

Analisi integrata tra camere all-sky e array infrasonico per la caratterizzazione dei bolidi

- **Belli Giacomo¹, Dario Barghini^{2,3}, Daniele Gardiol², Andrea Cozzumbo², Duccio Gheri¹, Emanuele Pace⁴ and Emanuele Marchetti¹**
- 1. **Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Firenze, via G. La Pira, 4, 50121 Firenze, Italia**
- 2. **INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino, Via Osservatorio 20, I-10025 Pino Torinese, TO, Italia**
- 3. **Dipartimento di Fisica – Università degli Studi di Torino, Via Pietro Giuria 1, I-10125 Torino, TO, Italia**
- 4. **Osservatorio Polifunzionale del Chianti, Strada Provinciale Castellina in Chianti, 50021 Barberino val d’Elsa, Firenze, Italia**

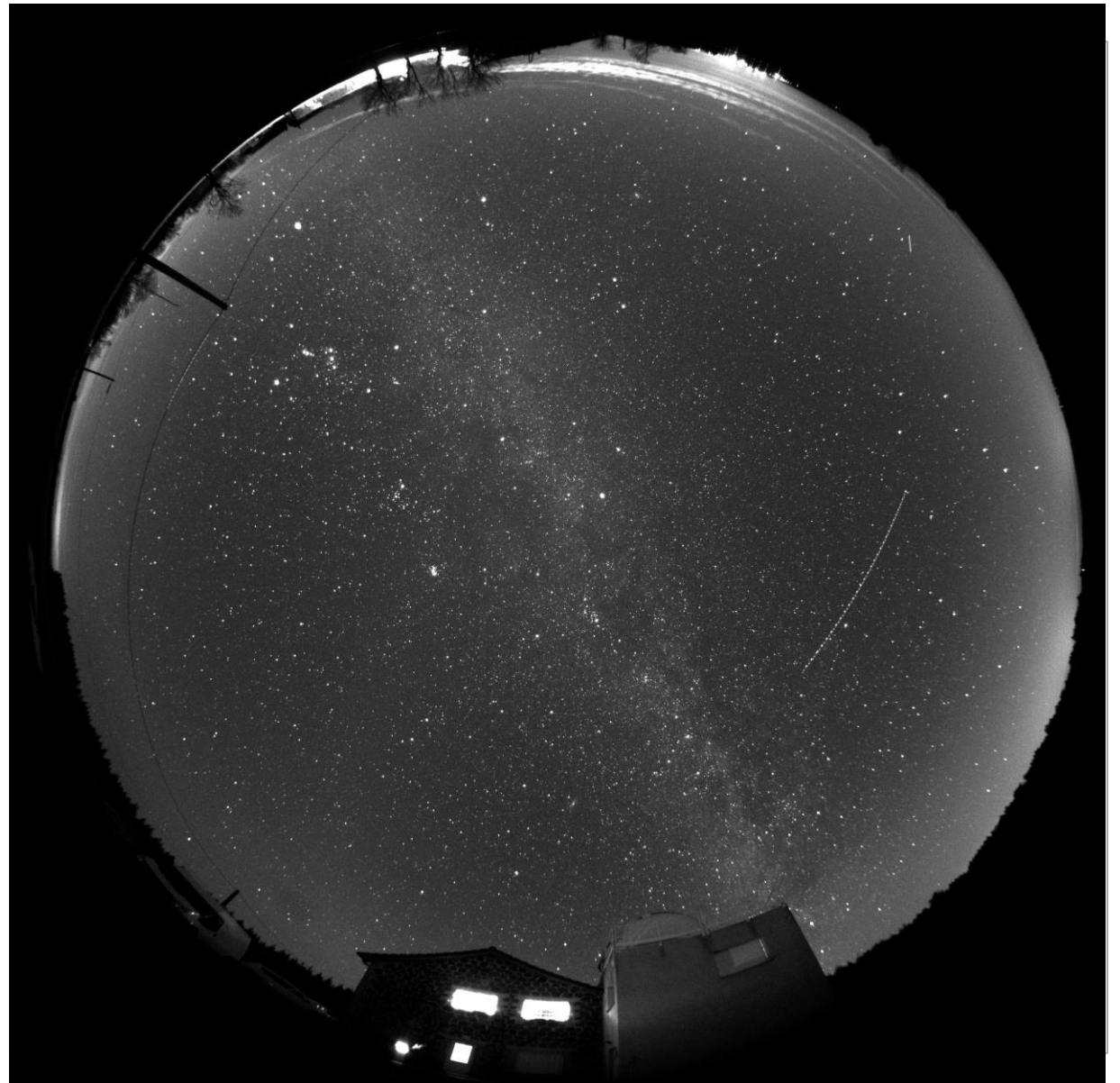
I bolidi



Di notte e in buone condizioni meteorologiche si osservano tramite camere All-sky

... ma anche grazie a registrazioni infrasoniche

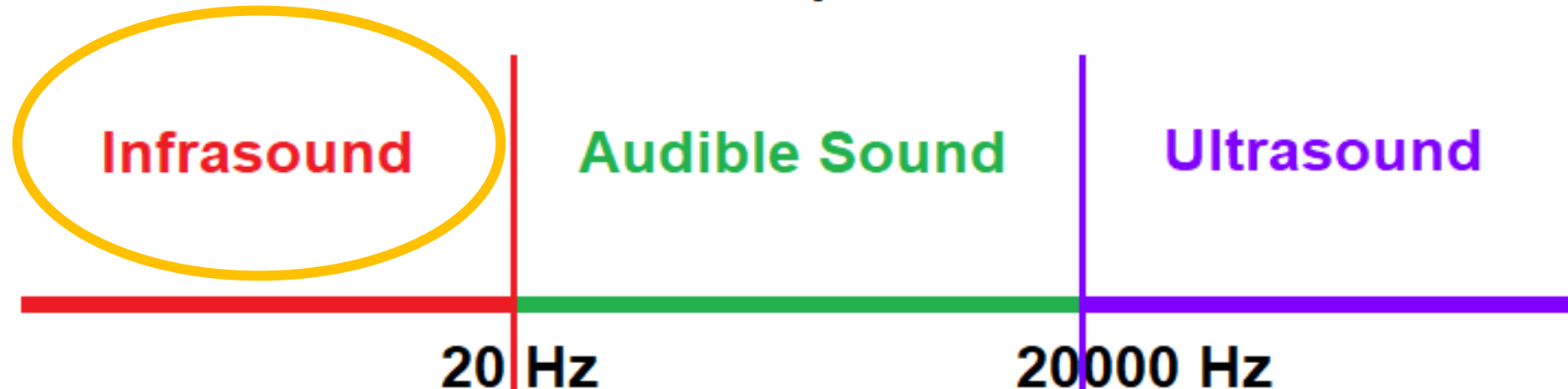
Penetrano continuamente nell'atmosfera con una velocità di qualche decina di km/s



L' INFRASUONO

Onde acustiche longitudinali di bassa frequenza (< 20 Hz) che si propagano in atmosfera alla velocità del suono del mezzo

