

91. G. CORTELLESA, A. REALE, P. SALVADORI. — Ricerche sulla struttura del protone attraverso misure di sezione d'urto differenziale di fotoproduzione singola di mesoni π^0 e di effetto Compton.

Riassunto. — Il presente lavoro consta di due parti distinte. Nella prima parte si esamina molto brevemente la situazione delle nostre conoscenze sulla struttura del nucleone quale si rivela dai processi che coinvolgono i mesoni π , in particolare i processi di fotoproduzione. Si espongono i risultati sperimentali ottenuti in questo campo e se ne discutono le conseguenze. Nella seconda parte si discute l'effetto Compton su protone e si presentano le misure fatte relative a questo processo.

Summary. — This work consists of two distinct parts. The first briefly reviews knowledge of nuclear structure as revealed in processes involving π mesons, particularly their photoproduction. Experimental results obtained in this field are presented and discussed. The second part discusses the Compton effect and gives the results of measurements of this process.

I. - FOTOPRODUZIONE SINGOLA DI MESONI π^0 DA IDROGENO

1. - ASPETTI GENERALI DEL PROBLEMA.

Il problema delle forze nucleari ha subito, negli ultimi dieci anni, una evoluzione con la scoperta del mesone π . Si è riconosciuto a questa particella un ruolo fondamentale in tutti i fenomeni nucleari legati con le interazioni forti. Lo studio dei fenomeni che coinvolgono in qualche modo i mesoni π ha perciò avuto una importanza dominante. Esso si è svolto secondo linee classiche e cioè mediante lo studio di reazioni nucleari di produzione di mesoni π e reazioni di diffusione di mesoni da parte di nucleoni. Si è così scoperta la prima risonanza nella sezione d'urto d'interazione mesone-nucleone. A questa scoperta hanno fatto seguito quelle delle risonanze a più alta energia.

Sfortunatamente a questo allargarsi del quadro sperimentale si sono contrapposti due fatti che ritardano la comprensione dei fenomeni mesonici e quindi, in generale, la comprensione del problema delle forze nucleari: da un lato la teoria non è riuscita a inquadrare i fatti nuovi nemmeno qualitativamente; d'altro lato la scoperta dei fatti nuovi è sta-

ta eseguita con esperienze di scarsa precisione. Per vari motivi, primo fra tutti la scarsa intensità delle macchine acceleratrici, le misure condotte fino a questi ultimi due anni, sono state affette da grandi errori, sia statistici che sistematici. Si può ricordare il caso più clamoroso delle esperienze di diffusione di mesoni π^+ e π^- su protoni che hanno dovuto essere ripetute più volte prima che si potesse disporre di un risultato attendibile. Queste misure affermavano l'esistenza di una differenza tra l'energia corrispondente al massimo delle risonanze, determinata con misure di diffusione e quella determinata con misure di fotoproduzione. Tale differenza nelle energie sembrava dovuta a qualche meccanismo fondamentale, mentre è stata oggi largamente rimossa con la ripetizione delle misure di diffusione da parte del gruppo di SACLAY (¹, ²).

Analogamente le misure di fotoproduzione di mesoni, in ispecie quelle relative ai π^0 , hanno fornito inizialmente un quadro confuso. I risultati ottenuti nei diversi laboratori (³, ²⁰) davano, fino a un anno fa circa, andamenti della sezione d'urto molto diversi a seconda delle diverse tecniche di misura. Persino i tentativi di intercalibrazione di due dispositivi sperimentali l'uno con l'altro, in uno stesso laboratorio, hanno dato un risultato non soddisfacente (¹⁶). Più coerenti invece le misure su mesoni carichi. Questo perchè la misura di mesoni carichi è più semplice per varie ragioni: la sezione d'urto è maggiore, il mesone carico viene rivelato direttamente e la misura è generalmente affetta da un minor numero di correzioni (²¹, ²⁹).

Da un punto di vista generale è necessario trarre le maggiori informazioni possibili sui processi mesonici ed è in particolare necessario cercare di migliorare le nostre conoscenze nel campo dei processi che coinvolgono i mesoni π^0 portandole almeno al livello delle informazioni disponibili sui mesoni π carichi.

2. - IL PROBLEMA SPERIMENTALE.

La reazione di fotoproduzione singola di mesoni π^0 su idrogeno e cioè la reazione:



seguita dal decadimento immediato del mesone π^0 in due raggi gamma, può essere rivelata qualora si misuri il solo protone di rinculo. I processi in concorrenza che danno un protone di rinculo sono infatti o processi di produzione multipla di mesoni, oppure l'effetto Compton sul protone. I processi di produzione multipla hanno una soglia cinematica decisa-

mente più alta rispetto alla produzione singola, e possono in linea di principio essere eliminati se si lavora con una energia massima dello spettro di bremsstrahlung superiore alla soglia cinematica di produzione singola e inferiore alla soglia cinematica di produzione multipla. L'effetto Compton non può essere eliminato per questa via e deve essere misurato indipendentemente, per poter essere sottratto dal conteggio totale così da isolare il contributo dei mesoni π^0 .

In realtà la misura del solo protone di rinculo presenta parecchi inconvenienti: la separazione tra le soglie cinematiche non è così facile per vari motivi. Prima di tutto lo spettro di bremsstrahlung varia come $1/E$ e quindi, se si è costretti a fare uso della testa dello spettro, si diminuisce molto il numero di fotoni utili per la reazione in studio e cioè si ha una velocità di conteggio ridotta. In secondo luogo; l'apertura finita in angolo e in energia dei dispositivi con cui si misura il protone di rinculo, tende a rendere meno netta la separazione tra le reazioni di produzione singola e doppia. Se, per esempio, l'apertura nella energia dei fotoni incidenti è di 100 MeV, occorrerà lavorare con una energia dello spettro di bremsstrahlung sufficiente per comprendere l'intera apertura in energia del dispositivo. Poichè però la separazione tra le energie dei gamma responsabili di una produzione doppia o una produzione singola di mesoni è meno di 100 MeV, entro il dispositivo saranno necessariamente compresi protoni di rinculo dati da produzione doppia. Questo è vero per angoli nel laboratorio del protone di rinculo inferiori a 60° circa, perchè per angoli superiori non è possibile avere protoni di rinculo dalla produzione doppia, per ragioni cinematiche, per energie dei fotoni incidenti inferiori a 1200 MeV. La contaminazione dovuta alla produzione doppia è perciò inevitabile ed è anche molto grande qualora si faccia uso di uno spettro di fotoni dato da bersaglio spesso, perchè allora la testa dello spettro di bremsstrahlung è arrotondata e occorre, per avere intensità utilizzabili, aumentare l'energia massima dello spettro molto al di là dell'energia dei fotoni responsabili della produzione singola. In questo modo la contaminazione dovuta a produzione doppia aumenta ancora.

Misure eseguite in passato, rivelando il solo protone di rinculo, hanno richiesto correzioni fortissime, fino al 50% ⁽¹⁾. E' da notare l'incertezza di queste correzioni legata anche al fatto che mentre si riteneva in passato che si potesse correggere solo per i protoni di rinculo dovuti a fotoproduzione di coppie $\pi^+ + \pi^-$, si sa oggi ⁽²⁾ che la fotoproduzione doppia di mesoni π^0 non è trascurabile e quindi occorre correggere anche per la produzione doppia di mesoni π^0 che ha sezioni d'urto e distribuzioni angolari a tutt'oggi pressochè sconosciute.

Una discriminazione molto efficace si ottiene misurando, oltre al protone di rinculo, uno dei raggi γ di decadimento del mesone π^0 (vedi fig. 1). Si aggiunge così un ulteriore elemento di incertezza, dovuto al fatto che il rendimento geometrico di misura dei raggi gamma di decadimento deve essere valutato numericamente, però si guadagna una discriminazione assoluta contro la produzione doppia di mesoni carichi e una forte discriminazione anche contro la produzione doppia di mesoni π^0 . Risulta invece esaltato il fondo dovuto all'effetto Compton. Questi punti sono stati da noi trattati in un precedente lavoro ⁽¹⁸⁾ e ci limitiamo perciò a riassumere qui i risultati della discussione. La produzione doppia di mesoni π^0 viene fortemente ridotta perchè la correlazione tra il protone di rinculo e i due mesoni π^0 emessi è molto più lasca che la correlazione tra protone di rinculo e mesone π^0 emesso nella produzione singola. In quest'ultimo caso la misura del protone di rinculo fissa in modo univoco la direzione del mesone π^0 . Questa correlazione così lasca riduce praticamente a zero la probabilità di contare coincidenze protone-gamma da produzione doppia di mesoni π^0 , anche per valori dell'energia massima dello spettro di bremsstrahlung superiori alla soglia di produzione doppia di mesoni π^0 .

Poichè la distribuzione dei gamma di decadimento del mesone è invece fortemente concentrata in avanti, il rendimento di misura sarà molto diverso per i due processi, qualora il contatore che misura i raggi gamma sia posto in posizione opportuna. Come vedremo più in dettaglio in seguito, per quanto riguarda l'effetto Compton la situazione è opposta. Mentre il rendimento di misura dei raggi gamma di decadimento da mesoni π^0 è inferiore al 100% perchè parte dei raggi gamma puntano comunque fuori di un telescopio predisposto per misurarli, anche nelle migliori condizioni, il rendimento di misura dei gamma associati a un protone di rinculo di effetto Compton può essere portato al 100% con una geometria opportuna. Gli angoli che il fotone diffuso per effetto Compton e i fotoni di decadimento del mesone formano con la direzione del fascio gamma incidente sono praticamente gli stessi e così pure coincidono le energie. La soglia cinematica dell'effetto Compton è leggermente inferiore alla soglia cinematica di fotoproduzione singola e questo permette una misura dell'effetto Compton che può essere così sottratto.

Fortunatamente la sezione d'urto per effetto Compton è inferiore per un fattore circa 100 rispetto alla sezione d'urto di fotoproduzione singola di mesoni π^0 e quindi si può trascurare con ottima approssimazione il contributo dato dall'effetto Compton nei dati di fotoproduzione dei mesoni π^0 .

Le considerazioni esposte hanno indotto il nostro gruppo a scegliere come prima esperienza da eseguire con l'elettrosincrotrone di Frascati, una misura di sezione d'urto differenziale di fotoproduzione singola di mesoni π^0 in idrogeno.

La ripetizione pura e semplice di una misura in questo campo non avrebbe, naturalmente, avuto senso se non si fosse cercato, sin dall'inizio, di migliorare le condizioni sperimentali nella direzione di accrescere la precisione della misura.

Si è trattato essenzialmente di cercare se le contraddizioni tra i risultati sperimentali precedenti non nascondessero, in realtà, il fatto che i dispositivi sperimentali fin qui usati mediavano la sezione d'urto differenziale su campi di variazione dei parametri che la caratterizzano, troppo estesi. La sezione d'urto differenziale di produzione di una particella in una reazione con due corpi nello stato finale è infatti funzione di due parametri: l'angolo di produzione della particella e l'energia totale nel baricentro, ovvero, se si vuole, l'energia della particella incidente. Se la sezione d'urto differenziale è una funzione rapidamente variabile di questi parametri, una esperienza in cui si medi su una larga apertura angolare nel baricentro e su un largo intervallo della energia della particella incidente può dare risultati del tutto diversi da quello che si vuole effettivamente mettere in evidenza. La forma molto appiattita e allargata della seconda risonanza nella sezione d'urto di fotoproduzione di mesoni π^0 poteva quindi essere originata da una cattiva risoluzione degli apparati di misura. Si trattava perciò di chiarire innanzitutto questo punto e, per fare questo, occorreva misurare la sezione di urto differenziale, ad esempio, ad un angolo di emissione determinato nel baricentro, per il mesone π^0 , in funzione della energia del fotone incidente. Le condizioni sperimentali in cui si poteva cominciare a mettere in evidenza un effetto di questo genere erano dettate dalle misure di fotoproduzione singola di mesoni π^+ ⁽²³⁾. Si ricava infatti da queste che la seconda risonanza ha una larghezza non superiore ai 100 MeV circa alla base.

Se anche nel caso della fotoproduzione di mesoni π^0 i parametri della risonanza rimangono gli stessi ed, in particolare la larghezza non supera i 100 MeV, occorre misurare in condizioni cinematiche tali da poter studiare la forma della risonanza. Questo significa ridurre la risoluzione in energia dei fotoni incidenti al disotto della larghezza della risonanza.

Il programma sperimentale, per quanto riguarda la fotoproduzione di mesoni π^0 è perciò delineato: esame preliminare della forma della seconda risonanza in modo da stabilire le condizioni sperimentali mi-

glieri, prosecuzione poi di misure sistematiche della distribuzione angolare

3. - INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI SPERIMENTALI.

Per una conveniente presentazione delle conoscenze attuali nel campo della fotoproduzione dei π^0 , è forse conveniente suddividerle in 3 gruppi:

- 1) misure per energie dei gamma incidenti comprese tra la soglia e 250 MeV;
- 2) misure per energie dei gamma incidenti comprese tra 250 e 500 MeV;
- 3) misure per energie dei gamma incidenti al disopra di 500 MeV e fino a 1200 MeV.

