



MIRACLE

cosMIC RAYS spaceLAB EXPERIMENT

MISURA DEL FLUSSO DI RAGGI COSMICI E SEPARAZIONE DELLE COMPONENTI CARICA E NEUTRA

ADRIANO DEL VINCIO

VIOLA FLORIS

DANIELE PASSARO

DOMENICO RICCARDI

MARCO RIGGIRELLO

NICCOLÒ TORRITI

ANTOINE VENTURINI

7 Maggio 2021

1 INTRODUZIONE

I raggi cosmici (RC) sono particelle elementari e nuclei provenienti dall'universo che bombardano costantemente l'atmosfera terrestre. I RC sono solitamente classificati in due categorie: i *primari*, ovvero le particelle cosmiche che incidono direttamente nell'alta atmosfera, tipicamente composti da protoni, particelle alpha e in parte minore da nuclei leggeri; i *secondari*, prodotti dagli sciami adronici ed elettromagnetici generati dalle interazioni dei primari con l'atmosfera, e tipicamente composti da muoni, mesoni, adroni leggeri e nuclei. I RC sono noti fin dai primi decenni

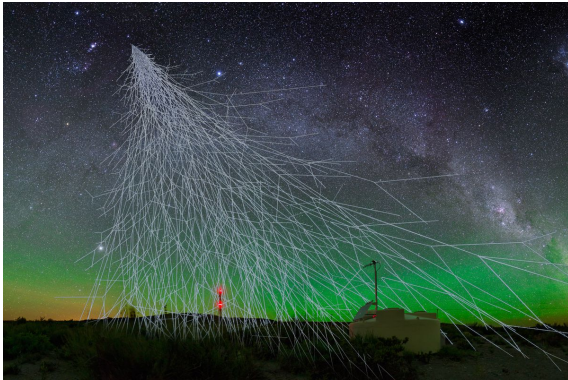


FIGURA 1: Sciami prodotto da un raggio cosmico primario.

del '900 e la loro fisica è stata studiata approfonditamente nel corso degli anni, ma rimane comunque tuttora un interessante campo di ricerca. Le misure di interesse che vogliamo effettuare con il nostro esperimento sono:

1. **Misura di flusso verticale dei RC carichi in funzione dell'altitudine** - Il flusso verticale di raggi cosmici è atteso dipendere dalla quota: l'interazione adronica dei primari con l'atmosfera (Figura 2) dipende criticamente dalla densità del mezzo. Stimiamo che il massimo della produzione di secondari avvenga attorno ai 20km. Questa misura è di duplice interesse: correlazione con l'altitudine di formazione delle nuvole, rivelando un possibile ruolo dei RC nella loro formazione (si veda l'esperimento

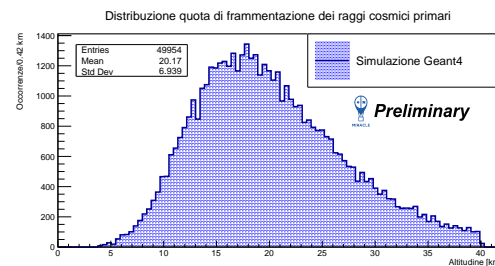


FIGURA 2: Simulazione GEANT4 della quota di frammentazione di un fascio di protoni energetici nell'atmosfera.

CLOUD @CERN); stima dei danni da radiazione indotti sull'elettronica, importante per stimare i *single event upset* nella strumentazione di missioni spaziali;

2. **Misura di flusso orizzontale dei RC carichi in funzione dell'altitudine** - Ci si aspetta che la componente orizzontale dei RC sia fortemente soppressa, ma questo dipende dallo spessore trasverso di atmosfera attraversato, dunque dalla quota. Questa misura non è presente in letteratura e può apportare un contributo originale alla descrizione dei RC.

Le precedenti misure di flusso assumono maggiore interesse se integrate con informazioni quali pressione atmosferica, umidità, tempo di arrivo e coordinate GPS; queste ultime in particolare permettono di correlare eventi in quota con eventi a terra, rivelabili con un telescopio analogo a quello che verrà montato sul pallone, già a disposizione nel dipartimento di Fisica, di cui potremo disporre sul sito di lancio. In questo modo si potrebbero identificare eventi rari di *sciami estesi*¹ (figura 1).

