

La dinamica dell'alta atmosfera (*)

S. GIORGI

Ricevuto il 19 Febbraio 1963

RIASSUNTO. — Viene preso in esame il problema della determinazione dei venti nell'alta atmosfera, usando la tecnica della nube di Sodio-Litio, e viene presa in considerazione una rassegna dei diversi metodi più comunemente usati nei vari paesi. Particolare attenzione è rivolta al metodo italiano che viene illustrato in alcuni dettagli allo scopo di fornire una completa soluzione del problema.

SUMMARY. — The problem of the winds determination in the high atmosphere by the Sodium-and-Lithium cloud technique is considered and a review is presented of the data reduction methods most commonly used in various countries. Particular attention is devoted to the Italian method which is illustrated in some details in order to provide a complete solution to the problem.

Lo studio delle caratteristiche, sia dinamiche che strutturali, dell'alta atmosfera viene oggi prevalentemente compiuto mediante indagine diretta: a questo scopo i razzi sonda appaiono i mezzi più adatti.

Fino a quote dell'ordine di 60-70 km il campo si può considerare acquisito ai normali mezzi di indagine meteorologica (palloncini sonda, razzi meteorologici, ecc.). A quote molto alte invece — per fissare le idee al di sopra dei 250 km — sono i satelliti gli strumenti tecnici più idonei allo scopo. Rimane quindi un vasto campo di quote in cui i razzi sonda operano convenientemente per la ricerca e lo studio dei parametri dinamici e strutturali dell'atmosfera.

Venendo a trattare più specificatamente delle caratteristiche dinamiche, si può dire che la tecnica più conveniente è quella della nube di

(*) Nota presentata al 2° Congresso Internazionale Tecnico Scientifico dello Spazio. Roma, 19-23 Giugno 1962.

sodio e litio a causa di alcuni fondamentali vantaggi che essa presenta rispetto ad altri metodi:

- a) possibilità di ricavare dati in un ampio intervallo di quote;
- b) possibilità di seguire otticamente la nube da terra per un tempo sufficientemente lungo;
- c) semplicità del carico pagante con conseguente aumento della « reliability ».

Per il punto c) chiarirà l'assunto una breve descrizione del carico pagante. Esso è costituito da un contenitore dove è immessa una sostanza capace di autocombustione — termite, ad es. — e sodio polverizzato con una quantità addizionale di litio (sotto forma, quest'ultimo, di masserelle diffuse nella massa maggiore, o in condizioni analoghe al sodio, ma in quantità minore) mescolati assieme.

Un comando a tempo innesca la combustione della termite, il sodio (e il litio) viene polverizzato e fuoriesce attraverso apposite aperture praticate nelle pareti del contenitore, mentre il razzo continua nel suo moto ascensionale. Generalmente la quantità della miscela è tale (e la combustione è regolata in modo) che il sodio fuoriesce fra una quota di 75-80 km e la quota massima raggiungibile dal razzo (e, a volte, anche per una parte della traiettoria discendente). Questo spiega, sia detto per inciso, anche il primo dei vantaggi sopra elencati.

Il sodio ed il litio formano una nube artificiale che è illuminata dai raggi del sole e che, a causa di complessi fenomeni fisico-chimici, di cui in questa sede si tralascia un tentativo di interpretazione, può essere fotografata da terra sotto vari angoli e posizioni.

Tali riprese fotografiche, e questo risponde al punto b) sopra ricordato, possono essere effettuate per un periodo di tempo abbastanza lungo, da venti a trenta minuti, perchè la diffusione della nube artificiale, benchè rapida a causa della assai rarefatta atmosfera circostante, avviene in assenza, o quasi, di reazioni chimiche, in quanto, appunto, il numero di molecole di aria per unità di volume alle quote interessate dagli esperimenti è estremamente ridotto. Questo spiega anche perchè la tecnica della nube di sodio e litio non possa essere impiegata a basse quote, praticamente — secondo esperienze condotte qualche tempo fa — al di sotto dei 69-70 km; infatti, a causa della densità atmosferica relativamente alta, si innescano delle complesse reazioni chimiche con quasi immediata sparizione della nube artificiale.

A scopo di confronto si può accennare brevemente agli altri metodi più usati per lo studio diretto delle caratteristiche dell'alta atmosfera:

1) *Sfera cadente* (falling sphere).

In questo caso il carico pagante del razzo vettore è costituito da un contenitore in cui è immesso un tessuto leggerissimo, ma abbastanza resistente, che, espulso dal suo alloggiamento alla quota voluta, si gonfia assumendo la forma di una sfera. Tale sfera, che in genere ha un diametro sui 30 m e viene seguita da terra a mezzo radar, cade lentamente verso il suolo — a causa della sua estrema leggerezza — mentre la componente orizzontale dei suoi spostamenti permette la determinazione dei venti in quota (che sono — come meglio si specificherà nel seguito — essenzialmente orizzontali). Questo metodo però può essere usato, come appare evidente, soltanto a quote non molto elevate — praticamente non oltre i 100 km — perchè la densità atmosferica deve essere abbastanza alta da impedire una troppo rapida caduta della sfera.

2) *Granate esplosive*.