Sound Spectrum

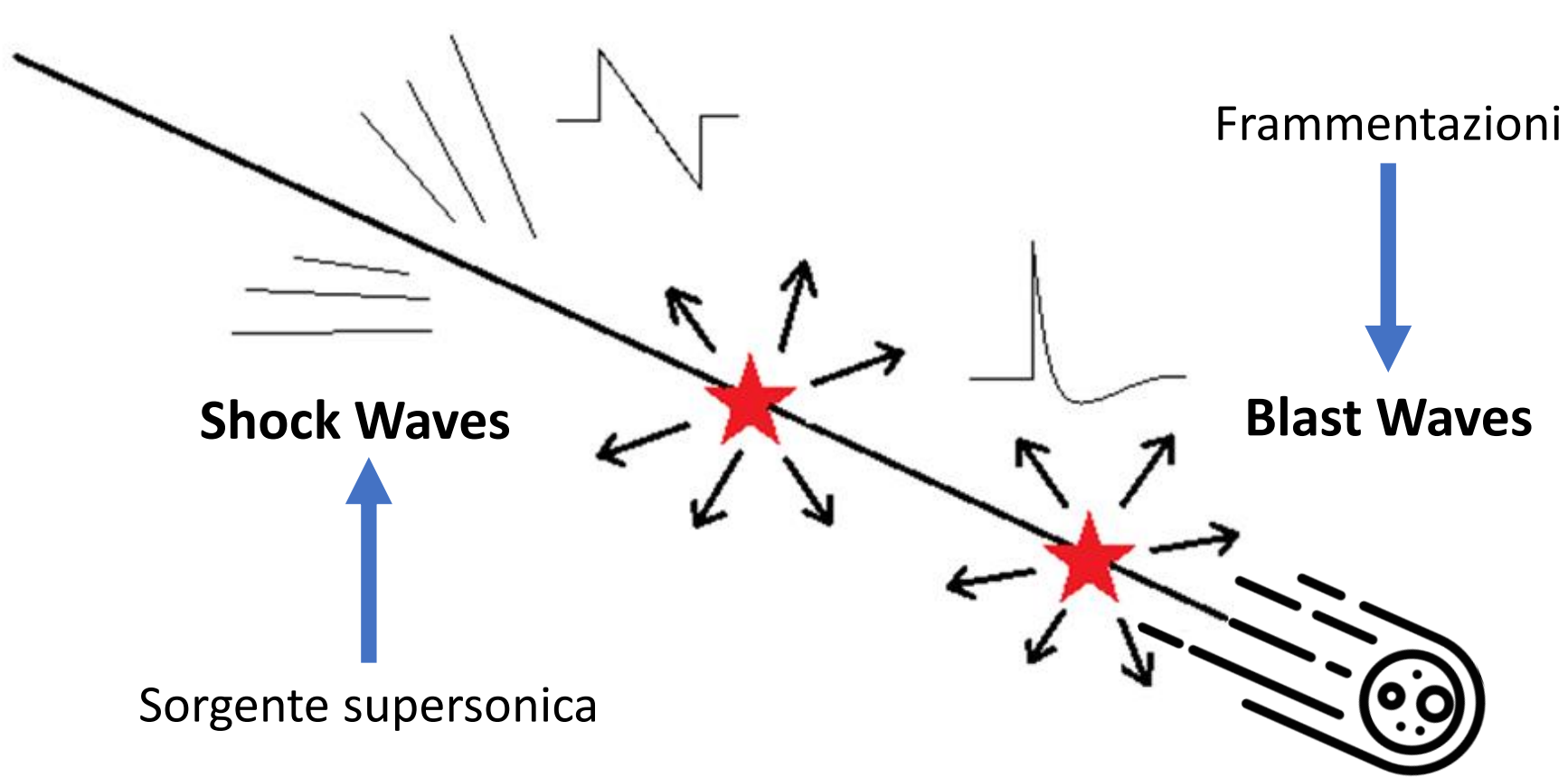




Sorgenti di infrasuono:
sia naturali che antropiche



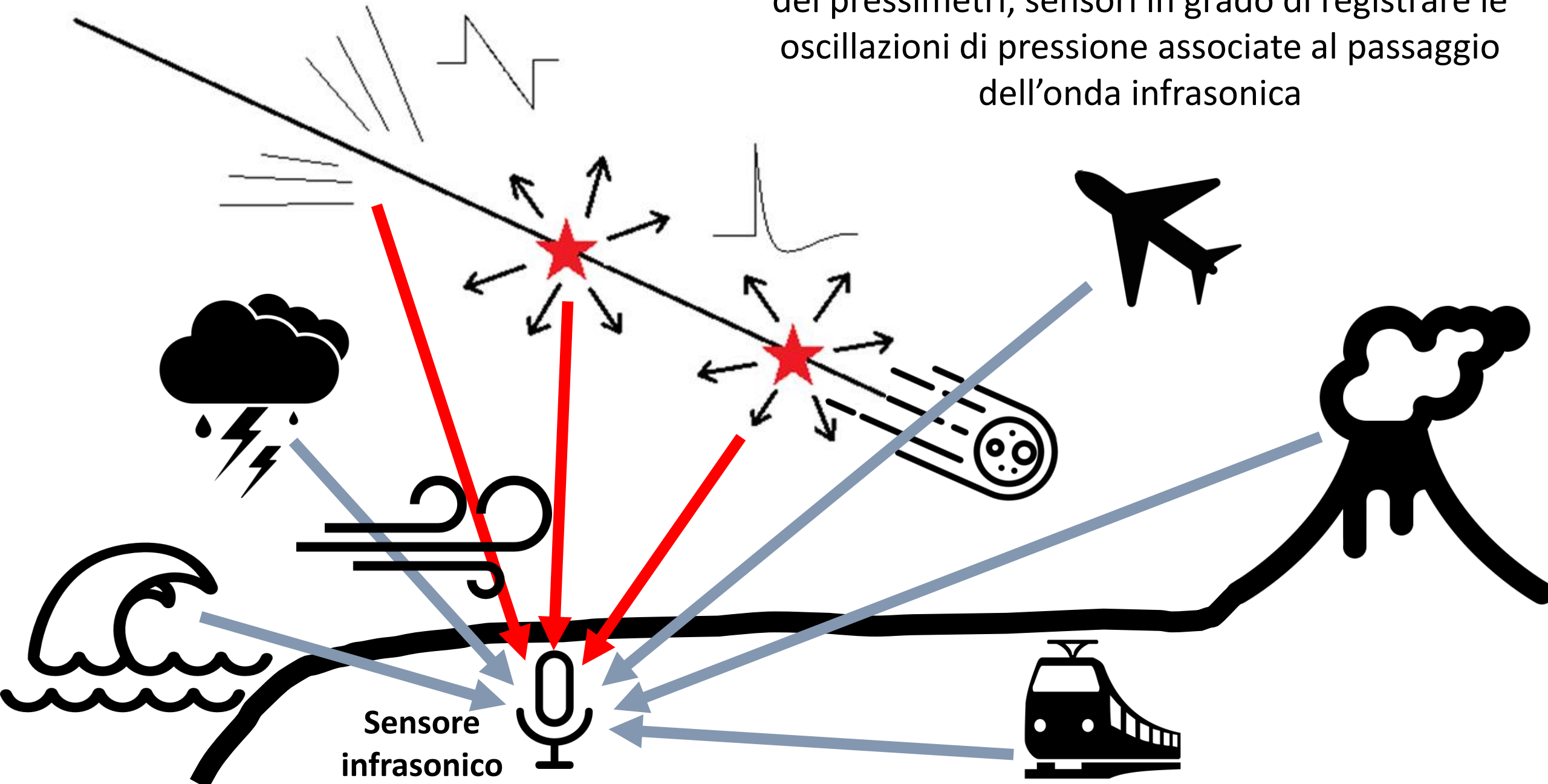
I bolidi producono infrasuono...



I bolidi attraversando l'atmosfera a velocità supersonica generano un fronte di shock cilindrico. Nelle fasi finali il bolide può frammentare: ogni frammentazione genera blast waves sferiche. Shock e blast waves sono poi convertite in infrasuono con la propagazione dell'onda.

I bolidi producono infrasuono...

L'infrasuono può essere registrato a terra usando dei pressimetri, sensori in grado di registrare le oscillazioni di pressione associate al passaggio dell'onda infrasonica



I bolidi producono infrasuono...

L'infrasuono può essere registrato a terra usando dei
microfoni speciali in grado di registrare le
vibrazioni del terreno. È un saggio

Ma in tutto questo
marasma di segnali e
rumore...

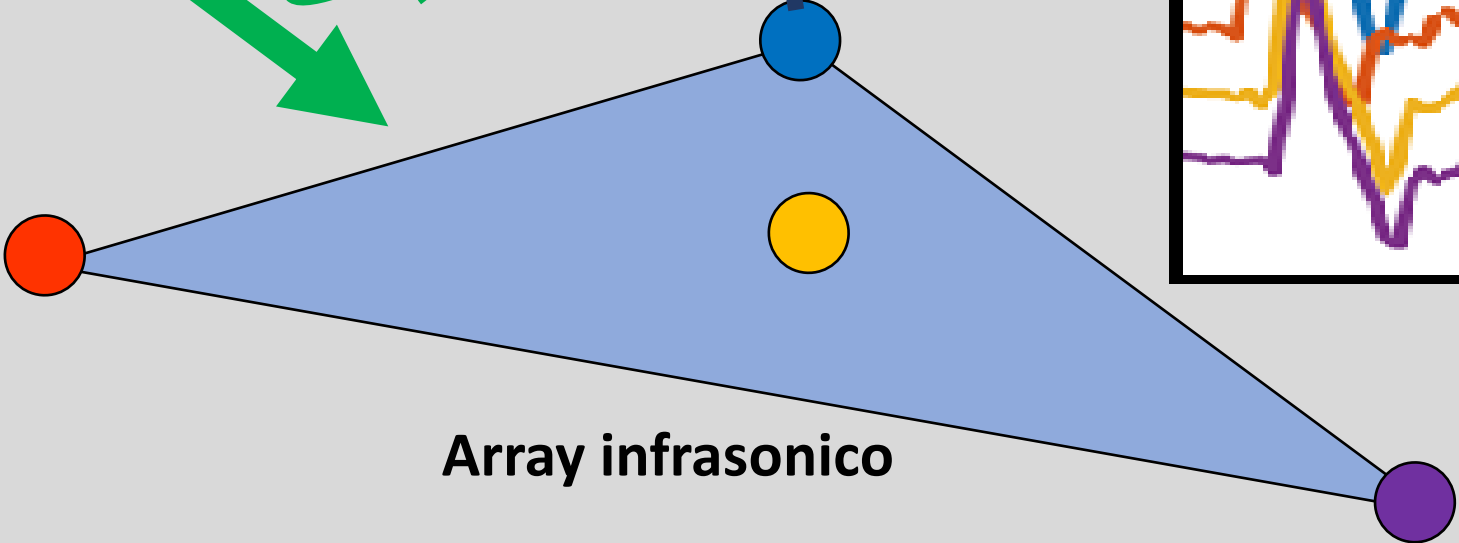
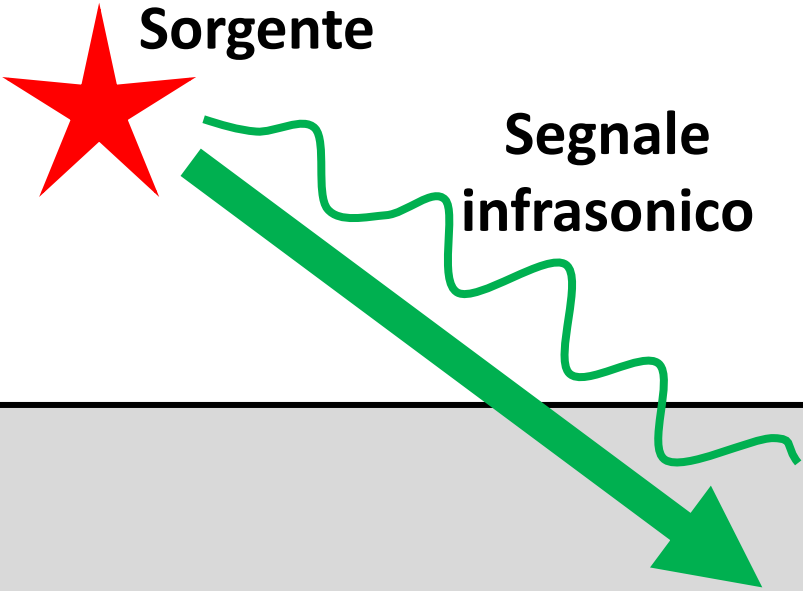
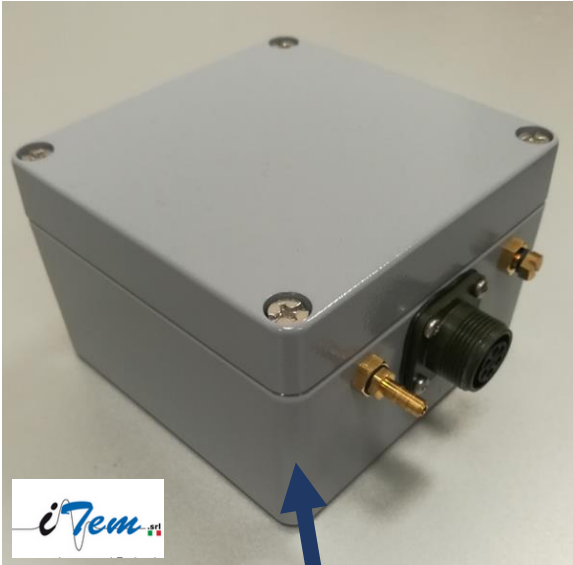
Come riconosco il
segnale infrasonico
prodotto dal
bolide?



