SULLA PERCEZIONE DELLA DIREZIONE DEL SUONO.

Prof. ANNIBALE STEFANINI.

§ 1. — Si è ritenuto per molto tempo che il giudizio della direzione di un suono fosse basato sulla diversa intensità con la quale esso è percepito dai due orecchi. Ma Lord Rayleigh ¹⁾ mostrò che pei suoni puri ciò può esser vero se sono acuti, perchè allora se la sorgente sonora non è situata nel piano mediano normale all'asse dei due orecchi, il suono è percepito più intenso dall'orecchio più vicino; ma per suoni gravi la differenza d'intensità, anche se la sorgente sonora è su quell'asse, è insignificante, ed egli riteneva che non potesse servire alla localizzazione del suono.

La differenza d'intensità ai due orecchi, nell'ipotesi che la testa funzioni come una sfera di raggio r , per un suono di lunghezza d'onda λ , che provenga da destra o da sinistra, è data da

$$\Delta = \frac{3}{4} \left(\frac{2\pi r}{\lambda} \right)^2$$

e per una nota di 128 v. d. il valore di Δ è appena l'1 % dell'intensità totale; e per note di questa altezza e per quelle più basse pareva difficile ritenere che la differenza fra le intensità ai due orecchi potesse servire alla localizzazione del suono.

Ora non v'ha dubbio che la differenza d'intensità ai due orecchi facilita il giudizio; ma in quei casi in cui tale spiegazione sembrava insufficiente, Lord Rayleigh suppose che intervenisse la differenza di fase ai due orecchi. Egli riconobbe tuttavia che se questo può essere vero pei suoni gravi, non lo è più per gli acuti. Infatti, ammettendo fra gli orecchi una distanza media di 25 cm. (metà della circonferenza della

¹⁾ *Phil. Mag.* (6) 13, pag. 214, 1907.

testa) per una nota di 256 v. d. il ritardo per uno degli orecchi è $1/4$ di periodo, per la nota di 512 v. d. è di $1/2$ periodo e per 1024 v. d. di un periodo. Ora è certo che un ritardo di $1/2$ periodo non può servire al giudizio, e tanto meno quello di un periodo. Per note un po' alte la differenza di fase non può quindi servire; e deve invece entrare in gioco la differenza d'intensità.

Per riconoscere se realmente la differenza di fase influisce sulla localizzazione dei suoni gravi, oltre le esperienze accennate nel riassunto pubblicatone da A. Pochettino ¹⁾ e quelle di Münnich, di Aggazzotti, di More e Fry ²⁾, di Myers e Wilson ³⁾, delle quali già mi occupai in un mio precedente studio ⁴⁾ sono notevoli quelle più recenti di Margery Simpson e di G. W. Stewart.

Altre ricerche sulla localizzazione del suono sono state poi pubblicate dall'Aggazzotti, da Hornbostel e Wertheimer, da W. e H. Marx e da Perot.

§ 2. — Dalle esperienze di Stewart ⁵⁾ in alcune delle quali si faceva variare la fase mediante un percorso diverso del suono, che da un diapason era condotto agli orecchi con tubi di gomma, e in altre si faceva variare l'intensità ai due orecchi, sembra risultare che effettivamente una differenza di fase compresa fra 0 e $1/4$ di periodo possa servire alla localizzazione dei suoni compresi fra 128 e 1024 v. d. Anzi secondo Stewart, mentre la differenza d'intensità non è che un fattore accessorio, pei suoni compresi fra i limiti anzidetti è la differenza di fase che ha l'importanza predominante sul giudizio della localizzazione.

Quando era fatta variare insieme l'intensità e la fase, nessuno dei due elementi aveva un'importanza diversa di

¹⁾ *Nuovo Cimento* (5) 19, p. 137, 1910.

²⁾ *Phil. Mag.* (6), 13, pag. 452, 1907.

³⁾ *Proc. Roy. Soc.* 80, pag. 260, 1908.

⁴⁾ *Arch. It. di Otol. et.* 29, pag. 65, 1918.

⁵⁾ *Phys. Rev.* (2), 15, pag. 425 e 432, 1920.

quando si faceva agire da solo. Perciò nel caso di una loro azione simultanea, i risultati furono gli stessi di quando agiva la sola differenza o di fase o d'intensità. — E poichè fra gli individui da lui adoperati per le esperienze, ne furono trovati due che non erano capaci di giudicare una differenza d'intensità ai due orecchi, mentre localizzavano il suono per differenza di fase, lo Stewart conclude che l'orecchio è capace di percepire la fase di una vibrazione sonora, almeno entro i limiti anzidetti fra 128 e 1024 v. d.

Dalle esperienze eseguite da M. Simpson ¹⁾ e da quelle sopra citate dello Stewart risulta poi che il rapporto $\frac{\varphi}{\theta}$ fra la differenza di fase e lo spostamento angolare dell'immagine sonora dall'asse dei due orecchi, è costante per ciascuna nota e per ciascun individuo in una medesima esperienza, ma può variare da una esperienza all'altra; è poi diverso per individui diversi, e cresce, per una stessa persona, al crescere dell'altezza del suono.

Anche se, mantenendo uguale la fase, si fa diversa l'intensità ai due orecchi, fra lo spostamento angolare θ anzidetto e le intensità I , I' a destra e sinistra, esiste una relazione costante, che da esperienze eseguite nel 1918 da Stewart e Howda ²⁾ col diapason 256 v. d. risultò espressa da

$$\theta = k \log_e \frac{I}{I'}.$$

Lo Stewart ha esteso ora quella relazione per suoni fino a 1024 v. d.; e, misurando le intensità col disco di Rayleigh, ha ottenuto per k i valori seguenti:

Pe le note di	v. d.	256	512	1024
Osservatore	S	16°		
»	B	30°	21°	10°
»	F		14°	7°,8
»	M		21°	18°

¹⁾ *Phis. Rev.* (2) 15, pag. 421, 1920.

²⁾ *Psych. Rev.* 25, pag. 242, 1918.

Nelle esperienze così eseguite si ottiene ordinariamente la fusione dei due suoni in un'unica immagine spostata più o meno dall'asse dei due orecchi secondo la relazione precedente, allorchè come sorgente sonora si adopera un diapason. Ma lo Stewart adoperò anche suoni prodotti con un apparecchio da lui chiamato *Phaser* e simile a quello di cui si era già servito Lord Rayleigh ¹⁾ consistente in una o più sbarre di ferro disposte secondo i raggi di una ruota, che si fanno girare rapidamente di fronte a due elettromagneti, che sono riuniti a due telefoni, dai quali si conducono i suoni stessi agli orecchi mediante tubi di gomma. Egli manteneva uguale la fase, e variava l'intensità ai due orecchi stringendo più o meno uno dei tubi. In questo modo non si può determinare la costante k ; ma fu trovato che per alcuni osservatori non si aveva la fusione in un suono unico, bensì si presentavano due immagini sonore distinte.