Per energie comprese tra la soglia e 250 MeV, solo recentemente un lavoro sperimentale di GOLDANSKY e al. ⁽¹⁷⁾ ha definitivamente chiarito alcune questioni riguardanti lo stato in cui avviene la fotoproduzione vicino la soglia, rimaste in sospeso dai lavori precedenti ^(4, 9). I punti sperimentali precedenti erano compatibili con l'ipotesi di fotoproduzione del mesone in uno stato P, con una certa indicazione per la presenza di un piccolo contributo S. E' stato ora dimostrato con certezza che la fotoproduzione avviene, in prossimità della soglia non solo in uno stato P ma anche S, in accordo con le teorie fenomenologiche di Watson e Feld, anzi le misure di Goldansky hanno permesso la separazione dei contributi dei termini di fotoproduzione diretta e di quelli dovuti allo scambio di carica nel campo del nucleone.

Nella seconda zona di energie, per quanto le varie misure si sovrappongano solo parzialmente e quindi non ci sia la possibilità di un pieno confronto, tuttavia tutte quante portano al fatto ormai ben riconosciuto che la sezione d'urto aumenta fortemente con l'energia dei gamma incidenti raggiungendo un massimo fra 300-320 MeV e riducendosi a $\sim 1/5$ del valore massimo per $E=500$ MeV. Un simile andamento risonante mostra la sezione di urto per fotoproduzione di mesoni π carichi ma il massimo è a una energia dei gamma leggermente minore, circa 300 MeV. Un andamento risonante ha anche la sezione d'urto per diffusione pione-nucleone, in corrispondenza alla stessa energia nel sistema del baricentro alla quale corrisponde il massimo di fotoproduzione. E' questa la nota risonanza $(3/2, 3/2)$. Essa è dovuta al prevalere, tra gli stati di momento angolare possibili, di quello in cui $l = 1$, cioè è uno stato P $3/2$ e spin isotopico totale $T = 3/2$, corrispondente ad un assorbimento di dipolo magnetico. Malgrado questo fatto sia perfettamente stabilito, restano

tuttora delle questioni aperte riguardanti le correzioni dovute agli altri stati, in particolare lo stato $P\ 3/2$ eccitato dal dipolo elettrico e le correzioni dovute all'interferenza di tutti questi stati tra loro e con l'onda S .

Per quanto riguarda la zona delle energie maggiori di 500 MeV, il fatto interessante, come s'è detto, è la scoperta di nuovi massimi nelle sezioni d'urto per fotoproduzione sia di mesoni carichi che neutri. Precisamente un massimo è stato trovato per una energia di 700-750 MeV e il fatto che un simile massimo ricorra, in corrispondenza alla stessa energia nel s.c.m., nello scattering $\pi^- + p$ ma non in quello $\pi^+ + p$ suggerisce che si tratti di uno stato risonante con $T = 1/2$. Sulla parità di questo stato risonante, cui si attribuisce un momento angolare totale $J = 3/2$ dalla forma delle distribuzioni angolari in fotoproduzione, sono sorte molte controversie: ha parità $+$ o $-$ cioè si tratta di uno stato P o D ?⁽³⁰⁾. La risposta è stata data dalle misure di polarizzazione del protone di rinculo in fotoproduzione di π^0 e sembra che si tratti di uno stato D ^(31, 32). Dato che ad alte energie, però, non è noto esattamente quali e quanti multipoli intervengano in fotoproduzione, la risposta non è priva di ambiguità potendo comunque la polarizzazione dei protoni di rinculo essere spiegata dall'interferenza dell'ampiezza corrispondente alla prima risonanza con qualche altro stato^(33, 34).

A tutto questo aggiungasi il fatto sperimentale recente, che è il risultato delle attuali misure, che la seconda risonanza s'è rivelata più stretta in ampiezza di quanto si ricavava dalle misure precedenti su cui, peraltro, sono costruiti i modelli. Sarà interessante analizzare le conseguenze teoriche di questo risultato.

Una terza risonanza è stata trovata in fotoproduzione per una energia dei gamma di circa 1050 MeV, osservata anche in diffusione, ma di cui attualmente, per questioni di energia massima del sincrotrone, non possiamo occuparci.

1. - IL DISPOSITIVO SPERIMENTALE.

Il dispositivo sperimentale, già da noi descritto in dettaglio altrove⁽¹⁸⁾, consta (fig. 1) di un telescopio per la misura del protone di rinculo e di un secondo telescopio per la misura di uno dei fotoni provenienti dal decadimento del mesone π^0 .

Il telescopio per protoni si compone di 5 scintillatori plastici; quattro hanno dimensioni $15 \times 15\text{ cm}^2$, spessore 0,5 cm e il quinto ha spessore identico e area $10 \times 10\text{ cm}^2$. Il contatore più piccolo definisce l'angolo solido di accettazione del telescopio. Tra gli scintillatori sono posti assorbitori di rame, sagomati a cuneo. Gli assorbitori sono più sottili per angoli più grandi dei protoni di rinculo, perchè, prefissata una energia dei

fotoni incidenti, i protoni di rinculo corrispondenti hanno una energia più elevata se emessi ad angoli più in avanti nel laboratorio. La sagomatura degli assorbitori è calcolata in modo da mantenere costante l'intervallo di energia e l'energia media dei fotoni accettati dal telescopio, per tutta la apertura angolare del dispositivo. Il range dei protoni viene determinato connettendo il telescopio in modo che l'ultimo contatore sia in anticoincidenza.

La connessione elettronica è eseguita realizzando un insieme di coincidenze lente precedute da discriminatori in ampiezza, che provvedono a tagliare gli impulsi al disotto di una data soglia. In parallelo a questo

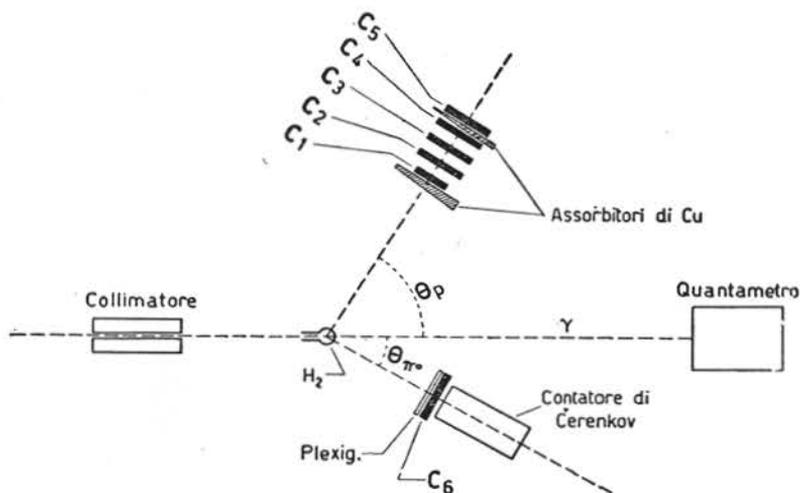


Fig. 1. - Schema dell'apparato sperimentale.

sistema lento, si ha un sistema di coincidenze rapide che diminuiscono il numero di coincidenze casuali. I tagli della parte rapida, variabili, sono mantenuti al disotto dei tagli della parte lenta. I poteri risolutivi del ramo lento sono migliori di 0,5 microsecondi mentre i poteri risolutivi del ramo rapido sono di 10 nanosecondi.

I tagli elettronici vengono stabiliti osservando le distribuzioni in ampiezza ottenute nei primi quattro contatori del telescopio per protoni, per quelle particelle che hanno scaricato i primi quattro contatori e non il quinto. Poichè a parità di range i protoni sono particelle che ionizzano molto più dei mesoni π e degli elettroni, almeno per energie dei protoni al disotto dei 300 MeV, gli impulsi dati dai protoni possono, con i tagli elettronici, venir isolati dal fondo di mesoni π e di elettroni.

Il telescopio per la misura dei gamma di mesoni π^0 è costituito da un contatore di Cerenkov di vetro al piombo di 12 cm di diametro e 25 cm

di lunghezza, che è preceduto da uno scintillatore di $15 \times 15 \text{ cm}^2$ di area e 0,5 cm di spessore. Il contatore a scintillazione, posto in anticoincidenza, ha il compito di anticoincidere gli eventi carichi associati col protone di rinculo. Una fenditura di piombo posta prima del contatore di anticoincidenza definisce l'apertura del telescopio per il conteggio dei fotoni di decadimento. La connessione elettronica tra questi due contatori e tra essi e il telescopio per protoni segue le linee già accennate sopra

3. - RISULTATI E DISCUSSIONE DELLE MISURE.

I risultati sperimentali relativi alla fotoproduzione di mesoni π^0 per angoli nel baricentro di 56° e 90° rispettivamente sono dati in figura 2. Le condizioni sperimentali in cui sono state eseguite le misure sono riportate nelle tabelle I e II. La prima colonna di queste tabelle contiene l'energia media dei fotoni e l'intervallo di energia accettato dal disposi-

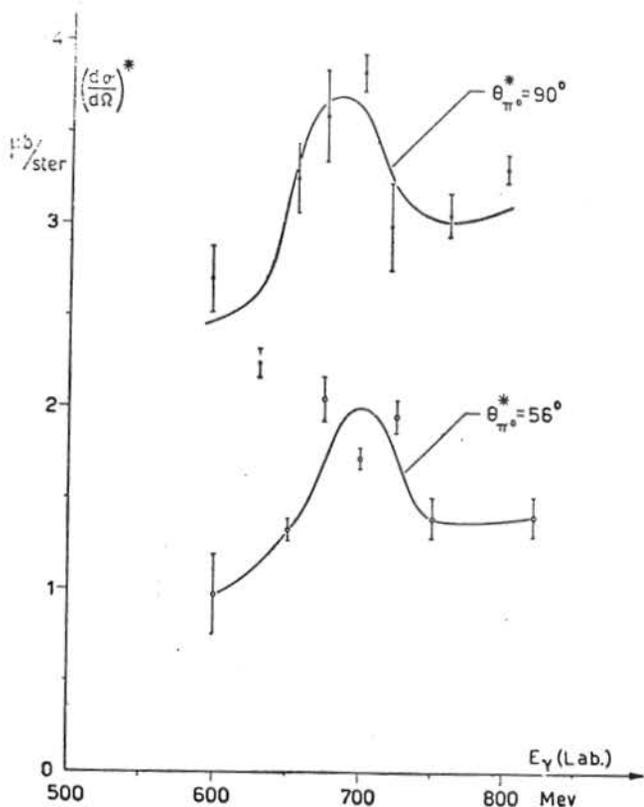


Fig. 2. - Sezione d'urto differenziale (SCM) in funzione dell'energia.

TABELLA I

Misure di sezione d'urto differenziale per fotoproduzione singola di mesoni π^0 ad un angolo del mesone di 56° nel SCM.

E_γ (Lab) (MeV)	Θ_p (Lab)	T_p (Lab) (MeV)	$\Theta_{\pi^0}^*$	$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)^*$ ($\mu\text{b/st.}$)
600 ± 30	$58^\circ \pm 1,1^\circ$	65 - 77	$56^\circ \pm 3'$	$0,97 \pm 0,22$
650 ± 30	»	75 - 86	$56,5' \pm 2,7''$	$1,33 \pm 0,06$
675 ± 30	»	80 - 90	$56,7^\circ \pm 2,7''$	$2,04 \pm 0,12$
700 ± 30	»	85 - 95	$56,7' \pm 2,7''$	$1,72 \pm 0,06$
725 ± 30	»	89 - 100	$57,2' \pm 2,5''$	$1,95 \pm 0,09$
750 ± 30	»	93 - 104	$57,7' \pm 2,5''$	$1,40 \pm 0,11$
820 ± 30	»	106 - 117	$56,5' \pm 3,5''$	$1,41 \pm 0,11$

TABELLA II

Misure di sezione d'urto differenziale per fotoproduzione singola di mesoni π^0 ad un angolo del mesone di 90° nel SCM.

E_γ (Lab) (MeV)	Θ_p (Lab)	T_p (Lab) (MeV)	$\Theta_{\pi^0}^*$	$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)^*$ ($\mu\text{b/st.}$)
595 ± 20	$41' \pm 1,25'$	155 - 171	$90,5_0 \pm 2,8''$	$2,70 \pm 0,19$
635 ± 20	»	171 - 187	$90,6' \pm 2,6''$	$2,24 \pm 0,07$
660 ± 20	»	181 - 197	$90,7' \pm 2,4''$	$3,25 \pm 0,20$
675 ± 20	»	187 - 203	$90,8' \pm 2,3''$	$3,60 \pm 0,26$
700 ± 20	»	197 - 213	$90,7' \pm 2,1''$	$3,83 \pm 0,11$
720 ± 20	»	205 - 221	$90,5^\circ \pm 2,0'$	$3,00 \pm 0,25$
760 ± 20	»	221 - 237	$90,2' \pm 2,0''$	$3,07 \pm 0,13$
800 ± 20	»	237 - 254	$90,0' \pm 2,0''$	$3,31 \pm 0,07$

tivo sperimentale. La seconda colonna dà l'angolo medio nel laboratorio per il protone di rinculo e apertura angolare, sempre nel laboratorio. La terza colonna contiene l'intervallo di energia cinetica dei protoni accettato dal telescopio in corrispondenza dell'angolo medio. La penultima colonna dà l'angolo medio del mesone π^0 nel baricentro e l'intervallo di angoli nel baricentro determinati dal dispositivo. L'ultima colonna ci dà infine la sezione d'urto differenziale nel baricentro calcolata tenendo conto di tutte le correzioni e in particolare della efficienza del contatore di Cerenkov. Quest'ultimo dato è stato calcolato con la calcolatrice elettronica 610 I.B.M. del nostro Istituto.