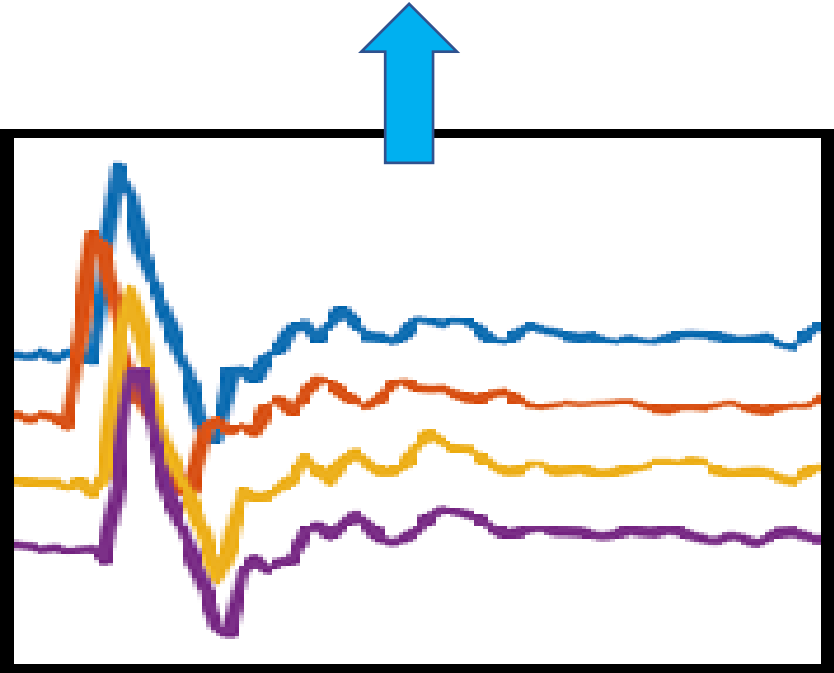
Sensore
infrasonico

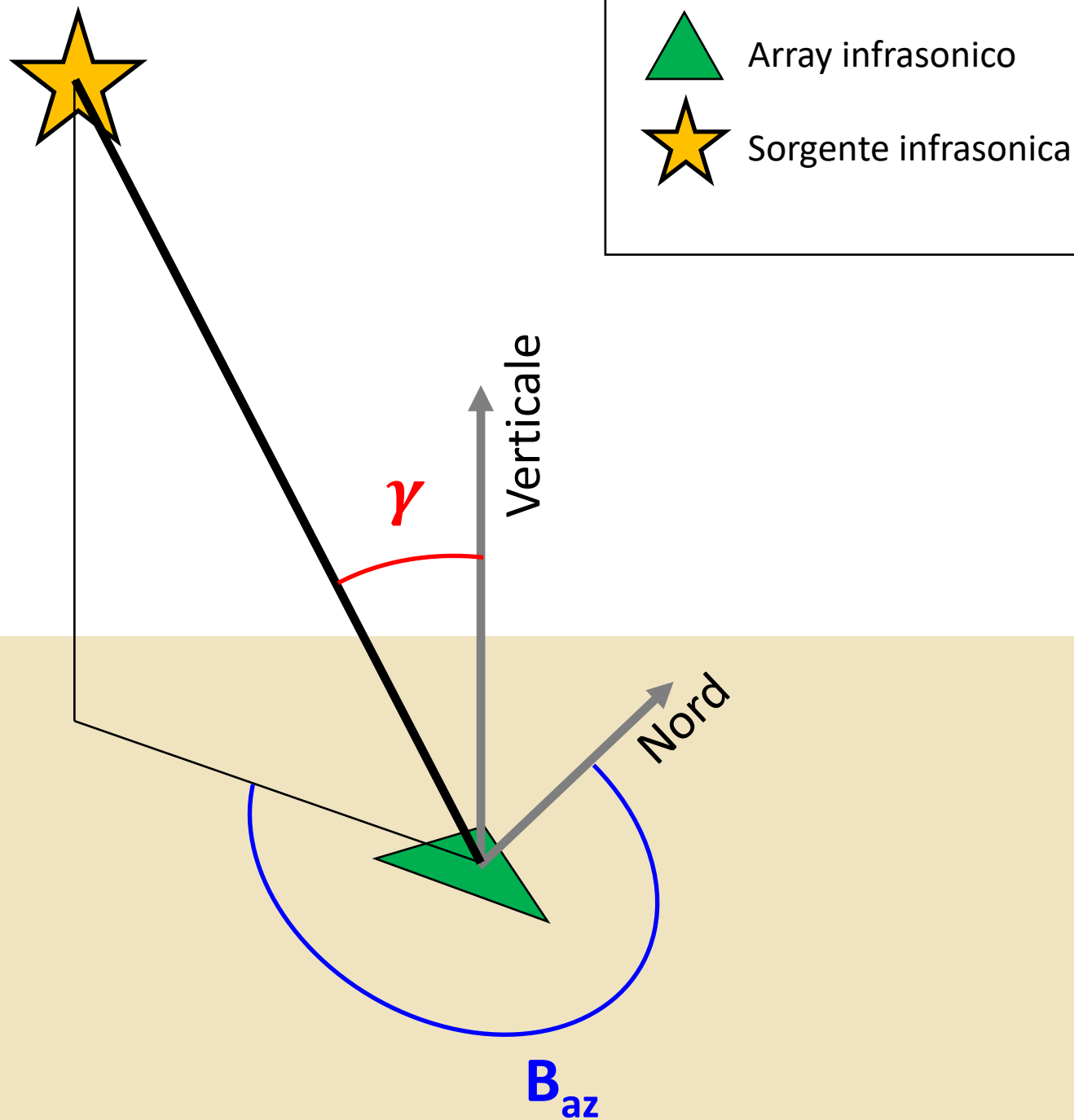


Analisi di array infrasonico: l'infrasuono, solitamente viene registrato non con un singolo sensore ma tramite un array infrasonico, che garantisce numerosi vantaggi.



L'analisi di array inoltre permette di discriminare segnale coerente dal rumore e...





... caratterizzare il segnale
in termini di:

- **Back Azimuth (B_{az}):**

È la direzione di provenienza del
segnale, misurata dal ricevitore
rispetto a Nord

- **Velocità Apparente (c_a),**

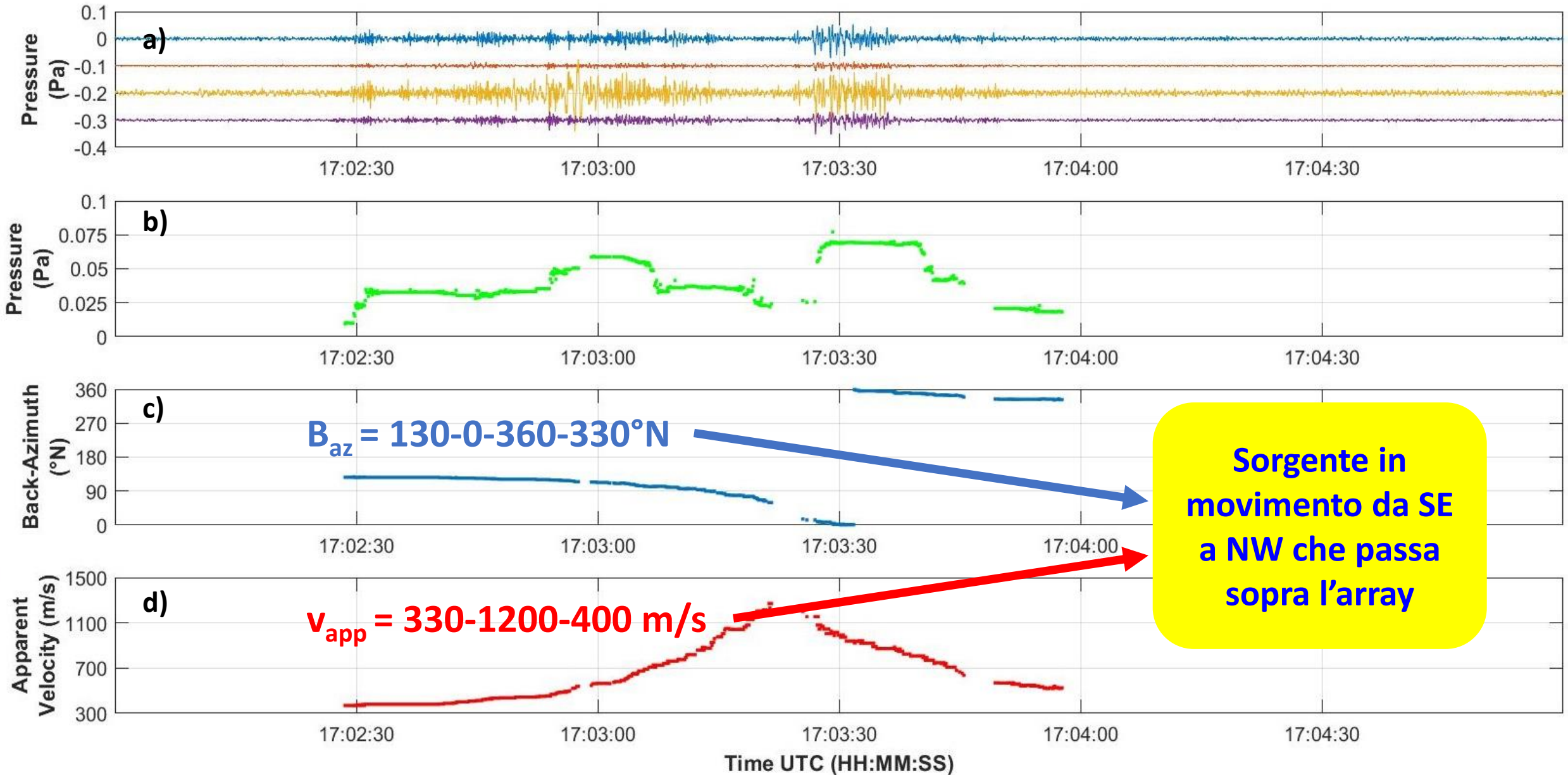
$$c_a = \frac{c}{\sin \gamma} :$$

Indice dell'angolo di
incidenza del segnale (γ)