Esperienze analoghe a queste furono eseguite anche da me nel 1917, e pubblicate nel 1918 ²⁾, col reotomo pendolare. Io pure notai che si percepiva talvolta il suono come proveniente dai due telefoni; ma poichè la doppia immagine non l'ottennevo mai adoprando due diapason all'unisono, attribuii il fatto a differenza di timbro nei suoni resi dai due telefoni. Ritengo perciò che altrettanto debba essere osservato a proposito delle esperienze di Stewart.

§ 3. — Dal complesso delle esperienze fatte precedentemente a quelle sopra riferite si erano ottenuti risultati assai discordanti; poichè, fra gli individui adoperati nelle ricerche, ve ne erano alcuni che non avvertivano spostamento nell'immagine sonora quando si faceva variare la fase, e fra quelli che l'avvertivano, alcuni lo giudicavano diverso da altri per una medesima differenza di fase. Era lecito perciò ritenere che quello che si attribuiva a differenza di fase fosse dovuto invece a differenza d'intensità ai due orecchi, causata dal diverso percorso lungo

¹⁾ *Phil. Mag.* (6) 13, pag. 316, 1907.

²⁾ *Arch. ital. d' Otol. et.* 29, pag. 65, 1918.

i tubi adoperati. Il suono era infatti lateralizzato dalla parte dove il tubo, per ottenere un'anticipazione della fase, era più corto.

Nelle esperienze di Simpson e in quelle di Stewart fu procurato di tenere uguali le intensità ai due orecchi, cambiando opportunamente la disposizione sperimentale. Cioè: invece di diramare il suono condotto ai due orecchi da un unico tubo cui si affacciava il diapason, si adoperavano due tubi separati, uno affacciato a una branca e l'altro all'altra branca del diapason. Si poteva ottenere una medesima intensità avvicinando più o meno uno dei tubi al diapason; e in alcuni casi fu anche verificata l'uguaglianza d'intensità col disco di Rayleigh.

Per determinare il limite superiore del suono pel quale cessa l'azione della fase, lo Stewart si servì dell'apparecchio sopra descritto (*Phaser*); e trovò che al di sopra di 1500 v. d. una differenza di fase ai due orecchi non serve più alla lateralizzazione del suono.

A questo proposito è per altro da notare che Lord Rayleigh, nelle sue considerazioni sopra citate, si riferiva al caso che la sorgente sonora fosse unica e lontana dall'ascoltatore, e osservava che allora la distanza fra i due orecchi non poteva, per suoni acuti, determinare una differenza di fase efficace alla lateralizzazione. Quando invece, come nelle esperienze dello Stewart, si conducono, mediante tubi, due vibrazioni in fase diversa separatamente ai due orecchi, la cosa è differente; e se l'organo uditivo fosse costituito in modo da riconoscere la fase, non vi dovrebbe essere alcuna limitazione dipendente dall'altezza del suono.

§ 4. — Un modo più semplice di risolvere l'obiezione relativa alla diversa intensità derivante dal diverso cammino che, nelle esperienze più antiche, si faceva percorrere al suono, fu immaginato dal prof. A. Lo Surdo, e da lui dimostrato ad alcuni soci della Società Italiana di Fisica in occasione del Congresso che quella Società tenne in Pisa nell'aprile 1919.

Il prof. Lo Surdo adoperava un risonatore al quale era presentato un diapason vibrante (512 v. d.). Dal risonatore si

diramavano due tubi di gomma che erano portati agli orecchi. Quando i tubi avevano la stessa lunghezza, il suono era localizzato nel piano mediano normale all'asse dei due orecchi, e se quello di destra si allungava di circa $1/8$ della lunghezza d'onda l'immagine sonora si portava a sinistra; *ma rimaneva localizzata a sinistra anche se la lunghezza del tubo da quella parte si aumentava di 65 cm., cioè di un tratto uguale alla lunghezza d'onda del suono adoperato.* In questo caso il suono a sinistra doveva esser più debole che a destra; ma poichè a sinistra si aveva una anticipazione della fase, il suono era lateralizzato da quella parte nonostante che fosse più debole di quello che arrivava a destra.

Fra le persone che fecero l'esperimento, alcune, ed io era fra queste, non riuscivano a localizzare decisamente il suono dalla parte ove la fase anticipava; ma per altre la decisione era sicura.

§ 5. — Volli perciò ripetere con maggiore comodità quelle esperienze; e adoperando i tubi che penetravano nel condotto uditivo, tanto io che altre persone non riuscivamo sempre a formarci un giudizio sicuro sulla sede dell'immagine sonora, che talvolta restava nel piano mediano, tal altra era localizzata dalla parte opposta a quella dove avrebbe dovuto trovarsi. E ciò non poteva dipendere da diversa sensibilità dei due orecchi, perchè anche scambiando di posto i tubi si aveva la stessa incertezza.

§ 6. — La spiegazione di questi risultati discordanti mi fu per altro suggerita da un'esperienza fatta con tubi di lunghezza uguale. Quando il suono percorre uguali tratti di tubo e arriva perciò ai due orecchi con uguale intensità e nella medesima fase, l'immagine sonora si forma nel piano mediano: per alcuni sembra esterna, per altri il suono è percepito come proveniente dal mezzo della testa. Orbene: *basta spostare leggermente uno dei tubi nel condotto uditivo, inclinarlo più o meno, o introdurlo più o meno profondamente nel meato, per avvertire subito uno spostamento dell'immagine sonora.*

Le discordanze provate dai diversi individui, o anche da un medesimo individuo in ore diverse di uno stesso giorno o in giorni diversi, e che erano attribuite a condizioni fisiche variabili negli osservatori da una volta all'altra (M. Simpson, *l. c.*, pag. 424) debbono invece assai più ragionevolmente esser dovute alla causa d'errore da me indicata; perchè era oltremodo facile che da una volta all'altra vi fosse qualche dissimmetria nella posizione dei tubi otoscopici, che servivano a condurre il suono agli orecchi.

Per eliminarla, ho applicato a ciascuna delle estremità dei tubi adduttori del suono un imbuto metallico, procurando che i due imbuti fossero in tutto uguali e potessero contenere comodamente il padiglione dell'orecchio.