Durante la corsa ascensionale del razzo vettore si fanno esplodere ad intervalli prestabiliti di quote delle granate ad alto esplosivo, costituenti il carico pagante. È necessario disporre a terra di un preciso sistema d'inseguimento elettronico (Dovap, ad es.) e di un completo impianto acustico (microfoni di alta precisione, ad es.). I venti vengono valutati mediante una tecnica abbastanza complessa e possono essere determinati solo come valore medio fra due quote successive di esplosione delle granate. Si tratta quindi di un metodo non molto preciso, anche se abbastanza rapido, che non può dare ragione di molti importanti fenomeni dinamici dell'alta atmosferica («shear», ad esempio).

3) *Nubi artificiali di metalli alcalini, quali cesio e potassio*.

La tecnica è analoga a quella delle esperienze sodio-litio, salvo che la nube ionizzata che si forma non emette nel visibile e deve essere seguita da terra mediante «tracking» radarico; essa richiede cioè un'attrezzatura assai complessa e costosa. Peraltro, questo metodo, permettendo i lanci in ogni ora del giorno, presenta un vantaggio rispetto alla tecnica del sodio-litio che, come noto, può essere impiegata solo in esperienze com-

piute poco prima dell'alba o poco dopo il tramonto. Infatti, mentre la nube deve essere « illuminata » dal sole, le stazioni di ripresa a terra non devono essere investite dalla luce solare né diretta, né diffusa dall'ambiente circostante, per evitare di « annegare » sulla lastra l'immagine della nube.

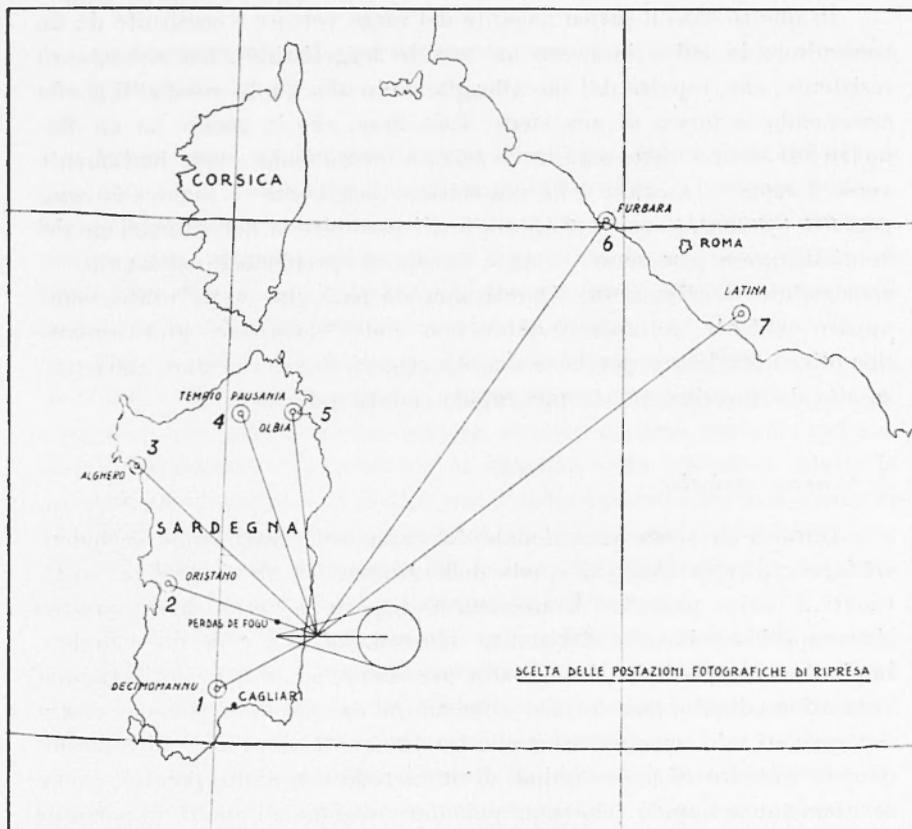


Fig. 1

Nel programma italiano di ricerche nell'alta atmosfera svolto dalla Commissione per le Ricerche Spaziali presieduta dal Prof. Broglio è stata impiegata la combinazione razzi sonda-nubi di sodio e litio e la distribuzione delle postazioni fotografiche a terra è stata finora quella riportata in Fig. 1. Tali postazioni, disposte intorno al Poligono del Salto di Quirra da cui sono stati effettuati i lanci, sono state dotate di quattro macchine fotografiche di ripresa ciascuna di diverse caratteristiche.

Le macchine scattano i fotogrammi ad intervalli prestabiliti di tempo con tempi di esposizione parimenti fissati ed identici per tutte le macchine di tutte le stazioni. Sempre per i lanci italiani si riportano, a titolo di esempio, due sequenze di tali fotogrammi (Figg. 2, 3, 4, 5, 6, 7). Nelle due ultime figure sono articolatamente evidenti gli « shear ». Il fenomeno degli « shear » cioè di correnti, o venti, dell'alta atmosfera che in un intervallo relativamente ristretto di quote cambiano bruscamente direzione, è uno dei più importanti della dinamica dell'alta atmosfera. La Fig. 8, che si riferisce ad un lancio differente di quello relativo alle Figg. 6 e 7, ne dà un altro esempio. Nella Fig. 8 è possibile individuare un altro importante fenomeno dinamico: la turbolenza, di cui la Fig. 9, particolare della precedente, dà un quadro più chiaro.