**Indicazioni sulla posizione
della sorgente**

Un esempio: l'analisi di array del segnale infrasonico prodotto da un aeroplano

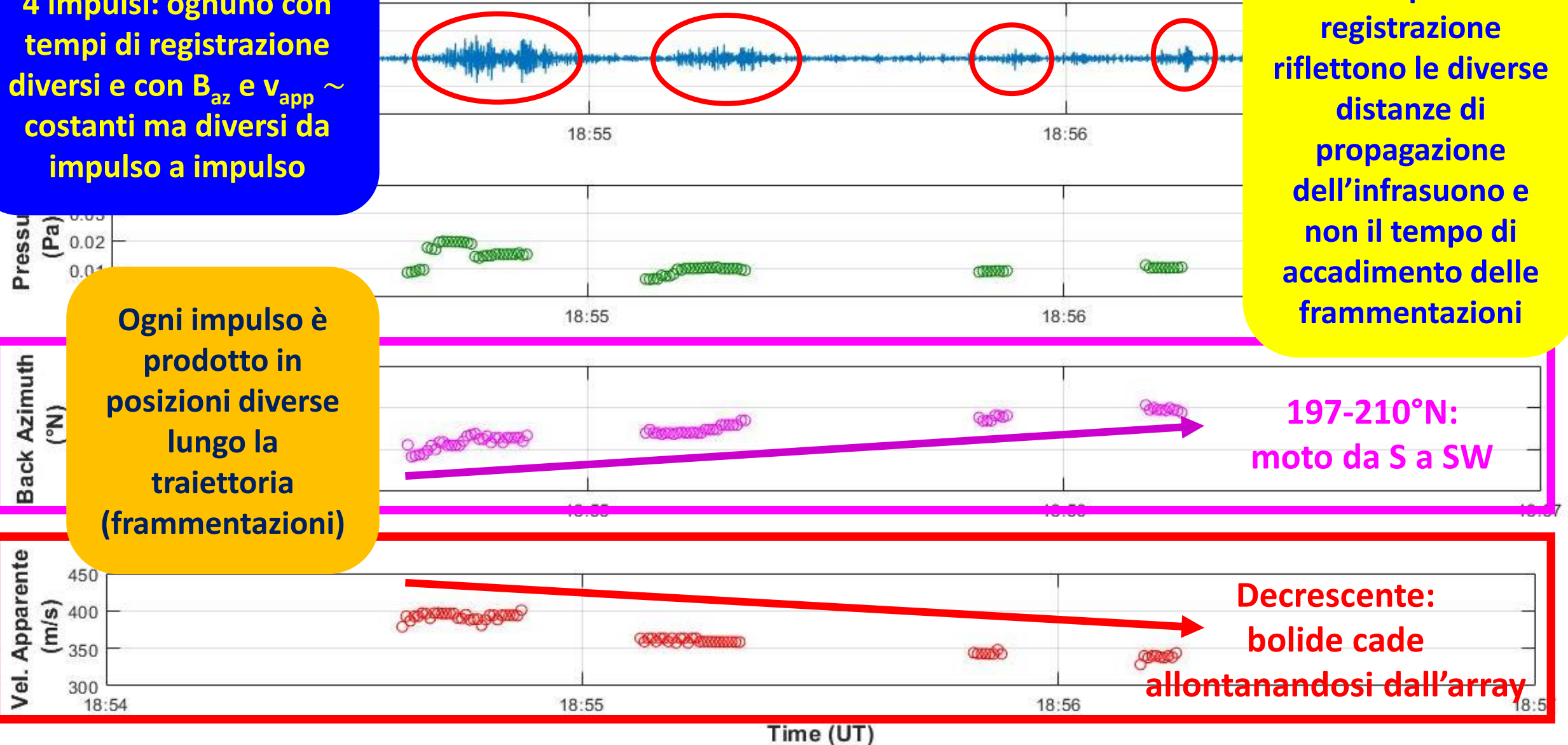


L'analisi di array del segnale infrasonico prodotto da un bolide: il bolide del 2017/10/30 registrato in Valle d'Aosta

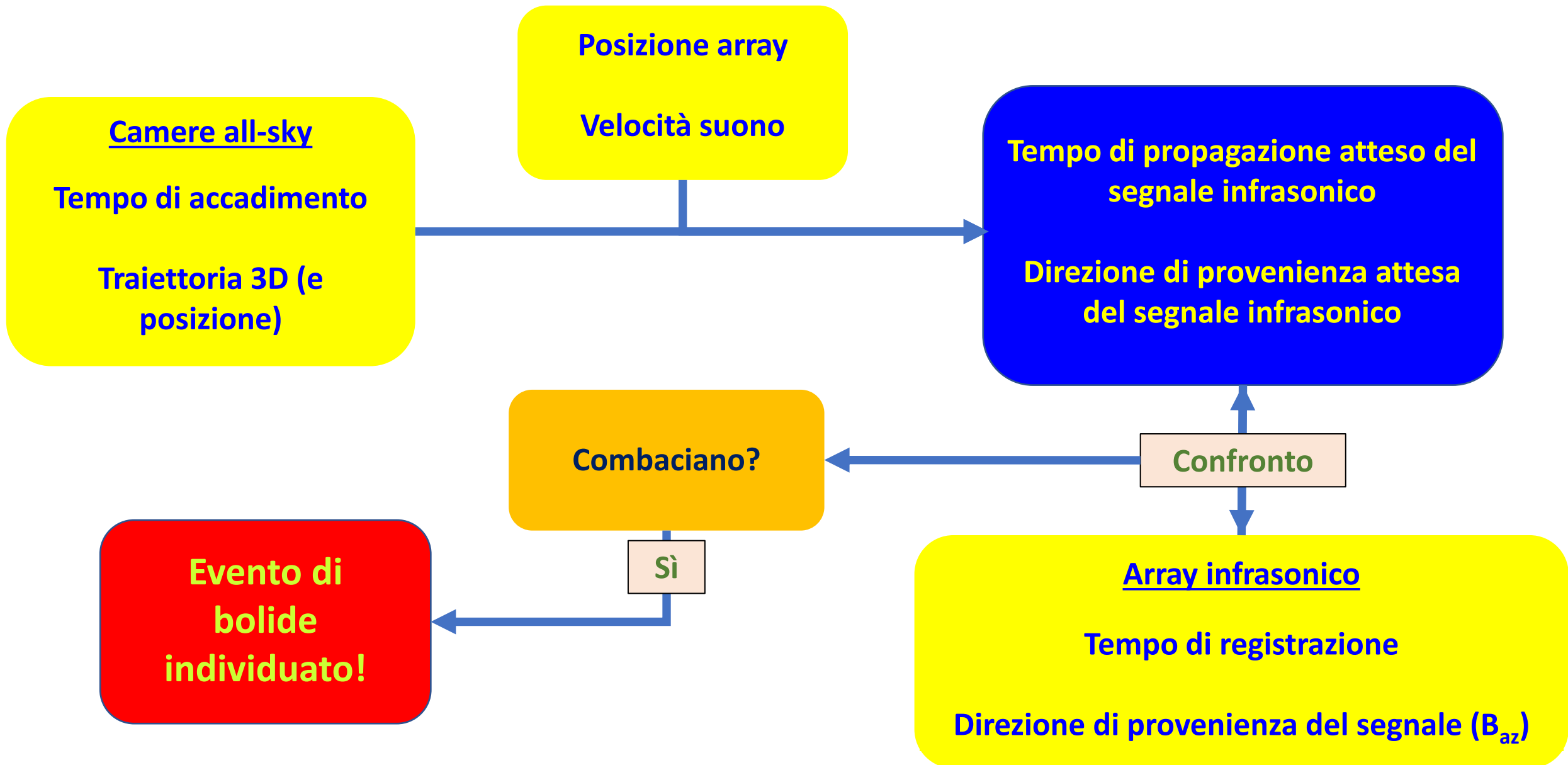
4 impulsi: ognuno con tempi di registrazione diversi e con B_{az} e v_{app} ~ costanti ma diversi da impulso a impulso

Le differenze dei tempi di registrazione riflettono le diverse distanze di propagazione dell'infrasuono e non il tempo di accadimento delle frammentazioni

Ogni impulso è prodotto in posizioni diverse lungo la traiettoria (frammentazioni)



La ricerca: partendo dalle segnalazioni delle camere all-sky (PRISMA) sono stati ricercati i segnali infrasonici prodotti dai bolidi nelle registrazioni di un array infrasonico (CHA) installato in Valle d'Aosta.



Eventi (2010) di dati a CHA sono stati individuati 13 eventi di bolide



**Bolidi molto piccoli:
diametro max ~ 13.5 cm e massa
max ~ 4.26 kg**

... per confronto ...

**Čeljabinsk : diametro ~ 15 m, massa
~ 10,000 tonnellate!**

**Numerosi studi incentrati sulla caratterizzazione (dimensioni, energia) dei bolidi a partire dalle loro registrazioni infrasoniche...
.. tuttavia questi sono limitati agli eventi di maggiori entità.**

Poco o niente è stato invece fatto per meteore e bolidi più piccoli, che sono però anche gli eventi più frequenti.