Con questa modificazione ogni dissimmetria viene resa impossibile; e allora l'esperienza di Lo Surdo riesce immancabilmente, e senza alcuna esitazione il suono è localizzato dalla parte dove arriva con anticipo di fase, anche se il cammino che deve percorrere è più lungo.

Parrebbe dunque che la differenza di fase avesse la prevalenza su quella dell'intensità. Se non che è da osservare che quando al ramo più corto dei due tubi si aggiunge un tratto uguale a una lunghezza d'onda del suono adoperato, si aumenta da quella parte la capacità dello spazio risonante, e poichè in quel tratto aggiunto può formarsi un'onda stazionaria completa, niente di più probabile che da quella parte l'intensità del suono aumenti in modo da renderla maggiore che dell'altra.

Sembra quindi che non si possa attribuire a queste esperienze un valore decisivo.

Vedremo tuttavia (12) che si è cercato in altro modo di far variare la fase senza far cambiare l'intensità.

§ 7. — Nell'ascoltazione ordinaria il suono arriva ai due orecchi liberamente, e in modo diverso da quello seguito nelle esperienze sopra riferite; e forse intervengono ad aiutare il giudizio della localizzazione molti altri elementi, fra i quali

può avere notevole importanza la conduzione per via ossea, e specialmente l'abitudine.

Lo Stewart ¹⁾, in una sua nota anteriore a quella citata aveva calcolato l'intensità del suono che arriva ai due orecchi per il caso che la sorgente fosse situata a 477 cm. dall'ascoltatore, e per diverse posizioni del capo; e aveva trovato che per i toni bassi l'intensità apparente è quasi la stessa ai due orecchi per qualunque posizione del capo. Per toni alquanto alti la differenza delle intensità diventa un fattore più importante; ma per note molto acute ($\lambda = 30$ cm.) la sua importanza di nuovo diminuisce. Poichè nei casi ordinari il suono è assai meglio localizzato quando la testa può ruotare attorno al suo asse verticale, queste ricerche sono certamente interessanti; ma da esse non risultava che la differenza fra le intensità ai due orecchi fosse il fattore più importante nella localizzazione del suono.

In altra Nota successiva lo Stewart ²⁾ studiò invece se per la localizzazione non fosse più importante la somma delle intensità ai due orecchi, anzichè la loro differenza. Egli osserva che se il capo e la sorgente sonora sono stazionari, probabilmente ha molta importanza o la differenza o il rapporto fra l'intensità ai due orecchi; ma se l'ascoltatore può girare il capo a volontà e il suono ha una durata sufficiente, vi è il caso di pensare che possa intervenire come elemento di giudizio la somma delle intensità, che egli perciò calcolò per diverse posizioni del capo rispetto alla sorgente sonora.

Dai risultati da lui trovati, e rappresentati dalle curve annesse alla sua Nota citata, resulterebbe che se la somma delle intensità ai due orecchi fosse d'importanza pratica per la localizzazione del suono, quando l'osservatore fosse di fronte alla sorgente avrebbe minor difficoltà a localizzarla se la lunghezza d'onda del suono è di 60 cm., che se è di 30 o di

¹⁾ *Phys. Rev.* (1) 38, pag. 467, 1911.

²⁾ *Phys. Rev.* (2) 2, pag. 72, 1913.

120 cm.; perchè per $\lambda = 60$ cm. si ha una variazione maggiore della somma delle intensità per una piccola rotazione del capo, che per $\lambda = 30$ o $\lambda = 120$ cm.

Le curve tracciate da Stewart non assicurano, del resto, che $\lambda = 60$ cm. sia il valore critico.

Si deve peraltro notare che queste considerazioni di Stewart non possono avere alcun valore pratico; poichè è ormai fuori di dubbio ¹⁾ che le intensità dei suoni che arrivano ai due orecchi non si sommano. Il fattore che interviene nella localizzazione dei suoni è dunque o la differenza delle intensità ai due orecchi (poichè il centro nervoso giudica che il suono gli sia trasmesso soltanto dall'orecchio ove arriva più intenso), ovvero la differenza di fase.

§ 8. — In favore della differenza di fase sembrano stare anche le esperienze del Rayleigh eseguite mediante i battimenti di due diapason quasi all'unisono.

Se i due diapason son tenuti uno a destra e l'altro a sinistra, la fase con la quale i suoni arrivano ai due orecchi varia continuamente, e il suono sembra provenire alternativamente da destra e da sinistra. Questo metodo dei battimenti è stato seguito anche da Stewart, e potrebbe servire alla dimostrazione dell'influenza della fase se le vibrazioni dei due diapason si propagassero in modo da restare fra loro distinte, e a ciascun orecchio arrivasse soltanto il suono di uno solo dei due diapason.

Ma lo spostamento dell'immagine sonora che si avverte quando i diapason sono liberi nell'aria, può esser dovuto al fatto che quando i periodi delle due sorgenti sono diversi, la composizione delle vibrazioni che si propagano in direzioni opposte non dà origine a un'onda stazionaria con ventri e nodi fissi, come avviene quando i periodi sono uguali; bensì per tale composizione il massimo dell'ampiezza risultante si verifica in punti via via diversi dello spazio.

¹⁾ Cfr. Stefanini. *Arch. Ital. d'Otol. ecc.*, 29, pag. 65, 1918.

Infatti, sia $MN = l$ (fig. 1) la distanza

Fig. 1.

fra le due sorgenti, e una abbia il periodo T_1 , l'altra il periodo T_2 , cui corrispondano le lunghezze d'onda λ_1 e λ_2 e sia a l'ampiezza massima d'oscillazione comune. L'ampiezza risultante A in un punto C alla distanza x da M sarà data, all'istante t , da

$$\begin{aligned} (1) \quad A &= a \cos 2\pi \left(\frac{t}{T_1} - \frac{x}{\lambda_1} \right) + a \cos 2\pi \left(\frac{t}{T_2} - \frac{l-x}{\lambda_2} \right) = \\ &= 2a \cos \pi \left[(n_1 - n_2)t - \frac{x(n_1 + n_2)}{V} + \frac{ln_2}{V} \right] + \\ &+ \cos 2\pi \left[\frac{n_1 + n_2}{2}t - \frac{x(n_1 - n_2)}{2V} - \frac{ln_2}{2V} \right] \end{aligned}$$

ove si è posto

$$\frac{1}{T_1} = n_1 \quad \frac{1}{T_2} = n_2 \quad \frac{1}{\lambda_1} = \frac{1}{V T_1} = \frac{n_1}{V} \quad \frac{1}{\lambda_2} = \frac{n_2}{V} \quad \left(\begin{array}{l} V \text{ velocità} \\ \text{del suono} \end{array} \right).$$

Scrivendo ancora, per semplicità

$$n_1 - n_2 = d \quad n_1 + n_2 = s$$

la (1) può scriversi

$$(2) \quad A = 2a \cos \pi \left(dt - \frac{xs}{V} + \frac{ln_2}{V} \right) \cos 2\pi \left(\frac{st}{2} - \frac{xd}{2V} - \frac{ln_2}{2V} \right).$$

In questa equazione il primo fattore rappresenta l'ampiezza di oscillazione, variabile con t e con x , di una vibrazione di frequenza $\frac{s}{2} = \frac{n_1 + n_2}{2}$, la cui fase varia con x , e definita dal secondo fattore.

