

# SHAPE 1 - Breve analisi dei dati rilevati dal lancio di un pallone sonda

*Letizia Bonomi*

*dell'Associazione di volontariato «Il Cercalibro»*

---

## Indice

1	Obiettivi . . . . .	3
2	Materiali e metodi . . . . .	4
2.1	Materiali utilizzati . . . . .	4
2.2	Metodi . . . . .	5
3	Analisi dei dati . . . . .	5
3.1	Stima dell'incertezza su altitudine, velocità e accelerazione . . . . .	5
3.2	Analisi del moto . . . . .	6
3.3	Analisi della temperatura e della pressione atmosferica . . . . .	10
3.4	Radiazioni ionizzanti . . . . .	12
	3.4.1 Validazione dell'interpolazione lineare . . . . .	12
	3.4.2 Risultati ottenuti dal contatore Geiger . . . . .	12
4	Conclusioni . . . . .	15

## 1 Obiettivi

Shape (Student High Altitude Project for Education) è un progetto nato all'interno di un'associazione di volontariato di Medesano, «Il Cercalibro», con lo scopo di inviare un carico utile nella stratosfera terrestre tramite pallone-sonda per effettuare esperimenti scientifici<sup>1</sup>, coinvolgendo gli Istituti Scolastici Gadda di Fornovo, Bertolucci, Ulivi, Marconi di Parma. Gli studenti di questi Istituti Scolastici che hanno partecipato al progetto, hanno lavorato con un obiettivo comune, raggiunto grazie alla cooperazione, alla competenza specifica delle diverse scuole coinvolte e all'apporto delle risorse territoriali messe in rete attraverso il volontariato sociale. Gli studenti, supervisionati dai docenti di ogni materia specifica, e dal gruppo di coordinamento Shape de Il Cercalibro, hanno studiato la legislazione di volo, assemblato il carico utile da inviare nello spazio, ideato, proposto e approntato gli esperimenti da installare su questo. Hanno, infine, lanciato e recuperato la sonda e raccolto i dati da analizzare.

Il presente documento vuole essere un riassunto dei risultati trovati, per appassionati di «oggetti volanti» e non, per chi è del mestiere ma anche per chi ritiene la fisica indigesta e, naturalmente, per tutti i docenti che, in futuro, volessero proporre nelle ore di fisica l'analisi di un moto «reale» e, perchè no, ripetere l'esperienza con i propri studenti.

---

<sup>1</sup> Per scaricare i dati sperimentali raccolti, e/o conoscere la nostra associazione, puoi collegarti a [http://associazionecercalibro.it/wordpress/?page\\_id=1483](http://associazionecercalibro.it/wordpress/?page_id=1483)

## 2 Materiali e metodi

### 2.1 Materiali utilizzati

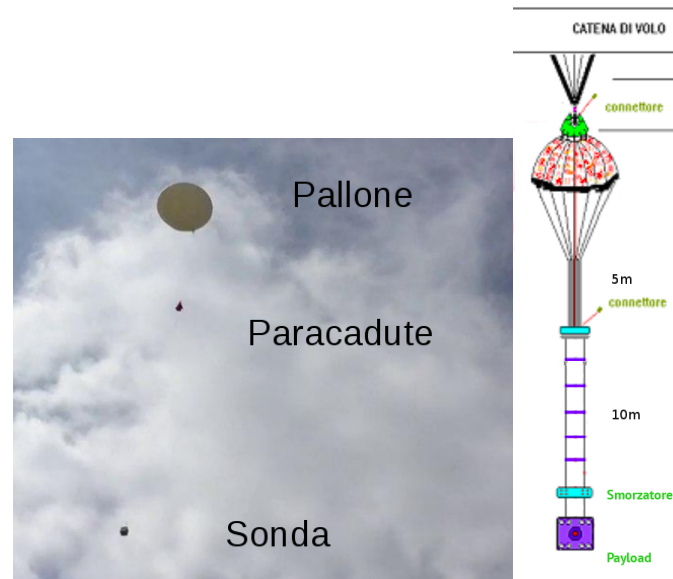


Fig. 1: Pallone-sonda

La catena di volo è mostrata in figura 1.

Sono stati utilizzati un pallone aerostatico Stratoflight 1600, riempito di elio e connesso a paracadute, smorzatore di volo e payload (sonda) tramite cavo in Kevlar 3 mm da 400 kg, moschettoni da 350 kg e girella da 500 kg. Il payload, in polistirolo, e dalla massa di 1,2 kg, è stato equipaggiato con videocamera GoPro Hero4, sensore di temperatura e di pressione atmosferica, due tracker GPS TK 102 (accuratezza nominale  $\pm 5$  m), dataLogger Strato3 e contatore Geiger GMC-300E Plus, posizionato all'interno della sonda.

