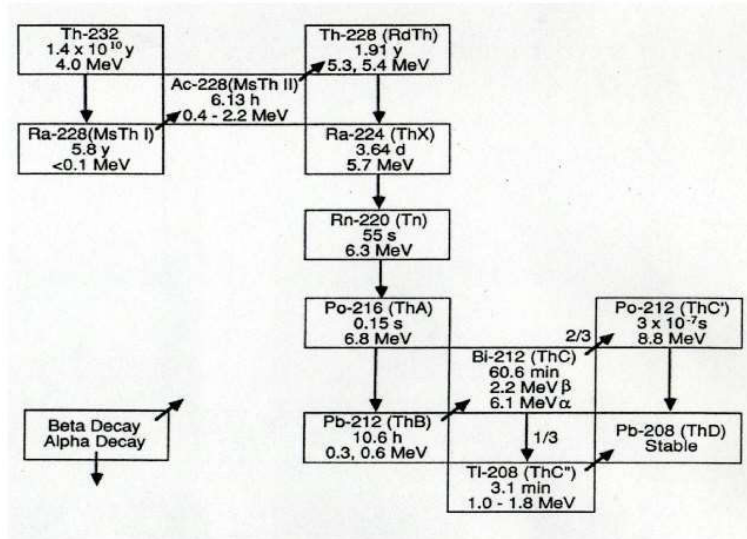
CPS = 0274

Jejak Panjang =  $26\text{px} * 6\mu\text{m} = 156\text{ m}$

Sensor CMOS mendeteksi radiasi beta dipancarkan oleh peluruhan thorium. Dalam gambar samping Anda melihat gambar diperbesar dari jalur elektron.



Gambar 14. Pengamatan sinar Beta energi Tinggi.



Gambar 15. Hasil pengamatan radiasi sinar Alfa Dan Beta energi Tinggi (Thorium)

### Uranium - uraninit

Uranium adalah suatu unsur kimia dengan simbol U dan nomor atom 92. Ini adalah logam putih keperakan dalam seri aktinida tabel periodik. Sebuah atom uranium memiliki 92 proton dan 92 elektron, dimana 6 adalah elektron valensi. Uranium adalah lemah radioaktif karena semua isotop yang tidak stabil (dengan paruh dari 6 isotop alami dikenal, uranium-233 ke uranium-238, bervariasi antara 69 tahun dan 4,5 miliar tahun). Isotop yang paling umum dari uranium yang uranium-238 (yang memiliki 146 neutron dan menyumbang hampir 99,3% dari uranium yang ditemukan di alam) dan uranium-235 (yang memiliki 143 neutron, akuntansi untuk 0,7% dari elemen ditemukan secara alami). Uraninit atau bijih uranium adalah bijih yang sangat radioaktif, salah satu sumber utama uranium.

Sumber = Uranium Oksida (uraninit)