20211001	01:04:55.93	16.084	4.261	1.351×10^{-1}	5.512×10^8	300-330	81.229	32.710
----------	-------------	--------	-------	------------------------	---------------------	---------	--------	--------

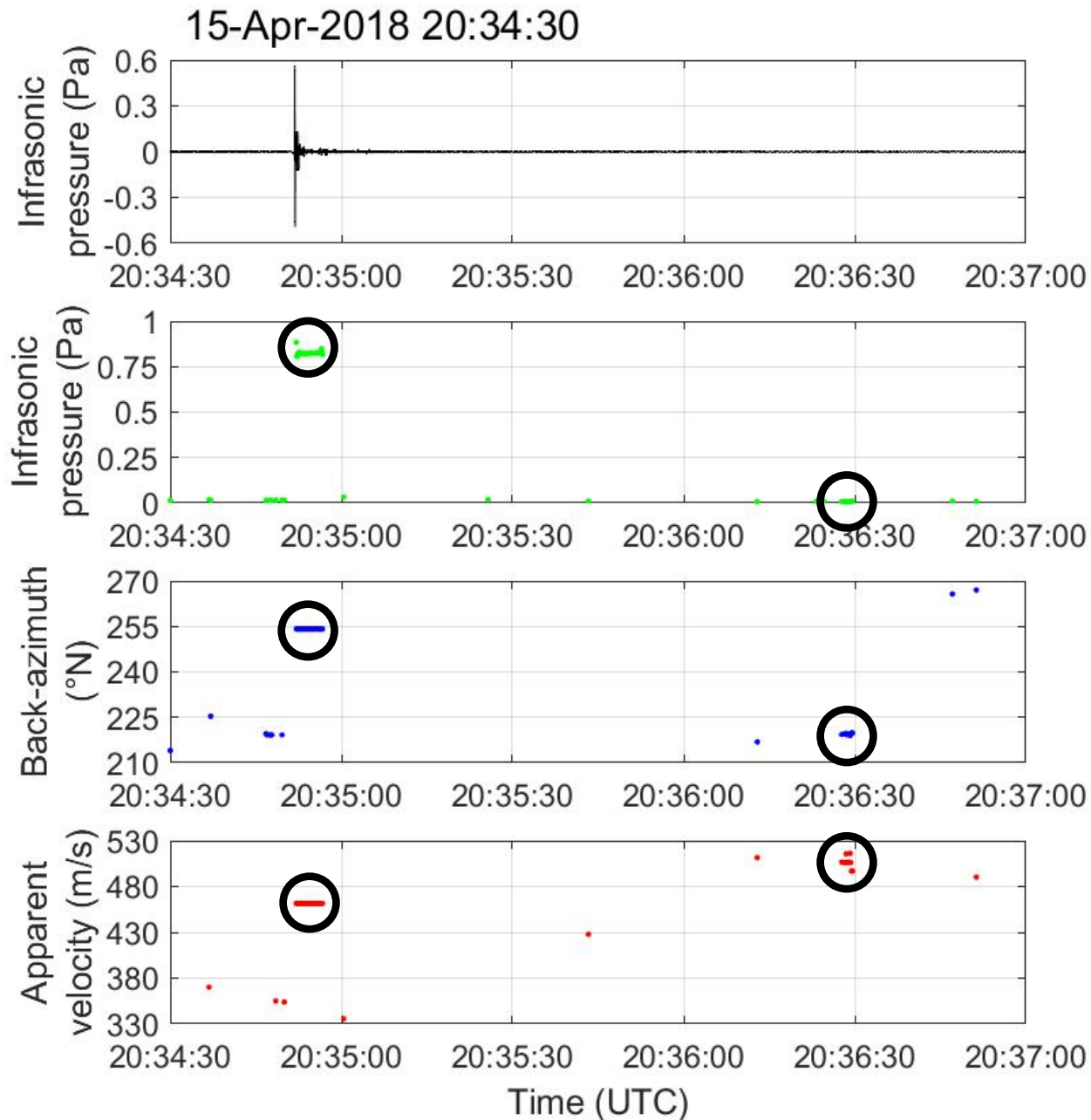
Alcuni degli eventi estratti: Bolide del 15/04/2018

Parametri attesi in base ai dati delle all-sky camere e alla posizione dell'array CHA:

- Tempo di accadimento: 20:30:01
- Distanza dall'array: 110-89 km
- Tempo propagazione all'array: 6 min – 4 min e 30 s
- B_{az} ottico rispetto all'array: 220-260°N

Parametri infrasonici:

- Tempo di registrazione: 20:34:50-20:36:30
- Numero di impulsi = 2
- Pressione massima = 0.88 Pa
- Back-azimuth = 255°N e 220°N
- Velocità apparente = 460 m/s e 505 m/s



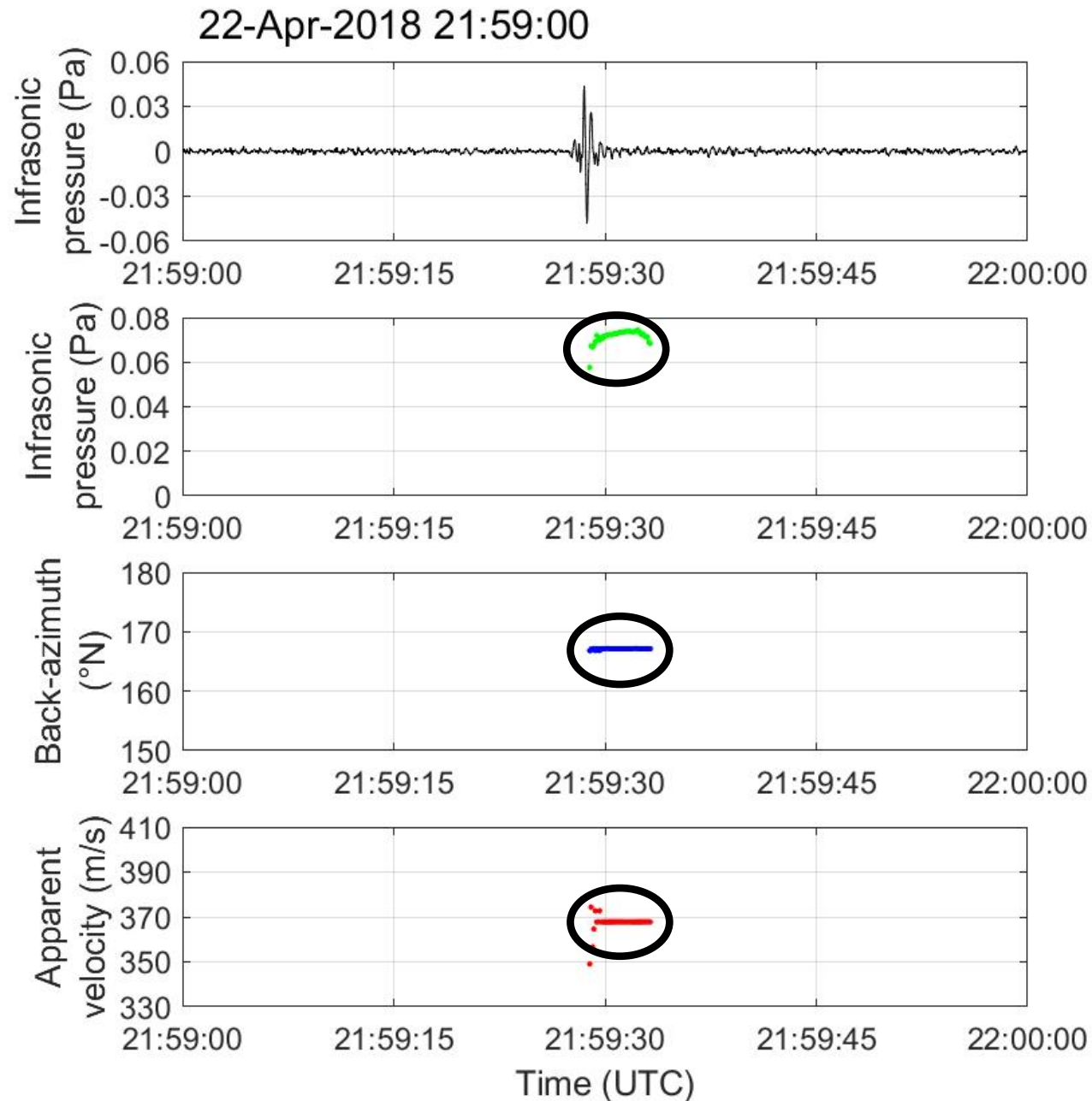
Alcuni degli eventi estratti: Bolide del 22/04/2018

Parametri attesi in base ai dati delle all-sky camere e alla posizione dell'array CHA:

- Tempo di accadimento: 21:49:27
- Distanza dall'array: 179-182 km
- Tempo propagazione all'array: 9 min – 10 min
- B_{az} ottico rispetto all'array: 168-185 °N

Parametri infrasonici:

- Tempo di registrazione: 21:59:25
- Numero di impulsi = 1
- Pressione massima = 0.075 Pa
- Back-azimuth = 167°N
- Velocità apparente = 370 m/s