3. **Misura del flusso di neutroni termici in funzione dell'altitudine** - I neutroni vengono prodotti in seguito a reazioni di spallazione nucleare tra i raggi cosmici primari e i nuclei di azoto e ossigeno. Lo spettro energetico risulta avere un picco per energie di 100 keV, come si

¹particelle prodotte da una singola interazione di un raggio cosmico primario con l'atmosfera che coprono una vasta superficie geografica.

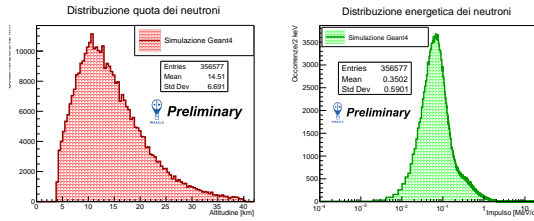


FIGURA 3: Simulazione GEANT4 della quota e spettro energetico iniziale dei neutroni prodotti. Si noti come la distribuzione in quota segue quella dei protoni primari (Fig. 2).

osserva dalla Figura 3. Attraverso processi di scattering multiplo l'energia cinetica dei neutroni diminuisce, fino ad energie inferiori ad 1 eV. Neutroni con tale range di energie sono definiti termici. A queste energie diventano importanti i fenomeni di assorbimento, in particolare si sottolinea il seguente: $n + {}^{14}\text{N} \longrightarrow {}^{14}\text{C} + p$, in cui da un nucleo di azoto si forma un particolare isotopo del carbonio. La reazione descritta regola la produzione e abbondanza relativa del carbonio-14 in natura. Dalla misura del flusso di neutroni termici possiamo ricavare il rate di produzione del ${}^{14}\text{C}$ in funzione della quota. La misura è importante perché l'attività legata al carbonio-14 è uno dei metodi più diffusi di datazione di reperti organici. Nonostante esistano dei modelli del flusso di neutroni in funzione della quota, non abbiamo trovato in letteratura una misura diretta per altitudini maggiori di 5 km.

4. **Caratterizzazione del modulo rivelatore micromegas** - Un prototipo di micromegas, cioè di un particolare modello di rivelatore a gas, sarà realizzato in collaborazione tra l'INFN ed il CERN appositamente per il nostro esperimento.

Per la prima volta al mondo una micromegas si troverà ad operare in ambienti estremi di temperatura e pressione; caratterizzarne le prestazioni in funzione dell'altitudine sarà determinante per dimostrare la possibilità di impiego di tale strumento in future missioni spaziali dedicate allo studio della radiazione di bassa energia. In particolare, nel campo dello Space Weather, vi è grande interesse nella costruzione di un sistema di monitoraggio della magnetosfera/ionosfera terrestre attraverso la rivelazione di atomi neutri di bassa energia (nel range 1-100 keV) per poter studiare in dettaglio l'attività geomagnetica che tanto influenza il funzionamento delle apparecchiature elettroniche.

2 APPARATO SPERIMENTALE

Tutte le misure di flusso passano attraverso la conoscenza e lo studio dettagliato dell'efficienza dei singoli detector che costituiscono il nostro apparato. Tale studio sarà effettuato a terra presso i laboratori dell'INFN come operazione preliminare al volo, presumibilmente nelle settimane precedenti al lancio.

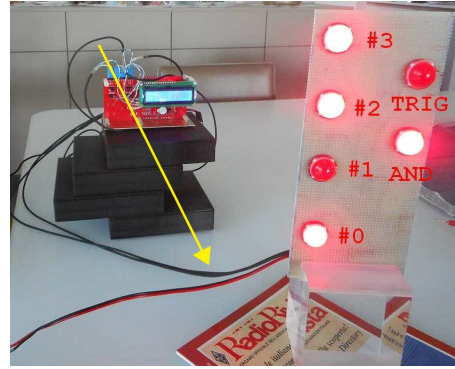


FIGURA 4: Test di funzionamento dell'apparato scintillatore.

La rivelazione della componente carica avviene attraverso due diversi apparati: due sistemi basati su scintillatori e una *micromegas*. Entrambi i detector vengono sviluppati appositamente e gentilmente finanziati dall'INFN.