Si notano in particolare i filamenti di nube di cui appare l'insorgenza da un unico centro sul braccio principale della nube stessa. Il fenomeno della turbolenza negli esperimenti finora condotti, in Italia ed in altri Paesi, si è verificato a quote piuttosto basse: secondo alcuni ricercatori il limite superiore dovrebbe essere fissato a 102 km. Questo fatto è confermato dai risultati sperimentali che hanno indicato la presenza di turbolenza solo fra 80 e 100 km. Da 80 km in su sono anche presenti gli « shear », il cui campo si estende, almeno nella quasi totalità dei casi, fino a 110-115 km e non oltre.

I fotogrammi sono gli elementi di base per la restituzione dei dati. In questa fase degli esperimenti il problema principale è quello della individuazione dei punti omologhi, cioè dei punti su due o più fotogrammi diversi, ma presi allo stesso istante in due o più differenti postazioni, che corrispondono allo stesso punto (particelle) della nube vera. La restituzione dei dati, cioè la ricostruzione della posizione spaziale vera della nube ad ogni istante, è possibile quindi solo disponendo delle serie complete di fotogrammi relative ad almeno due postazioni di ripresa.

Ritornando ora al problema principale si può dire che sono stati escogitati vari metodi per la determinazione dei punti omologhi. Intanto se ne possono citare almeno due che « aggirano » la difficoltà:

- a) ricostruzione fotogrammetrica (stereofotogrammetria);
- b) uso di stazioni fotografiche di ripresa molto lontane dal punto di lancio.

Ma essi sono troppo poco precisi per gli scopi dell'esplorazione dell'alta atmosfera.

I metodi effettivamente impiegati sono vari; se ne possono ricordare tre:

- 1) metodo americano: analogico
- 2) metodo inglese : numerico
- 3) metodo italiano : analitico.

Il metodo americano è basato sulla ricostruzione in scala in un vasto ambiente a terra del fenomeno reale. Al posto delle stazioni fotografiche vi sono dei proiettori il cui asse ottico è orientato identicamente a quello delle macchine fotografiche. Nel modello le negative dei fotogrammi sono proiettate su un grande schermo emisferico (Fig. 10). Una disposizione opportuna delle lenti dei proiettori assicura che tutti gli angoli del modello siano conservati rispetto al fenomeno reale.

In queste condizioni un sottile filo di nylon (o simile materiale) tirato fra un proiettore del modello ed un punto della corrispondente immagine proiettata dalla nube rappresenta una « linea di vista » fra la macchina fotografica corrispondente al proiettore e lo stesso punto (particella) della nube vera. Un secondo filo tirato da un secondo proiettore, sempre nel modello, allo stesso punto della corrispondente immagine della nube incrocia il primo filo in un punto che corrisponde nel modello alla posizione reale della particella della nube vera. Per migliorare la precisione si considerano anche gli altri proiettori in modo da ottenere un incrocio fra tanti fili quante sono le stazioni di ripresa. Essendo fissata e nota la scala del modello, è possibile allora ricostruire completamente la posizione della nube ad ogni istante.

Il metodo richiede dunque una complessa apparecchiatura a terra, il che costituisce certamente uno svantaggio; inoltre l'individuazione dei punti omologhi avviene, come sopra accennato, per vie prevalentemente « visive » e questo è causa di una certa imprecisione soprattutto nella zona di nube con pochi elementi caratteristici, cioè negli intervalli di quote in cui il vento è quasi costante in intensità e direzione: ciò si verifica in particolare alle alte quote — per fissare le idee, al di sopra dei 150 km.

Nel metodo inglese si considerano per ogni istante le coppie di fotogrammi contemporanei ottenuti in due stazioni diverse. Si fa inoltre riferimento, per semplicità all'asse centrale dell'immagine della nube. Su tale asse si individuano per ciascun fotogramma un certo numero di punti (cinquanta, ad es.). Si considera poi un punto su di un fotogramma e si determina analiticamente la retta congiungente tale punto col centro ottico della macchina che ha ripreso il corrispondente fotogramma. In modo analogo si costruiscono le rette passanti per il centro ottico

dell'altra macchina e per tutti i punti segnati sull'altro fotogramma: fra tali rette si cerca poi quella che interseca la retta del primo foto-