L'ampiezza dell'oscillazione risultante avrà perciò, in ogni punto x , $n_1 - n_2$ massimi al secondo, i quali si verificheranno negli istanti t che soddisfano alla condizione:

$$(3) \quad dt - \frac{sx}{V} + \frac{ln_2}{V} = k \quad \left(k \text{ intero} \right).$$

Da questa si ricava

$$(4) \quad x = \frac{Vd}{s} t + \frac{ln_2}{s} - \frac{kV}{s}.$$

La distanza fra due massimi in un dato istante t si otterrà dalla differenza fra i valori x_k e x_{k+1} che si hanno dalla (4) per due valori consecutivi di k , ed è data da

$$\Delta = \frac{V}{n_1 + n_2}.$$

La velocità con la quale i massimi si spostano si avrà invece dalla differenza fra i valori x_t , x_{t+1} , per due valori t e $t+1$ posti nella (4) e sarà

$$(5) \quad v = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} V.$$

Si vede perciò che i massimi si spostano tanto più velocemente, quanto più rapidi sono i battimenti.

In un medesimo istante i massimi dell'ampiezza risultante si verificano nei diversi punti dello spazio che son definiti dai successivi valori di k nella (4); ma l'orecchio percepirà soltanto quello più vicino, e perciò sembrerà che l'immagine sonora si sposti nello spazio, passando da destra a sinistra e viceversa. Invece si tratta di uno spostamento oggettivo, nello spazio, del massimo dell'intensità risultante.

Questo spostamento del massimo dell'ampiezza risultante si può illustrare anche graficamente, disegnando su due strisce di carta lucida due sinusoidi di periodi leggermente diversi e che contengano, in una medesima lunghezza, una per esempio 5 periodi, l'altra $4\frac{1}{2}$. Sovrapponendo i due disegni in modo che coincidano gli estremi, il massimo dell'ampiezza è appunto ad uno degli estremi (fig. 2).

Spostando di $1/4$ di lunghezza d'onda in sensi opposti le due sinusoidi si vede che dove prima era il massimo, si ha invece il minimo (fig. 3¹).

È per questo spostamento che il suono, nel caso di due diapason non all'unisono, sembra provenire ora dall'uno ora dall'altro orecchio.

Che il massimo dell'ampiezza risultante, nel caso dei battimenti si sposta effettivamente nello spazio, e tanto più rapidamente quanto più numerosi sono i battimenti, precisamente come è indicato dalla (5), era stato dimostrato sperimentalmente dal Righi ¹).

Nemmeno l'esperienza del Rayleigh coi battimenti è perciò dimostrativa dell'influenza della fase sulla localizzazione del suono.

§ 9. — Le esperienze dell' Aggazzotti ²), ebbero per scopo di dimostrare che il fattore determinante la localizzazione è la differenza di tempo fra gli istanti in cui il suono giunge ai due orecchi, come già egli aveva accennato fino dal 1911 ³).

Ma alle esperienze fatte con un telefono che si spostava in una stanza si può obiettare che l'aver difeso il capo dell'ascoltatore con un grosso strato di cotone non basta forse ad eliminare gli effetti della riflessione del suono dalle pareti, dal pavimento e dal soffitto della stanza, che possono dar luogo a differenze d'intensità, non controllabili, in punti diversi della sala. Nelle esperienze fatte conducendo un suono ai due orecchi con tubi di lunghezze diverse, è poi ben difficile, per non dire impossibile, esser sicuri di aver reso assolutamente uguali le intensità ai due orecchi strozzando più o meno il tubo più corto.

Da quanto sarà esposto in seguito si vedrà che non si può ammettere che il fattore tempo sia sufficiente per rico-

¹) *Mem. R. Accad. di Bologna*, 14 febr. 1892.

²) *Gior. R. Accad. di Medicina di Torino*, pag. 187, 1920.

³) *Archivio di Fisiologia*, IX pag. 523, 1911.

noscere la lateralità di un suono. Ad ogni modo si potrebbe sempre dire che quando si ascolta un suono che proviene da lontano, l'orecchio prima colpito è sempre il più vicino alla sorgente sonora, e quindi percepirà il suono più intensamente dell'altro. Si sarebbe quindi ricondotti a riferir tutto a differenze d'intensità, e la facoltà di poter apprezzare differenze estremamente piccole d'intensità non sarebbe più difficile ad ammettersi di quella, di riconoscere differenze altrettanto piccole di tempo.

L'osservazione che se l'intensità fosse il vero elemento del giudizio, il padiglione dell'orecchio dovrebbe rendere impossibile l'errore così frequente fra l'avanti e il dietro, poichè esso dovrebbe rinforzare le onde provenienti dal davanti concentrandole, non mi sembra giusta, dal momento che il padiglione agisce allo stesso modo sui due orecchi.

Anche pei suoni continui l'Aggazzotti ritiene che entri in conto il fattore tempo, perchè la sensazione, se la sorgente sonora si troverà fuori del piano di simmetria, avrà inizio nelle due orecchie con un certo intervallo, e perchè i suoni, anche musicali, pur essendo continui, potrebbero presentare oscillazioni nell'intensità, che dovrebbero originare discontinuità nella sensazione.

È difficile controllare queste ipotesi, nè è facile ammettere oscillazioni d'intensità in tutti i suoni, per es. in quelli resi dai diapason.

§ 10. — A conclusioni analoghe a quelle di Aggazzotti giunsero anche v. Hornbostel e Wertheimer ¹⁾, i quali raccoglievano con imbuti, o con disposizioni microtelefoniche, il rumore prodotto da un colpo di martello, e cambiavano la differenza di percorso o spostando la sorgente sonora rispetto ai due ricevitori, o spostando questi insieme, o una alla volta, o introducendo dei tubi a cannocchiale fra i telefoni e gli orecchi.