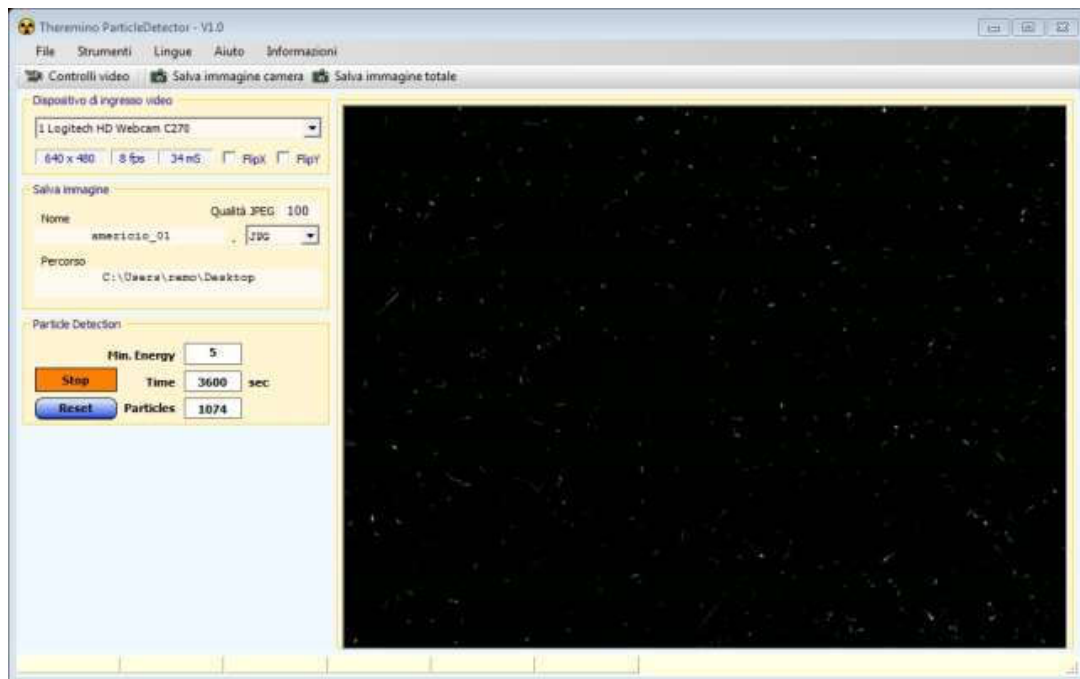
Waktu = 3600s

Partikel = 1074

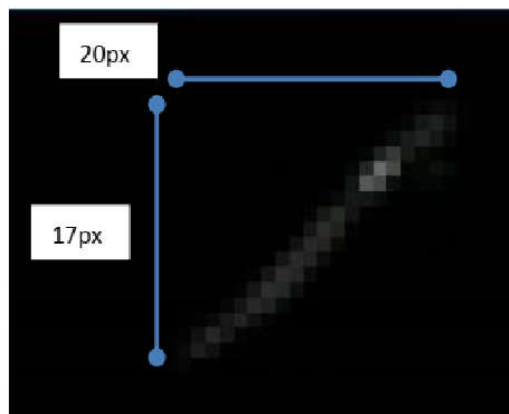
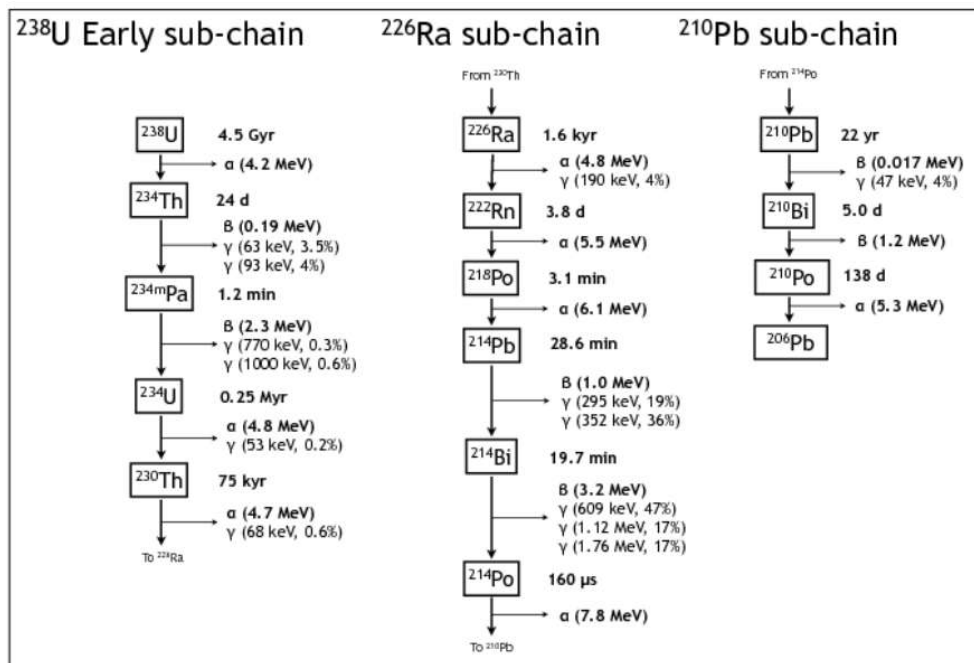
CPS = 0298

Jejak Panjang =  $40\text{px} * 6\mu\text{m} = 240\text{ m}$

Sensor CMOS mendeteksi radiasi beta dipancarkan oleh peluruhan uranium. Dalam gambar samping Anda melihat gambar diperbesar dari jalur elektron.