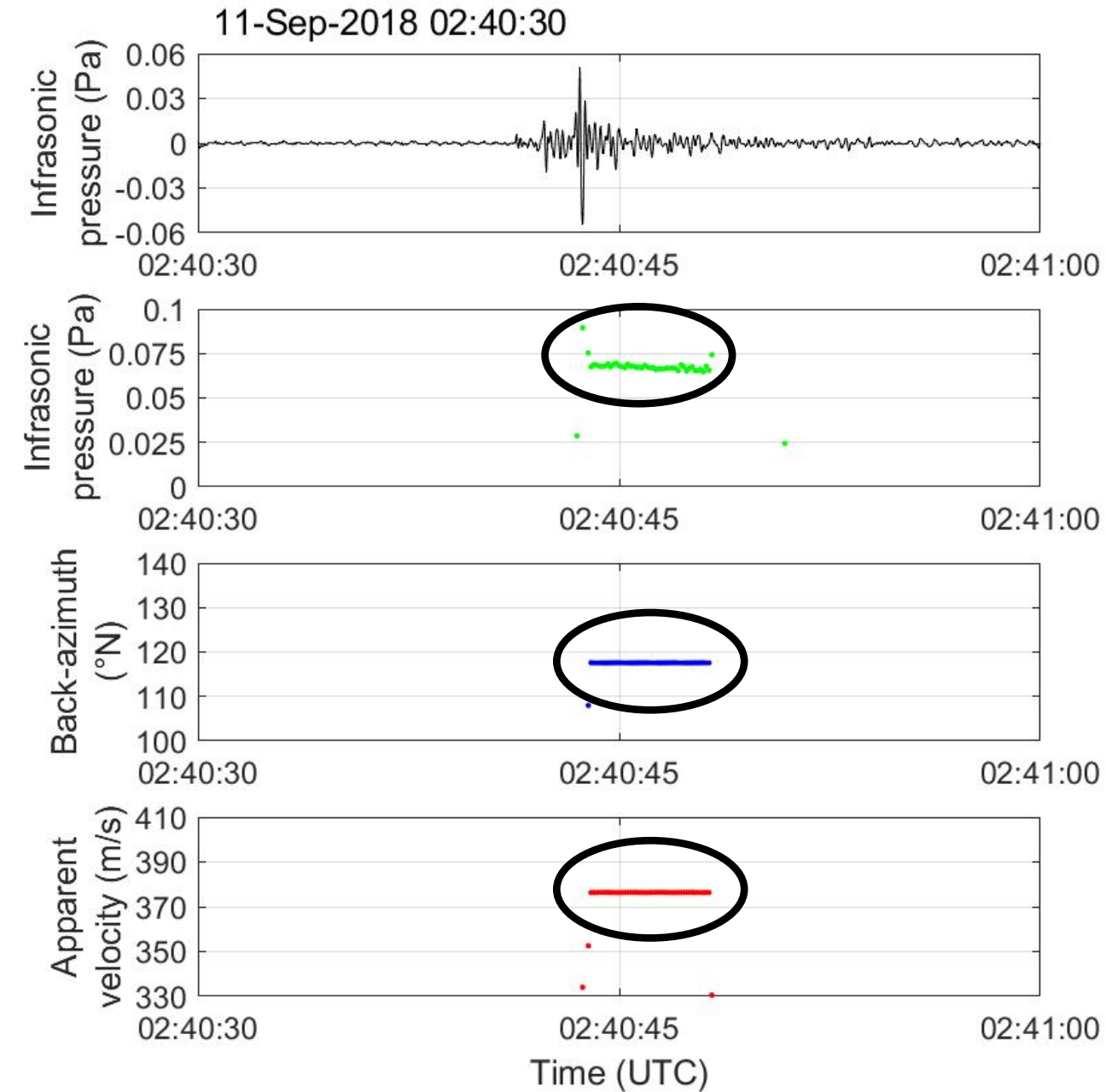
Alcuni degli eventi estratti: Bolide del 11/09/2018

Parametri attesi in base ai dati delle all-sky camere e alla posizione dell'array CHA:

- Tempo di accadimento: 02:34:38
- Distanza dall'array: 115-114 km
- Tempo propagazione all'array: 5 min e 45 s – 6 min
- B_{az} ottico rispetto all'array: 119-104°N

Parametri infrasonici:

- Tempo di registrazione: 02:40:42
- Numero di impulsi = 1
- Pressione massima = 0.09 Pa
- Back-azimuth = 118°N
- Velocità apparente = 376 m/s



Ricostruzione infrasonica della posizione o della traiettoria del bolide (Belli et al., 2021): partendo dai parametri ottenuti con l'analisi di array (B_{az} e v_{app}), retro-propagando il raggio infrasonico dal sensore alla sorgente, è possibile ricostruire la posizione in atmosfera della sorgente infrasonica. Tuttavia l'atmosfera terrestre non è omogenea, ma stratificata!

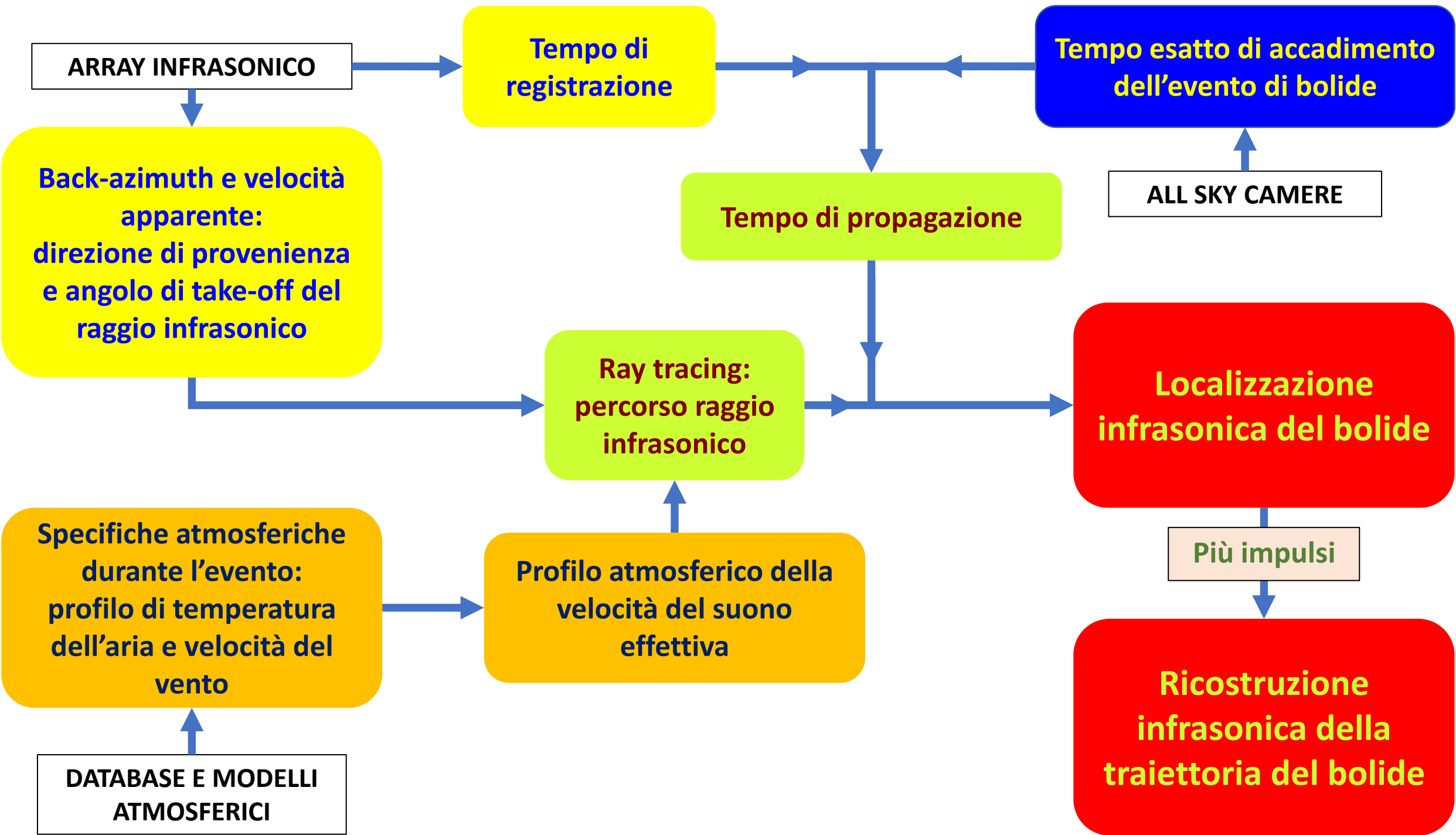


Ogni livello ha diversa densità e temperatura e di conseguenza una diversa velocità del suono statica.

