



Lodovico Lappetito
Trento (TN)

lodovicolappetito@gmail.com

Un Approccio Open Source e Low Cost per la Rilevazione dei Raggi Cosmici e per la Misura del Decadimento del Muone

ABSTRACT

This work describes the design and construction of an apparatus for the detection of cosmic rays with the main purpose of measuring the muon lifetime. The apparatus, consisting of detector, high voltage electronics, readout electronics and signal processing software, is entirely based on open and low cost components. The innovative aspect of this experimental measure, rightly considered a “classic experiment” among the modern physics experiences, is the use of technologies that are easily available at low costs, including the microcomputer Raspberry Pi with Python software, the PSoC Cypress microcontroller and the photomultiplier high voltage driver from the Theremino open project. This approach makes the construction of the apparatus within the reach of physics laboratories with limited budgets. The variety and richness of the different topics involved: particle physics, electronics, data processing software just to name a few, make this project a motivating and highly educational challenge for a group of final year high school students or even for a university physics laboratory project.

Introduzione La ricerca scientifica costa molto. Le attività sperimentali in particolare, richiedono apparecchiature sofisticate e costose. Non parliamo di ricerca di frontiera come LHC al CERN per la fisica delle particelle oppure LIGO/VIRGO per l’astrofisica che sono progetti colossali resi possibili soltanto dalla cooperazione fra le diverse nazioni. Parliamo delle normali attività di un laboratorio universitario di fisica sperimentale o di un laboratorio di liceo, ai quali, a meno di non avere a disposizione budget generosi, molte attività sperimentali, soprattutto di didattica sulla fisica moderna, sono precluse a causa del costo molto elevato - a volte ingiustificato - della strumentazione e delle apparecchiature.

Questi ultimi anni hanno però visto la nascita di molteplici progetti che vanno verso una sorta di “democratizzazione” dell’accesso a risorse hardware, software e di conoscenza. Come esempi citiamo il movimento per il software open source (*Linux*), l’elettronica in formato *open e low cost* (*Arduino*, *Raspberry Pi*, microcontrollori come il *PSoC*) e la stampa 3D. Queste iniziative hanno il grande pregio di rendere liberamente disponibili tecnologie che facilitano l’auto-costruzione e la prototipazione, ne sono un esempio i progetti che sviluppiamo all’interno dell’iniziativa *PhysicsOpenLab* [1]. Queste iniziative non possono che riflettersi anche e soprattutto nell’ambito scientifico sperimentale dove la costruzione degli strumenti e l’utilizzo dei prototipi è sempre stato il “pane quotidiano”.

Il progetto che proponiamo in questo lavoro, descritto anche in una presentazione all’interno del nostro spazio web [2], si inserisce in questo filone: si tratta di un rivelatore per raggi cosmici basato su scintillatore plastico accoppiato ad un fotomoltiplicatore.

Progetti sulla rilevazione dei raggi cosmici sono già apparsi numerose volte nella letteratura scientifica dedicata alle attività didattiche [3], citiamo in particolare il prodotto commerciale della *TeachSpin*¹, al quale ci siamo ispirati [4]. Il nostro progetto però si differenzia in quanto è stato seguito un approccio basato

¹ www.teachspin.com/muon-physics

soprattutto sulla autocostruzione e sull'utilizzo di tecnologie *open*, facilmente disponibili e a basso costo.

Come circuito di alta tensione per il fotomoltiplicatore è stato adottato il *PMT adapter* del progetto Theremino [5]. L'elettronica di lettura è limitata ad un amplificatore a transimpedenza seguito da un comparatore veloce. Il segnale viene inviato ad una scheda PSoC 5 [6] che acquisisce i segnali, ne fa una prima elaborazione e li invia ad un microcomputer *Raspberry Pi* per la registrazione, la elaborazione finale e la visualizzazione.

Il PSoC 5, con il suo clock a 50 MHz, permette una buona precisione temporale nell'acquisizione degli impulsi e questo abilita lo strumento anche alla misura del tempo di decadimento dei muoni rilevati dall'apparato che si arrestano nello scintillatore e decadono al suo interno. I componenti utilizzati sono tutti *low cost, open source* e, se possibile, autocostruiti. L'unico componente che non può essere autocostruito è la sonda del rivelatore, costituita da uno scintillatore plastico accoppiato ad un fotomoltiplicatore. Vi è però la possibilità di reperire facilmente ed a costi contenuti sia lo scintillatore che il fotomoltiplicatore sul mercato online del surplus (anche se l'accesso al mercato surplus potrebbe essere difficoltoso per una scuola).