Gambar 16. Pengamatan radiasi sinar Alfa Dan Beta energi Tinggi (Uranium)



Gambar 16. Hasil pengamatan radiasi sinar Alfa Dan Beta energi Tinggi (Uranium)

### Radium

Radium adalah unsur kimia dengan simbol Ra dan nomor atom 88. Ini adalah elemen keenam dalam kelompok 2 dari tabel periodik, juga dikenal sebagai logam alkali tanah. Warna radium murni hampir murni putih, tapi mengoksidasi dengan mudah bila terkena udara dan menjadi hitam. Semua isotop radio yang sangat radioaktif, yang lebih stabil adalah radio-isotop 226, yang memiliki paruh 1600 tahun, dan meluruh menjadi radon.

Sumber = Radium jam tangan

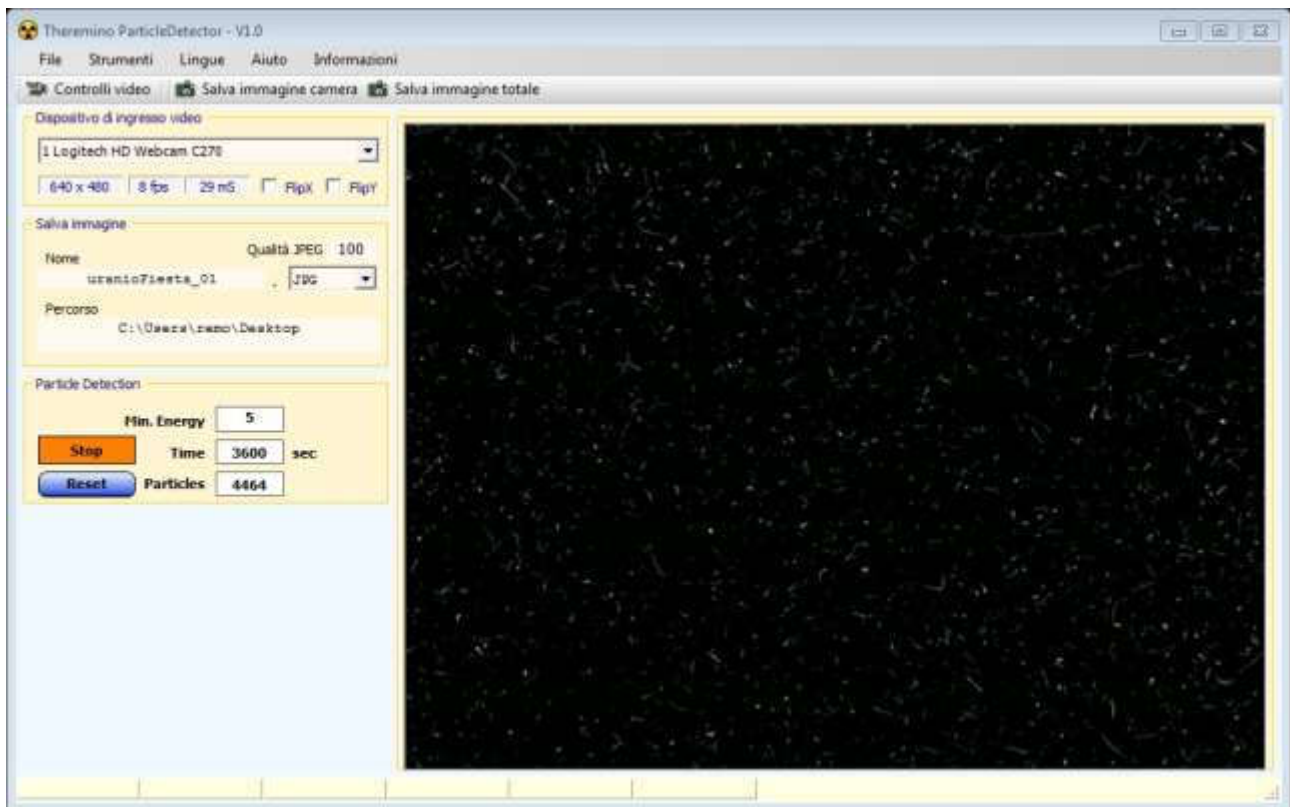
Waktu = 3600s

Partikel = 4464

CPS = 1,24

Jejak Panjang = 56px \* 6μm = 336 m

Sensor CMOS mendeteksi radiasi beta dipancarkan oleh peluruhan radium. Pada gambar di atas Anda melihat gambar diperbesar dari jalur elektron.