I risultati sperimentali mostrano un andamento della sezione d'urto differenziale sia a 90° che a 56° nel baricentro per il mesone π^0 , assai differente da quello che si ricava dalla letteratura. La differenza notevole consiste nel fatto che è evidente una risonanza piuttosto pronunciata, relativamente stretta, a una energia attorno ai 700 MeV. I dati sperimentali precedenti mostrano invece una seconda risonanza appena accennata, larga, a energie più elevate.

L'apparente diversità è legata in modo essenziale alla apertura in energia e in angolo del nostro apparato in confronto alle corrispondenti grandezze nei dispositivi sperimentali usati nelle precedenti misure.

La risoluzione da noi adottata per i punti a 90° è, ad esempio, di ± 20 MeV mentre quella adottata dal gruppo DEWIRE e al. ⁽¹⁴⁾ è di ± 30 MeV. Una risonanza stretta verrà allora fortemente mediata dalla peggiore risoluzione in energia; è quindi logico che la curva si presenti, nei risultati del gruppo citato, con un andamento meno marcato.

Anche la risoluzione angolare gioca in modo non indifferente, nelle zone in cui la dipendenza della sezione d'urto differenziale dall'angolo è molto forte. Poichè la derivata parziale della sezione d'urto differenziale rispetto all'angolo è sensibilmente diversa da zero, come risultò fin dalle prime misure orientative, sia per gli angoli in avanti che per quelli all'indietro nel baricentro, per il mesone π^0 , è pensabile che le zone degli angoli in avanti e all'indietro presentino particolari difficoltà qualora si abbiano cattive risoluzioni combinate sia in energia che in angolo.

Le misure da noi eseguite saranno perciò riconducibili ai dati precedenti solo quando si avrà un quadro completo sperimentale di dati, ottenuti con buone risoluzioni in angolo e in energia. Possiamo però fin da ora escludere dal confronto quelle prime misure eseguite sul solo protone di rinculo in cui si fa uso di grandi correzioni dovute a produzione multipla. Le misure citate vanno corrette anche per la produzione doppia di mesoni π^0 . Questo però sarà possibile solo quando la produzione doppia di mesoni π^0 sarà stata misurata più accuratamente. Questa mancata cor-

rezione, sia detto per inciso, tende ad alzare le sezioni d'urto che sono infatti, in quel primo lavoro citato, in alcuni casi anormalmente alte.

Le misure riportate in Fig. 2 fanno assegnare alla seconda risonanza un valore dell'energia dei fotoni incidenti compreso tra 675 e 700 MeV, corrispondente a $525 \div 540$ MeV per l'energia disponibile nel baricentro, in buon accordo con il valore ottenuto dalle misure di diffusione di mesoni π^- su protoni (¹, ²).

II. - DIFFUSIONE ELASTICA DI GAMMA DA PROTONI

1. - ATTUALE SITUAZIONE SPERIMENTALE.

La diffusione elastica dei raggi gamma da protoni, cioè la reazione:



può essere usata come una notevole sorgente di informazione sulla struttura del nucleone, attraverso una migliore comprensione dell'interazione del campo elettromagnetico con nucleoni liberi. La diffusione di un gamma da un nucleone presenta sostanzialmente due aspetti importanti: 1) la notevole differenza di massa tra elettrone e protone rende la sezione d'urto

di diffusione nel caso di un protone $\left(\frac{m}{M}\right)^2 \approx 3 \cdot 10^{-7}$ volte quella su elet-

trone; 2) sebbene il nucleone abbia spin $1/2$, tuttavia il momento magnetico anomalo che esso possiede dovuto alla sua struttura interna e, probabilmente altri effetti elettromagnetici, fanno sì che la diffusione di un gamma da un nucleone possa essere descritta dalla formula di Klein-Nishina opportunamente modificata, solo per energie dei gamma veramente basse. Similmente la diffusione di gamma da nuclei complessi permette un interessante raffronto con la diffusione di gamma da parte degli elettroni di un atomo. In questo ultimo caso è noto che, ad energie bassissime dei gamma, la sezione d'urto di diffusione è zero per un atomo neutro

e ha il valore classico di Thomson $\sigma_{Th} \propto \left(\frac{Z'e^2}{M'e^2}\right)^2 (1 + \cos^2 \Theta)$ per uno

ione (come per un corpo rigido di carica effettiva $Z'e$ e massa totale M'). Al crescere dell'energia dei gamma, il rapporto tra la diffusione elastica coerente e quella anelastica dipende dal fattore di forma atomico. Per grandi energie dei gamma, la sezione d'urto diviene la somma incoerente delle sezioni d'urto di Klein-Nishina di Z elettroni.

Una situazione analoga è stata riscontrata nelle misure di diffusione

di gamma da nuclei fatte finora. A bassissime energie (1-10 MeV) è difficile osservare la diffusione nucleare a causa della diffusione dovuta agli elettroni, tuttavia diversi sperimentatori (³⁵, ³⁸) hanno lavorato in questa zona di energie riuscendo a mettere in evidenza effetti dovuti a risonanze nucleari, predetti in precedenza (³⁹).

Sopra 50 MeV e fino a 100 MeV circa, si hanno diverse misure di sezione d'urto e tutte mostrano che è compatibile coi risultati sperimentali una descrizione dello scattering basata su una sezione d'urto Thomson più un termine di scattering anelastico, dovuto alla diffusione dai nucleoni singoli, secondo la formula di KLEIN-NISHINA (⁴⁰) (modificata per tener conto del momento magnetico anomalo dei nucleoni). Questo secondo termine si sovrappone al primo tramite un fattore di forma nucleare di cui si può, però, dare ragionevolmente solo un ordine di grandezza.

Le difficoltà cominciano al disopra dei 100 MeV. Da un punto di vista strettamente sperimentale queste consistono essenzialmente nel fatto che al disopra di 143 MeV nel laboratorio si ha la fotoproduzione di mesoni π^0 , i cui gamma di decadimento costituiscono un fondo che è possibile eliminare solo sfruttando le piccole differenze di cinematica tra i due processi, facendo uso di apparati di buona risoluzione. Comunque, dalla soglia fino ad energie di circa 300 MeV nel laboratorio, l'andamento della sezione d'urto è stato misurato e le conclusioni sono che la sezione d'urto, che aumenta lentamente con l'energia dei gamma fino all'energia corrispondente alla soglia dei π , oltre questo valore sale su con maggiore rapidità fino all'energia corrispondente alla prima risonanza di fotoproduzione (⁴¹, ⁴³).

Per quanto riguarda la zona delle alte energie, nessun risultato sperimentale è stato finora pubblicato. Le uniche misure, ancora in corso di pubblicazione, sono quelle di DE WIRE e al. (⁴⁴) che si sono spinti fino a una energia attorno a 600 MeV, in effetto Compton su idrogeno, per un angolo di 75° e 90° (SCM).

L'indicazione più sorprendente di queste misure preliminari è che la sezione d'urto mantiene a questa energia praticamente lo stesso valore che ha all'energia di risonanza in fotoproduzione, mentre ci si attenderebbe una rapida discesa, con un andamento simile a quello della sezione d'urto differenziale per fotoproduzione di mesoni π^0 .

Dato l'interesse del risultato e la scarsità dei dati sperimentali che caratterizza questa zona di energie, abbiamo voluto esplorare la possibilità di eseguire misure al disopra dei 500 MeV e per un angolo di 90° (SCM) in modo da completare, se possibile, le conoscenze attuali relative a questo angolo.

2. - TEORIE DELLA DIFFUSIONE ELASTICA DEI GAMMA.

Dal punto di vista dell'interpretazione teorica, il metodo più potente di indagine con cui si possono trarre delle predizioni sul processo di diffusione nucleare, resta finora l'uso delle relazioni di dispersione (45).

Gell-Mann, Goldberger e Thirring hanno infatti dimostrato che, scrivendo l'ampiezza di diffusione in avanti nella forma generale:

$$M_1(k_1) = A_1(k_1) \vec{e} \times \vec{e}' + i B_1(k_1) \sigma \times \vec{e} \wedge \vec{e}' \quad (1)$$

(dove $A_1(K_1)$, $B_1(K_1)$ sono funzioni complesse di K_1 , energia del fotone incidente nel sistema del laboratorio, \vec{e} , \vec{e}' i vettori di polarizzazione dei fotoni incidente e diffuso e σ l'operatore di spin del protone) deve essere:

$$R_1 [A_1(k_1) - A_1(0)] = \frac{2 k_1^2}{\pi} P \int_0^\infty \frac{\text{Im } A_1(k'_1)}{k'_1 (k_1'^2 - k_1^2)} dk'_1 \quad (2)$$

$$R_1 [B_1(k_1) - k_1 B_1(0)] = \frac{2 k_1^3}{\pi} P \int_0^\infty \frac{\text{Im } B_1(k'_1)}{k_1'^2 (k_1'^2 - k_1^2)} dk'_1$$

Per il cosiddetto teorema ottico si può anche scrivere:

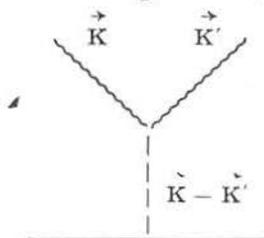
$$\text{Im } A_1(k_1) = \frac{k_1}{4\pi} \sigma_{\text{Tot}}(k_1)$$

Al disopra della soglia, σ_{Tot} è sostanzialmente la sezione d'urto di fotoproduzione di π , perchè in prima approssimazione si può trascurare il contributo del processo di diffusione elastica alla sezione d'urto totale d'assorbimento, nonchè quello di produzione di coppie di elettroni. Se allora, come si fa nella ordinaria teoria della diffusione, si scrivono le ampiezze di diffusione, e di qui le sezioni d'urto differenziali, in termini degli spostamenti di fase, una analisi fenomenologica della natura e dell'ordine dei multipoli implicati nei processi di assorbimento, unitamente alle (2), permette di risalire alla conoscenza delle fasi e quindi alle ampiezze di diffusione. In ogni caso, per energie dei gamma estremamente basse, l'analisi teorica dei processi di diffusione può essere fatta quasi

rigorosamente. Infatti a tali energie le sole onde elettromagnetiche che possono essere sensibilmente diffuse sono quelle di dipolo elettrico e magnetico, che possono accoppiarsi allo spin del protone in modo da formare onde di momento angolare totale $1/2$ e $3/2$. Ebbene è stato dimostrato da Low ⁽⁴⁶⁾ che per tali energie le ampiezze corrispondenti alle due diverse transizioni sono determinate dalla massa, carica e momento magnetico anomalo del nucleone. In altre parole, l'analogo della ampiezza di diffusione Thomson è determinato dalle proprietà elettromagnetiche statiche del nucleone.

Al crescere dell'energia, e subito dopo la soglia dei π , l'ampiezza di transizione $M_{3/2}$ diviene predominante e questa, che è responsabile della prima risonanza, è anche responsabile degli alti valori della sezione d'urto per diffusione in questa zona di energie. Tuttavia, l'aggiunta alla sezione d'urto Thomson di questo termine risonante riproduce i dati sperimentali solo qualitativamente ⁽⁴⁷⁾. La situazione non viene migliorata molto dalla considerazione di meccanismi del processo di diffusione basati su termini di interazione del tipo $A^2 \Phi^2$ nell'equazione di KLEIN-GORDON ⁽⁴⁸⁾.

Recentemente ^(49, 50) è stato preso in considerazione anche il meccanismo di produzione basato sul diagramma già suggerito da Low:



La considerazione di un simile diagramma, che tra l'altro è strettamente connesso con la vita media del π^0 , ha reso soddisfacente l'accordo coi dati sperimentali. Il suo contributo è stato semplicemente aggiunto alla parte reale dell'ampiezza di diffusione.

Per energie molto alte, come abbiamo visto, non si hanno che pochissimi dati sperimentali assolutamente insufficienti per un confronto con la teoria, la quale del resto consiste semplicemente nel ritenere che per energie maggiori di 500 MeV, il contributo predominante sia quello dell'ampiezza $E_{1/2}$ come suggerito dai dati sulla fotoproduzione.

3. - RISULTATI DELLE MISURE.

Il dispositivo sperimentale e l'elettronica usati sono quelli già descritti nella prima parte, per le misure di fotoproduzione di π^0 .

L'unica modifica consiste nel cambiamento dell'angolo del contatore di Cerenkov rispetto alla direzione del fascio, dato che a parità di energia e di angolo di emissione del protone, gli angoli di emissione di un π^0 o di un gamma diffuso in effetto Compton sono leggermente diversi. L'altra modifica, come discuteremo appresso, è consistita in una riduzione dell'angolo solido di accettazione del Cerenkov. Abbiamo quindi misurato le coincidenze protone-gamma, in funzione dell'energia massima dello spettro di bremsstrahlung.