Il dataLogger ha una frequenza di campionamento di un campione ogni due secondi, e registra orario UTC, coordinate GPS, velocità orizzontale, temperatura interna ed esterna alla sonda, pressione, umidità, altitudine, carica della batteria.

Il contatore Geiger ha un range di rilevazione compreso tra 0,25 MeV e 3,50 MeV per la radiazione  $\beta$ , e compreso tra 0,03 MeV e 3,00 MeV per la radiazione X- $\gamma$ . Il campionamento di registrazione è di un campione ogni secondo.

## 2.2 Metodi

Le seguenti analisi si riferiscono al lancio del pallone-sonda avvenuto presso la Corte di Giarola (PR), (lat:44.740515 long:10.174370) alle ore 16.45 del 20 maggio 2017. La sonda è atterrata nei pressi di Crognolo (RE) (lat:44.50870 long:10.37191).

Il pallone è stato riempito con una quantità di  $He$  pari a  $9,3 m^3$ , calcolata tramite l'ausilio di un calcolatore di burst [1], in modo da scoppiare ad una quota di 33 km.

Per le seguenti analisi ci si è avvalsi di OriginPro 8.0, ed in particolare delle sue funzioni di fitting<sup>2</sup>, interpolazione<sup>3</sup> e calcolo differenziale.

L'intervallo temporale analizzato varia dal minuto 14.32 UTC al minuto 17.32 UTC del dataLogger. Tra l'orario registrato dal contatore Geiger, e quello registrato dal dataLogger vi è uno sfasamento temporale di due ore e due minuti.

I dati registrati dal contatore Geiger sono stati sommati sull'intero minuto (CPM = conteggi per minuto), data la natura stocastica dei fenomeni d'interazione coinvolti, e non sono stati corretti con il tempo morto del rivelatore.

Per correlare i dati rilevati dal Geiger e dal dataLogger è stato necessario eseguire un'interpolazione lineare dei valori di altitudine e di pressione a 181 punti dei 5401 dati rilevati dal dataLogger, a partire dalle ore 16:30 del contatore Geiger (in concomitanza con le ore 14:32 UTC del dataLogger) fino alle ore 19.30 del contatore Geiger (in concomitanza con le ore 17.32 UTC del dataLogger).

## 3 Analisi dei dati

### 3.1 Stima dell'incertezza su altitudine, velocità e accelerazione

Dai dati rilevati dal GPS nel tratto finale, quando ormai la sonda è atterrata, è stato possibile stimare l'incertezza di cui è affetto il dataLogger nella determinazione dell'altitudine, calcolando la deviazione standard  $\sigma_A$  su 400 valori registrati. Si ottiene un valore di  $\sigma_A$  pari a 9 m che, per semplicità, viene assunto come valore costante per l'incertezza sull'altitudine durante il moto; tuttavia, l'incertezza da attribuire alla maggior parte dei GPS destinati ad uso non professionale può essere anche quattro volte superiore per quanto concerne l'individuazione dell'altitudine [2]. Successivamente, dai valori dell'altitudine sono stati ricavati da Origin velocità ed accelerazione verticali, tramite funzione differenziale. Per lo stesso intervallo di 400 valori calcolati è stata stimata una  $\sigma_v$  pari a  $0,5 \frac{m}{s}$  per la velocità e una  $\sigma_a$  pari a  $0,3 \frac{m}{s^2}$  per l'accelerazione, che vengono assunte come incertezze per queste due grandezze.

---

<sup>2</sup> Fittare: trovare l'equazione che meglio approssima una serie di dati sperimentali

<sup>3</sup> Interpolare: metodo per individuare nuovi punti del piano cartesiano a partire da un insieme finito di punti dati

## 3.2 Analisi del moto

La figura 2 mostra i grafici di altitudine, velocità e accelerazioni verticali in funzione del tempo, dai quali si evincono le seguenti considerazioni:

- Il pallone sonda raggiunge la quota massima in un'ora e 44 minuti circa di volo. Dopo circa 16 minuti dalla partenza, la sonda sale con velocità verticale variabile tra  $4 \frac{m}{s}$  e  $8 \frac{m}{s}$ . Analizzando il grafico dell'altitudine in funzione del tempo, viene eseguito un fit lineare per il moto di salita (figura 4), trovando una velocità media di ascesa di  $(5,8 \pm 0,5) \frac{m}{s}$ , cioè pari a  $20,8 \frac{km}{h}$  (approssimazione di moto verticale uniforme).

- Raggiunta la quota massima, pari a  $(37501 \pm 9)m$ , il pallone scoppia, ed inizia il moto di caduta verso il basso. L'accelerazione di gravità teorica, calcolata come  $g = G \frac{M_{Terra}}{h^2}$ , alla quota  $h$  di 37000 m, risulta essere pari a  $9,7 \frac{m}{s^2}$ ; dal grafico dell'accelerazione, si evince che la sonda è soggetta per qualche secondo ad un'accelerazione di  $(9,9 \pm 0,3) \frac{m}{s^2}$ , raggiungendo una velocità massima di circa  $(79,1 \pm 0,5) \frac{m}{s}$  (quindi  $285 \frac{km}{h}$ ) dopo circa 12 secondi di caduta. Il valore di  $g$  trovato rispecchia quindi quello teorico entro l'incertezza sperimentale.