Gambar 17. Pengamatan radiasi Radium

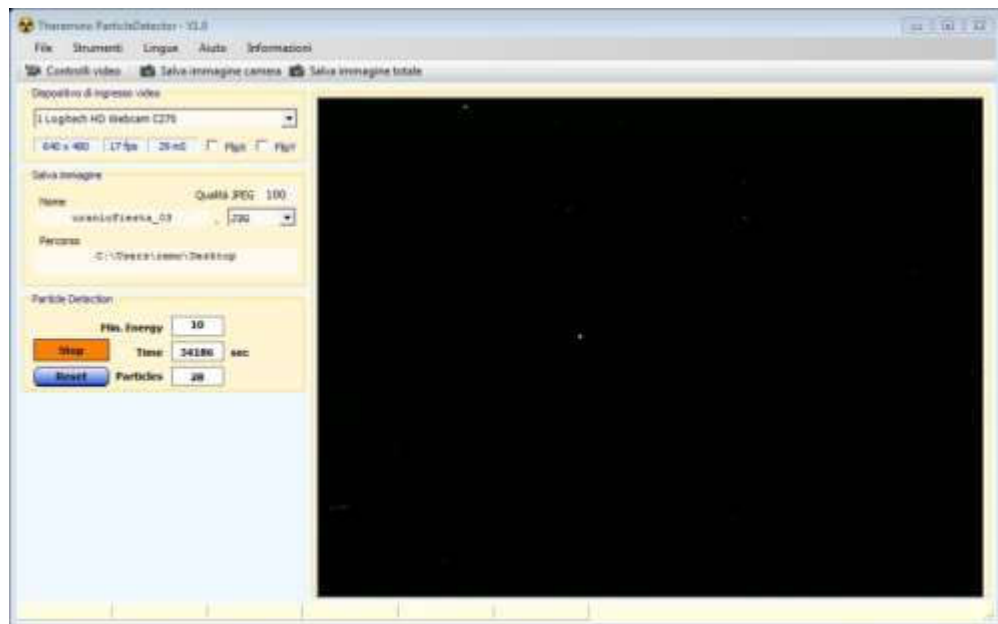
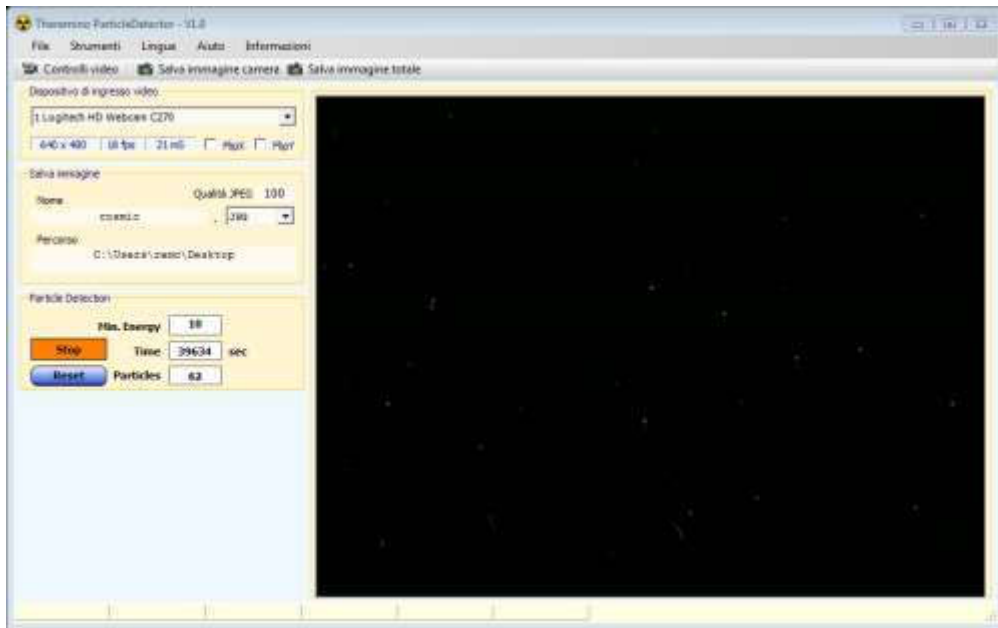
## Cosmic Rays