La tabella III mostra la velocità di conteggio ottenuta per ogni $6,30 \cdot 10^{10}$ fotoni equivalenti (ad una energia di 770 MeV) in condizioni cinematiche in cui la soglia di produzione dell'effetto Compton coincide con una energia di 750 MeV per i fotoni incidenti, mentre la soglia di fotoproduzione singola dei mesoni π^0 è a 780 MeV.

TABELLA III

Curva di eccitazione delle coincidenze protone-gamma col dispositivo sperimentale usato per le misure di effetto Compton.

Energia massima dello spettro di bremsstrahlung (in MeV)	Velocità di conteggio (normalizzata a 770 MeV) ogni $6,3 \cdot 10^{10}$ fotoni equivalenti
700	0,04 \pm 0,02
725	0,05 \pm 0,02
750	0,05 \pm 0,02
760	0,12 \pm 0,03
770	0,15 \pm 0,03
780	0,31 \pm 0,03
790	0,32 \pm 0,03
800	0,71 \pm 0,06
830	1,36 \pm 0,13
850	1,16 \pm 0,12

Questa misura è stata eseguita ponendo il contatore di definizione del telescopio per protoni a 229 cm dal bersaglio a idrogeno, con una fenditura dinanzi al contatore di Cerenkov di 6 cm di larghezza orizzontale e di altezza 2,5 cm e con il contatore di Cerenkov posto ad un angolo medio di $64,5^\circ$. Le condizioni cinematiche definiscono un intervallo di energie dei raggi gamma responsabili dell'effetto Compton, che va da 748 a 790 MeV. L'effetto Compton viene perciò misurato per una energia media di 770 MeV con un intervallo di ± 20 MeV.

4. - DISCUSSIONE DEI RISULTATI.

La curva di eccitazione sembrerebbe indicare la presenza di un effetto nella zona giusta di energia massima dello spettro di bremsstrahlung. Si noti che se questa interpretazione è valida, fino a una energia massima

dello spettro di 780 MeV, quasi tutto il conteggio è dovuto ad effetto Compton perchè la salita del conteggio può essere compresa pensando che lo spettro di bremsstrahlung invade man mano tutta la zona dei fotoni incidenti che possono dare origine all'effetto Compton.

Questa indicazione della esistenza dell'effetto Compton in tali proporzioni è stata da noi confermata eseguendo misure con diversa geometria. Se, infatti, si altera la geometria in modo tale che il telescopio per protoni e il telescopio che misura i gamma diffusi non siano più sullo stesso piano, avendo anche tenuto conto delle dimensioni finite del bersaglio ad idrogeno usato nelle misure, si è in grado di separare l'effetto Compton dalla fotoproduzione di mesoni π^0 . La prima di queste due reazioni è rigorosamente piana, la seconda dà invece una distribuzione spaziale delle coincidenze tra protone di rinculo e gamma di decadimento che non è piana perchè i fotoni di decadimento possono avere un azimuth qualsiasi attorno alla direzione di volo del mesone π^0 .

Questo effetto è stato visto in una misura di coincidenze tra protone di rinculo e gamma con il sistema in piano e fuori piano.

Un risultato tipico delle prove è il seguente: con energia massima dello spettro di bremsstrahlung di 760 MeV, uscendo fuori piano di 10° circa, la velocità di conteggio cala di un fattore $10 \pm 2,3$. Se questo conteggio fosse dovuto a mesoni residui, in qualche modo, ci si sarebbe atteso una diminuzione al massimo di un fattore 1,2. Abbiamo infatti ottenuto, per le velocità di conteggio « per sweep », cioè per 10^{-5} coulomb di carica raccolti al quantmetro:

« in piano »	E (MeV)	
	800	$0,68 \pm 0,06$
	760	$0,12 \pm 0,03$
« fuori piano »	800	$0,14 \pm 0,02$
	760	$0,01 \pm 0,01$

Ci pare quindi di aver provato che gli eventi contati con energia massima della macchina a 760 MeV siano in prevalenza eventi dovuti a effetto Compton. Una eguale prova ripetuta a 800 MeV di energia massima dello spettro di bremsstrahlung da un fattore tra conteggio in piano e fuori piano pari a $5 \pm 0,7$. Come si è osservato prima una parte notevole del conteggio anche in queste condizioni dovrebbe essere data dall'effetto Compton. La prova sembra confermare anche questa interpretazione.

Per risalire dai dati della tabella III a un valore sia pure approssima-

tivo della sezione d'urto Compton, il problema principale è quello di sottrarre dalle velocità di conteggio misurate il contributo dovuto alla fotoproduzione singola di π^0 . In primo luogo occorre calcolare qual'è, nelle nostre condizioni geometriche l'efficienza di rivelazione dei gamma di decadimento che possono simulare un gamma diffuso. Come già osservammo, mentre l'efficienza di rivelazione per i gamma diffusi può essere considerata assai prossima a 1, date la risoluzione in angolo del telescopio per protoni e le dimensioni dell'apertura che delimita l'angolo di accettazione del Cerenkov, l'efficienza per i gamma di decadimento è molto bassa. Abbiamo calcolato, facendo uso di un programma di calcolo appositamente elaborato per il nostro calcolatore IBM 610, un valore medio dell'efficienza dei gamma da π^0 del 7%. In secondo luogo occorre determinare qual'è l'intervallo di energia dello spettro di bremsstrahlung effettivamente utilizzato, al variare dell'energia massima dello spettro. Finchè quest'ultima si mantiene lontana dall'energia media dell'intervallo di spettro utilizzato, questo intervallo può essere considerato costante e pari a 40 MeV con risoluzione in energia quasi rettangolare. Ma per punti ottenuti abbassando l'energia della macchina, l'intervallo si restringe fino a scomparire. Poichè i π^0 provengono da una banda di energia di ± 20 MeV attorno a 800 MeV, se l'energia massima dello spettro è, ad esempio, 790 MeV, l'intervallo è ridotto a 10 MeV. Da notare che in questo caso diviene più problematico il calcolo del fattore di spettro.

Altra necessaria correzione è quella dovuta all'assorbimento nucleare nel rame del telescopio per protoni.

La sottrazione è stata fatta prendendo come valori di riferimento le velocità di conteggio da noi già ottenute in fotoproduzione di π^0 e, a parte le correzioni già dette, riducendole di un fattore pari al rapporto tra l'attuale efficienza e quella che si aveva nelle misure di fotoproduzione. Ciò equivale a dire che per i valori delle sezioni d'urto differenziali di fotoproduzione abbiamo utilizzato i valori da noi già trovati nelle stesse condizioni cinematiche.

Abbiamo così dedotto il valore della sezione d'urto per diffusione per ciascuno dei punti ottenuti variando l'energia massima dello spettro e mediando i risultati ottenuti. Il valore trovato è:

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{90^\circ}^* = (0,17 \pm 0,03) \mu\text{b/st.} \quad \text{per } E_\gamma = 770 \text{ MeV}$$

Da notare che il valore per la sezione d'urto che si ottiene utilizzando solamente i punti che certamente sono immuni da contaminazione di π^0 , quelli cioè per i quali $E_\gamma \leq 780$ MeV forniscono un valore di:

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{90^\circ}^* = (0,13 \pm 0,06) \mu\text{b/st.}$$

Come si vede il valore della sezione d'urto che si ottiene a questa energia è piuttosto elevato, dello stesso ordine di grandezza del valore alla prima risonanza in fotoproduzione. Tenendo presente il risultato di DEWIRE (³⁹) ci sembra una interessante indicazione il fatto che fino a 500 MeV a sui 770 MeV la sezione d'urto ha un valore così elevato. Mancano assolutamente indicazioni sul comportamento della sezione d'urto nell'intervallo tra le due energie.

5. - CONSIDERAZIONI FINALI.

Le misure qui esposte sulla fotoproduzione singola di mesoni π^0 e i dati preliminari sull'effetto Compton mostrano come il quadro sperimentale della interazione mesone-nucleone vada studiato molto più in dettaglio di quanto si sia fatto finora.

La sezione d'urto differenziale sembra variare più rapidamente con l'energia di quanto ci si aspetti sulla base delle prime misure. Ricordiamo che una situazione analoga sussiste anche nel campo dei mesoni carichi (²⁹) dove una interpolazione più accurata delle misure ha mostrato l'esistenza di una seconda risonanza altrettanto stretta quanto quella da noi rilevata nel campo della fotoproduzione singola di mesoni π^0 .

Se è così cambiato l'aspetto della sezione d'urto differenziale per ciò che riguarda la variazione del suo valore con l'energia; c'è forse da aspettarsi che anche la dipendenza angolare a energia costante non segua una formula interpolatoria semplice e quindi occorra eseguire misure a molti angoli e con aperture angolari piuttosto strette. Le oscillazioni della sezione d'urto differenziale rilevate da altri autori per angoli in avanti (¹³), potrebbero essere reali e non dovute, come si potrebbe anche pensare, a errori sistematici.

Nel dubbio che una indagine più accurata non porti a riconoscere una struttura complessa nella distribuzione angolare, abbiamo deciso di proseguire, con il presente apparato sperimentale, la nostra indagine ad altri angoli nel baricentro e ci stiamo preparando ad estenderla, con altri apparati in avanzata preparazione, a tutte le altre zone della distribuzione angolare che non possono essere coperte dal presente apparato.

Nel campo dell'effetto Compton ci ripromettiamo di completare una indagine della sezione d'urto per un angolo di 90° nel baricentro per il fotone diffuso. Non appena ottenuti ed analizzati questi dati estenderemo la misura dell'effetto Compton ad almeno due angoli nel baricentro per il fotone diffuso in modo da avere una prima distribuzione angolare.

6. - RINGRAZIAMENTI.

Una esperienza con un grado di complessità come quella esposta non avrebbe potuto essere condotta a termine senza una collaborazione strettissima dei servizi tecnici dei Laboratori di Fisica. Ringraziamo perciò in primo luogo il Sig. Corindo Felici, capo del servizio elettronica, al cui costante interessamento e guida è dovuta la costruzione e messa a punto dei circuiti elettronici.

Ringraziamo il personale della officina ed in particolar modo il Sig. Fortunato Graziosi che ha lavorato con estrema perizia e precisione gli assorbitori del telescopio per protoni, consentendoci così di raggiungere una definizione geometrica mai raggiunta in altri esperimenti simili. Vogliamo ringraziare i tecnici del nostro reparto, Sig. Antonio Saffioli e Sig. Giovanni Nalini che hanno curato il montaggio di tutto l'apparato sperimentale.

Ringraziamo inoltre gli operatori del sincrotrone dei Laboratori Nazionali di Frascati per l'impegno con cui svolgono il delicato compito di mantenere costanti le condizioni sperimentali, specie durante l'esecuzione di curve di eccitazione con piccolissimi incrementi di energia.

Roma — Istituto Superiore di Sanità - Laboratori di Fisica.

BIBLIOGRAFIA

- (1) BRISSON J., DETOEF, FALK-VAIRANT P., VAN ROSSUM L., VALLADAS G. e YUAN L. C. L. - Phys. Rev. Letters, 3: 361 (1959).
- (2) DEVLIN T. J., BARISH B. C., HESS W. N., PEREZ-MENDEZ V. e SOLOMON T. - Phys. Rev. Letters, 4: 242 (1960).
- (3) SILVERMAN A. e STEARNS M. - Phys. Rev., 88: 1225 (1952).
- (4) GOLDSCHMIDT-CLERMONT Y., OSBORNE L. S. e SCOTT M. - Phys. Rev., 97: 188 (1955).
- (5) WALKER R. L., OAKLEY D. C. e TOLLESTRUP A. V. - Phys. Rev., 97: 1279 (1953).
- (6) OAKLEY P. C. e WALKER R. L. - Phys. Rev., 97: 1283 (1953).
- (7) KECK J. C., TOLLESTRUP A. V. e BINGHAM H. H. - Phys. Rev., 103: 1549 (1956).
- (8) JHON W. e STOPPINI G. - Nuovo Cimento, 6: 1206 (1957).
- (9) KOESTER L. J. e MILLS F. E. - Phys. Rev., 103: 1900 (1957).
- (10) McDONALD W. S., PETERSON V. Z. e CORSON D. R. - Phys. Rev., 107: 377 (1957).
- (11) VETTE J. I. - Phys. Rev., 111: 622 (1958).
- (12) BINGHAM H. H. e CLEGG A. B. - Phys. Rev., 112: 2034 (1958).
- (13) BERKELMAN K. e WAGGONER J. - Phys. Rev., 117: 1364 (1960).
- (14) DEWIRE J. W., JACKSON H. E. e LITTAUER R. M. - Phys. Rev., 10: 1208 (1958).
- (15) STEIN P. C. e ROGERS K. C. - Phys. Rev., 110: 1209 (1958).
- (16) WORLOCK R. M. - Phys. Rev., 117: 537 (1960).
- (17) VASIL'KOV R. G., GOVORKOV B. B. e GOL'DANSKII V. I. - Sov. Phys. J.E.T.P., 37: 7 (1960).
- (18) CORTELESSA G. e REALE A. - Nuovo Cimento, XVIII 1265 (1960); Id. Scientific Reports of the Istituto sup. di Sanità (in pubblicazione).
- (19) BLOCK M. e SANDS M. - Phys. Rev., 113: 303 (1959).