RESTITUZIONE DEI DATI

METODO AMERICANO

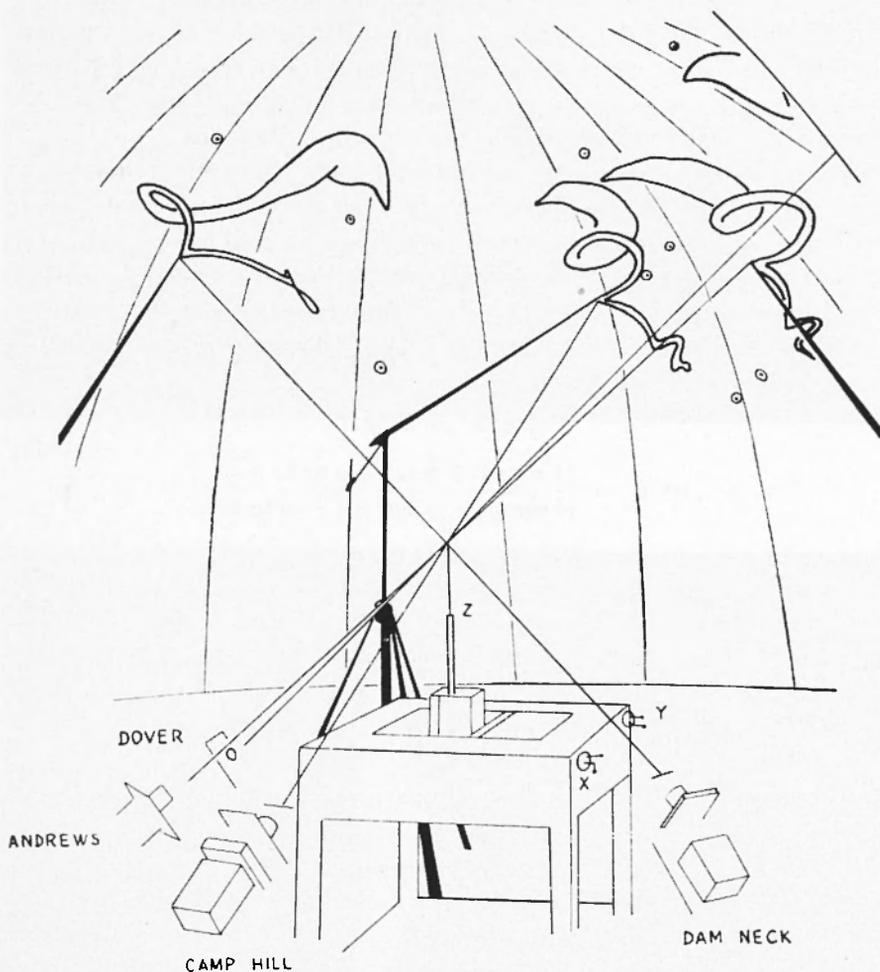


Fig. 10

gramma o che passa alla minima distanza da essa. Si determina così — nel secondo caso mediante una opportuna approssimazione — la posizione spaziale vera di un punto della nube.

Ripetendo lo stesso procedimento per tutti i punti del primo fotogramma si viene a ricostruire la nube, o meglio il suo asse centrale (*), ad ogni istante.

È evidente nel metodo una certa mancanza di precisione, ma, soprattutto una notevolissima laboriosità che allunga di molto i calcoli necessari, anche ricorrendo all'uso di calcolatori digitali.

Il metodo italiano è stato sviluppato dal Prof. Broglio in occasione delle serie di lanci dal Poligono del Salto di Quirra. Si considerino due fotogrammi presi allo stesso istante in due stazioni diverse. Ogni punto dell'immagine della nube — per semplicità si può fare riferimento all'asse centrale — è individuato da due coordinate di lastra x, y .

Si consideri poi il piano verticale α passante per le due stazioni di cui sopra e per ognuna di esse si fissi un sistema di coordinate polari sferiche con origine nel centro ottico di ciascuna stazione e in cui l'elevazione φ è contata a partire dall'orizzontale locale e l'azimut θ a partire dal piano α . Le coordinate polari φ e θ sono legate alle coordinate di lastra x, y (Fig. 11) dalle semplici relazioni trigonometriche:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{sen} \varphi &= \frac{f \operatorname{sen} \varphi_0 + y \cos \varphi_0}{\sqrt{f^2 + x^2 + y^2}} \\ \operatorname{tg} \theta &= \frac{(f \cos \varphi_0 - y \operatorname{sen} \varphi_0) \operatorname{tg} \theta_0 + x}{(f \cos \varphi_0 - y \operatorname{sen} \varphi_0) - x \operatorname{tg} \theta_0} \end{aligned} \right\} [1]$$

COORDINATE DI LASTRA E COORDINATE POLARI

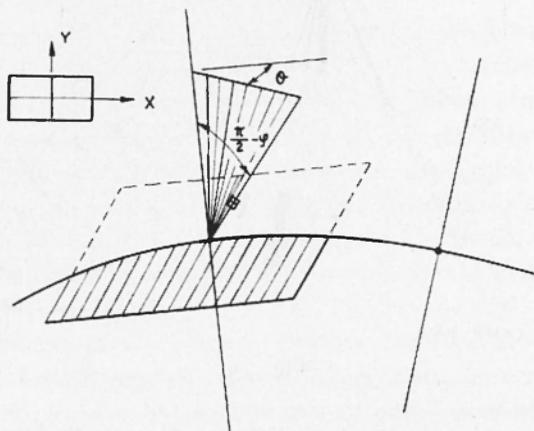


Fig. 11

(*) Dal punto di vista delle caratteristiche dinamiche, il limitarsi alla considerazione dell'asse centrale non comporta in pratica alcun errore sensibile.