Dal grafico di figura 5a, si evince che nei primi due minuti di discesa la sonda cade con una velocità media di  $202 \frac{km}{h}$ . Nel grafico, la velocità è negativa nel tratto di discesa, in quanto si tratta di moto retrogrado: rispetto al sistema di riferimento scelto, con asse della quota positiva verso l'alto, la sonda torna indietro. Lungo la discesa, la sonda incontra l'attrito dell'aria, che inizia a frenare il moto di caduta, facendo aprire il paracadute.

- Per quanto riguarda gli ultimi 5 minuti di caduta, dal tempo  $t = 8992 s$ , il grafico è con buona approssimazione di nuovo una retta: questo accade quando la forza peso uguaglia la forza di attrito viscoso, e la velocità «limite» raggiunta è costante. In questo ultimo tratto, il fit di figura 5b, mostra per gli ultimi 5 minuti di caduta una velocità limite (con buona approssimazione costante) pari a  $(4,9 \pm 0,5) \frac{m}{s}$  (cioè  $17,6 \frac{km}{h}$ ). Il tempo di caduta della sonda è pari a circa 48 minuti.

Il grafico di figura 3 illustra, con le approssimazioni fatte, la velocità verticale per diversi momenti del moto.

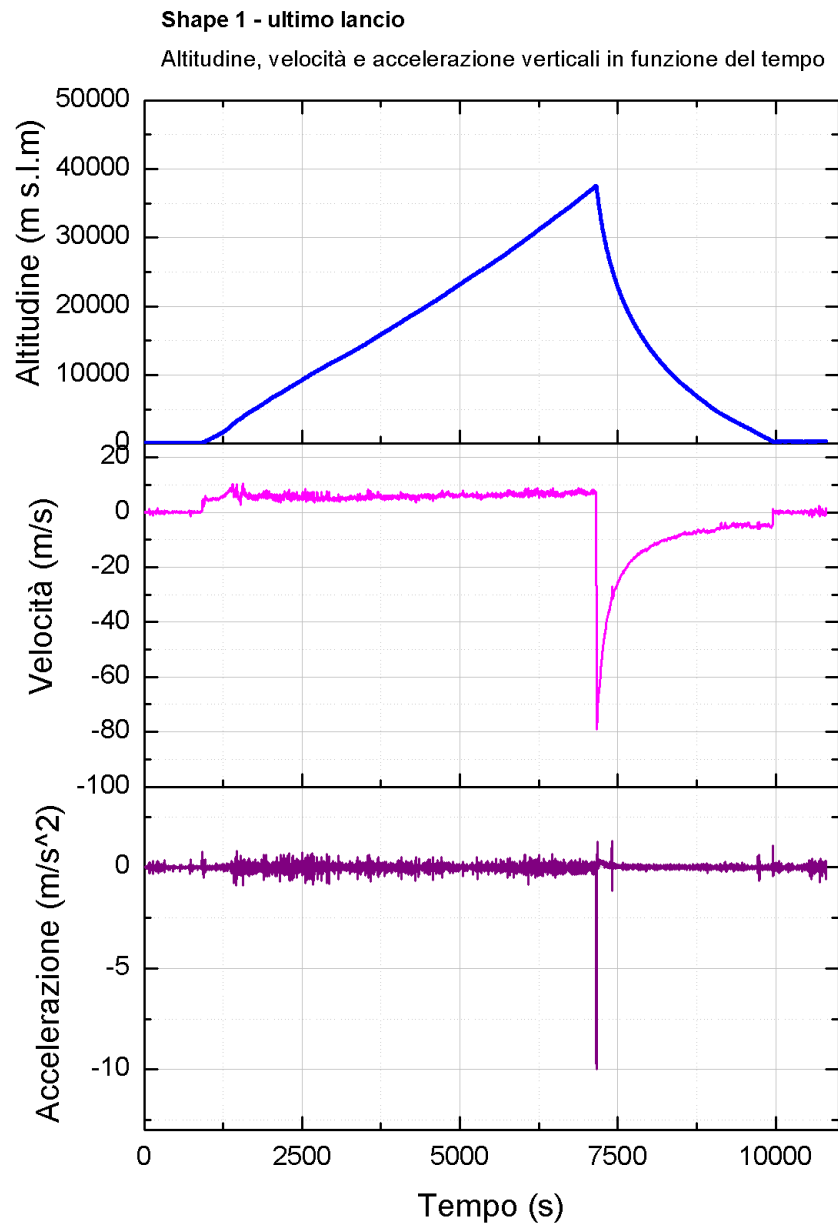


Fig. 2: Grafici di altitudine, velocità ed accelerazione verticali in funzione del tempo