Cenni Teorici e Storici

Il leptone μ (muone), componente principale dei raggi cosmici secondari, è una particella elementare a spin $1/2$ e massa pari a $105,65$ MeV e vita media di circa $2,2 \mu\text{s}$. I muoni sono prodotti nell'alta atmosfera principalmente dal decadimento di particelle π , a loro volta create dalle collisioni nucleari dei raggi cosmici primari con i nuclei dei gas atmosferici. Alla produzione essi sono caratterizzati da velocità relativistiche e, per via del fenomeno della dilatazione temporale, riescono a giungere fino al livello del mare [7]. Il muone è stata la prima particella elementare ad essere trovata instabile, cioè soggetta al decadimento in altre particelle. Al tempo dei primi pionieristici esperimenti di Bruno Rossi, Franco Rasetti e altri le sole altre particelle fondamentali note erano il fotone, l'elettrone, il positrone, i protoni, i neutroni ed il neutrino. Da allora dozzine di particelle ed antiparticelle sono state scoperte e la maggior parte di esse è instabile. In effetti di tutte le particelle che sono state osservate come entità isolate le uniche che vivono più a lungo dei muoni sono i fotoni, gli elettroni, i protoni, i neutroni, i neutrini e le loro antiparticelle. Anche il neutrone, quando è libero, è sottoposto al decadimento beta con una vita media di 15 minuti. È noto che il muone decade in un elettrone, un neutrino muonico ed un antineutrino elettronico, come mostrato in figura 1.

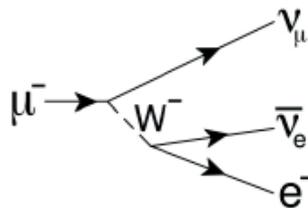


Figura 1 – Schema del decadimento del Muone in un Elettrone e due Neutrini

I tempi del decadimento del muone si descrivono matematicamente in maniera semplice. Supponiamo di avere all'istante t un numero $N(t)$ di muoni. Se la probabilità che un muone decada in un piccolo intervallo temporale dt vale λdt , dove λ è la costante che caratterizza la rapidità di decadimento del muone, allora $\tau = 1/\lambda$ è la costante di tempo del decadimento ed il numero dei muoni diminuisce nel tempo con la legge esponenziale:

$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau} \quad (1)$$

Noi però non abbiamo un gruppo di muoni del quale misurare il tasso di diminuzione in seguito al decadimento. Invece rileviamo il decadimento muonico a partire dai muoni che entrano nel rivelatore essenzialmente ad istanti casuali, tipicamente uno per volta. Anche in questo caso comunque la distribuzione del tempo di decadimento ha un semplice andamento esponenziale dello stesso tipo descritto dalla relazione (1). Dato che il tempo di decadimento è distribuito con legge esponenziale non è importante che il muone del quale registriamo il decadimento sia stato prodotto nel rivelatore piuttosto che nell'alta atmosfera: infatti una funzione esponenziale appare sempre la stessa sia che venga esaminata nei primi o negli ultimi istanti, la sua "forma esponenziale" non cambia nel tempo.

**Metodo di
Misura del
Tempo di
Decadimento**

Il rivelatore, costituito da scintillatore plastico e PMT è schematizzato in figura 2. Il rivelatore produce molti segnali impulsivi ogni secondo. Molti di questi segnali sono dovuti al rumore elettronico del dispositivo stesso ed alla radioattività ambientale, questi segnali vengono filtrati dall'elettronica di lettura come verrà spiegato nel paragrafo successivo che descrive l'apparato sperimentale. I segnali rimanenti sono nella maggior parte dovuti ai muoni che attraversano da parte a parte il cristallo scintillatore e vengono rilevati e conteggiati dal nostro apparato. Ma la frazione più interessante di questi eventi è quella dovuta ai muoni che entrano nello scintillatore con energia cinetica molto minore del valore medio. Questi muoni perdono la loro energia, cedendola allo scintillatore, in quantità sufficiente a far sì che vengano completamente arrestati all'interno del cristallo stesso. Arrestandosi, depositano nello scintillatore l'ultima parte della loro energia cinetica, che tipicamente vale, per il materiale di cui è composto lo scintillatore [8,9], circa 40 MeV. Questo processo di rallentamento genera quindi un primo impulso luminoso che viene rilevato dal PMT.