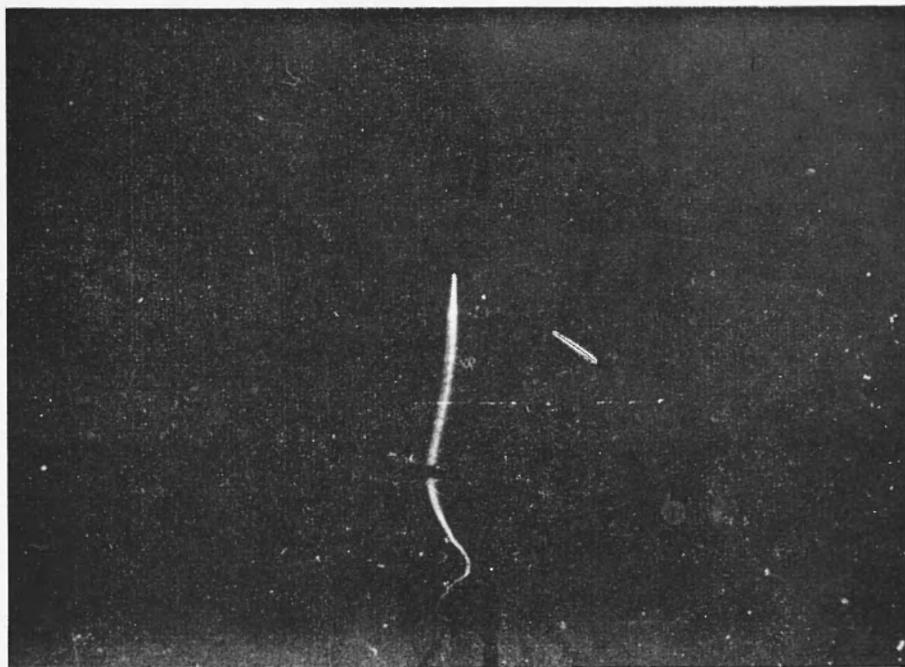


Fig. 2

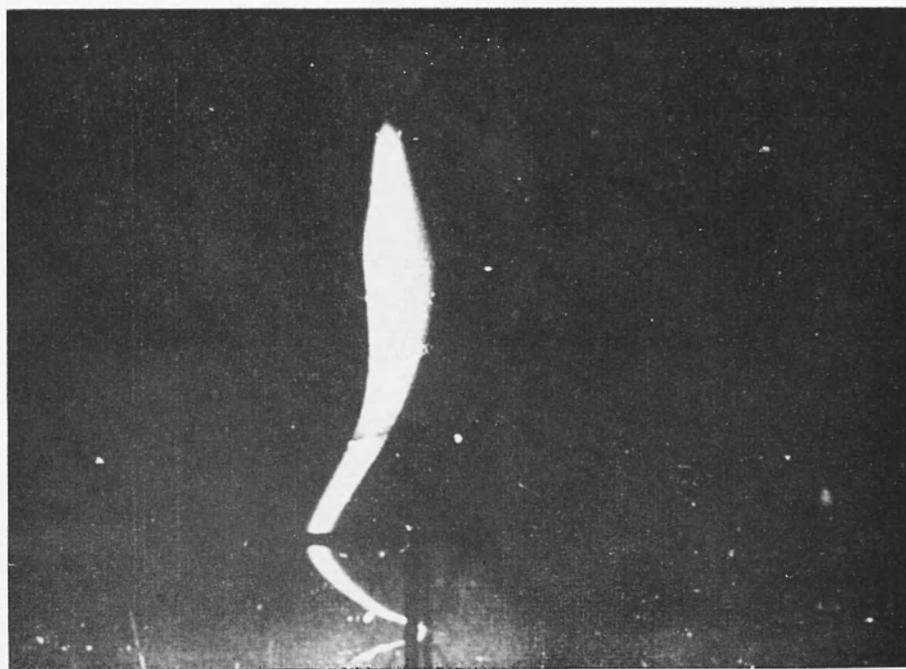


Fig. 3

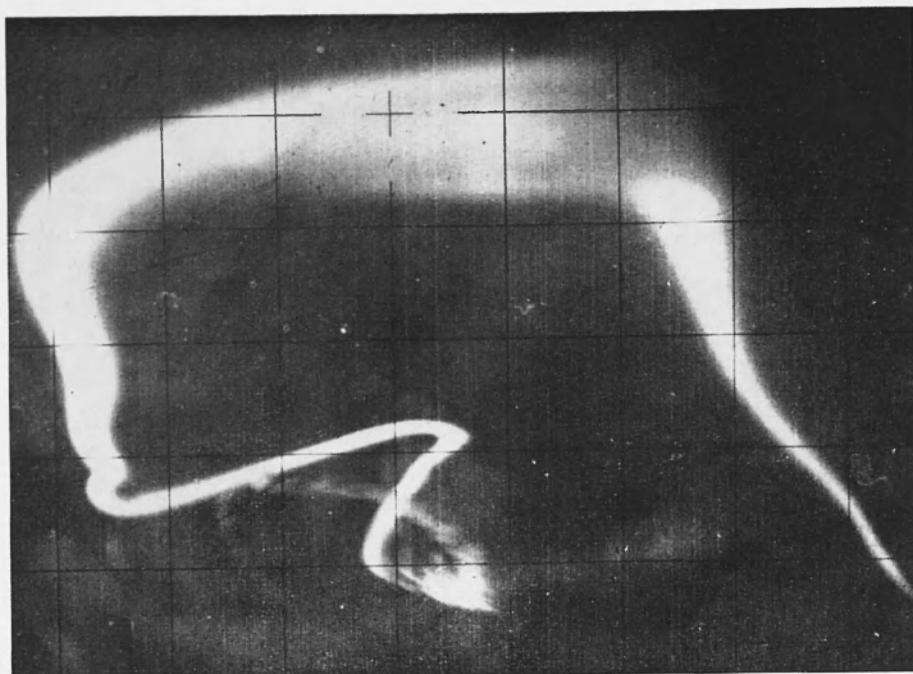


Fig. 8]