- (20) FELDMAN M., HIGHLAND V., DE WIRE J. W. e LITTAUER R. M. - Phys. Rev. Letters, 5: 435 (1960).
- (21) LUCKEY D. - (Thesis) Cornell University (1954).
- (22) BERNARDINI G. e GOLDWASSER E. L. - Phys. Rev., 94: 729 (1954).
- (23) JANES G. S. e KRANSHAAR W. L. - Phys. Rev., 93: 900 (1954).
- (24) WALKER R. L., OAKLEY D. C., PETERSON V. Z., TEASDALE J. G. e VEITE J. I. - Phys. Rev., 99: 210 (1955).
- (25) KECK J. C., TOLLESTRUP A. V. e WORLOCK R. M. - Phys. Rev., 99: 220 (1955).
- (26) HEINBERG M., McCLELLAND W. M., TURKOT F., WOODWARD W. M., ZIPOY D. M. e WILSON R. R. - Phys. Rev., 110: 1211 (1958).
- (27) WILSON R. R. - Phys. Rev., 110: 1212 (1958).
- (28) DIXON F. P. e WALKER R. L. - Phys. Rev. Letters, 1: 112 (1958).
- (29) BENEVENTANO M., FINOCCHIARO G., FINZI R., MEZZETTI L., PAOLUZZI L. e SCHAEFER C. - Nuovo Cimento, XVII, 274 (1960).
- (30) PEIERLS R. F. - Ph. Rev. Letters, 1: 174 (1958).
- (31) QUERZOLI R., SALVINI G. e SILVERMAN A. - Proceedings of Rochester Conference (1960).
- (32) STEIN P. - Phys. Rev. Letters, 2: 473 (1959).
- (33) BINGHAM H. H. e CLEGG A. B. - Phys. Rev., 112: 2033 (1960).
- (34) PELLEGRINI C. e STOPPINI G. - Nuovo Cimento, XVII, 269 (1960).
- (35) BURKHARDT - Phys. Rev., 100: 192 (1955).
- (36) DRESSEL GOLDHABER, HANSON - Phys. Rev., 74: 1046 (1948).
- (37) FULLER E. HAYWARD - Phys. Rev., 93: 1106 (1954).
- (38) STEARNS M. B. - Phys. Rev., 87: 706 (1932).
- (39) BETHE H. A. e ASHUKIN J. - Experimental Nuclear Physics, Edited by E. Segré, I, 347.
- (40) POWELL J. L. - Phys. Rev., 75: 32 (1949).
- (41) PUGH FRISH GOMEZ - Phys. Rev., 95: 590 (1954).
- (42) OXLEY C. L. e TELEGGI V. L. - Phys. Rev., 100: 435 (1953).
- (43) BERNARDINI G., HANSON A. O., ODIAN A. C., YAMAGATA T., AUERBACH L. B. e FIOLOSOFO I. - Nuovo Cimento, XVIII, 1203 (1960).
- (44) LITTAUER, DEWIRE, FELDMAN - Bull. am. phys. Soc., 4: 233 (1939).
- (45) GELL-MAMM, GOLDBERGER, THIRING - Phys. Rev., 95: 1612 (1954).
- (46) LOW F. - Phys. Rev., 96: 1428 (1954).
- (47) YAMAGUCHI Y. - University of Illinois Report (1955).
- (48) KARZAS W. J., WATSON W. K. R. e ZACHARIASEN F. - Phys. Rev., 110: 253 (1958).
- (49) HYMAN L. G. - Ph.D. Thesis.
- (50) JACOB M. e MATHEWS J. - Phys. Rev., 117: 834 (1960).

Riassunto. — Si descrive un nuovo elettrocompressore particolarmente adatto per fluidi frigoriferi, aventi le seguenti caratteristiche principali: compressore rotativo alloggiato entro il rotore del motore elettrico; afflusso di lubrificante crescente al crescere delle sollecitazioni della macchina; separazione centrifuga del lubrificante dal fluido compresso, all'interno dell'elettrocompressore.

Un'altra caratteristica peculiare è data dal fatto che la nuova macchina consta di un numero molto limitato di parti, di cui solo 5 hanno bisogno di lavorazioni speciali.

Summary. — A new type of electrocompressor, especially fitted for refrigerant fluids and having the following main performance, is described: rotary compressor housed inside the rotor of the electric motor; lubricant inflow growing by the growing of the engine stresses; centrifugal lubricant separation from the compressed fluid inside the electrocompressor.

Another peculiar feature is given by the fact that this new engine is composed of a very limited number of components, five only of which need particular machinings.

Agli inizi di questo secolo l'abate francese Audiffren, preoccupato dalle frequenti perdite di anidride solforosa dai premistoppa dei compressori che azionavano la fabbrica di ghiaccio di un suo nipote, si propose di costruire una macchina frigorifera dalla quale le fughe dell'intermediario fossero impossibili.

Il problema venne da lui risolto in modo geniale con la collaborazione della Casa Singrun di Epinay, e l'anno 1907 vide la nascita della prima macchina frigorifera ermetica che si diffuse rapidamente con il nome di macchina Audiffren-Singrun. Le sue caratteristiche ed il suo funzionamento sono ben noti e non conviene dilungarsi a descriverli; ci limitiamo a ricordare che compressore, condensatore, organo di strozzamento ed evaporatore sono contenuti in due involucri metallici solidali tra loro, ermeticamente sigillati e ruotanti attorno ad un medesimo asse;

(*) Relazione presentata al Congresso dell'Associazione Termotecnica Italiana (Napoli, 16 ottobre 1960).

il motore è esterno alla macchina e viene di solito collegato ad essa mediante cinghie. La macchina Audiffren-Singrun, originariamente ad anidride solforosa, viene ancora costruita per freon 12 ed impiegata in alcune contrade tropicali dove, in mancanza di energia elettrica, viene azionata a pedali.

Il generatore di freddo dell'abate Audiffren è adatto per le piccole utenze commerciali ma non si presta per gli armadi domestici; esso ebbe il grande merito di dare una soluzione al problema delle perdite e di attirare l'attenzione dei Tecnici sulla necessità di proseguire gli sforzi per realizzare macchine e circuiti frigoriferi a perfetta tenuta.

Prima di giungere agli attuali compressori ermetici, dovevano tuttavia passare ancora parecchi anni. Nel 1926, la General Electric Co. (1) costruì il primo gruppo ermetico costituito da un motore elettrico monofase a 4 poli, con circuito ausiliario di avviamento, direttamente accoppiato ad un piccolo compressore alternativo. Entrambi erano racchiusi entro un involucro di acciaio saldato dal quale dipartivano le tubazioni dell'agente frigorifero. Il compressore lavorava alla velocità di ben 1800 giri nominali al minuto primo, corrispondenti ad una corrente alternata della frequenza di 60 Hz; una particolarità interessante era costituita dal fatto che questa prima macchina, priva di valvole, era del tipo « a stantuffo oscillante » simile quindi alle piccole motrici a vapore usate come giocattoli. La lubrificazione era realizzata mediante una pompa alternativa ed inoltre il compressore era munito di un dispositivo oleodinamico che metteva in by-pass l'aspirazione e la compressione durante la fase di avviamento, e ciò allo scopo di ridurre le resistenze allo spunto del motore elettrico.

E' bene ricordare, in quest'occasione, che nell'anno 1933 il milanese Carlo Zorzi brevettò un compressore ermetico per piccoli frigoriferi domestici, dotato di caratteristiche molto interessanti; la macchina di Zorzi suscitò all'estero l'interesse di molti studiosi (2) ma, come avviene molto spesso nel nostro Paese, non ebbe fortuna da noi e finì col costituire una fonte gratuita di ispirazione per costruzioni straniere similari. Ad essa si arrestò il contributo italiano allo studio di macchine frigorifere ermetiche.

Nel frattempo negli U.S.A. ed in Germania, la costruzione di questi nuovi compressori, sino alla potenza di 1/6 HP, si veniva intensificando tanto che nell'anno 1939 l'80% della produzione mondiale era costituito dai modelli ermetici (3). Oggi queste macchine sono praticamente le sole usate in un'infinità di applicazioni che vanno dal frigorifero domestico, al conservatore di creme o di cibi congelati, ai refrigeratori d'acqua, ai deumidificatori, ai conservatori di tessuti viventi e di plasma sangui-

gno, ecc.; esse impiegano ormai nella loro totalità gli idrocarburi fluoroclorurati comunemente denominati freon o alfofrene.

Lo sforzo costante dei fabbricanti è stato quello di costruire macchine sempre più efficienti ed economiche, e tali da assicurare un servizio della durata di almeno 5 anni senza alcun intervento.

Le costruzioni moderne sono orientate verso due grandi categorie di compressori e, precisamente, gli alternativi ed i rotativi. Nei compressori alternativi più recenti si impiega prevalentemente l'accoppiamento del tipo « a glifo » (2) tra pistone ed albero, fino a potenze di circa 1 HP mentre i rotativi sono per lo più del tipo monocellulare con settore scorrevole entro un'asola praticata lungo generatrici del cilindro, e più raramente del tipo bicellulare con due palette scorrevoli entro asole praticate lungo generatrici del pistone rotante. Le velocità di rotazione, alla frequenza di 50 Hz usata in Europa, sono di 1500 e di 3000 giri nominali al minuto primo per motori rispettivamente a 4 ed a due poli, e di 1800 e 3600 giri nominali al primo per la frequenza di 60 Hz usata in America.

Recentemente, nella categoria dei compressori alternativi, han fatto la loro comparsa i « compressori oscillanti » i cui studi vennero iniziati circa trenta anni or sono e ripresi solo recentemente; questi compressori sono oggi costruiti per potenze assorbite non superiori a 100 Watt e ne esistono due tipi che si differenziano principalmente per le caratteristiche elettriche; precisamente, elettromagnetici (3. 4. 5. 6) ed elettrodinamici (4. 6. 7) che lavorano entrambi con correnti alternate e nei quali il pistone, in ciò aiutato da giochi di molle, si muove in sincronismo con la frequenza della rete.

Queste macchine sono estremamente sensibili alle variazioni di tensione, ed il loro rendimento volumetrico effettivo decresce rapidamente con il crescere del rapporto di compressione (6) la qual cosa costituisce un inconveniente notevole data la forte variabilità di questo rapporto nel caso della condensazione ad aria.

Riteniamo inoltre che i costi di produzione non siano in generale inferiori a quelli dei compressori alternativi con accoppiamento a glifo e che, in ogni caso, la lieve eventuale economia viene annullata dai cennati inconvenienti che sono insiti nella loro natura.

Secondo un recente studio di K. BACH (6) i compressori che presentano le migliori caratteristiche, sia nei riguardi delle sottotensioni, sia per i rendimenti volumetrici effettivi che si mantengono elevati anche con forti variazioni del rapporto di compressione, sono i compressori rotativi. Quelli oscillanti hanno rendimenti globali di pochissimo superiori a quelli dei compressori alternativi sino ad un rapporto di com-

pressione uguale a 6, ma se la tensione della rete si abbassa anche di poco, questo leggerissimo vantaggio si annulla per valori del rapporto di compressione inferiori a 4 (fig. 1).

A fianco ai compressori descritti, si deve ricordare un recente tentativo della Casa Wetmore Hodges & Associated di Redwood City, in

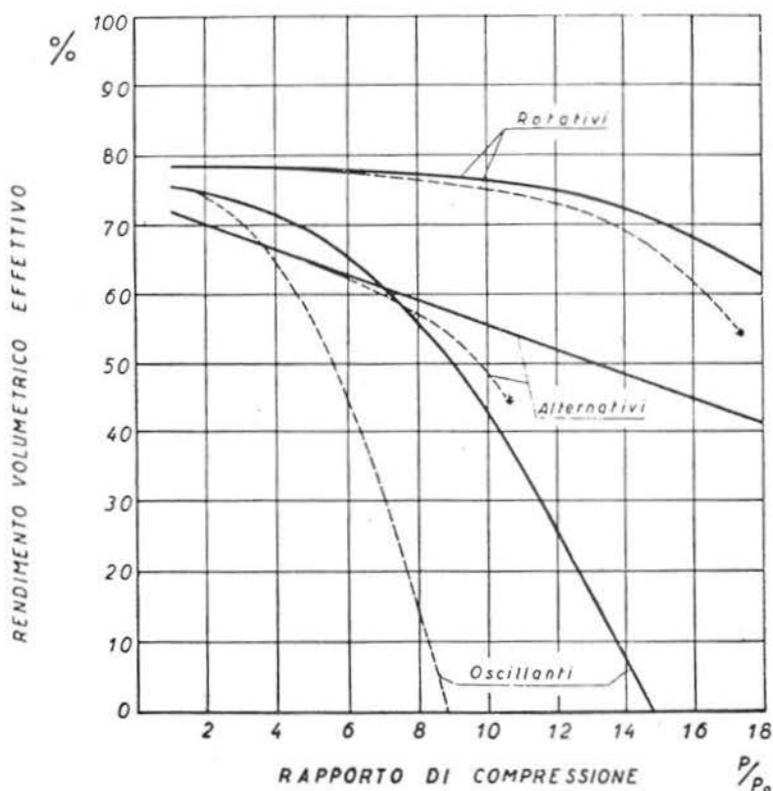


Fig. 1. - Rendimento volumetrico effettivo in funzione del rapporto di compressione — 220 V; — Sottotensione 176 V (6).