Dengan sensor Webcam dapat dilakukan survei dari muon kosmik. Hanya menaruhnya horisontal sehingga memaksimalkan permukaan sensitif dan mengambil eksposur yang berlangsung berjam-jam. Dua gambar di bawah relatif ke dua pengukuran:

pengukuran pertama:  $0,00156 \text{ CPS} = 0,0939 \text{ CPM}$

pengukuran kedua:  $0,00082 \text{ CPS} = 0,0492 \text{ CPM}$

Dua pengukuran setuju satu sama lain. Aliran teoritis ke permukaan  $9,45 \text{ mm}^2$ , dengan mempertimbangkan fakta bahwa "normal" aliran dari  $1 \text{ CPM}$  untuk wilayah  $1 \text{ cm}^2$ , sekitar  $0,0945 \text{ CPM}$ . Langkah-langkah yang sedikit lebih rendah dari "teori" nilai karena fakta bahwa permukaan sensitif dari sensor CMOS secara signifikan kurang dari "nilai geometris".



Gambar 18. Pengamatan 1 dan 2 radiasi kosmik

### ***Elektromagnetik Cascades***

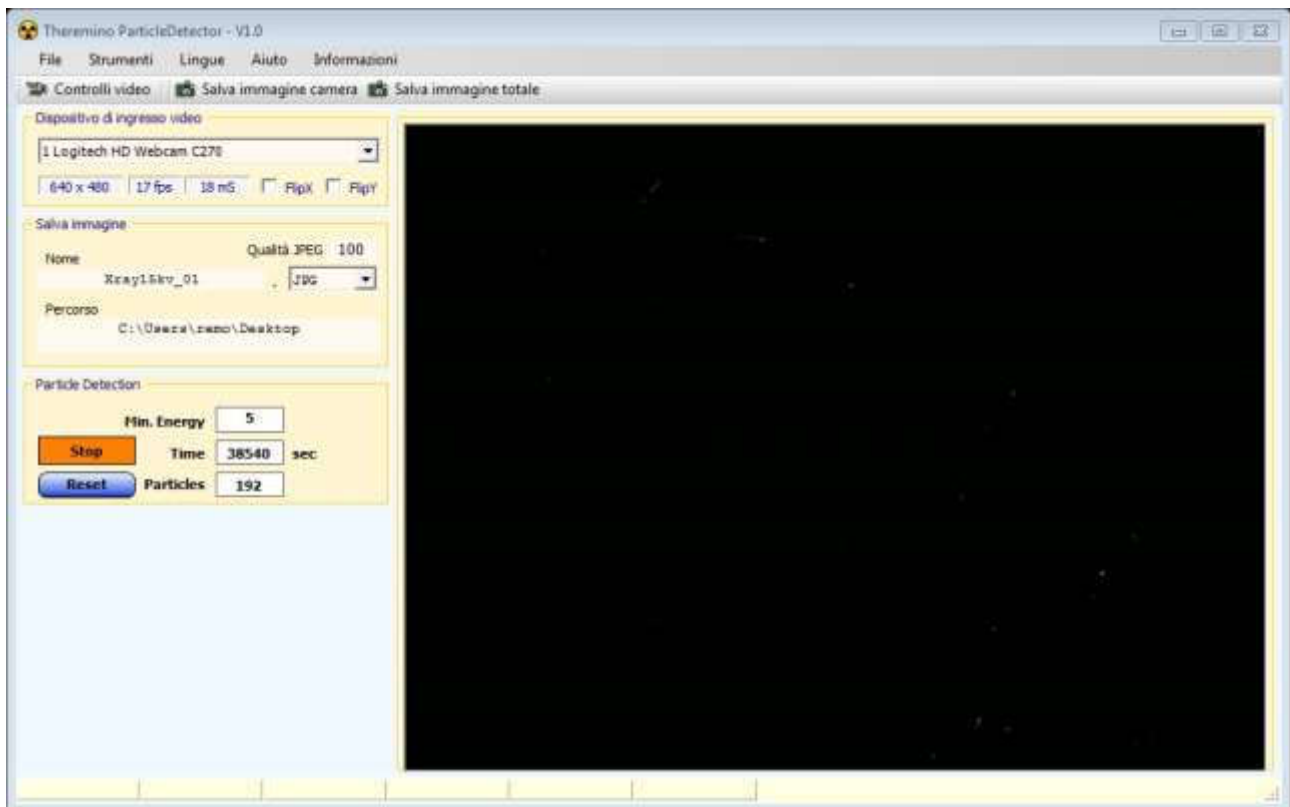
Dengan Webcam sensor Anda dapat membuat pengukuran pada kaskade elektromagnetik yang dihasilkan dalam bahan kepadatan tinggi, seperti timah. Gambar di bawah ini menunjukkan setup dari pengalaman: webcam ditempatkan di bawah lembaran timah dengan ketebalan sekitar 2 cm. "Lunak" komponen sinar kosmik berinteraksi dengan memimpin, menghasilkan partikel sekunder, elektron dan positron, yang terdeteksi oleh webcam.