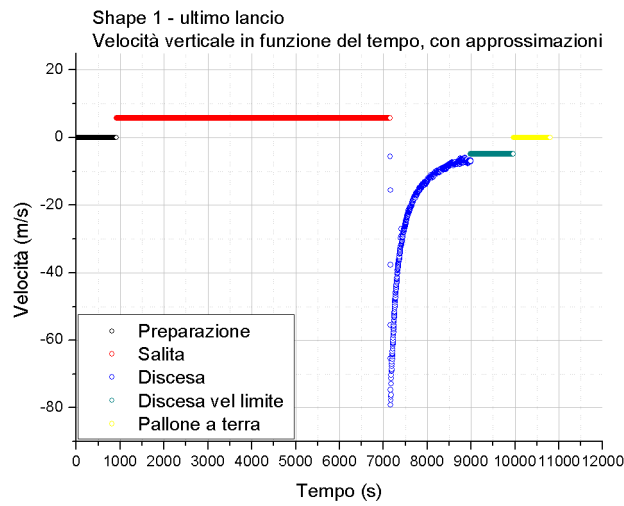


Fig. 3: Approssimazione della componente verticale della velocità nei vari tratti del moto

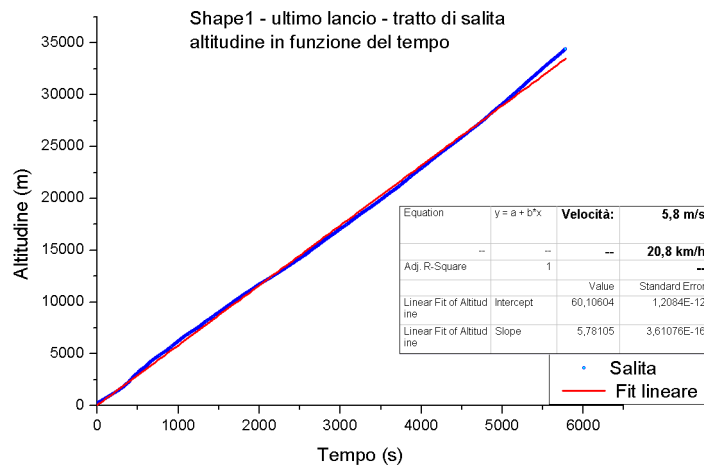
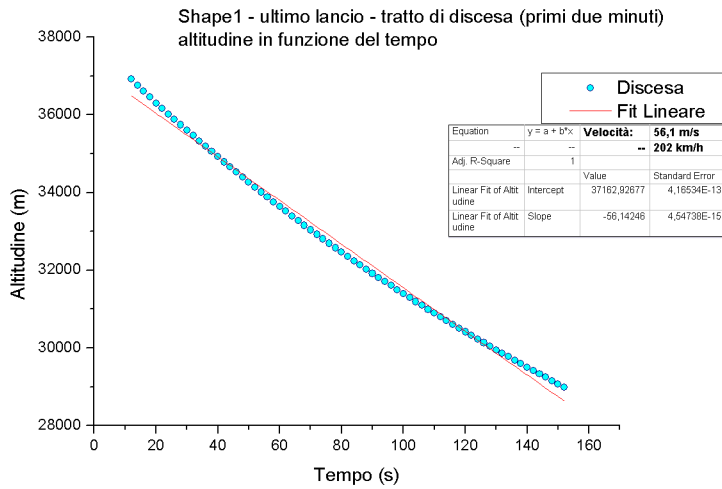
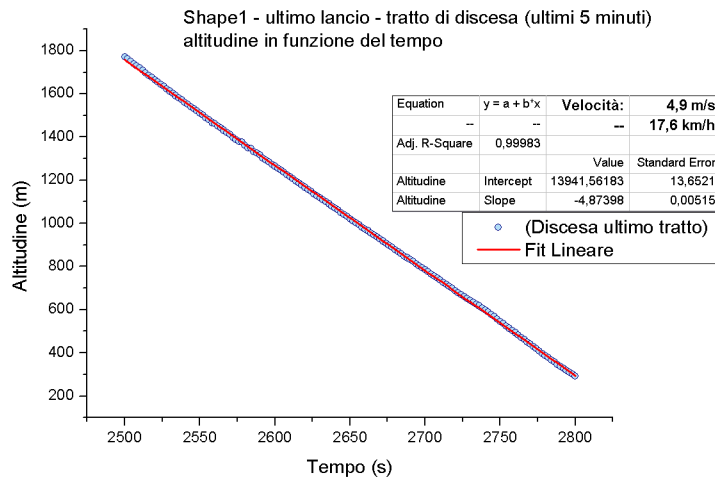