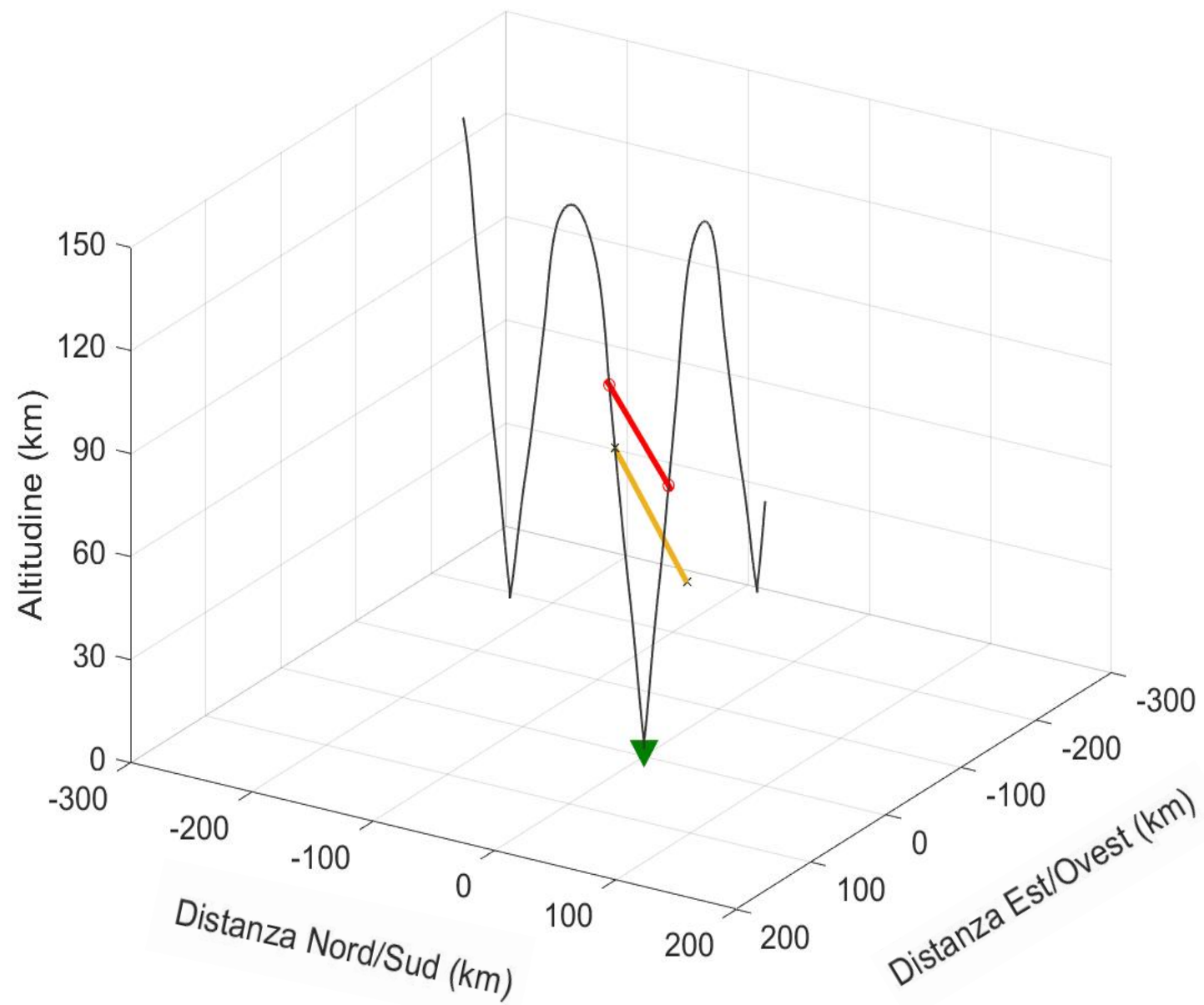
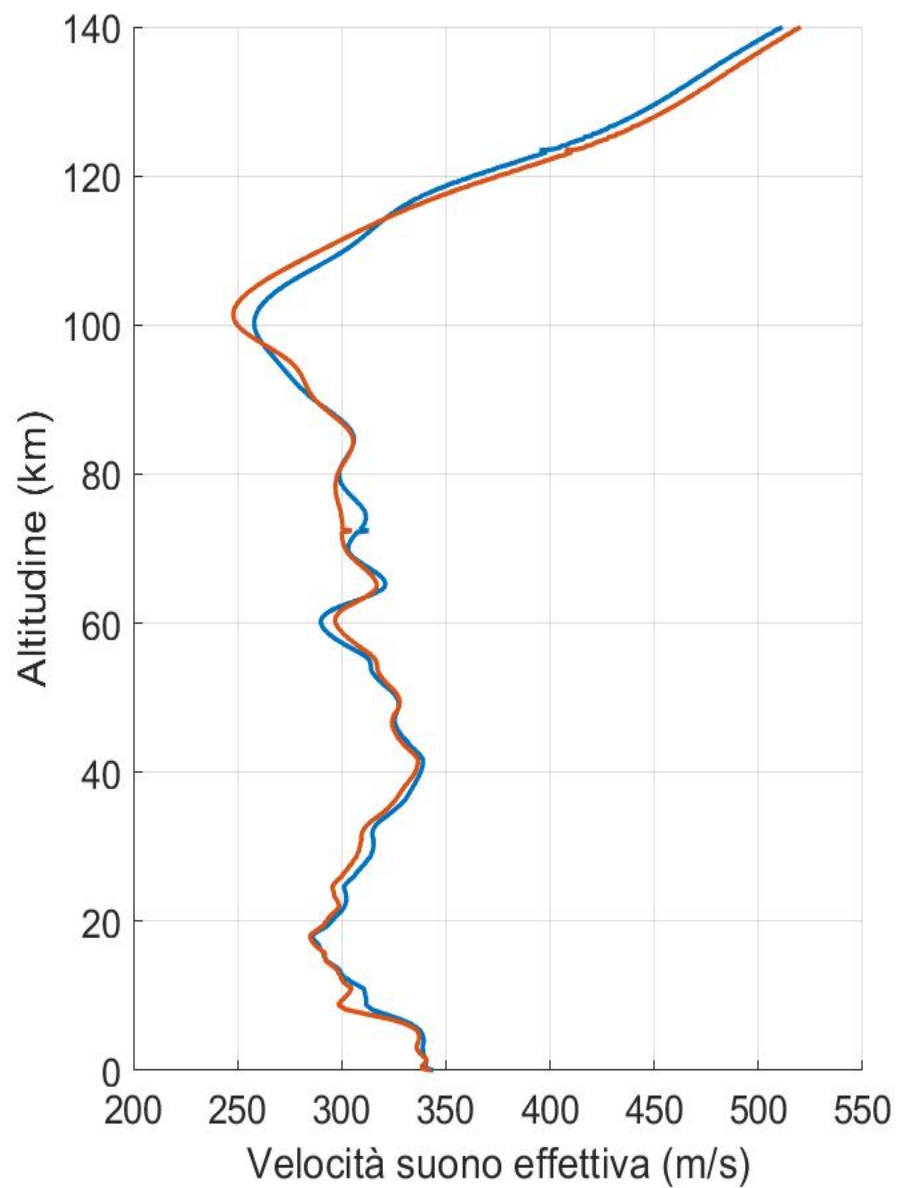
La velocità del vento (v_w) si somma vettorialmente alla velocità del suono statica (c , rosso) per determinare la velocità del suono effettiva (c_{eff} , blu):

$$c_{eff} = c + v_w$$

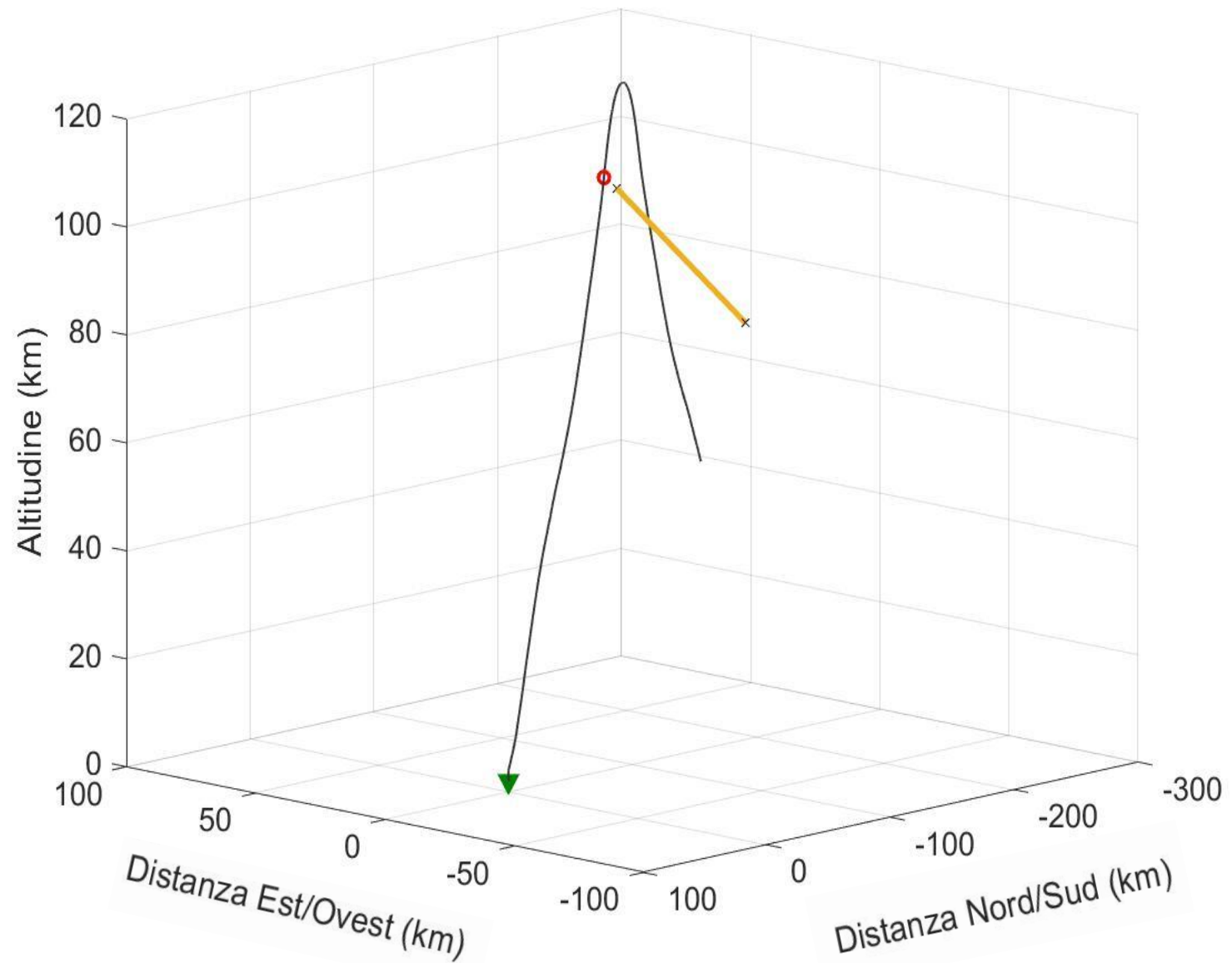
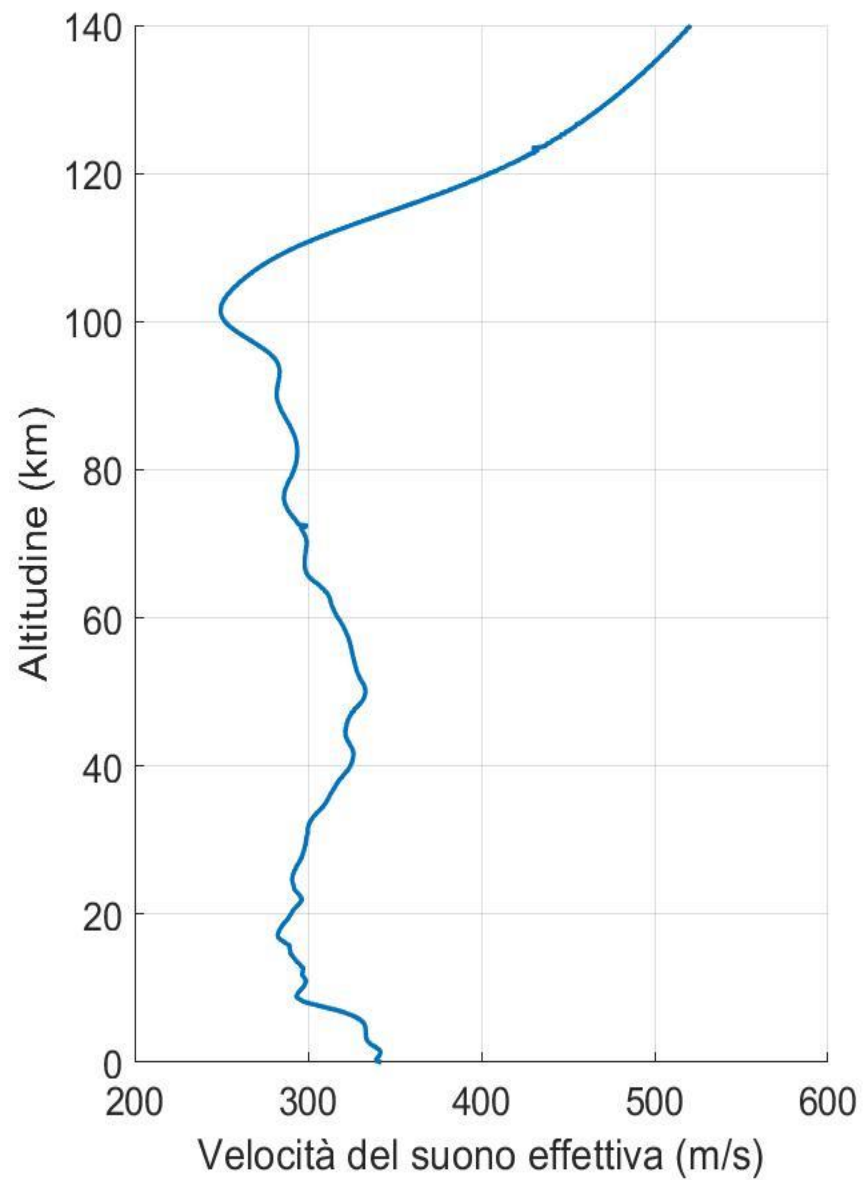
Attraversando livelli a diversa velocità, l'infrasuono va incontro a successive rifrazioni (legge di Snell).