Waktu = 38540s

Partikel = 192



CPS = 0,00498 - Lebih tinggi dari nilai yang diperoleh tanpa lembar memimpin



Gambar 19. Skema pengujian dan hasil pengamatan peluruhan elektromagnetik.

### **Sinar X**

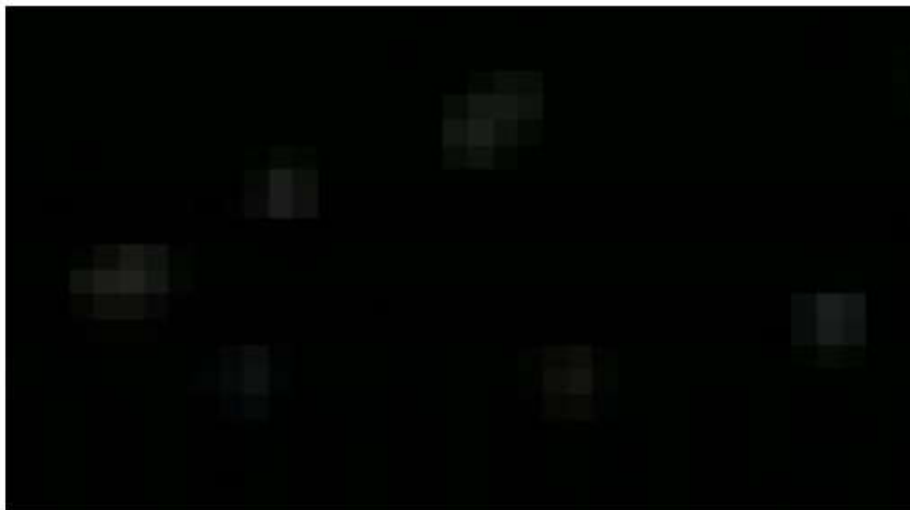
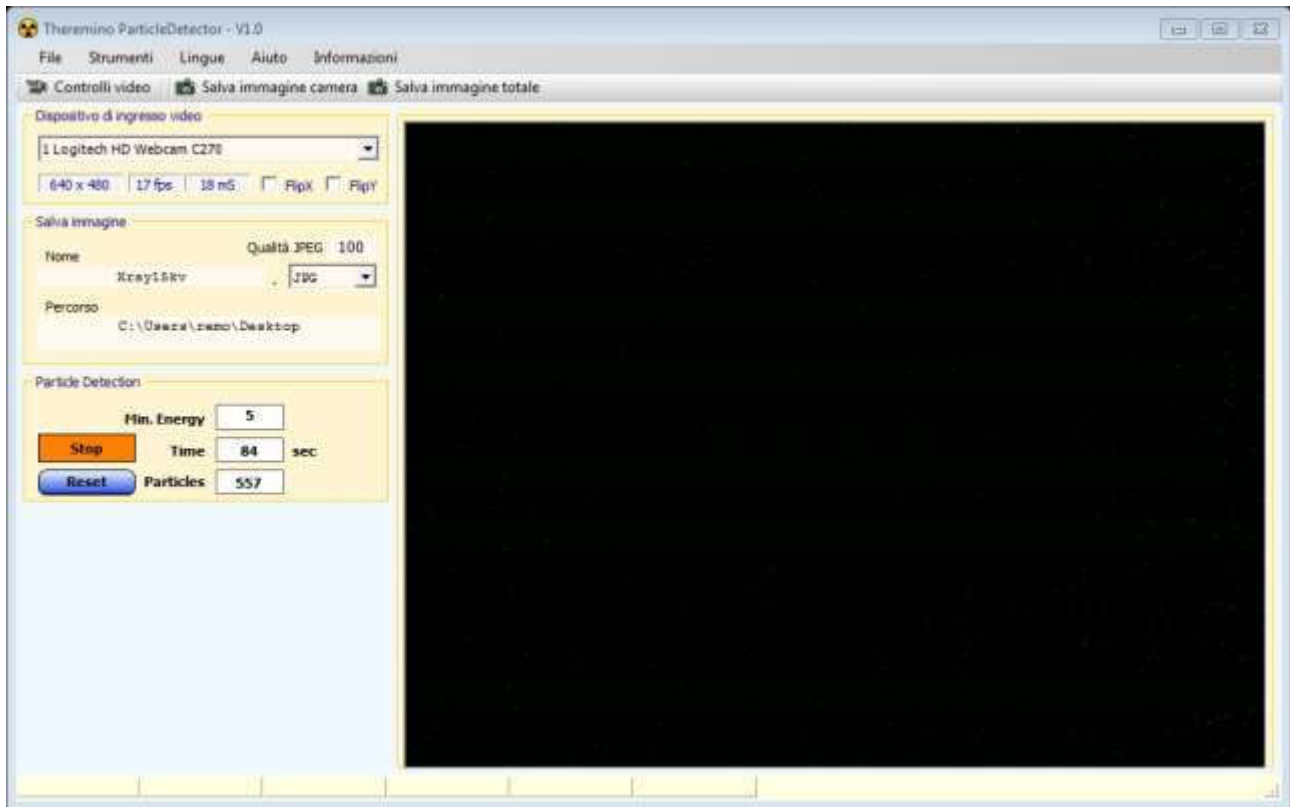
Kami menggunakan sensor Webcam untuk melakukan tes dengan generator 15kV X-ray. Dalam gambar kita melihat detail dari Cam diposisikan di depan jendela depan (berilium) dari tabung. Cam sensitif, bahkan jika dengan efisiensi yang rendah, dengan X-ray. Di bawah ini