2.1 SCINTILLATORE

La prima classe di detector sfrutta il *meccanismo di scintillazione* per rivelare le particelle cariche che attraversano un materiale plastico emettendo fotoni raccolti da due SiPM (Silicon PhotoMultiplier) incollati sulle pareti laterali. In particolare, i SiPM utilizzati saranno del tipo NUV (sensibili ultravioletto) della FBK². Questo sistema scintillatore-SiPM viene letto da un'elettronica di front-end essenzialmente suddivisa in due parti: PCB (che comprende l'amplificatore e il comparatore, oltre che il circuito di alimentazione dei SiPM) e CPU (XLR8 di Alorium con FPGA). Tale apparato è già stato assemblato come mostrato in Figura 4.

2.2 MICROMEGAS

La micromegas (micro-mesh gaseous structure, MM) è un contatore a valanga a facce piane parallele che consiste in regione di deriva (~ 5 mm) e di una moltiplicativa posta tra la micromesh e gli elettrodi di read-out (~ 128 μm). Quando una particella carica attraversa il detector produce elettroni di ionizzazione nella regione di deriva/conversione, che successivamente si spostano verso la zona moltiplicativa attraverso i buchi nella griglia della mesh, dove vengono amplificati.

La micromegas che si implementerà è unica nel suo genere perché ottimizzata anche per la rivelazione degli ENA (atomi neutri di bassa energia) che vengono ionizzati a seguito dell'attraversamento di un foglio di carbonio posto sulla finestra di rivelazione della MM. Viste le dimensioni e i pesi non sarà possibile equipaggiarla con un read-out standard, ma sarà letto soltanto il segnale della mesh, corrispondente all'OR di tutte le strip e questo non ci permetterà di fare misure di posizione. Tuttavia, questo tipo di lettura è sufficiente per effettuare misure di flusso e di efficienza della camera stessa. Rispetto ad una micromegas standard,

²<https://advansid.com/technology/silicon-photomultipliers>

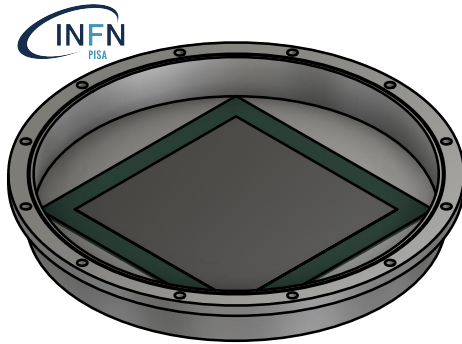


FIGURA 5: Proiezione della micromegas e del supporto appositamente progettate per il nostro esperimento.

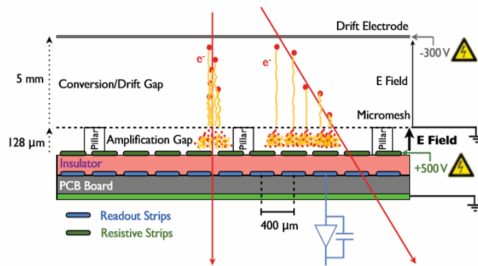


FIGURA 6: Schema concettuale di una "bulk micromegas". Le dimensioni del gap di amplificazione ed i valori di tensione sono ottimizzati per la rivelazione di muoni di alta energia.

realizzate in dimensioni anche di diversi m^2 per i grandi esperimenti del CERN come ATLAS, grande attenzione sarà dedicata nella costruzione della meccanica di supporto con lo scopo di permettere al detector di operare senza un sistema di flussaggio di gas per tutta la durata del volo del pallone.

2.3 RIVELATORE DI NEUTRONI

Essendo particelle neutre, i neutroni non possono essere rivelati con *detectors* che sfruttano il principio della ionizzazione, perciò una strumentazione dedicata è necessaria. I rivelatori di neutroni sono basati sulla rivelazione di prodotti secondari (fotoni, particelle cariche) dalle reazioni nucleari indotte dall'urto del neutrone su elementi tipo ^{10}B o 6Li . Questo sistema di rivelazione è efficace solo per i neutroni termici, e proprio per questo è ideale per la nostra misura sul flusso di neutroni. Proponiamo due sistemi di rivelazione: essi hanno pregi e difetti che richiedono un approfondimento maggiore per scegliere quale utilizzare nell'esperienza (*che svolgeremo qualora il progetto venisse approvato*).