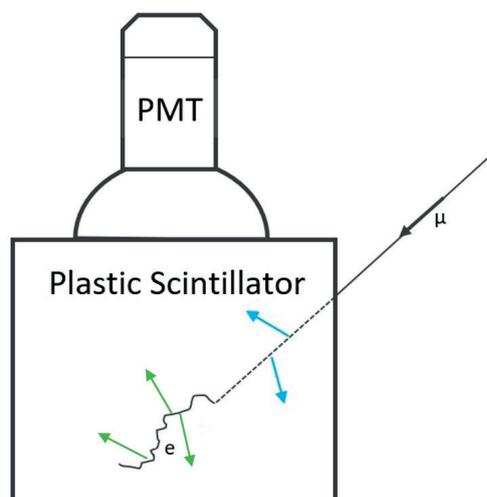


Figura 2 – Schema che mostra la generazione di due impulsi luminosi (freccie azzurre e freccie verdi) usati nella determinazione della vita media muonica. Il primo impulso di luce proviene dal muone rallentato (linea tratteggiata) mentre il secondo proviene dall'elettrone prodotto dal decadimento (linea ondulata)

I muoni che si arrestano nello scintillatore, vi rimangono ancora per un tempo relativamente lungo, dell'ordine di microsecondi. Ciascuno di essi decade in un

elettrone (un positrone se si tratta di un antimuone) più un neutrino ed un anti-neutrino. Tutta l'energia a riposo del muone (106 MeV) appare come energia cinetica delle tre particelle. Mediamente, l'elettrone (o il positrone) riceve un terzo di questa energia, circa 35 MeV, mentre ai due neutrini rimane l'energia restante, ma i neutrini non sono rilevabili dal nostro strumento. Invece l'elettrone, essendo una particella carica, causa ionizzazione durante il suo movimento all'interno dello scintillatore, producendo così un secondo impulso luminoso. Anche questo secondo impulso di luce viene rilevato dal PMT e viene utilizzato per misurare l'intervallo temporale tra i due impulsi. La distribuzione degli intervalli temporali tra due successivi impulsi per un insieme di decadimenti muonici è la grandezza fisica che ci interessa per la misura del tempo di decadimento.

Apparato Sperimentale

L'apparato sperimentale è essenzialmente costituito da un rivelatore a scintillazione, da un'elettronica che effettua l'amplificazione e la filtrazione degli impulsi prodotti dal PMT e da un microcontrollore PSoC che registra gli impulsi, ne fa il conteggio e misura l'intervallo temporale fra due impulsi successivi. I dati vengono inviati via interfaccia seriale ad un microcomputer *Raspberry Pi* per la successiva elaborazione e visualizzazione dei dati.

La descrizione dettagliata dell'apparato sperimentale è contenuta nella versione integrale dell'articolo presente sul sito online della rivista. In questa sede ci limitiamo a riportare, nelle figure 3, 4 e 5 alcune immagini dell'apparato sperimentale.