Fig. 4: Moto di salita





(a) Primi due minuti di caduta

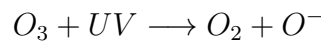


(b) Discesa, tratto finale

Fig. 5: Tratti del moto di discesa della sonda

### 3.3 Analisi della temperatura e della pressione atmosferica

La pressione  $p$  e la temperatura  $T$ , atmosferiche, sono state graficate in funzione dell'altitudine in figura 6 e in funzione del tempo in figura 7. Si può vedere come la temperatura diminuisca nella troposfera, fino a circa 18 km di altitudine, registrando un valore minimo di  $-44,0^{\circ}\text{C}$ , e torni a crescere nella stratosfera, oltre i 18 km di altitudine, fino a  $+1,8^{\circ}\text{C}$ , con una escursione di  $45,8^{\circ}\text{C}$ ; questo fenomeno si ritrova anche in letteratura [3]: infatti, i raggi ultravioletti (UV) emessi dal Sole dissociano le molecole di ozono  $O_3$ , presenti nella stratosfera, secondo la reazione esotermica



producendo un innalzamento della temperatura atmosferica.

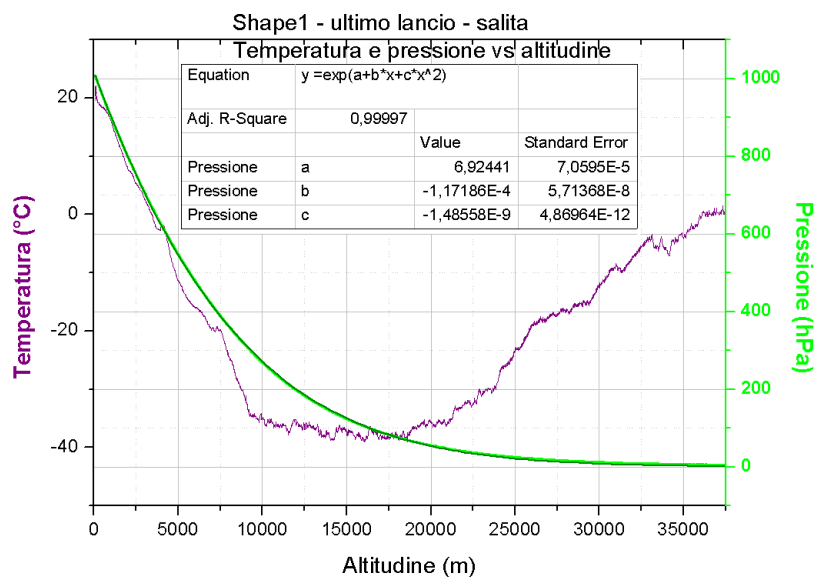


Fig. 6: Pressione e temperatura atmosferiche in funzione dell'altitudine, fino alla quota massima

Come mostra anche il grafico di figura 6, la pressione atmosferica, espressa in  $hPa$ , decresce con l'altitudine, in modo repentino fino ai 15-20 km di quota, per poi assestarsi ad un valore prossimo a zero verso i 30 km di quota. Il grafico è stato fittato con una curva esponenziale del tipo  $y(x) = Ae^{(bx+cx^2)}$ . I valori dei parametri trovati risultano  $A = 1017 hPa$ ,  $b = -1,2 \cdot 10^{-4} m^{-1}$ ,  $c = -1,5 \cdot 10^{-9} m^{-2}$ , con coefficiente  $R^2$  corretto pari a 0,99.

Pertanto, l'equazione  $p(h) = 1017e^{(1,2 \cdot 10^{-4}h - 1,5 \cdot 10^{-9}h^2)}$  sembra descrivere in modo opportuno la curva trovata.