Un sistema utilizza come rivelatore il dosimetro CT007-T della GammaGuard. Il dosimetro comunica tramite Bluetooth con una applicazione per Android, dove i dati (compresi data e coordinate GPS) vengono conservati. Il salvataggio dei dati viene eseguito attraverso comandi manuali alla fine dell'acquisizione, perciò c'è la necessità di un cellulare



FIGURA 7: A sinistra: foto del sistema CT007-T + cellulare; a destra: disegno del rivelatore Scionix.

che rimanga funzionante in volo e dopo l'atterraggio. Non poter salvare automaticamente i dati è il difetto principale di questo sistema.

La seconda proposta prevede di utilizzare un rivelatore della ditta Scionix che accoppia un rivelatore di fotoni a un cristallo di iodurio di 6Li drogato con europio. Il sistema viene letto da un circuito elettronico simile a quello già montato per il rivelatore di particelle cariche (e sfrutta parte di quella elettronica). Essendo realizzato su misura, questo rivelatore è potenzialmente più affidabile per i nostri scopi; tuttavia questo sistema risulta più complesso del primo, che è già pronto all'uso.

2.4 LAYOUT DELL'APPARATO E FRAME

Per la realizzazione dell'esperimento è necessario realizzare una struttura di supporto in cui poter fissare i differenti rivelatori. Le linee guida per il progetto sono state essenzialmente tre: 1) Leggerezza della struttura; 2) Resistenza termica; 3) Facilità di realizzazione. Per soddisfare questi tre punti si è deciso di realizzare una struttura stampata in 3D; il materiale che più si adatta alle richieste è il PETG, un materiale meccanicamente e termicamente resistente e che inoltre è facilmente stampabile. Da esperimenti eseguiti su questo materiale si è visto che con un trattamento termico ("thermal annealing") in cui si raggiungono i $-40^\circ C$, il materiale perde solamente il 2-3% delle caratteristiche meccaniche. Per quanto riguarda la temperatura massima, la temperatura di transizione vetrosa del materiale è $80^\circ C$, oltre la quale il materiale passa a perdere le proprie caratteristiche di rigidità ed assume un comportamento gommoso. Dai dati di precedenti voli si è visto che le temperature più alte vengono raggiunte solamente localmente dai componenti elettronici, pertanto anche se si dovessero superare i $70^\circ C$ non sarebbe un problema per la resistenza strutturale dei supporti. In Figura 8 è riportato il supporto meccanico assemblato con i rivelatori. Si è deciso di utilizzare una configurazione a *tetto* per minimizzare peso e spazio occupato, senza rinunciare a misure di flusso orizzontale (coincidenza tra i due scintillatori) e verticale (scintillatori in anticoincidenza tra loro + scintillatori in coincidenza con la micromegas). In questa configurazione, il rivelatore di neutroni viene alloggiato sotto la micromegas.

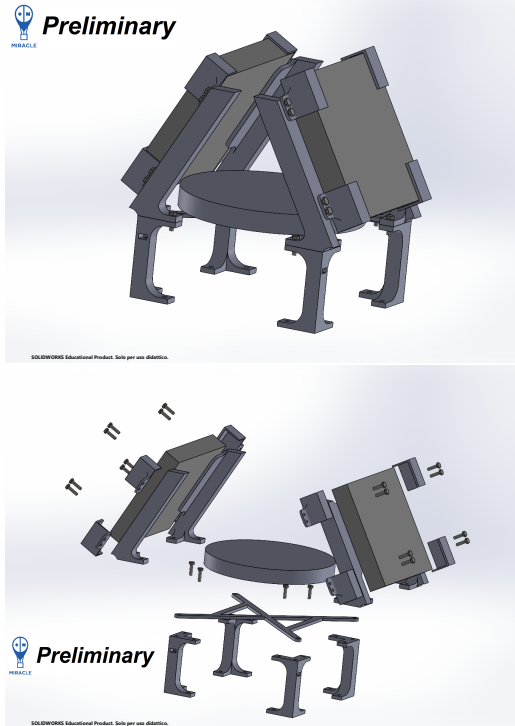


FIGURA 8: Sopra: frame di sostegno con rivelatori montati; sotto: vista esplosa. In obliquo vengono allocati gli scintillatori, mentre al centro viene posizionata la micromegas; sottostante la micromegas, viene posizionato il rivelatore di neutroni.