Figura 3 – PMT accoppiato allo scintillatore

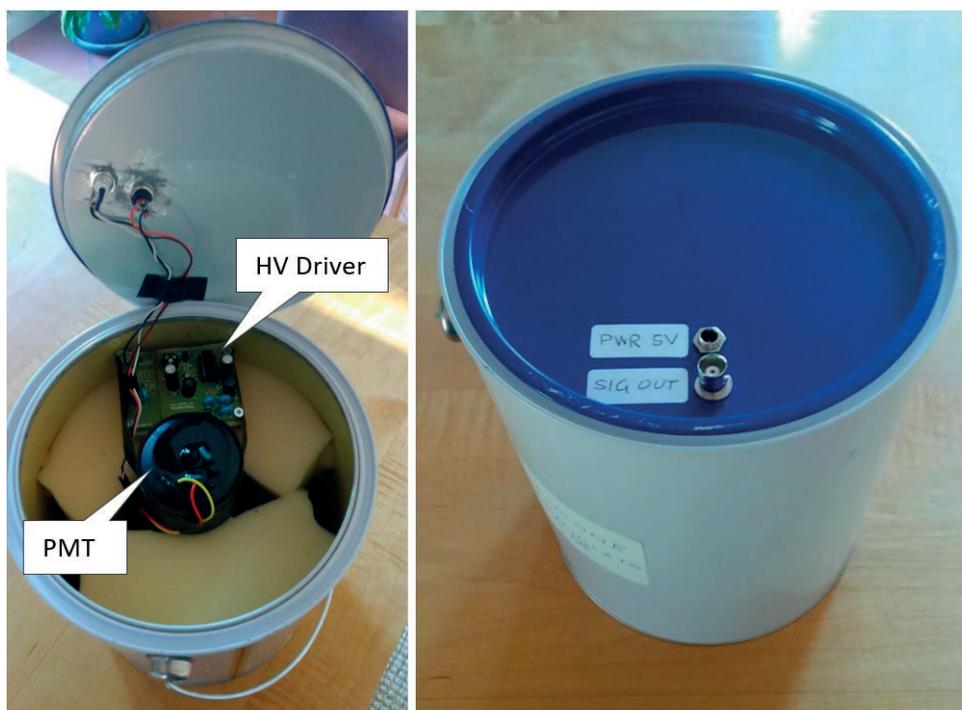


Figura 4 – Detector ultimato

Collegando l'oscilloscopio all'uscita del rivelatore è possibile osservare gli impulsi prodotti dal fotomoltiplicatore. Modificando la base dei tempi ed incrementando la persistenza del display, è semplice verificare "ad occhio", la presenza degli impulsi prodotti dal passaggio dei muoni ed i relativi impulsi prodotti invece dagli elettroni del decadimento. Questi ultimi sono in numero minore, dato che solo una piccola percentuale di muoni decade all'interno dello scintillatore, e rispetto agli impulsi muonici hanno ampiezza leggermente minore e sono tipicamente collocati a poche centinaia di nanosecondi dall'impulso muonico che li ha originati, come mostrato in figura 6.