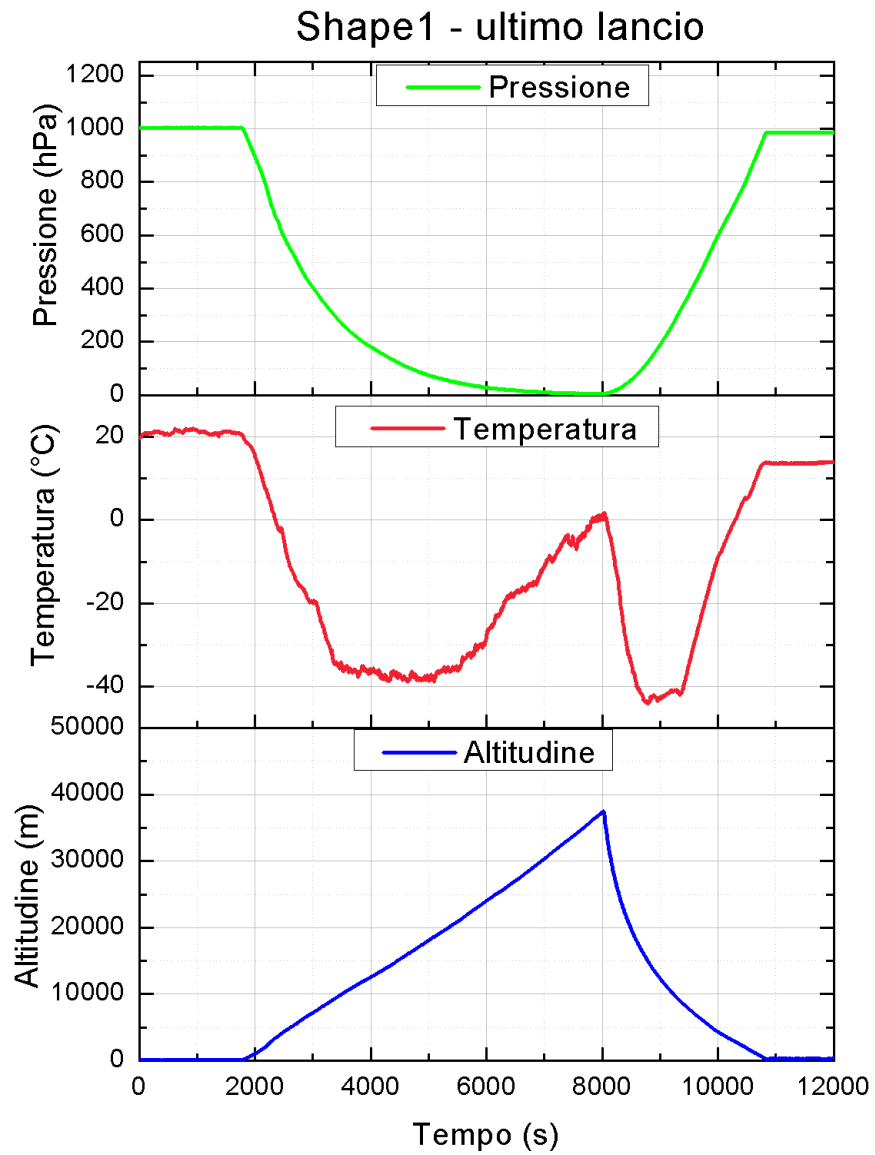


Fig. 7: Pressione, temperatura ed altitudine in funzione del tempo

## 3.4 Radiazioni ionizzanti

### 3.4.1 Validazione dell'interpolazione lineare

Come spiegato nella sottosezione 2.2, per confrontare i dati rilevati dal Geiger e dal dataLogger, è stato necessario eseguire una interpolazione lineare dei dati registrati dal dataLogger. Dai grafici di figura 8 si può vedere come l'interpolazione lineare venga eseguita in modo corretto da Origin.

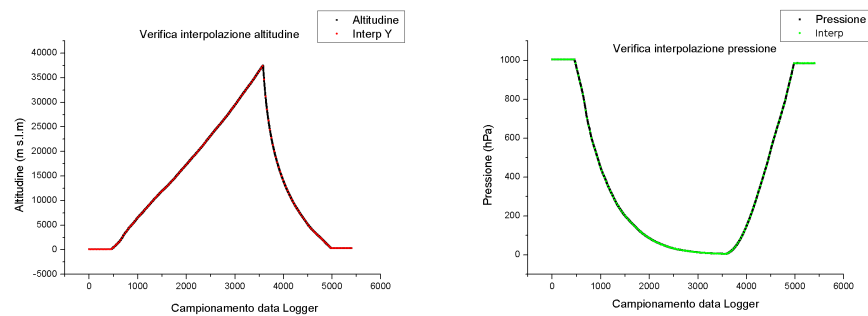


Fig. 8: Validazione dell'interpolazione lineare

### 3.4.2 Risultati ottenuti dal contatore Geiger

Il contatore Geiger segna un conteggio quando rileva una particella ionizzante ( $\beta$ ,  $\gamma$  o X). Le particelle  $\beta$  potrebbero essere schermate dall'involucro della sonda (dovremmo conoscerne le energie), e non è possibile distinguere le X dalle  $\gamma$ . Non è stato altresì possibile stimare l'energia assorbita dal contatore, in quanto lo strumento non era stato tarato in modo opportuno, tramite sorgente radioattiva nota.

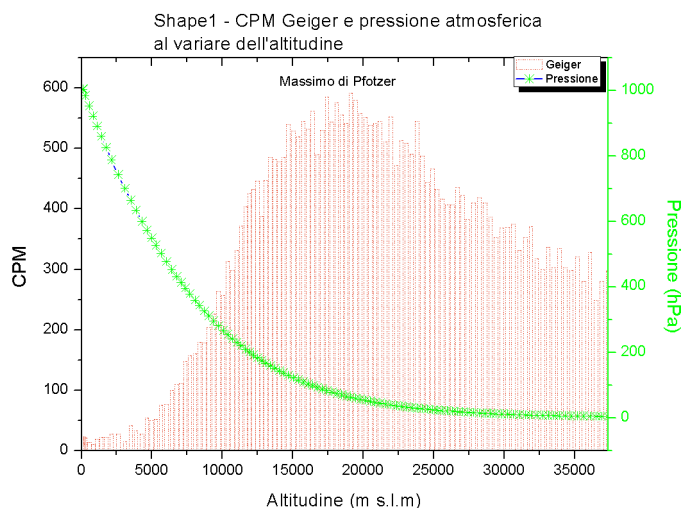


Fig. 9: CPM e pressione atmosferica in funzione dell'altitudine, fino alla quota massima