¹⁾ *Sitzber. der preuss. Akad. d. Wiss.* XX p. 388, 1920.

Essi ritengono che le differenze d'intensità o di fase dovute a quelle differenze di percorso non bastino a spiegare i risultati ottenuti, e attribuiscono la lateralizzazione dei suoni al solo fattore tempo.

§ 11. — Il maggiore W. Marx e il prof. H. Marx ¹⁾, hanno reso conto di esperienze fatte durante la guerra per localizzare il tiro delle batterie.

Tre osservatori, scelti fra persone con udito normale ai due orecchi, e convenientemente esercitati, erano situati in tre punti distanti 2 km. l'uno dall'altro, e ad ogni colpo udito dovevano indicare con un indice orizzontale, mobile su un cerchio diviso in $2\pi \times 1000$ parti (come si usa nell'artiglieria) la direzione da cui proveniva il rumore. Per la localizzazione della batteria erano utilizzati diversi colpi successivi. Le tre rette che così potevano esser condotte dai tre punti di osservazione, o si incontravano in un medesimo punto, o formavano un piccolo triangolo, che serviva a localizzare la batteria.

I risultati di molte esperienze mostrarono che la direzione del rumore poteva essere indicata con un'approssimazione grandissima, cioè in modo che l'errore, per batterie situate a distanza da 3 a 7 km. era compreso fra 5 e 10 millesimi della distanza. Il magg. Marx ritiene che il concorso della vista, che interviene per indicare sul cerchio diviso la direzione del suono, possa facilitare molto il giudizio.

Ponendo questi risultati ottenuti in aperta campagna in raffronto con quelli delle esperienze ordinarie di gabinetto, eseguite generalmente in ambienti limitati e chiusi, il prof. A. Marx fa notare che se i risultati anzidetti potessero generalizzarsi anche per piccole distanze, si dovrebbe poter localizzare un suono, originato per es. a 3 m., con l'approssimazione di 3 cm., ciò che è impossibile a realizzarsi. La grandissima differenza a favore dei risultati ottenuti in aperta

¹⁾ *B. it. z. Anatom. Physiol. etc.* di A. Passow e K. L. Schäfer; 16 pag. 32, 1921.

campagna si deve quindi attribuire al fatto che il giudizio è molto più facile per rumori molto forti, provenienti da molto lontano, che per suoni prodotti a pochi metri di distanza.

È ben noto che nelle esperienze eseguite per piccole distanze si localizzano meglio i suoni molto ricchi di armonici in confronto di suoni puri; è quindi naturale che i rumori sieno meglio adatti ad essere localizzati.

Il medesimo professore fa una rassegna delle ipotesi proposte per spiegare la nostra facoltà di percepire la direzione del suono, e conclude che nessuna è pienamente soddisfacente, e che i risultati eseguiti sul tiro delle batterie di cannoni, non possono esser spiegati con i soli processi fisiologici conosciuti.

§ 12. — Profittando delle proprietà delle correnti alternate e del telefono, il Perot ¹⁾ ha potuto separare la differenza di intensità da quella di tempo, e ha potuto farle agire sia isolatamente, sia insieme, per trarre delle importanti conclusioni.

Per ottenere differenze d'intensità misurabili, senza differenze di fase o di tempo, il Perot si è servito di due telefoni inseriti nel circuito di un potenziometro percorso da una corrente alternata (che può essere quella della rete stradale, o di una posta microtelefonica, o di un alternatore per radiotelegrafia). I telefoni sono in serie e i capi estremi del loro circuito sono in comunicazione con due punti fissi A, B, del potenziometro. Un contatto preso sul filo di comunicazione fra i due telefoni si fa scorrere fra i punti A, B, e si trova così da prima una posizione intermedia C per la quale, applicando i due telefoni agli orecchi, il suono è percepito nel mezzo della fronte, e poi altre due posizioni C_1 , C_2 , per le quali il suono si sente soltanto a destra, o soltanto a sinistra. In questo modo, le fasi essendo ad ogni istante uguali ai due telefoni, la localizzazione è dovuta soltanto a differenza di intensità.

¹⁾ *Journ. de Physique et Radium*, VI. 2 p. 96, 1921.

Scambiando di posto i telefoni, si posson determinare altri due punti C'_1 , C'_2 , cui corrisponde la lateralizzazione del suono, e da queste due coppie di punti, con calcoli semplici, è possibile dedurre la differenza di sensibilità, sia dei telefoni, sia dei due orecchi.

Misurando l'intensità delle correnti che percorrono i telefoni con un raddrizzatore a galena inserito nel circuito di un amplificatore, il Perot ha constatato che l'intensità del suono reso da ciascun telefono è proporzionale alla lunghezza del filo del potenziometro compreso nel tratto AB o BC.

Dai risultati ottenuti con le correnti sinusoidali di frequenze varianti fra 525 e 950 il Perot ha riconosciuto che il rapporto fra le intensità ai due orecchi necessarie a lateralizzare la sensazione deve essere 1,25 per suoni deboli e 1,08 per suoni 70 volte più forti¹⁾. Sembra che il valore di tal rapporto non dipenda dalla frequenza.

Il rapporto fra le sensibilità dei due orecchi ha portato a risultati poco facilmente interpretabili, poichè esso sarebbe variabile da 1,30 a 2,32 secondo i suoni impiegati.

Altre disposizioni sono state adoperate per far arrivare ai due orecchi uno stesso suono in istanti diversi.

Da prima il Perot richiama l'uso del tubo di caucciù indicato da Labrouste. Introducendo gli estremi di un tubo a grosse pareti, lungo circa 2 m., nel condotto uditivo degli orecchi, un leggero colpo battuto nel punto di mezzo del tubo, se gli orecchi sono di egual sensibilità, si percepisce nel mezzo della fronte. Colpendo a destra o a sinistra del punto di mezzo, si viene a delimitare una piccola porzione del tubo per la quale si è incerti se il rumore è percepito a destra o a sinistra; ma al di là di essa la lateralizzazione è sicura. Per un osservatore esercitato la zona incerta è di 1

¹⁾ Il Perot, ritenendo che le intensità sieno proporzionali ai quadrati delle ampiezze d'oscillazione, dice che tali rapporti debbono essere (1,25)² e (1,08)².

a 2 cm., quindi, affinchè sia percepita la sensazione di direzione occorre che il suono arrivi ad un orecchio un tempo $\frac{2}{V}$ prima che all'altro, essendo V la velocità del suono nel-

l'aria del tubo, espressa in $\frac{\text{cm.}}{\text{sec.}}$. Il Perot pone $V = 25000$,

e quindi quel tempo risulta 0,000080 sec. Per alcune persone questo tempo può essere doppio o triplo. Per una dissimetria fra gli orecchi quel tempo resta invariato, ma la zona neutra si sposta verso l'orecchio più sordo ¹⁾.