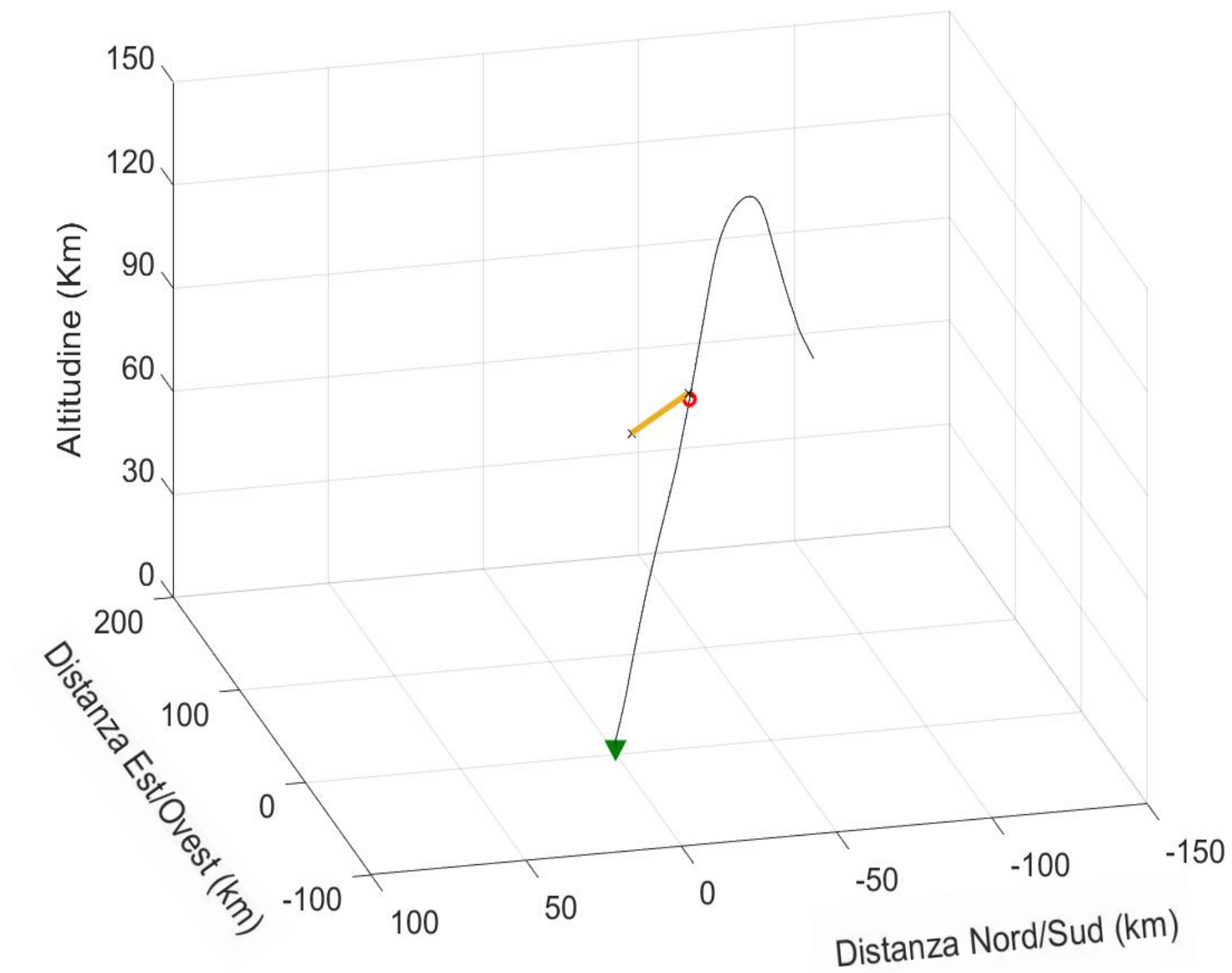
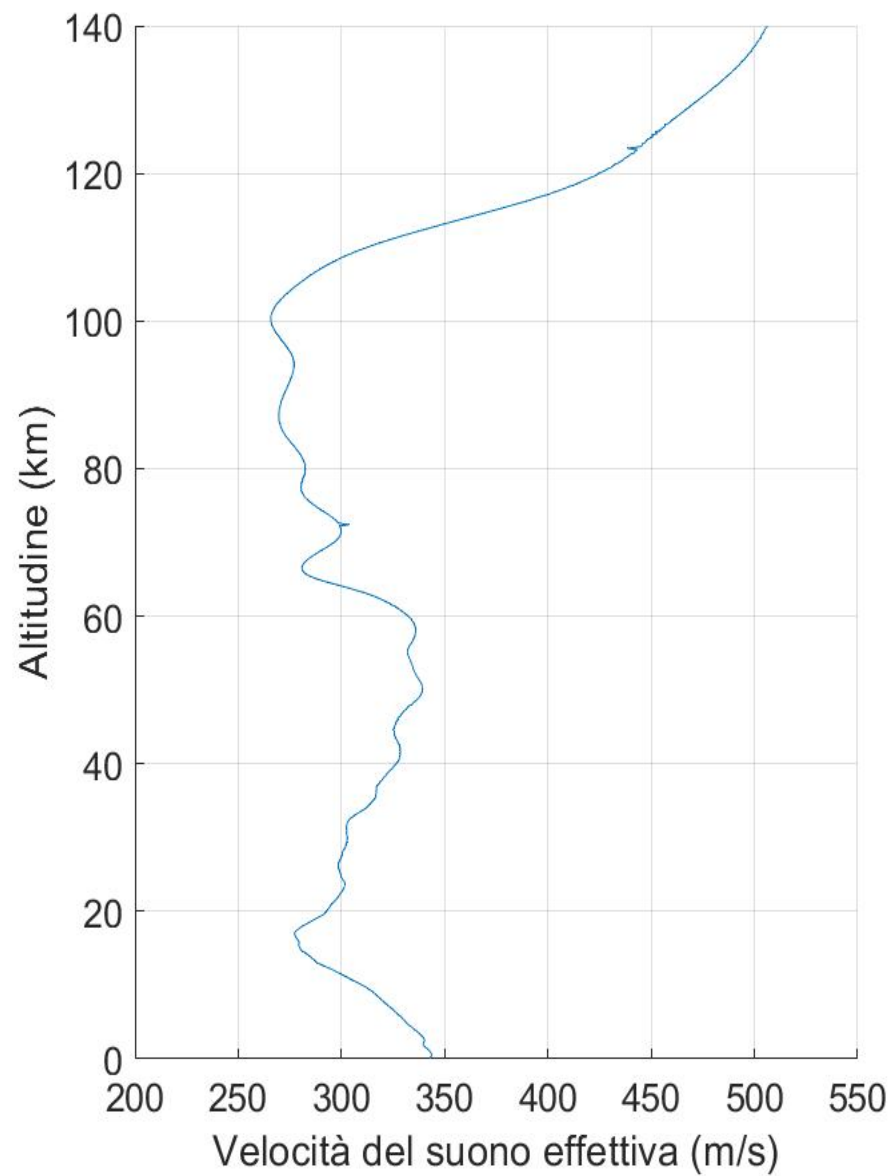
Ricostruzione infrasonica della traiettoria del bolide: evento del 2018/04/15



Ricostruzione infrasonica della traiettoria del bolide: evento del 2018/04/22



Ricostruzione infrasonica della traiettoria del bolide: evento del 2018/09/11



Next Steps

Estrazione parametri infrasonici:
- Frequenza di picco
- Pressione massima alla sorgente

Confronto tra parametri infrasonici e parametri della sorgente ricavati dall'analisi delle immagini delle all-sky camere ed

Eventuale definizione di leggi empiriche per legare i parametri infrasonici ai parametri del meteoroido

Grazie per l'attenzione!