Dai grafici di figura 9 e 10, deduciamo che il numero maggiore di conteggi si verifica ad una quota di 18-20 km, contando fino quasi 600 CPM, contro una media di 16 CPM al suolo, attestando quindi CPM 37 volte superiori. Paradossalmente, oltre i 20 km di quota i conteggi diminuiscono progressivamente verso la quota massima, (300 CPM). Questo è quello che venne osservato anche da Pfozter, durante i primissimi esperimenti con palloni sonda lanciati nello spazio [4].

Il fenomeno si spiega con la seguente considerazione: i raggi cosmici primari, l'insieme delle particelle provenienti dallo spazio, sono costituiti principalmente da protoni (86 – 89)%, particelle  $\alpha$  (9%) e per il resto da nuclei più pesanti, elettroni, neutrini e raggi  $\gamma$  ad alta energia. Queste particelle, interagendo con l'atmosfera, provocano la formazione di particelle secondarie: pioni, muoni, neutrini ad alta energia, raggi  $\beta$ ,  $\gamma$  e X [5]. Il flusso delle componenti secondarie aumenta man mano che le particelle primarie penetrano nell'atmosfera, e il suo aumento compete con l'attenuazione che queste particelle secondarie subiscono nella stessa [6]. Quello che rileva il contatore Geiger, quindi, sono per lo più raggi X e  $\gamma$  prodotti da queste reazioni secondarie, che non possono essere presenti oltre i 20 km di quota in grande quantità, cioè oltre il cosiddetto «massimo di Pfozter». Queste radiazioni vengono fermate dall'atmosfera dopo alcune interazioni adroniche, ed arrivano al suolo solo in percentuali bassissime. La posizione e le caratteristiche del massimo di Pfozter dipende ovviamente dal tipo di radiazione considerata, dalla latitudine, a causa dell'effetto del campo geomagnetico, dalla soglia di rivelazione e dal range angolare coperto, nonché dagli effetti di modulazione solare. In linea di massima, diversi studi mostrano un massimo intorno ad una quota di circa 18 km [7], che è quanto rilevato anche tramite la nostra esperienza.