2.5 SURRISCALDAMENTO E COIBENTAZIONE

L'apparato per la rivelazione dei RC è molto sensibile alla temperatura, e in particolare questa ne influenza l'efficienza. Salendo in quota, è noto che la temperatura varia nel range $-56^{\circ}\text{C} \div 15^{\circ}\text{C}$. Per minimizzare tale variazione si è deciso di coibentare l'apparato con una struttura in polistirolo.

L'elettronica che si vuole utilizzare può facilmente surriscaldarsi (in particolare la FPGA), e ciò può comportare un effetto non controllabile sulla strumentazione. Per minimizzare questo effetto si è pensato di separare fisicamente l'elettronica dall'apparato rivelatore. Inoltre, la strumentazione stessa potrebbe subire malfunzionamenti a causa dell'elevata temperatura: è in corso una valutazione sulla possibilità di inserire delle strips di rame che permettano di dissipare il calore all'esterno dell'elettronica.

2.6 DIMENSIONI, PESO E CONSUMI

L'apparato descritto ha le seguenti dimensioni : **20cm×20cm×30cm**.

Si è stimato che il peso complessivo della strumentazione (rivelatori+frame+elettronica+alimentazione) è di ≈ 2900 g. Dettagli sul peso di ciascun componente sono riportati in Tabella 1. Riguardo il consumo in potenza: esso è trascurabile per i rivelatori, mentre si è stimato che l'elettronica consuma complessivamente ~ 1.2 Ah a 5 V. Assumendo un tempo di volo di 3 ore, riteniamo che un PowerBank da 7.2 Ah o maggiore sia sufficiente per alimentare la strumentazione.

3 SOMMARIO

Abbiamo messo a punto un sistema di rivelazione *multi-purpose* adatto al volo su pallone. Per soddisfare le richieste tecniche ed effettuare tutte le misure di nostro interesse, l'esperimento sfrutta elettronica *ad hoc* e rivelatori alla frontiera tecnologica sviluppati dall'INFN. Prima dell'eventuale lancio testeremo il sistema in laboratorio: questa potrà essere per noi l'occasione di condurre un esperimento di fisica delle particelle, seguendolo in tutte le fasi, dalla progettazione fino all'analisi dati. Le sfide di questo progetto richiedono la collaborazione tra diverse aree del sapere scientifico. La possibilità (e la necessità) di lavorare fianco a fianco fra fisici ed ingegneri per la realizzazione di questo ambizioso progetto di ricerca è un valore aggiunto importante della nostra proposta. Non solo l'esperimento si gioverà della sinergia delle nostre competenze: noi stessi ricaveremo il massimo da questa collaborazione.

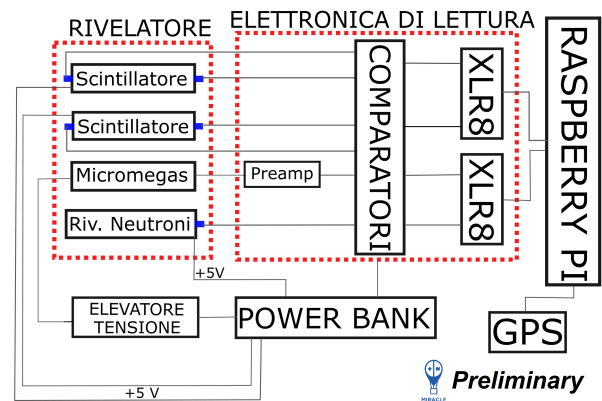


FIGURA 9: Schematica riassuntiva dell'apparato rivelatore, dell'elettronica Front-End e dell'elettronica di acquisizioni dati.