California, di creare un compressore volumetrico a capsulismo collocato entro il rotore di un motore elettrico (8). La macchina è rappresentata nella fig. 2; essa è priva di valvole ed i due ingranaggi che costituiscono il capsulismo sono interni l'uno all'altro, ma, dal punto di vista cinematico, la disposizione è identica a quella delle comuni pompe a ingranaggi. La tenuta avviene non solo sulle due testate, ma anche lungo i denti per cui sono necessari una costruzione estremamente accurata, con tolleranze di lavorazione ridottissime, e materiali che non risentono delle

sollecitazioni termiche entro il campo delle temperature di lavoro. Inoltre, uno degli ingranaggi è motore e l'altro mosso, e quindi l'accoppiamento è un accoppiamento di forza che non deve dar luogo a usure, poichè in tal caso sarebbe impossibile effettuare la compressione. Infine, il volume delle camere di compressione è in confronto allo sviluppo notevole delle superfici cui è affidata la tenuta, per cui le inevitabili « fughe » di gas compresso assumono una particolare importanza.

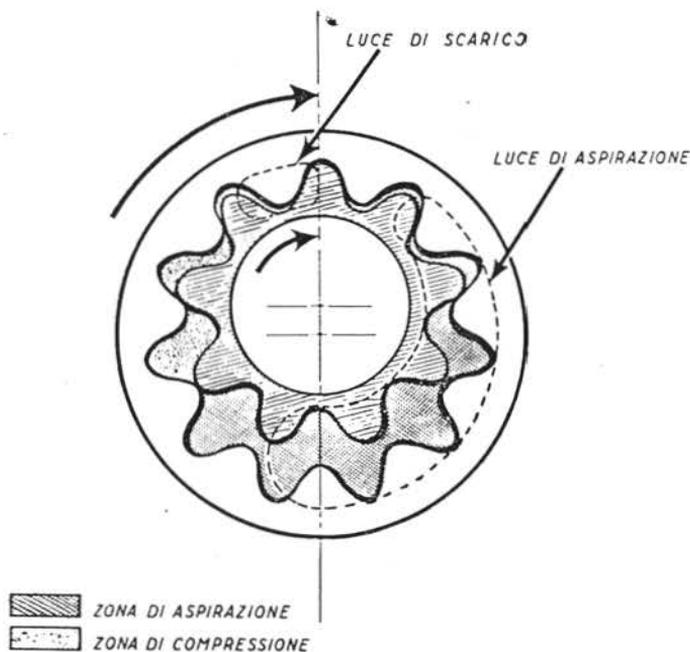


Fig. 2. - Compressore volumetrico a capsulismo della Wetmore Hodges.

Tutte queste ragioni, unite ad un'economia di costruzione pressochè inesistente ed alla precarietà di un lungo funzionamento, han fatto sì che questa interessante macchina non abbia sino ad ora riscosso particolare favore; non è da escludersi che ulteriori perfezionamenti possano renderla più efficiente, più economica e più durevole. I principali vantaggi, a nostro avviso, sono costituiti dalla mancanza di valvole e dall'avviamento morbido.

* * *

Da alcuni anni ci eravamo proposti di studiare un nuovo gruppo compressore ermetico, caratterizzato da semplicità ed economia nella co-

struzione, da sicurezza di funzionamento e da una buona durata. Ciò allo scopo di estendere a categorie sempre più vaste i vantaggi del freddo, tenendo presente che il costo del compressore ammonta a circa $1/3$ di quello dell'armadio frigorifero completo. Contemporaneamente, ci eravamo posti anche il problema della riduzione dei costi di fabbricazione del mobile (*).

Il quesito che si presentava era il seguente: dove orientare gli sforzi? Infatti, i compressori alternativi, dopo l'adozione dell'accoppiamento a glifo, sono stati così semplificati da rendere difficili ulteriori perfezionamenti al di fuori di quelli relativi all'accoppiamento con motori a 2 poli anziché a 4 poli, come avviene normalmente. Tali perfezionamenti, del resto, sono già allo studio delle Case costruttrici. I compressori oscillanti presentano gli inconvenienti ai quali si è accennato; quelli a capsulismo tipo Wilmore non ci sembrano, per quanto abbiamo detto, molto adatti alle piccole potenze ma suscettibili di sviluppo per quelle maggiori, e, d'altra parte, una conferma indiretta a questa considerazione vien data dal recente sviluppo dei compressori — anch'essi a capsulismo — a doppia elica della S.R.M. che presentano problemi di tenuta interna molto simili a quelli del compressore Wilmore e che si sono dimostrati particolarmente rispondenti solo alle grandi e medie portate di gas (¹⁰, ¹¹).

Il campo dei compressori rotativi che sono caratterizzati, come si è detto, da rendimenti volumetrici più elevati e più stabili, è meno coltivato di quello degli alternativi, e ci sembrò quindi meritevole di attenta considerazione; pertanto, ci dedicammo sin dal principio dell'anno 1934, allo studio di un compressore rotativo che risultasse economico e robusto.

* * *

I primi tentativi tendevano alla realizzazione di una macchina unica che, con particolari accorgimenti, fosse in grado di adempiere alla doppia funzione di compressore e di motore.

A tale scopo — volendo deliberatamente evitare soluzioni che prendessero lo spunto dalle antiche macchine Autofrigo (*) perchè caratterizzate da un rendimento elettrico molto basso — si fece l'esperienza seguente: si prese un vecchio compressore ermetico per frigoriferi domestici e si ridusse al tornio il diametro del rotore. Questo venne nuova-

(*) La macchina Autofrigo, costruita dalla Escher-Wyss oltre trenta anni or sono, può considerarsi il primo compressore semi-ermetico e cioè ermetico ma ispezionabile con l'ausilio dei normali attrezzi d'officina. In essa lo statore elettrico, facilmente accessibile dall'esterno era separato dal rotore per il tramite di uno schermo di materiale antimagnetico, che faceva parte della capsula. Recentemente è comparso in Germania un nuovo compressore di media potenza che riecheggia fedelmente i criteri costruttivi dell'Autofrigo.

mente messo in opera, avendo cura di creare un'eccentricità rispetto all'asse geometrico dello statore. Da una parte le generatrici del rotore erano quasi tangenti a quelle interne dello statore, mentre, dalla parte diametralmente opposta, vi era, a causa della eccentricità, una distanza di 1.8 mm. Messa in moto la macchina, si osservò quanto segue:

- 1) il rotore si avviava qualunque fosse la posizione di arresto;
- 2) l'assorbimento di corrente non era superiore in maniera apprezzabile a quello che si aveva prima delle operazioni cennate, a parità

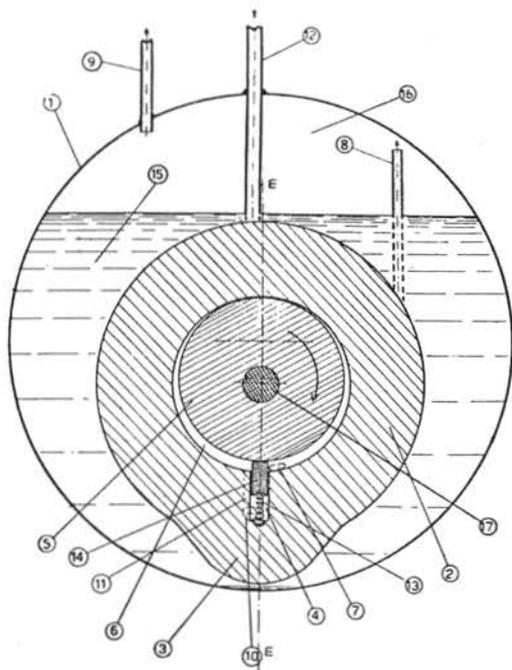


Fig. 3. - Primo tentativo: compressore monocellulare. Sezione verticale. 1) capsula; 2) statore; 3) protuberanza per l'asola del settore scorrevole; 4) asola; 5) rotore; 6) camera; 7) luce di scarico; 8) tubo di scarico; 9) mandata; 10) foro d'immissione; 11) canale d'immissione del gas entro la camera; 12) condotta di aspirazione; 13) molla del settore; 14) settore scorrevole.

di lavoro compiuto dal compressore. Si trattava tuttavia di un motore costruito nel 1926 e che già in origine aveva un rendimento assai basso, e quindi questa considerazione non poteva dar luogo a conclusioni serie.

Conseguentemente a questo esperimento, il futuro compressore avrebbe potuto avere la configurazione indicata nella fig. 3 che ricorda il classico compressore monocellulare, con settore scorrevole entro una asola sul cilindro.

La soluzione suggerita da questa prima esperienza avrebbe richiesto un motore a « cave chiuse » sia nello statore che nel rotore, altrimenti la tenuta sarebbe stata impossibile. Ora, mentre ciò è comune per i

rotori a gabbia di scoiattolo, lo stesso non può dirsi nei riguardi dello statore dove necessariamente le cave debbono essere occupate dalle masse delle bobine di campo. I motori a cave chiuse si fanno per applicazioni speciali, piuttosto rare, e costano molto per le difficoltà inerenti l'avvolgimento.

Questa considerazione ci suggerì una seconda soluzione che diede inizialmente risultati incoraggianti ⁽¹²⁾; non si voleva rinunciare al principio di costruire il motore-compressore, e si pensò quindi di costruire una macchina nella quale lo statore fosse diviso in due parti diverse e,

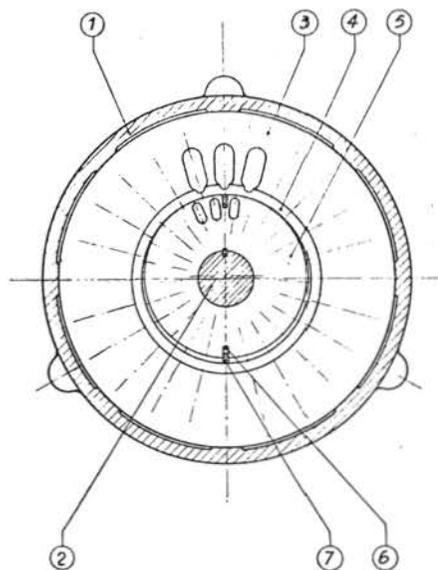


Fig. 4. - Secondo tentativo: compressore bicellulare. Sezione orizzontale. 1) capsula; 2) asse; 3) statore; 4) anello; 5) rotore; 6) asola; 7) palette scorrevole.

precisamente, una corona esterna simile a quella di un comune motore elettrico a cave aperte, ed un anello calettato sulla corona stessa, concentrico ed interno ad essa. Naturalmente, la presenza dell'anello rendeva difficoltosa la realizzazione della macchina monocellulare e quindi si ricorse ad un compressore bicellulare, con due palette scorrevoli entro le rispettive asole praticate nel rotore. Sia questa soluzione che quella precedente si presentavano vantaggiose perchè con la sola operazione di tranciatura dei lamierini magnetici si ricavano le parti sgrossate del motore e del compressore.

Il rotore era sempre calettato eccentricamente rispetto all'asse dello statore, per creare la camera di aspirazione; esso era collegato all'anello dello statore per mezzo di due piastre poste alle testate del cilindro, in modo da formare un tutto solidale, che poteva essere agevolmente sfi-

lato dallo statore. L'anello, in corrispondenza di ogni cava statorica, portava un solco in modo da aumentare la riluttanza magnetica del circuito e costringere il campo ad abbracciare il rotore.

La macchina costruita secondo questi criteri (fig. 4) funzionò in maniera incoraggiante. La lubrificazione era molto vivace in quanto all'olio veniva affidata anche la funzione di raffreddare le parti in movimento, oltre ad assicurare la tenuta. Un inconveniente era dovuto al fatto che la capsula era in pressione e conteneva notevoli quantità di olio. Quando il compressore si arrestava, questo, nel raffreddarsi, assorbiva una quantità assai forte di freon che veniva restituito quando, rimessa in moto la macchina, l'olio tornava a riscaldarsi. L'inconveniente era di notevole importanza a causa della modesta entità dell'agente frigorifero in circolazione, e venne in seguito eliminato. Tuttavia, restavano altri svantaggi: la presenza dell'anello faceva sì che il vettore campo si ripartisse in due direzioni, una delle quali tangenziale e l'altra normale che interessava il rotore. La componente tangenziale portava ad elevate sollecitazioni magnetiche accompagnate da un forte sviluppo di calore, che dava origine a deformazioni termiche durante il funzionamento della macchina. Inoltre, le asole ricavate nel rotore per l'alloggiamento delle palette non potevano essere adeguatamente approfondite per non disturbare, oltre il ragionevole i fenomeni elettromagnetici e quindi le palette risultavano troppo poco incastrate e non atte ad evitare fughe di gas dalla zona compressa verso quella di aspirazione.