Ma uno studio più completo di questo fenomeno fu eseguito con la disposizione che si usa per ottenere un campo rotante uniforme. Di due telefoni uno, T_1 , è inserito nel circuito di un rocchetto che può rotare entro i rocchetti fissi, fra loro ortogonali, che servono pel campo; l'altro telefono T_2 è in derivazione sul circuito della corrente alternata principale del campo, che, con adatta capacità e autoinduzione, può farsi circolare sfasata di $\frac{1}{4}$ di periodo in uno dei rocchetti fissi.

Se il campo è perfettamente sinusoidale e uniforme, la rotazione del rocchetto mobile entro i due fissi fa variare soltanto la fase nel telefono T_1 , rispetto all'altro in cui resta fissa. Le intensità nei due telefoni posson rendersi uguali regolando la derivazione del telefono T_2 .

Se il rocchetto mobile è a 45° fra i due fissi, le correnti nei due telefoni sono nella stessa fase, e il suono è percepito nel mezzo della fronte. Ruotando il rocchetto, si sente il suono passare a destra o a sinistra; ma il passaggio è più netto quando le fasi sono prossime ad essere uguali, che quando differiscono di 180° . La media delle due posizioni per le quali il suono apparisce a destra o a sinistra rappresenta

¹⁾ Dalle esperienze di Aggazzotti parrebbe che per la lateralizzazione sicura occorresse un anticipo di 0,000140 sec.; e da quelle di Hornbostel e Wertheimer resulterebbe che per produrre uno spostamento dell'immagine sonora dal piano mediano bastasse 0,000003 sec., ma che per portarla a 90° fosse necessario un anticipo di 0,000630 sec.

la differenza di fase necessaria a produrre la sensazione di direzione. Il Perot calcola questa differenza di fase come ritardo in secondi fra l'arrivo del suono ad un orecchio rispetto all'altro, e trova che varia fra 55 e 114 per suoni forti, e fra 81 e 155 milionesimi di secondo per suoni deboli. Sembra che questi valori del ritardo sieno indipendenti dalla frequenza. Da questo ne resulterebbe che la differenza di fase, espressa in gradi, sarebbe invece proporzionale alla frequenza, e che diverrebbe di 180° , cioè renderebbe impossibile la localizzazione, per suoni deboli di 4400 v. d., e per suoni forti di 8700 v. d.

§ 13. — Fra tutte queste ultime esperienze, dall'insieme delle quali sembra risultare che il solo fattore determinante la localizzazione sia la differenza di tempo nell'arrivo del suono ai due orecchi, le più interessanti mi sembrano quelle del Perot.

La prova col tubo di caucciù dette anche pei miei orecchi una zona incerta di 2 cm. Pensai allora che se la spiegazione del fenomeno fosse quella proposta dal Perot, adoperando altri materiali per la trasmissione del suono, le zone incerte dovrebbero essere proporzionali alle velocità del suono in ciascuno di essi. Feci perciò uso da prima di una lamina di ferro dello spessore di $1\frac{m}{m}$, larga $25\frac{m}{m}$ e lunga m. 5,50 tenendone le estremità ugualmente applicate ai padiglioni dei due orecchi, in modo da coprire tutto il condotto uditivo; e tanto io che altre persone trovammo una zona incerta di 10 a 12 cm. al più, ma che, facendo bene attenzione, si poteva limitare fra 6 e 8 cm. Poichè nel ferro la velocità del suono è circa 20 volte maggiore di quella nell'aria nei tubi sottili, quella zona nel ferro avrebbe dovuto essere di almeno 40 cm.

Lo stesso valore della zona incerta è stato ottenuto con altre lamine di ferro più corte, con fili di ferro lunghi o corti, grossi o sottili, introdotti nei condotti uditivi sia attraverso piccoli tappi forati di sughero, o mediante pezzi di tubi di gomma a grosse pareti molto elastici lunghi 5 cm. facendo

penetrare il ferro soltanto per 1 cm. nel tubo, sia applicando agli estremi del filo due imbuti di latta perfettamente uguali che possano comprendere comodamente il padiglione dell'orecchio.

Anche con striscie di legno di castagno, di quelle che si adoperano per fare le ceste e i corbelli, la zona incerta è di circa 6 cm., mentre la velocità del suono parallelamente alle fibre è, nel legno, da 15 a 20 volte maggiore che nell'aria dei tubi sottili.

Riempiendo di acqua il tubo di caucciù, la zona incerta resta per me di 2 cm. o $2\frac{1}{2}$ al più, come quando vi è l'aria, mentre dovrebbe divenire circa 5 volte maggiore.

§ 14. — Tutti questi risultati, confermati più volte su me e su altre cinque persone, fanno sorgere il dubbio che la causa della localizzazione sia la differenza d'intensità e non quella di tempo.

La ragione precipua che porta a sostenere l'ipotesi del tempo o della fase è quella di non ritenere possibile che l'orecchio riesca ad apprezzare una differenza d'intensità così piccola, qual'è quella che può derivare dall'ombra della testa, o da una differenza di pochi centimetri di percorso del suono nell'aria. Questa però è un'obiezione aprioristica, che cade se può dimostrarsi che tali differenze d'intensità si possono percepire. Volli perciò tentare la prova diretta, e a tale scopo feci uso della seguente disposizione.

Un pezzo solito del tubo di caucciù a grosse pareti, lungo 80 cm. col foro di 3 mm., poteva scorrere entro un corto pezzo di canna da cui era stata nel mezzo asportata una porzione semicilindrica lunga 1 cm. Dalla piccola finestra così ottenuta nella canna, il tubo di gomma poteva esser colpito dal filo di un pendolo lungo 1 metro, che aveva il punto di sospensione ad un'altezza di 80 cm. al di sopra e su una verticale distante 4 cm. dalla canna. Facendo oscillare il pendolo con un'ampiezza sufficiente, il filo batteva sul tubo di gomma piegandosi, e ad ogni oscillazione intera si aveva un

colpo, la cui intensità andava via via diminuendo al diminuire dell'ampiezza d'oscillazione.