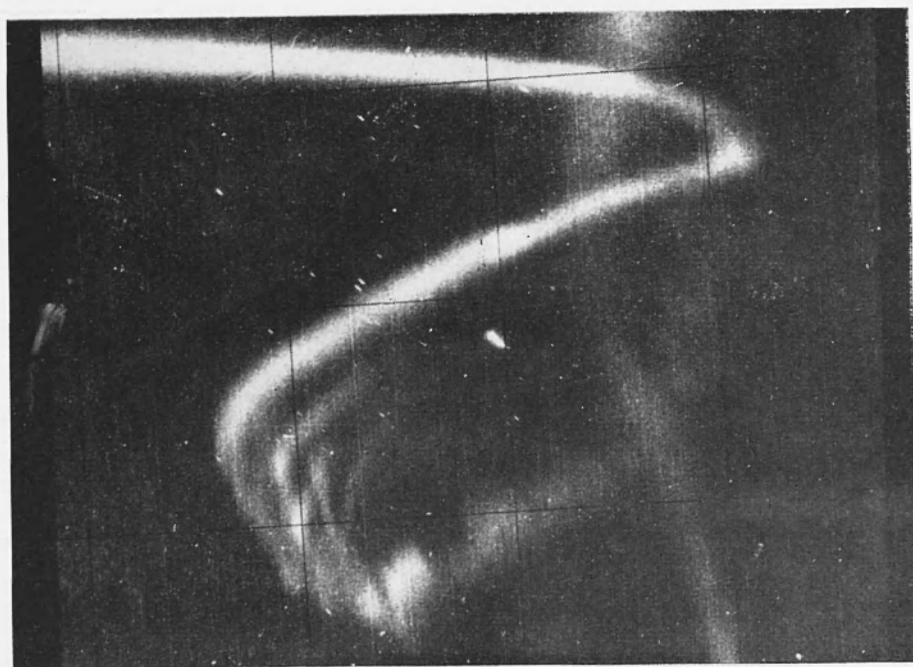


Fig. 9

dove f è la distanza focale e φ_o, θ_o elevazione ed azimuth dell'asse ottico (quantità, queste, note).

Ciascun punto della nube vera, essendo allineato con il suo punto immagine e col centro ottico, è definito quindi mediante le stesse φ e θ dello stesso punto immagine, rimanendo in questa fase del procedimento ancora incognita la distanza Z .

D'altra parte un punto della nube può anche essere determinato mediante gli angoli ξ e ζ (Fig. 12), legati a φ e θ dalle relazioni:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \xi &= \frac{\operatorname{sen} i}{\operatorname{tg} \theta} - \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{sen} \theta} \cos i \\ \cos \xi &= \cos \varphi \cos \theta \cos i + \operatorname{sen} \varphi \operatorname{sen} i \end{aligned} \right\} [2]$$

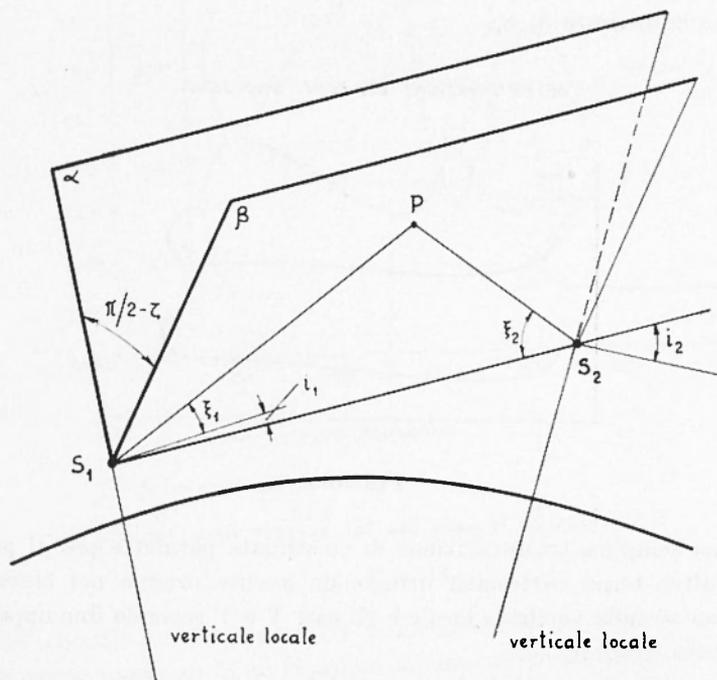


Fig. 12

dove i è l'inclinazione della orizzontale locale rispetto alla congiungente $S_1 S_2$.