RINGRAZIAMENTI E REFERENTI SCIENTIFICI

Ringraziamo i ricercatori dell'INFN della sezione di Pisa (Morsani, Paoletti e Pilo) e il Professore G. Lamanna per averci aiutato nello sviluppo della proposta. Il loro interesse e la loro disponibilità (che va ben oltre la strumentazione fornitaci, dandoci la possibilità di fruire di officina, servizio elettronico e laboratori) sono ciò che ci permetterà di *prendere il volo*.

PRESENTAZIONE DEL GRUPPO

Adriano Del Vincio — Laurea triennale in fisica e attualmente iscritto al corso di laurea magistrale in fisica medica. Il mio ruolo all'interno del gruppo è legato all'analisi dati ed ho contribuito a definire la misura proposta del flusso di neutroni in alta atmosfera ed il suo importante legame con la produzione di carbonio 14, impiegato nelle misure di datazione. Inoltre ho collaborato alla realizzazione della simulazione dell'interazione di raggi cosmici con l'atmosfera, attraverso l'uso del programma GEANT4.

Viola Floris — Laureata in Fisica presso l'Università degli Studi di Perugia. Ho sviluppato una tesi triennale sulla misura dell'energia in Fisica delle Particelle mediante calorimetri, approfondendo l'esperimento NA62 al SPS (Cern). Attenta ai dettagli ed amante delle sfide, mi sono appassionata agli aspetti più sperimentali della fisica delle particelle visitando i tunnel del Cern. Attualmente frequento il Corso di Laurea Magistrale in *Interazioni Fondamentali* all'Università di Pisa, dove, grazie al corso di laboratorio, sto portando avanti misure sui raggi cosmici, sul decadimento del muone e sull'annichilazione del positrone. Do il mio contributo al progetto con l'esperienza acquisita proprio in queste misure.

Daniele Passaro — Sono uno studente iscritto al corso di laurea magistrale in Fisica presso l'Università di Pisa, curriculum di "Interazioni Fondamentali". Il mio percorso formativo è incentrato sulla fisica delle particelle, in particolare dando grande attenzione ai metodi sperimentali necessari per l'attività di ricerca in fisica delle alte energie. Riguardo l'attività sperimentale, ho acquisito esperienza seguendo un totale di 6 corsi di laboratorio: 5 durante il corso di laurea triennale in Fisica presso UniSa, incentrati su analisi dati, elettronica digitale e analogica, microelettronica, magnetismo e simulazioni numeriche; uno durante il corso di laurea magistrale, dedicato alla fisica delle interazioni fondamentali ed in particolare sui raggi cosmici.

Nel progetto mi occupo delle simulazioni Monte Carlo, realizzate tramite il toolkit di simulazione avanzata GEANT4 (©CERN), e collaboro alla caratterizzazione generale della strumentazione.

Domenico Riccardi — Sono iscritto al corso di laurea magistrale in Fisica presso l'Università di Pisa, curriculum di "Interazioni Fondamentali". I miei interessi sono rivolti, principalmente, alla fisica sperimentale delle alte energie e all'analisi dei dati. L'attività sperimentale svolta nel corso della laurea triennale, frequentando tre laboratori, e in quella magistrale, con il laboratorio d'interazioni fondamentali, mi hanno permesso di approfondire aspetti e problematiche nell'ambito della realizzazione e dell'analisi dei risultati di esperimenti scientifici. La mia passione per la fisica delle alte energie, mi ha portato ad un lavoro di tesi triennale incentrato sullo studio dell'efficienza di ricostruzione dei muoni nel decadimento del mesone B_c^+ su simulazioni Monte Carlo prodotte dall'esperimento

CMS ad LHC. Nell'esperimento concepito mi occupo dello studio dell'efficienza dell'apparato, che è una variabile fondamentale per le misure di flusso che si vogliono ricavare, e più in generale sulla sua caratterizzazione.

Marco Riggirello — Sono uno studente magistrale del dipartimento di Fisica dell'Università di Pisa iscritto al curriculum di *Fisica delle Interazioni Fondamentali*. Per la laurea triennale, conseguita nel 2020, ho presentato una tesi sulla misura della violazione dell'universalità leptonica con l'esperimento CMS in cui ho effettuato un'analisi volta a ottimizzare la precisione della misura di $R(J/\psi)$. Sono molto interessato alle sfide sperimentali della fisica delle alte energie: durante il mio percorso triennale ho seguito numerosi corsi su argomenti di elettronica e analisi dati che sto approfondendo nella prosecuzione magistrale.