Applicati due imbuti uguali alle estremità del tubo di gomma, lo disposi in modo che il punto colpito fosse 2 cm. distante dal mezzo, e applicai ad un orecchio l'imbuto della parte più lunga, per ascoltare i rumori dei leggerissimi colpi del pendolo. Appena cessato di percepire il rumore, portai l'altro imbuto del ramo più corto al medesimo orecchio, e il rumore fu di nuovo percepito, con un'intensità certamente più che doppia di quella corrispondente alla soglia dell'eccitazione.

Per la riuscita di queste esperienze è necessario un ambiente del tutto silenzioso, e giova quindi eseguirle nelle ore notturne. Convien ancora assordare leggermente l'orecchio che ascolta, con un batuffolo di cotone bagnato, o con un tappo di gomma soffice; perchè se l'orecchio è libero, quando il rumore cessa di percepirsi dal ramo più lungo, il pendolo può fare al più 6 o 7 oscillazioni prima di cessare di colpire il tubo, e bisogna far la sostituzione del ramo più corto assai lestamente. Coll'orecchio assordato, invece, vi è assai più agio, perchè quando cessa di esser percepito, il colpo del pendolo è sempre assai discretamente intenso, e il contatto del filo col tubo dura assai di più.

Il maggiore medico Papale, assistente nell'Istituto del prof. Gradenigo a Napoli, che ebbe la compiacenza di ripetere queste esperienze, mi fece osservare che forse potevano esser falsate da fenomeni di stanchezza; perchè egli aveva bensì ascoltata la riapparizione del rumore dal lato più corto, ma aveva risentito il rumore anche riapplicando all'orecchio l'imbuto del ramo lungo, dopo di averlo tolto quando ogni rumore sembrava cessato.

Cambiai allora la disposizione, e fatto battere il filo del pendolo in un punto qualunque del tubo, appena cessata la percezione del rumore, fra una battuta e l'altra del pendolo facevo scorrere il tubo nella canna in modo da scorciare di

5 cm. il tratto interposto fra il punto colpito e l'orecchio, e il rumore riappariva ben distinto. Ovvero quando il rumore stava per cessare, spariva allungando il tratto di tubo e riappariva scorciandolo.

Posso quindi affermare che bastano pochi centimetri di percorso nell'aria per far variare l'intensità del rumore, nell'esperienza di Labronste, in modo distintamente percettibile. Ciò che si ascrive a differenza di tempo, può quindi benissimo essere invece attribuito a differenza d'intensità.

§ 15. — E che possa bastare il fattore intensità a determinare la lateralizzazione, mentre non basta il fattore tempo, si può dimostrare anche con queste altre esperienze:

a) S'introduca per circa 1 cm. ciascun estremo di un filo di ferro entro un pezzo di tubo di gomma a grosse pareti, lungo 5 cm., e si mettano questi due tubi di gomma nei condotti uditivi. Si stringa fra il pollice e l'indice della mano sinistra un punto del filo di ferro, più vicino a destra che a sinistra, e si faccia appoggiare il gambo di un diapason 1024 v. d. su uno dei diti, e il suono, che si trasmette dolcemente al filo (senza il tremito che si avrebbe appoggiandolo direttamente) si ode distintamente a destra. Ma basta stringere più o meno fortemente con l'altra mano un piccolo tratto di filo nella porzione più corta, perchè, per l'indebolimento che ne consegue nella trasmissione in tal porzione, il suono passi nettamente a sinistra.

b) Di un lungo tubo di gomma a grosse pareti si stringe una piccola porzione nel suo mezzo entro una morsetta di legno o di metallo, fissate ad una tavoletta di legno, nella quale sia praticato un foro da potervi introdurre il gambo di un diapason. Si collochino gli estremi del tubo nei condotti uditivi dei due orecchi, e tenendo la tavoletta con una mano (ad evitare la risonanza che si avrebbe posandola sul tavolo) si ponga in vibrazione il diapason. Se i tratti del tubo sono uguali e son ugualmente disposti negli orecchi, il suono si percepisce nettamente nel mezzo della fronte; ma basta spostare

appena il tubo in uno degli orecchi, perchè, affondandolo più o meno nell'orecchio, o dirigendolo diversamente, il suono passi a volontà a destra o a sinistra.

c) I due tratti compresi fra il punto stretto nella morsa e gli orecchi si possono far differire anche di mezzo metro, e cambiando la posizione del ramo più lungo nel condotto uditivo, il suono si può far apparire da quella parte, non ostante che vi arrivi assai più tardi di quanto dovrebbe bastare per farlo percepire dal lato più corto.

Nel caso *b)* non vi è differenza nè di fase nè di tempo ai due orecchi, e il solo fattore che determina la localizzazione è l'intensità; nei casi *a)* e *c)* la differenza d'intensità prevale su quella di tempo, contrariamente a quanto aveva trovato nelle sue esperienze lo Stewart.

Queste esperienze, che pel suono continuo dei diapason sono simili a quelle citate al § 6 a proposito del metodo Lo Surdo, riescono anche con rumori istantanei. Facendo uso del pendolo che batte col filo sul tubo di gomma, quando il rumore è percepito per es. a destra, basta spostare appena il tubo in un orecchio, per farlo apparire, al colpo successivo, a sinistra, sieno i due tratti del tubo eguali o no.

§ 16. — Il Perot contro l'ipotesi della differenza d'intensità cita il fatto seguente. Quando, con la disposizione dei due telefoni col campo rotante, si sente sicuramente a sinistra, per es., si può aumentare assai l'intensità a destra senza cessare di sentire a sinistra; in questo caso, egli dice, i due effetti fase e intensità sono opposti, ma predomina la fase, ossia l'anticipo del suono ad un orecchio. Egli non ha potuto, per mancanza di mezzi adatti, determinare qual rapporto fra le intensità era necessario a controbilanciare la differenza di fase.

Ma a questa obiezione si può rispondere che quando si sente distintamente a sinistra l'intensità è ivi assai maggiore che a destra, in modo da consentire un discreto aumento a destra, prima che il suono passi nettamente da quella parte.

E forse, nel caso ora considerato, interviene anche la conduzione ossea a complicare il giudizio; perchè, come già feci notare in occasione di altre esperienze ¹⁾, applicando ad un orecchio, ad es. il destro, un telefono che renda un suono continuo, il suono si percepisce nettamente fuori della testa, come proveniente dal telefono; ma quando con un secondo telefono si fa arrivare all'orecchio sinistro il medesimo suono molto più debole, che vada poi gradatamente crescendo d'intensità, mentre a sinistra non si percepisce affatto nulla, si sente nettamente staccare il suono dal primo telefono e portarsi da prima entro l'orecchio destro, e poi sempre più nell'interno della testa, per passare nel piano mediano quando le intensità ai due orecchi son divenute uguali, e trasportarsi a sinistra quando ivi il suono è divenuto più intenso che a destra.