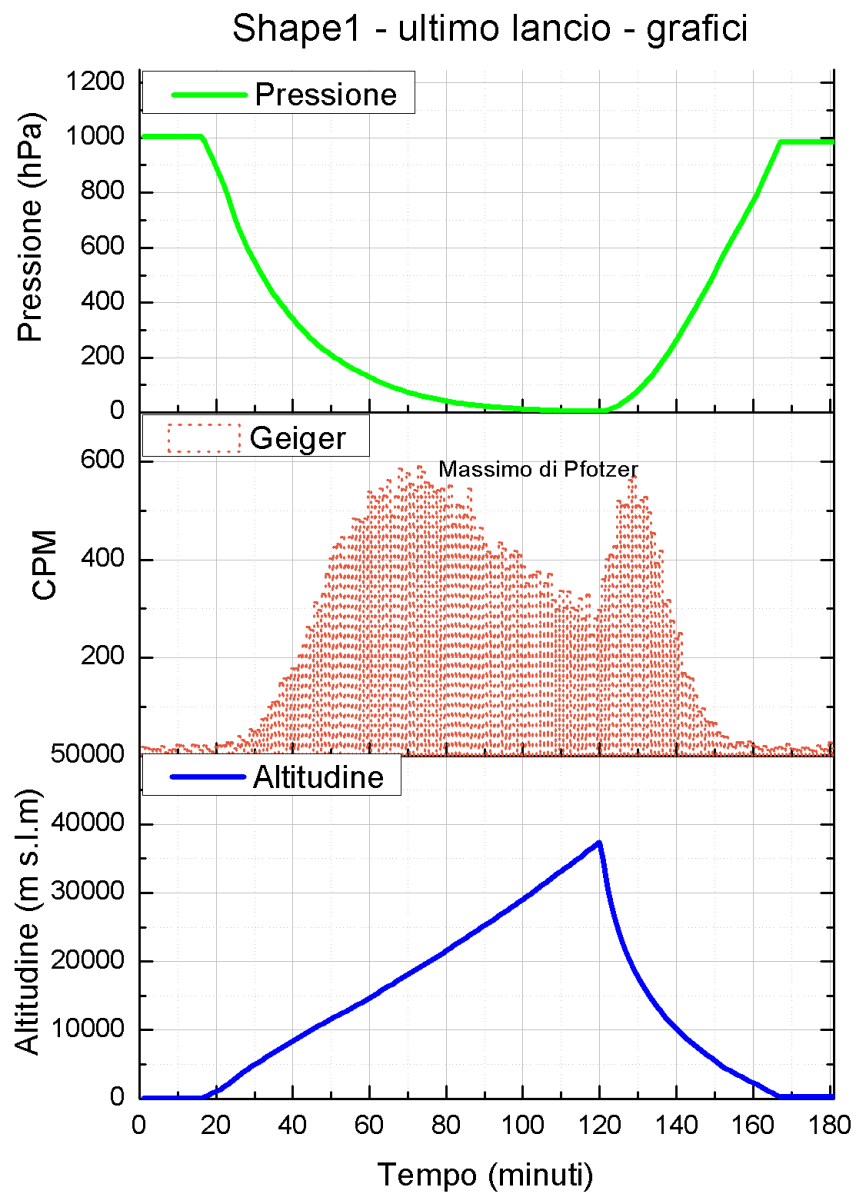


Fig. 10: Pressione atmosferica, CPM del contatore Geiger e altitudine in funzione del tempo

## 4 Conclusioni

Tramite il progetto interscolastico Shape, è stato inviato un pallone-sonda nello spazio, ed in seguito al suo recupero, è stato possibile analizzare i dati registrati da alcuni strumenti installati a bordo della sonda, quali sensore di temperatura e di pressione atmosferica, tracker GPS, dataLogger e contatore Geiger.

Tramite coordinate GPS, è stato possibile studiato il moto verticale della sonda, graficandone e valutandone altitudine, velocità e accelerazione in funzione del tempo. L'analisi dei dati ha messo in luce, nel moto di salita, dopo qualche minuto di assestamento iniziale, una velocità verticale pressochè costante, che risulta essere in media pari a  $20,8 \frac{km}{h}$ , e negli ultimi minuti di discesa, il raggiungimento di una velocità limite pressochè costante pari a  $17,6 \frac{km}{h}$ . Inoltre, è stato possibile ricavare il valore dell'accelerazione di gravità  $g$ , in assenza di atmosfera, che risulta essere pari a  $(9,9 \pm 0,3) \frac{m}{s^2}$ , contro un valore teorico di  $9,7 \frac{m}{s^2}$  alla quota di 37 km di altitudine: vediamo come il valore di  $g$  sia dunque stato verificato, entro l'incertezza sperimentale.

E' stato fittato il grafico della pressione atmosferica al variare dell'altitudine, ricavando una legge che, con quelle condizioni al contorno, possa approssimare la curva che lega queste due grandezze; inoltre, un grafico della temperatura atmosferica al variare dell'altitudine ha mostrato il caratteristico abbassamento di temperatura nella troposfera, fino a un minimo di  $-44^{\circ}C$ , ed il successivo innalzamento nella stratosfera, dovuto all'interazione di natura esotermica dei raggi UV con le molecole di ozono, raggiungendo  $+1,8^{\circ}C$  alla quota massima.

Infine, il grafico dei conteggi per minuto rilevati da un contatore Geiger ha mostrato il massimo di Pfozter, in corrispondenza del quale si registra l'intensità massima di radiazione, alla quota di circa 18 km di altitudine evidenziando, in corrispondenza di essa, un numero di conteggi per raggi X e  $\gamma$  37 volte superiori rispetto a quelli rilevati in prossimità del suolo. Questo non significa che la dose equivalente, e cioè la capacità di danneggiare i tessuti biologici, sia inferiore oltre il massimo di Pfozter, al contrario: quello che è stato appurato da alcuni studi condotti dalla NASA [8] è un aumento costante della dose equivalente man mano che si sale nell'atmosfera, che apparentemente contraddice la concentrazione di particelle al massimo Pfozter; in realtà, i raggi cosmici primari, che si trovano ad una quota maggiore, hanno un effetto molto più dannoso sui tessuti rispetto alle particelle secondarie.

## Riferimenti bibliografici

- [1] <http://habhub.org/calc/>
- [2] <http://gpsinformation.net/main/altitude.htm>
- [3] <https://it.wikipedia.org/wiki/Stratosfera>
- [4] [https://en.wikipedia.org/wiki/Georg\\_Pfotzer](https://en.wikipedia.org/wiki/Georg_Pfotzer)
- [5] [www.roma1.infn.it/exp/nemo/AHEN/Thesis/IreneDiPalma/Capitolo1.pdf](http://www.roma1.infn.it/exp/nemo/AHEN/Thesis/IreneDiPalma/Capitolo1.pdf)
- [6] <http://newton.ph.unito.it/~iannarel/tesi.pdf>
- [7] CORAM (Cosmic Ray Mission), pag 3
- [8] <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/nasa-studies-cosmic-radiation-to-protect-high-altitude-travelers>