Anda melihat detail dari beberapa piksel diaktifkan oleh foton X. Kecerahan pixel rendah karena foton rendah X energi.

Waktu = 84S

Partikel = 557

CPS = 6,6



Gambar 20 Hasilpengamatan sinar-X

## Kesimpulan

Pengujian telah menunjukkan bahwa webcam komersial dapat digunakan sebagai sederhana "biaya rendah" partikel detektor. Kepekaan terhadap partikel alpha, bagaimanapun, adalah sangat dibatasi oleh lapisan pelindung transparan dari sensor CMOS. Hapus

perlindungan ini akan membuat webcam juga sensitif terhadap radiasi alpha, tapi itu adalah operasi yang sulit yang mudah mengarah ke sensor istirahat.

webcam ini memiliki sensitivitas yang baik untuk radiasi beta lebih menembus, estimasi panjang jejak yang ditinggalkan oleh elektron yang terdeteksi oleh sensor, dapat memberikan informasi kasar pada energi partikel.

Source Type	Max Traces Length	Max $\beta$ Emission Energy
Cesium 137	120 $\mu\text{m}$	512 keV
Sodium 22	144 $\mu\text{m}$	544 keV
Strontium 90	198 $\mu\text{m}$	546 keV – 2,280 MeV
Thorium	156 $\mu\text{m}$	>1MeV
Uranium – Uraninite	240 $\mu\text{m}$	>2MeV
Uranium – Fiestaware	354 $\mu\text{m}$	>2MeV
Radium	336 $\mu\text{m}$	>2MeV

Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa cesium dan natrium elektron memancarkan beta dengan energi sekitar 500 keV yang menimbulkan jejak secara signifikan lebih pendek dari strontium, uranium, radium bahwa elektron memancarkan beta dengan energi bahkan lebih tinggi dari 2-3MeV, Haif tentu saja itu hanya murni perkiraan kualitatif. Webcam juga sensitif terhadap partikel kosmik seperti muon, namun permukaan kecil dari sensor, membatasi kemungkinan penggunaan ekstensif. Sensitivitas dari webcam radiasi gamma terbatas, mungkin karena kemungkinan kecil interaksi dalam area sensitif dari sensor CMOS. Tes dilakukan baik dengan radiasi gamma pada energi rendah (amerisium 241) dan kedua dengan sinar-X “aman” di 15KeV. Dari analisis awal tampak bahwa CMOS sensor merespon lebih baik terhadap radiasi gamma energi rendah (<100keV).