Ora, in tutto questo processo le fasi o sono sempre eguali, o hanno sempre la medesima differenza ai due orecchi; e i cambiamenti di posto dell'immagine sonora, che sono quelli stessi che si avrebbero se la differenza di fase (e di tempo) cambiasse continuamente, sono unicamente dovuti a differenze d'intensità.

Se i due telefoni son tenuti discosti dagli orecchi non si percepisce il distacco del suono da uno di essi, e lo spostamento dell'immagine sonora si presenta con altri caratteri.

La complessità del funzionamento del centro nervoso è resa manifesta anche dal fatto ben noto che un suono debole che arrivi ad un solo orecchio continua ad esser percepito benissimo anche se all'altro orecchio si fa arrivare un suono più acuto molto intenso; mentre un suono basso fa cessare la percezione di uno acuto, e di due suoni in tutto uguali si percepisce soltanto il più intenso.

Ciò può spiegare perchè si localizzino i suoni complessi e i rumori, assai meglio dei suoni puri.

¹⁾ *Archiv. ital. di otol. etc.* XXIX pag. 65, 1918.

§ 17. — V. Hornbostel e Wertheimer hanno trovato che si può facilitare la localizzazione di un rumore lontano, aumentando fino a circa 2 metri la distanza fra i microfoni o gli imbuto ricevitori, e spiegano ciò con l'aumento che così si viene a provocare nella differenza di tempo fra l'arrivo degli stimoli ai due orecchi. Ma poichè questa differenza di tempo è dovuta a una differenza di percorso, può benissimo il miglioramento esser dovuto anche a una maggior differenza nell'intensità del rumore ai due orecchi.

§ 18. — Se nelle esperienze del Perot coi due telefoni in fasi diverse l'intensità era effettivamente uguale dalle due parti, e se in quella del Lo Surdo non entrano in conto fenomeni perturbatori di risonanza, non si può negare l'influenza della fase nella localizzazione del suono e contrariamente a quanto avevo creduto di poter concludere in occasione di altri studi ¹⁾ devesi quindi ammettere che l'orecchio abbia la proprietà di percepire la fase della vibrazione, in modo da farla servire, ove manchi o sia insufficiente l'altro elemento della differenza d'intensità ai due orecchi, alla localizzazione dei suoni puri.

Resta da spiegare in qual modo tale apprezzamento della fase possa essere effettuato. Lord Rayleigh dice, a questo proposito, non doversi ritenere che il carattere ondulatorio del suono cessi all'estremità cocleare del nervo acustico, ma che probabilmente anche il processo di trasmissione al centro sensorio deve essere vibratorio, non già nel significato grossolanamente meccanico, ma con la preservazione del periodo e mantenendo la caratteristica della fase — concetto sostenuto fino dal 1886 da Rutherford in opposizione a Helmholtz.

La maggior parte dei fisiologi ritiene per altro che la risposta del sensorio sia indipendente dalla natura dello stimolo, e ciò starebbe contro l'ipotesi che la fase sia percepita come tale dal centro nervoso. Per cui a me sembra che po-

¹⁾ *Arch. Ital. d' Otol. ecc.*, 29, pag. 65, 1918.

trebbe farsi un'altra supposizione, e cioè che l'apprezzamento della fase sia determinato dai movimenti che si compiono nell'orecchio medio.

Infatti, se vi è differenza di fase ai due orecchi, gli spostamenti simultanei delle due membrane timpaniche non sono identici; mentre se la sorgente sonora è equidistante dai due orecchi, le fasi essendo allora uguali, le due membrane subiscono ad ogni istante spostamenti uguali in grandezza e direzione. Il centro nervoso, dalla disuguaglianza dei moti simultanei delle due membrane potrebbe quindi giudicare che la sorgente sonora è situata lateralmente, come dalla disuguaglianza delle immagini formatesi nei due occhi giudica il rilievo dei corpi.

Che la fase possa esser riconosciuta come differenza di direzione nel movimento e non come differenza di tempo, resulterebbe anche da questa esperienza.

Il solito tubo di gomma lungo 2 metri è fissato nel mezzo ad una morsetta di legno e i due capi sono introdotti negli orecchi. Appoggiando il gambo del diapason $do_3 = 1024$ v. d. nel mezzo del tubo, il suono si percepisce nel piano mediano. Se si appoggia a 7 cm. dal mezzo verso destra è udito a destra, a 8 cm. in fronte, a 9 cm. è udito a sinistra.

Poichè la lunghezza d'onda del do_3 è di 32 cm., quando si appoggia a 7 cm. si ha a destra un anticipo di fase minore di $\frac{1}{2} \lambda$, per l'appoggio di 9 cm. l'anticipo è maggiore di $\frac{1}{2} \lambda$, e gli spostamenti dell'immagine sonora corrispondono a quanto dovrebbe avvenire secondo le indicazioni di Lord Rayleigh; ma in tutti quei casi il suono arriva sempre in anticipo all'orecchio destro.

Se non che, questi risultati possono esser falsati da fenomeni di risonanza nell'interno del tubo. Infatti, se si tiene un solo estremo del tubo in un orecchio e si appoggia il gambo del do_3 a 8 cm. dall'estremo libero, il suono indebolisce moltissimo chiudendo questo estremo con un dito, (mentre parrebbe che, impedendone la libera uscita dall'estremità

aperta, il suono dovesse rinforzare); e quando è cessato del tutto riappare ben distintamente se il gambo si appoggia non solo a 10 cm., ma anche a 6 cm. dall'estremo chiuso; cioè non solo se si diminuisce, ma anche se si aumenta la distanza fra il punto di appoggio e l'orecchio.

Si vede perciò quanto malfido sia l'uso dei tubi in queste ricerche.

L'interpretazione da me proposta renderebbe conto anche del fatto notato dal Perot, che il passaggio del suono da un orecchio all'altro per una data variazione nella differenza di fase è meglio percepito quando le fasi son vicine ad essere uguali, che quando la differenza è vicina a 180° . Riconducendo la differenza di fase a differenza di tempo, questo fatto sarebbe inesplicabile; invece si potrebbe benissimo intendere che il centro nervoso riconoscesse una diversità nel moto simultaneo delle due membrane timpaniche più facilmente in un caso, che nell'altro.