Effettuando le operazioni per ciascun punto dell'asse centrale della nube sui fotogrammi si ottengono le due curve $\xi_1(\zeta)$ e $\xi_2(\zeta)$ (Fig. 13). Ne risulta immediata la determinazione dei punti omologhi: infatti ogni

punto P della nube è definito dallo stesso ζ per ciascuna delle due stazioni. Facendo riferimento ad un sistema cartesiano ortogonale di riferimento con origine, ad es., nel punto S_1 , con l'asse Z orientato secondo la verticale locale, l'asse Y sull'intersezione del piano orizzontale locale col piano α e l'asse X in conseguenza, si ottiene allora:

$$\begin{aligned} X(P) &= b \frac{\text{sen } \xi_2}{\text{sen}(\xi_2 - \xi_1)} \text{sen } \xi_1 \cos \zeta \\ Y(P) &= b \frac{\text{sen } \xi_2}{\text{sen}(\xi_2 - \xi_1)} [\cos \xi_1 \cos i_1 - \text{sen } \xi_1 \text{sen } \zeta \text{sen } i_1] \\ Z(P) &= b \frac{\text{sen } \xi_2}{\text{sen}(\xi_2 - \xi_1)} [\text{sen } \xi_1 \text{sen } \zeta \cos i_1 + \cos \xi_1 \text{sen } i_1] \end{aligned} \quad [3]$$

dove b è la distanza $S_1 S_2$.

DETERMINAZIONE DEI PUNTI OMOLOGHI

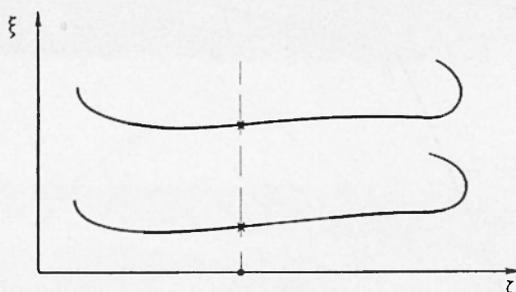


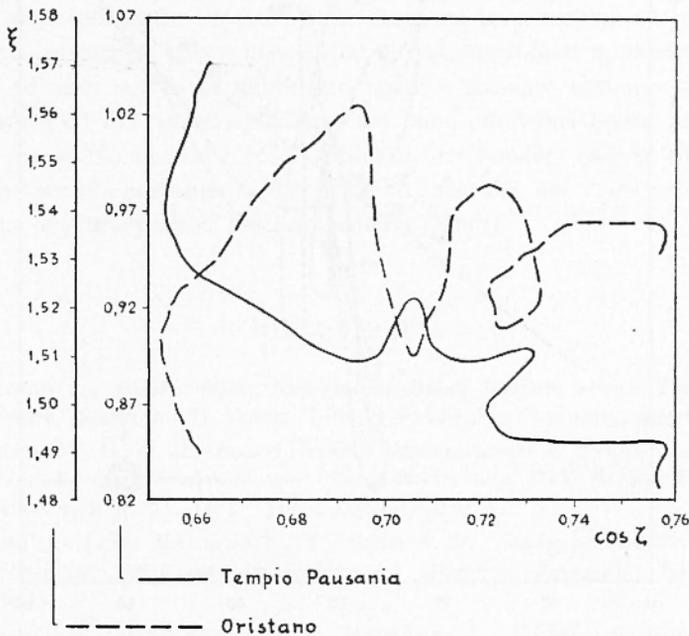
Fig. 13

Una semplice trasformazione di coordinate permette poi di passare ad un'altra terna cartesiana ortogonale avente origine nel lanciatore, con l'asse Z sulla verticale locale e gli assi X e Y secondo due opportune coordinate geografiche.

La restituzione dei dati col metodo esposto è quindi effettuata con una elevata precisione non raggiungibile negli altri metodi. Anche la elaborazione numerica è sufficientemente rapida: per i lanci italiani essa è stata condotta presso l'Istituto di Costruzione Aeronautiche dell'Università di Roma mediante un calcolatore digitale Bendix G-15D. Si noti infine che nel metodo italiano non è richiesto alcun complesso impianto sperimentale a terra e ciò costituisce un evidente vantaggio rispetto, ad esempio, al metodo americano.

La Fig. 14 mostra come in un caso reale si presentino le curve $\xi_1(\zeta)$ e $\xi_2(\zeta)$. I valori estremi di ζ (o $\cos \zeta$) sono gli stessi per le due curve, come è logico, dato che l'angolo dietro avente come vertice la congiungente $S_1 S_2$ e contenente tutta la nube deve essere lo stesso per le due stazioni. Per la stessa ragione le tangenti alle curve parallele all'asse

DIAGRAMMA PER LA DETERMINAZIONE DELLE COPPIE
DEI PUNTI CORRISPONDENTI



(Fotogrammi ripresi 151 sec. dopo il lancio)

Fig. 14

delle coordinate devono essere coincidenti. Si noti infine la tendenza alla corrispondenza di un massimo di una curva con un minimo dell'altra e viceversa.

Una volta effettuata la restituzione dei dati, il procedimento per il calcolo dei venti è molto semplice ed è concordemente adottato dai ricercatori dei vari Paesi. Si fa la proiezione quotata ad istanti successivi della nube sul piano orizzontale passante per il lanciatore e si riporta sullo stesso diagramma la traiettoria del razzo vettore ricavata in precedenza.