Per il nostro progetto mi sono occupato del *design* dell'apparato e, se sarà effettuato il lancio, contribuirò all'analisi dei dati raccolti.

Niccolò Torriti — Studente di Ingegneria Meccanica e membro dell'E-Team Squadra Corse dell'Università di Pisa. Date le conoscenze acquisite durante il corso di studi sia nell'usare software di modellazione, quali SolidWorks, sia per eseguire verifiche strutturali e il mio particolare interesse per le stampe 3D, mi occupo della modellazione CAD e della stampa 3D della struttura di supporto in cui poter fissare tutti i componenti necessari alle rilevazioni in atmosfera.

Antoine Venturini — Sono uno studente della laurea magistrale in Fisica presso l'Università di Pisa, iscritto al curriculum di Interazioni Fondamentali. Ho coltivato l'interesse per la fisica delle particelle sin dagli anni della triennale, laureandomi (nel 2020) con una tesi sulla misura del decadimento raro del bosone di Higgs in $\mu^+\mu^-$ di LHC @CERN, e frequentando poi la stessa estate la Summer School tenuta in Giappone dalla collaborazione per l'esperimento Belle 2. Insieme ai corsi teorici seguono numerosi corsi dedicati agli aspetti sperimentali della ricerca in fisica delle alte energie, sia all'analisi dati che alla strumentazione per la rivelazione delle particelle. Ho alle spalle l'esperienza di quattro corsi di laboratorio, dedicati all'analisi dati e all'elettronica analogica e digitale. In particolare, nell'ultimo anno ho condotto esperienze sulla rivelazione di raggi cosmici per mezzo di rivelatori a scintillazione e fototubi.

Nell'ambito del nostro progetto, mi occupo del sistema per la rivelazione dei neutroni e dell'analisi dei dati raccolti (se tutto andrà bene).

TABELLA 1: Tabella riassuntiva con componenti e materiale da acquistare, con costi e peso. I due totali si riferiscono ai due differenti *set-up* per il rivelatore di neutroni. **Entrambe le soluzioni soddisfano i limiti di spesa e di peso.**

	Materiale	Costo [€]	Peso [g]
Rivelatore particelle cariche	Lastra scintillatrice con 2 SiPM × 2	Gentile concessione INFN (valore forfettario > 1000 €)	504 ciascuna
	Scheda XLR8	76	-
	Componenti per PCB	50	-
	Cavi USB (USB mini-B → USB-A) × 2	3	-
	GPS: modulo Sparkfun GPS module – Copernicus II DIP (GPS-11-858)	62	-
	Antenna GPS: GPS Cti	15	-
	GPS_MOD25+2		
		209 + IVA	1080
Micromegas	Micromegas+gas+circuito alimentazione	Gentile concessione INFN (valore forfettario > 2500 €)	-
	Ibrido per bias e preamp: CAEN WA1422H400F2 A1422H400F2 - Charge Preamplifier Module, 400mV/MeV gain, Cdet<200pF	180	-
	Connettori per vuoto	50	-
	Scheda XLR8	76	-
	Componenti per PCB	50	-
	Cavi USB (USB mini-B → USB-A) × 2	3	-
	GPS: modulo Sparkfun GPS module – Copernicus II DIP (GPS-11-858)	62	-
	Antenna GPS: GPS Cti	15	-
	GPS_MOD25+2		
		436 + IVA	900
Rivelatore per neutroni I	CT007-T Thermal Neutron Detector	850 c.ca	140
	Blackview BV4900 Pro Rugged Smartphone (2020)	140	260
		990 + IVA	400
Rivelatore per neutroni II	Rivelatore Scionix	1095	-
	Componenti per PCB	50	-
		1145 + IVA	400 c.ca
Frame di supporto	Plastica per la stampa in 3D	50	300 c.ca
Alimentatori	Power Bank Ansmann 10 Ah, 5V, 3 porte USB	50 c.ca	220
	TOTALE	1735 oppure 1885 + IVA	2900