Gli inconvenienti connessi alla natura stessa della macchina erano quindi molteplici ed alcuni addirittura insuperabili. A ciò si aggiungevano l'elevato consumo di corrente a causa delle dispersioni magnetiche dell'anello e della eccentricità del rotore, ed una costruzione talmente delicata da rendere del tutto aleatoria l'apparente economia.

Tuttavia le esperienze compiute non sono state inutili in quanto hanno permesso di accertare che i pacchi lamellari — quali quelli dello statore vero e proprio, dell'anello e del rotore — se vengono ben compressi e si trovano in presenza di olio lubrificante, assicurano una buona tenuta. Inoltre, il materiale che compone i lamierini, costituito da leghe di ferro-silicio, resiste all'usura in presenza di una buona lubrificazione.

• • •

Scartata anche la seconda soluzione si partì, così come aveva fatto la Wetmore Hodges, dalla considerazione che, al di fuori di una corona periferica, essendo pressochè nullo il campo magnetico all'interno del rotore di un comune motore elettrico, è possibile utilizzare l'interno del

rotore stesso per alloggiarvi il compressore. In tal caso sarebbe stato possibile realizzare rotativi di vario genere, mono o pluricellulari, usando particolari accorgimenti. Abbiamo ritenuto più conveniente ricorrere, per i compressori di piccola potenza, a rotativi monocellulari e, invertendo i concetti costruttivi delle normali macchine di questo tipo, ne abbiamo costruito una nella quale il pistone è fisso e porta il settore mobile, mentre il cilindro, eccentrico rispetto al pistone, gli ruota attorno.

La macchina ha dato, questa volta, risultati eccellenti, sì che oltre ai normali prototipi da Laboratorio, costruiti da 1/8 sino a 2 HP per freon 12 e per freon 22, sono stati eseguiti e sono in esperimento i prototipi industriali.

La figura 5 (a-b) rappresenta, rispettivamente, una sezione orizzontale ed una verticale del nuovo compressore, dalle quali se ne comprende agevolmente il funzionamento.

I vapori freddi entrano nella camera di aspirazione attraverso fori praticati nel pistone. La camera, per la rotazione del cilindro che è solidale al rotore, aspira e comprime i gas che escono quindi attraverso la valvola di compressione mescolati con l'olio lubrificante. Questa valvola ruota assieme alla testata superiore e quindi le particelle di olio vengono proiettate per forza centrifuga e vanno a sbattere con violenza contro le pareti della capsula, dove si depositano e quindi scorrono verso il basso mescolandosi nuovamente con l'olio. Per le macchine di potenza superiore, all'uscita della valvola di mandata si trova un tubo di De Laval ad asse tangenziale, in modo da dirigere il getto con maggior energia verso le pareti dell'involucro e favorire così la separazione dell'olio. Questo separatore centrifugo si è dimostrato più efficace di quelli normalmente usati. Il gas esce dalla macchina con pochissimo olio, riducendo così gli svantaggi connessi al trascinarsi del lubrificante nell'evaporatore.

Uno studio particolare è stato richiesto dal sistema di lubrificazione. L'olio, nei compressori più piccoli, è prelevato dal fondo del carter mediante una normale pompa a vite e trascinato in un primo anello che si trova alla base del pistone; una parte dell'olio passa in una cameretta sita alla sommità superiore del detto pistone, attraversando la base dell'asola nella quale è alloggiato il settore scorrevole; quando, durante la compressione, il settore rientra nell'asola, esso spinge l'olio che, d'altra parte, incontra una forte resistenza a tornare indietro per la presenza della pompa a vite; viene forzato ad uscire attraverso i giochi tra settore ed asola e tra pistone e testate, aumentando la lubrificazione e la tenuta e contribuendo inoltre al raffreddamento della macchina. Si noti che le

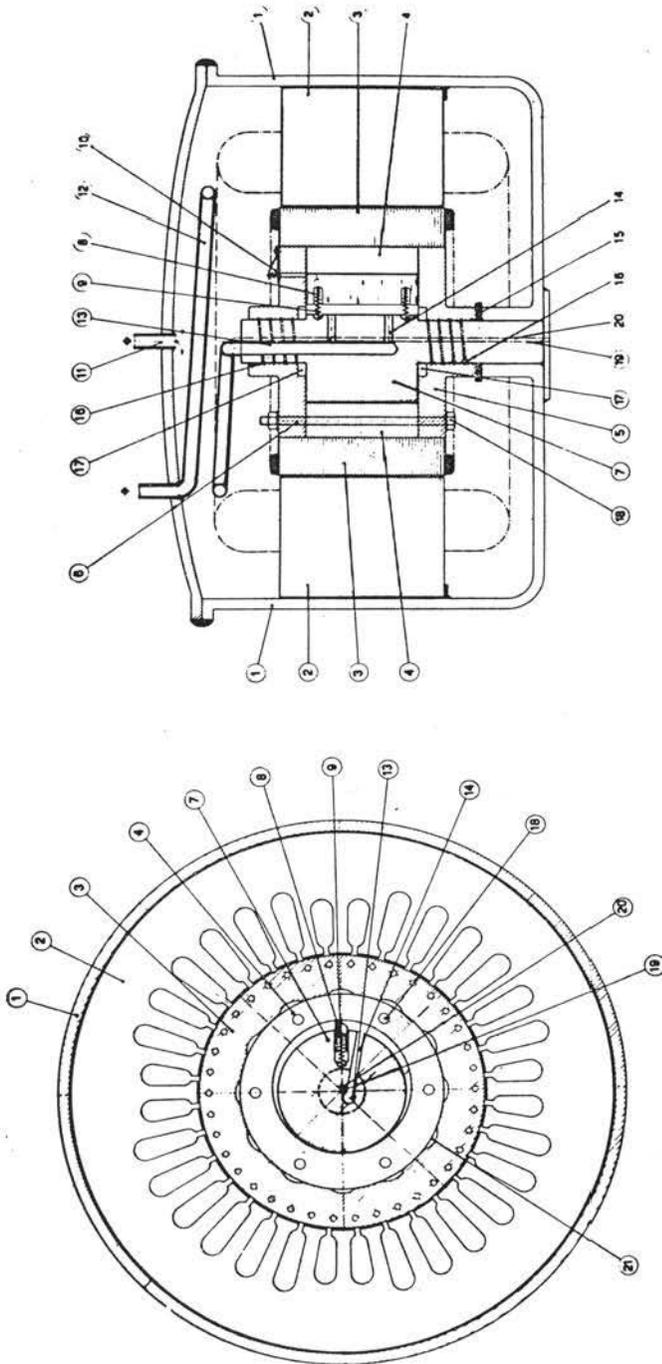


Fig. 5. - Nuovo compressore frigorifero

a) Sezione orizzontale

b) Sezione verticale

1) capsula; 2) statore; 3) rotore; 4) camicia del cilindro; 5) piastra inferiore; 6) piastra superiore; 7) pistone; 8) settore scorrevole; 9) molle del settore; 10) valvola di mandata; 11) tubazione di mandata; 12) raccordo di aspirazione; 13) canale di aspirazione; 14) fori di aspirazione; 15) reggispinta ad anelli; 16) pompa a vite; 17) anelli distributori d'olio; 18) ferri di fissaggio delle calotte; 19) asse di rotazione; 20) asse eccentrico; 21) fori per il raffreddamento.

molle che agiscono sul settore sono molto leggere, e la funzione di spingere quest'ultimo contro le pareti del cilindro viene affidata all'olio in pressione; si ha così un'azione morbida che attenua fortemente le usure. In questo compressore, al contrario di quanto avviene normalmente, gli artifici usati permettono di avere il maggior afflusso di lubrificante quando la macchina è maggiormente sollecitata il che le assicura una buona durata. Al fine di sperimentare adeguatamente il sistema di lubrificazione, abbiamo costruito una macchina interamente in ferro dolce; dopo tre mesi di lavoro continuo non è stato possibile riscontrare al micrometro alcuna traccia di usura.

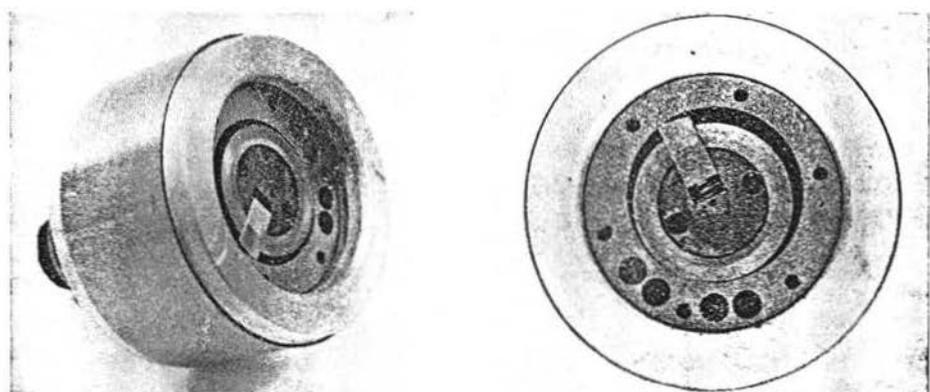


Fig. 6. - Fotografie dell'elettrocompressore sprovvisto dello statore del motore elettrico e della piastra superiore. Si notino i fori per la equilibratura dinamica, praticati nella parete del cilindro.

I disegni che abbiamo riportato riguardano i prototipi di laboratorio; naturalmente, quelli a carattere industriale ne differiscono notevolmente. Le fotografie (Fig. 6) mostrano un prototipo industriale privo della piastra superiore e dello statore del motore elettrico.

Le parti che richiedono lavorazioni speciali sono assai poche ed inoltre le lavorazioni — per quanto precise — sono molto semplici e richiedono un numero di macchine utensili notevolmente inferiore a quello necessario alla costruzione di altri compressori di piccola potenza.

Tenendo conto delle esperienze che hanno preceduto la realizzazione di questa macchina abbiamo sperimentato la possibilità di eliminare la camicia di riporto che costituisce il cilindro, sostituendola con lo stesso pacco lamellare del rotore. Risulta così una costruzione più economica, adatta per le potenze più piccole.

Il compressore lavora alle velocità di rotazione di 1500 e di 3000 giri nominali al minuto primo, a seconda se viene accoppiato ad un motore a 4 od a 2 poli.

Si ritiene che per la velocità più elevata non si debbano apportare modifiche importanti, profittando dei recenti studi dei russi Elkin, Mejlíchov, ecc. sui fenomeni di risonanza nelle condotte di aspirazione ⁽¹³⁾.

Un modello a laboratorio della potenza di 2 HP a freon 22, per il condizionamento dell'aria ha dato risultati molto favorevoli. Sono allo studio compressori di questo genere, per potenze sino a 50 HP, ad uno ed a due stadi.

In una prossima nota verranno fornite notizie sul funzionamento di queste macchine in differenti condizioni di lavoro.

Roma — Istituto Superiore di Sanità - Laboratori di Ingegneria Sanitaria.

BIBLIOGRAFIA

- (1) PLANK R. e KUPRIANOFF J. - Die Kleinkältemaschin. ed. Göttingen & Heidelberg Springer Verlag, 1948.
- (2) BACH K. - Kältetechnik, 11: 38 (1959).
- (3) LAVIGNE A. - Revue Pratique du Froid, 11: 48 (1935).
- (4) SCHMIDT Th. E. - Kältetechnik, 8: 93 (1956).
- (5) PERRONNE G. - Annexe 1958-2, pag. 267 au Bulletin de l'Institut International du Froid.
- (6) BACH K. - Kältetechnik, 11: 262 (1959).
- (7) NESSELMANN K. - Annexe 1958-2, pag. 257 au Bulletin de l'Institut International du Froid.
- (8) AN. - Tightened Design Packs Compressor in Motor Stator. Design News (1953).
- (9) SELLERIO U. - Comptes Rendus du IX Congrès International di Froid (1953).
- (10) WAGENIUS B. - Kylteknisk Tidshrift, 17, 11 (1958).
- (11) TZYRLIN B. - Kolodilnaja Teknika, 3: 46 (1959).
- (12) SELLERIO U. - Nouveau Compresseur frigorifique. Comptes Rendus du IX Congrès International du Froid. Annexe, 3: 42 (1953).
- (13) ELKIN I. MEJLIKHOV M. CHERNYAK T. e YUDITSKI I. - Kolodilnaja Teknika, 3: 48 (1960).

93. Francesco UGOLINI — Osservazioni ed esperienze sulle tubazioni in resina poliestere armata. (*)

Riassunto. — Tra le diverse materie plastiche usate per la costruzione delle tubazioni destinate al trasporto dei fluidi in pressione, sono state oggetto di particolari osservazioni e di esperienze pratiche le resine poliestere armate con lana di vetro.

Su tubazioni così costruite, esposte liberamente a tutti gli agenti atmosferici e sottoposte al normale lavoro di cantiere, sono state effettuate, nel laboratorio di ingegneria dell'Istituto Superiore di Sanità, delle prove di resistenza allo scoppio, prove di resistenza agli urti, prove di resistenza al calore, prove di resistenza agli agenti atmosferici, esperienze su diversi tipi di giunzioni e normalizzazione della calcolazione per tenere conto degli sforzi longitudinali cui le condotte sono sottoposte.