La Fig. 15 mostra il procedimento in un caso reale (sul diagramma sono riportate, per ragioni di chiarezza, solo due curve). Ora, i venti alle alte quote sono fondamentalmente orizzontali e costanti in direzione ed intensità, almeno per un tempo sufficientemente breve quale quello interessato dall'esperimento.

PROIEZIONE ORIZZONTALE DELLA NUBE

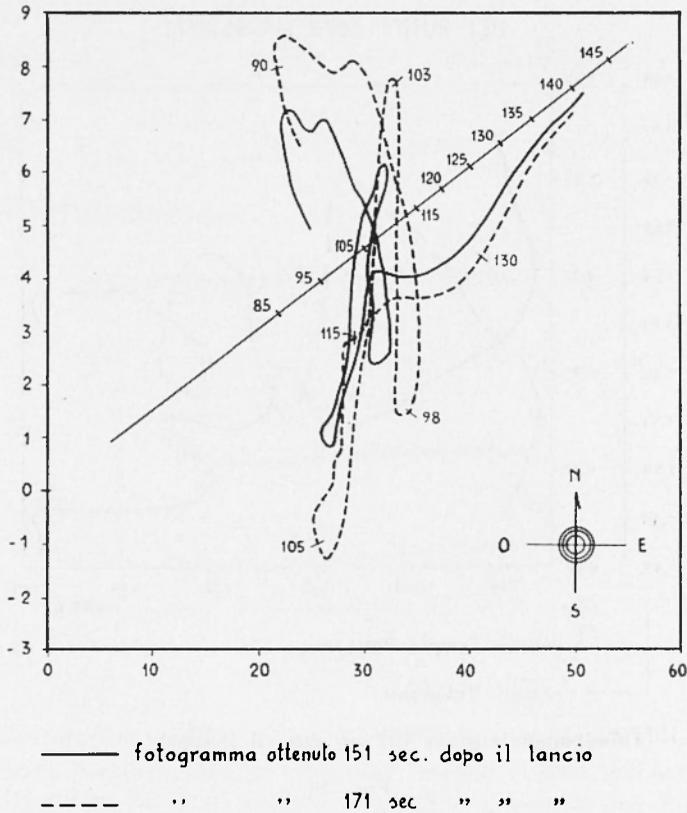


Fig. 15

In queste condizioni i punti della traiettoria del razzo e delle proiezioni della nube ad istanti successivi aventi la stessa quota risultano allineati su una retta. Se si indica allora con x_1, y_1, z un punto su una curva (relativa al tempo t_1) e con x_2, y_2, z un punto su un'altra curva (relativa al tempo t_2), lo spostamento D è:

$$D(z) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad [4]$$

e quindi la velocità del vento

$$V(z) = \frac{D(z)}{t_2 - t_1} \quad [5]$$

mentre la sua direzione:

$$\text{tg } \theta(z) = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad [6]$$

avendo orientato l'asse x verso est e l'asse y verso nord.

Si noti infine che l'ipotesi della costanza in direzione ed intensità dei venti orizzontali non è necessaria: si possono infatti applicare le [4], [5], [6] ad ogni coppia di curve successive e ricavare così le variazioni di $V(z)$ e $\theta(z)$ nel tempo; peraltro, nei lanci effettuati finora in Italia, questo fenomeno non si è mai verificato, ottenendosi così la conferma della sostanziale costanza in direzione ed intensità dei venti orizzontali in quota per intervalli di tempo di alcuni minuti.

BIBLIOGRAFIA

- (1) BROGLIO L., *First Italian Experiment Using Sodium Cloud Technique*. «Space Research» II North Holland Publishing Company, Amsterdam.
- (2) STROUD W. G. et al., *Rocket-Grenade Measurements of Temperatures and Winds in the Mesosphere over Churchill*. «Canada. IGY Rocket Report», Number 6, p. 31. IGY World Data Center A.
- (3) BEDINGER J. F., MANRING E. R., GOSH S. N., *Study of Sodium Vapor Ejected into the Upper Atmosphere*. «J. Geophys. Research», **63**, 19-29, (1958).
- (4) MARMO F. F., ASCHEMBRAND L. M., PRESSMAN J., *Artificial electron clouds*. Cinque pubblicazioni in «Planetary and Space Science», Pergamon Press, Londra da Agosto 1959 ad Aprile 1960.
- (5) BLAMONT J., *Nuages Artificiels de Sodium*. «Space Research I», North Holland Publishing Company, Amsterdam.
- (6) MANRING E., BEDINGER J., KNAFLICH H., LYNCH R., *Upper Atmospheric Wind Profiles Determined from three Rocket Experiments*. GCA Technical Report 61-1 - N. Geophysics Corporation of America.
- (7) BROGLIO L., *Review of Italian Meteorological Activities and Results*. In corso di pubblicazione in «Space Research» III, North Holland Publishing Company - Amsterdam.
- (8) BLAMONT J., DE JAGER D., *Upper Atmospheric Turbulence Determined by Means of Rockets*. «J. Geophys. Research», **67**, (9 July 1962).