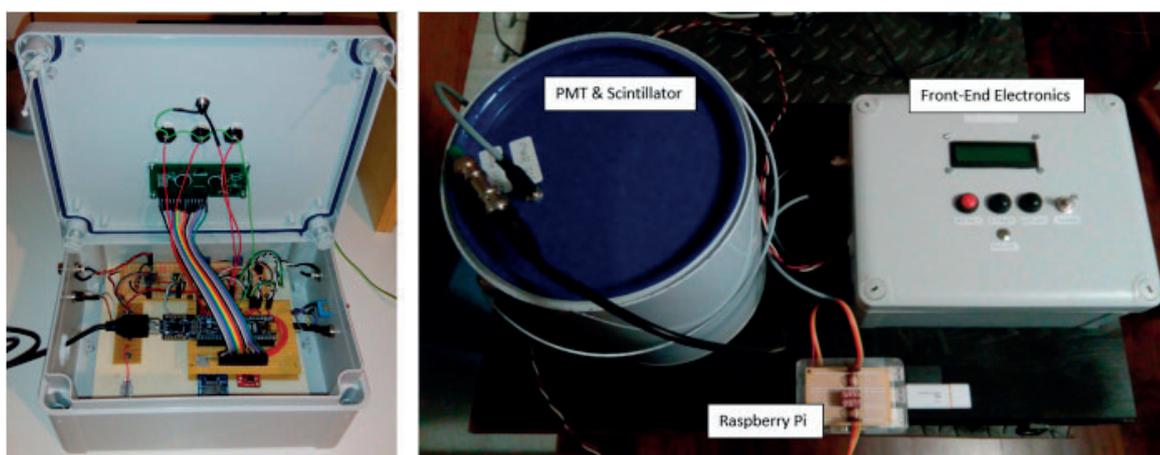


Figura 5 – Apparato completo

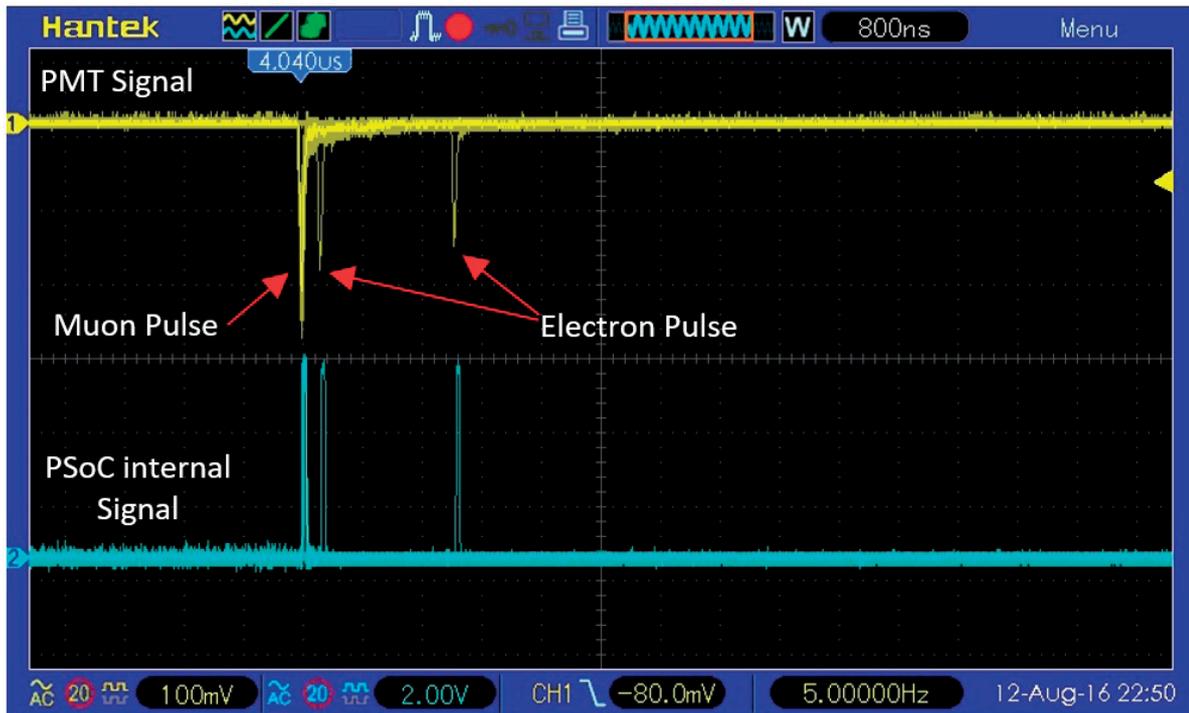


Figura 6 – Impulsi Muonici ed Elettronici

Risultati delle Misurazioni

Nella misura che riportiamo la “presa dati” è durata oltre 10 giorni, con un tasso medio di 0.4 eventi al minuto, ed ha permesso di raccogliere 9906 eventi. L’istogramma con i dati raccolti è mostrato in figura 7. L’intervallo temporale massimo acquisito è 20 μs ed è stato suddiviso in 200 bin, ognuno dei quali ampio 0,1 μs , i primi 6 bin (0,6 μs) sono stati esclusi dalla statistica perché intervalli temporali così brevi sono affetti da incertezza maggiore. Sulla base di questi dati è stata determinata la funzione esponenziale che meglio approssima i dati raccolti. Nella funzione esponenziale di approssimazione è stato inserito anche un *offset* in modo da tenere conto degli eventi temporalmente vicini ma non correlati fra loro che producono un rumore di fondo:

$$f(x) = \text{off} + ke^{-t/\tau} \quad (2)$$

La costante di tempo dell’esponenziale di *best fit* (che corrisponde al tempo di vita del muone) vale:

$$\tau = 2,11 \pm 0,04 \mu\text{s}$$

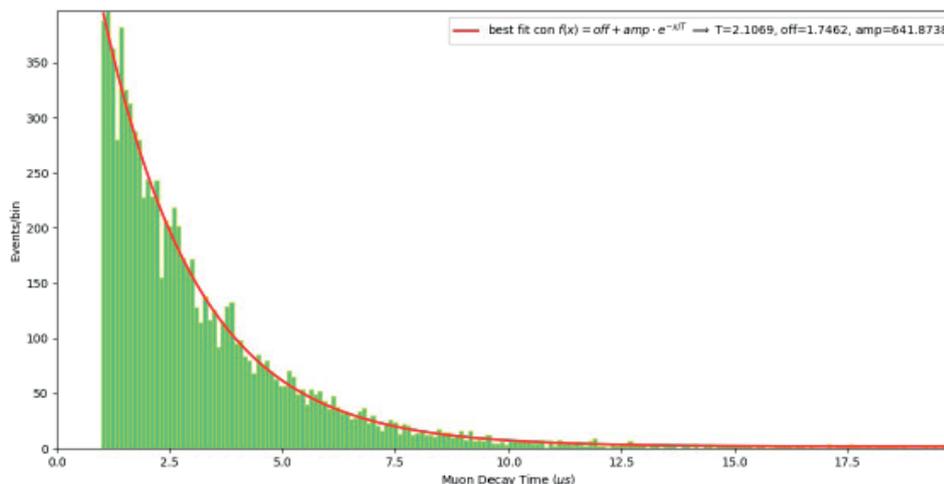


Figura 7 – Istogramma e funzione esponenziale di approssimazione dei dati

Conclusioni L'apparato per la rilevazione dei raggi cosmici descritto nel presente lavoro ha permesso la misura del tempo di decadimento del muone con precisione significativa. L'apparato è stato realizzato seguendo un approccio "a basso costo" sia nella parte *hardware* che nella parte *software* e questo ha permesso di contenere notevolmente i costi della realizzazione, stimati inferiori ai 500 €. Non si tratta però di un progetto semplice in quanto sono richieste conoscenze sia nel campo dell'elettronica che nel campo del *software*. Con una buona dose di pazienza l'apparato per la rilevazione dei muoni può comunque diventare un progetto annuale alla portata di un laboratorio liceale. Le ricadute educative sarebbero molteplici: fisica delle particelle, elettronica, *coding*, analisi dei dati. Aggiungiamo inoltre la possibilità di eseguire, sempre con lo stesso apparato, numerosi altri esperimenti, ad esempio la misura del flusso muonico a diverse altitudini e la verifica sperimentale della dilatazione temporale prevista dalla teoria della relatività ristretta.

Ringraziamenti Desideriamo ringraziare il Prof. T.E. Coan ed il Prof. J. Ye [3,4] per il loro lavoro sulla rilevazione dei muoni, che ha ispirato il presente progetto. Ringraziamo anche il collega Alessandro Ebranati per il contributo allo sviluppo del codice *Python*.

Abbreviazioni usate nel testo PSOC: *programmable system on chip*, sistema programmabile su singolo chip
PMT: *photomultiplier tube*, tubo fotomoltiplicatore

Bibliografia e Sitografia [1] physicsopenlab.org (2021)
[2] physicsopenlab.org/wp-content/uploads/2016/01/RilevatoreMuoni_ITA.pdf (2021)

- [3] T. COAN, T. LIU AND J. YE, A Compact Apparatus for Muon Lifetime Measurement and Time Dilation Demonstration in the Undergraduate Laboratory, *American Journal of Physics*, **74**, 161 (2006)
- [4] T.E. COAN AND J. YE, *Muon Physics*, www.tau.ac.il/~lab3/PARTICLES/muonlifetime.pdf (2021)
- [5] PMT_Adapter_V3.3, www.theremino.com/blog/gamma-spectrometry (2021)
- [6] Programmable System-on-Chip (PSoC) PSoC 5lp CY8C58LP Family Datasheets, *Cypress Semiconductor Corporation*, (2020)
- [7] B. ROSSI, *High Energy Particles*, Prentice-Hall Inc. New York, (1952)
- [8] BC-412 Datasheet, Saint Gobain
- [9] D.E. GROOM, N.V. MOKHOV AND S. STRIGANOV, Muon stopping power and range, *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, **76**, No.2 July (2001)



Dettagli spettacolari di stelle morenti nella Nebulosa dell'Anello del Sud

Ngc 3132 è una cosiddetta nebulosa planetaria, ovvero una nuvola di gas in espansione che circonda una stella morente. Ha un diametro di quasi mezzo anno luce, si trova a circa duemila anni luce dalla Terra e qui la vediamo osservata con due diversi strumenti di Webb: sopra nel vicino infrarosso con *NirCam*, sotto in medio infrarosso con *Miri*. (CREDIT: NASA, ESA, CSA e STScI)

L'immagine nel vicino infrarosso mostra una brillante stella bianca al centro con lunghi picchi di diffrazione circondata da grandi ovali verde acqua e arancio, che sono detriti espulsi dalla stella centrale invisibile. L'altra nel medio infrarosso mostra la natura binaria del sistema con due stelle al centro molto vicine l'una all'altra, una rossa e l'altra azzurra.