I primi risultati di questa indagine sperimentale, riportati nella presente memoria, sono valutati sia dal loro lato positivo, che negativo, al fine di ricavare elementi utili per lo studio e le applicazioni di tali tipi di tubazioni.

Summary. — Amongst the various plastic materials used for constructing tubing for the transport of fluids at pressure, particular interest has centred on polyester resins armoured with glass wool.

Such tubing, exposed freely to atmospheric agents and subjected to normal building processes, was tested in the engineering department of de Istituto superiore di Sanità, for its resistance to bursting, shock, heat and atmospheric agents. Experiments were conducted with various types of joints and the results were corrected to allow for the longitudinal forces to which such tubing is subjected.

The preliminary results are discussed in order to obtain useful information on the design and use of such plumbing.

Il crescente impiego delle tubazioni in materiale plastico negli impianti tecnici, condutture di scarico, acque industriali ed impianti similari, ha indotto tecnici e ricercatori a svolgere sempre più accurate indagini nel campo pratico e sperimentale, al fine di ottenere elementi di

(*) Lavoro presentato al XII Congresso Internazionale delle materie plastiche, ott. 1960 - Torino.

valutazione circa le caratteristiche fisico-meccaniche di maggiore importanza per tale materiale (1).

In particolare, con l'apparire sul mercato delle tubazioni costruite in resine poliestere armate con fibre di vetro, le cui caratteristiche meccaniche appaiono particolarmente interessanti per gli elevati valori di resistenza di tali resine, si è ritenuto opportuno effettuare delle esperienze e svolgere alcune considerazioni di calcolo relative all'impiego di tali tubazioni nel campo impiantistico.

Infatti, l'unione delle resine poliestere con i filati vetrosi ha reso possibile, secondo processi tecnologici vari, la costruzione di tubazioni di diametri maggiori di quelli ottenibili con altre sostanze termoplastiche estruse e per maggiori pressioni di esercizio.

Nella presente memoria si espongono i primi risultati di alcune esperienze ed osservazioni effettuate nel Laboratorio di Ingegneria dell'Istituto Superiore di Sanità, dalle quale sono stati desunti alcuni elementi caratteristici di impiego, utili per gli sviluppi degli impianti tecnico-sanitari.

Le prove si riferiscono a tubazioni costruite impiegando resine poliestere e lana di vetro centrifugate, in impianti di produzione pilota.

Questo primo gruppo di esperienze si è svolto su tubazioni del diametro interno di mm 94 — esterno mm 104, prodotte in spezzoni della lunghezza di circa 6 metri.

Sono state eseguite le seguenti prove:

- Prove di resistenza alla pressione idraulica interna.
- Prove di efficienza, di resistenza e funzionalità dei diversi tipi di collegamenti e giunzioni.
- Prove di resistenza agli agenti atmosferici naturali.
- Prove di resistenza agli urti.
- Prove di resistenza al calore.

Per le diverse prove si riporta di seguito una breve documentazione illustrativa con le considerazioni relative ai miglioramenti apportati e sperimentati con esito favorevole.

ESPERIENZE E RILIEVI.

Le prove di resistenza idraulica alla pressione interna di acqua proveniente da un impianto di compressione, sono state effettuate su tubazioni delle quali alcune senza giunzioni ed altre con giunti intermedi dei tipi che saranno più avanti descritti.

I tubi sono stati posti all'aperto, su cavalletti metallici esposti alle intemperie.

Alle testate dei tubi sono stati applicati sia dei tappi di chiusura costituiti da giunti a flangia cieca e sia dei tappi metallici in ferro o bronzo.

I giunti a flangia erano costituiti da una flangia in resina poliestere e massa da stampaggio avente un collare che è stato incollato mediante spalmatura di resina, sulla parte esterna della testata del tubo in prova. Sulla flangia sono stati applicati dei bulloni per effettuare una chiusura con flangia cieca costituita da una lastra di metallo stretta tra le due flange in resina poliestere armata, con interposta una guarnizione di gomma.

Su altre tubazioni sono stati applicati alle testate dei tappi metallici costituiti da tappi femmina aventi un diametro interno leggermente superiore al diametro esterno della testata del tubo, nel cui interspazio è stata colata resina poliestere caricata con talco. Successivamente, quale sigillatura, su alcuni tappi sono state eseguite delle fasciature esterne mediante nastro di tessuto di vetro imbevuto di resina poliestere.

In relazione ai calcoli di resistenza eseguiti preventivamente per determinare lo stato di tensione ed i carichi unitari ai quali sarebbe stato assoggettato il materiale, le tubazioni senza giunti intemedi e quelle con i giunti dei tipi che più avanti saranno descritti, sono state sottoposte a pressioni progressivamente in aumento fino al massimo di 40 atmosfere e mantenute in tali condizioni esposte a tutte le vicissitudini climatiche invernali ed estive della Città di Roma (settembre 1959 - luglio 1960).

La scelta di tali modalità di prova è stata motivata dal fatto che nel campo impiantistico i risultati delle esperienze possono essere tanto più veritieri per quanto più si opera in condizioni di realtà, astraendo da considerazioni prettamente teoriche che avrebbero imposto una diversa metodologia e che nel caso specifico seguiranno alle prove pratiche.

Le tubazioni sperimentali poste sui cavalletti di prova, chiuse alle testate da tappi femmina in ferro, hanno sopportato una pressione interna di 40 atmosfere senza dare luogo a perdite lungo i tubi. Una perdita si è verificata tra una testata del tubo ed un tappo di chiusura in bronzo. (Fig. 1). Queste prove, ripetute diverse volte hanno posto in evidenza la opportunità di evitare i collegamenti tra poliestere e bronzo non essendovi garanzia di aderenza tra questi due materiali, quando sono collegati con resine di tipo poliestere.

Per quanto si riferisce alla tenuta delle flange cieche in resina poliestere con massa da stampaggio, non si sono verificate perdite con i

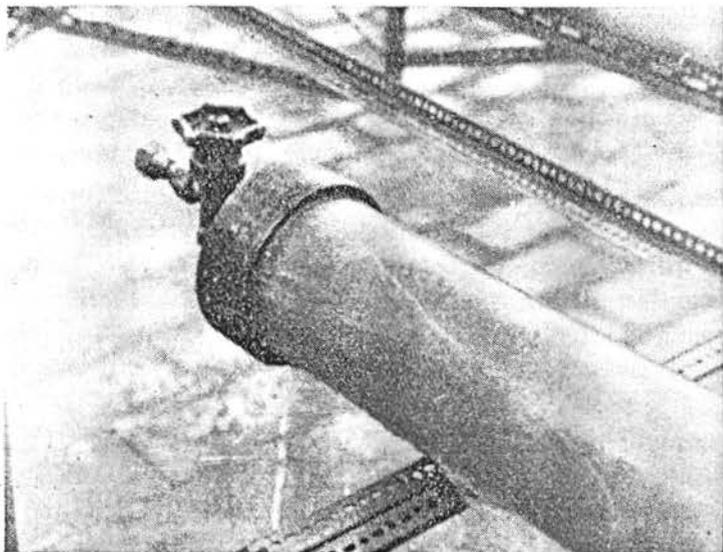


Fig. 1. - Perdita tra tappo di testata in bronzo e tubazione in resina poliestere rinforzata. Pressione 22 Kg/cm².

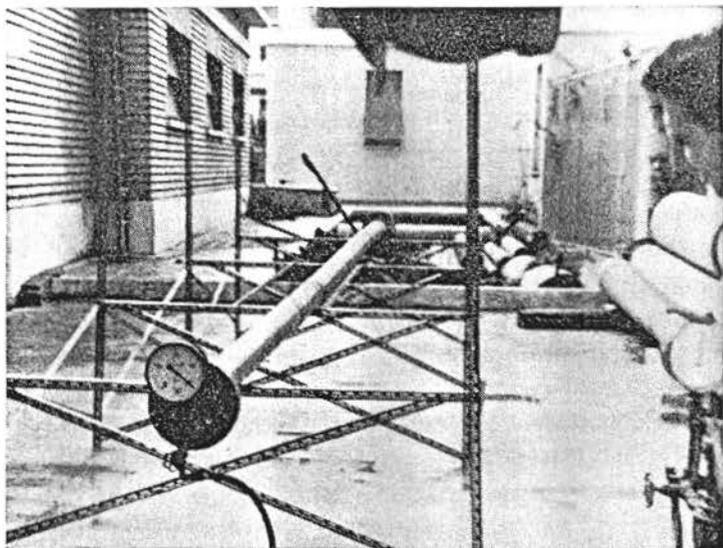


Fig. 2. - Tubazione in resina poliestere rinforzata, con testate a flangia e giunti intermedi con manicotti incollati con resina poliestere. Pressione 40 Kg/cm².

bulloni stretti a fondo. Fig. 2. In qualche caso però il tiro del bullone metallico ha causato la rottura della flangia. Fig. 3. Tale tipo di collegamento appare quindi eccessivamente fragile e poco sicuro.

Altre prove di pressione sono state effettuate su tubazioni i cui elementi erano collegati tra loro con giunti di diversa specie.

I giunti eseguiti mediante fasciatura in più giri di tessuto di lana di vetro impregnato di resina poliestere, sono risultati efficienti se il lavoro di giunzione veniva effettuato con cura, fuori del contatto della polvere e con una tecnologia appropriata. All'atto pratico, nelle esperienze

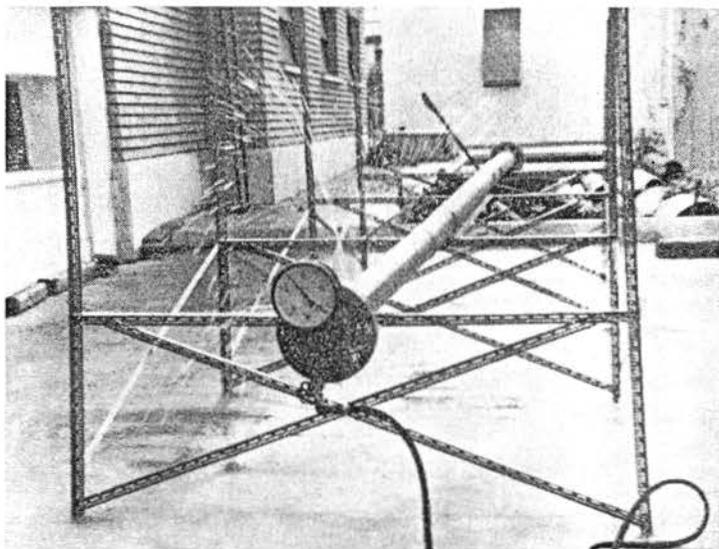


Fig. 3. - Perdita per lesione della flangia di testata dovuta al tiro dei bulloni. Pressione $7,3 \text{ Kg/cm}^2$.

di cantiere, si è riscontrato che la realizzazione di tali giunzioni eseguite praticamente in presenza di polvere non riesce efficiente. Se le due superfici esterne delle testate dei tubi non sono sgrassate e spolverate, già a 5-10 atmosfere si manifestano perdite. Fig. 4. Inoltre è facile che durante la esecuzione della fasciatura resti inglobata dell'aria nel tessuto di vetro impregnato di resina. In questo caso, una volta catalizzata la resina si osservano delle chiazze chiare con perdita attraverso le maglie del tessuto anche a pressione di 7-8 atmosfere. Fig. 5.

A questi difetti, dovuti esclusivamente ad un fattore tecnologico, il cui peso però è notevole all'atto pratico, si è cercato di ovviare riprendendo in esame i risultati degli studi e delle esperienze che in passato



Fig. 4. - Giunto eseguito in cantiere avvolgendo del nastro di tessuto di vetro impregnato in resina poliestere, senza sgrassare le testate ed in presenza di polvere. Inizio perdita 3 Kg/cm².

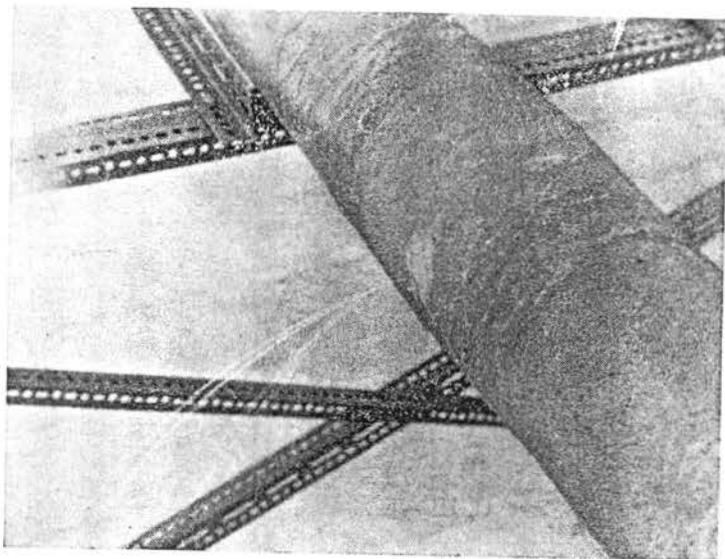


Fig. 5. - Perdita dovuta alla presenza di bolle d'aria nella fasciatura di giunzione eseguita con nastro di tessuto di vetro impregnato con resina poliestere. Inizio perdita 7 Kg/cm².

erano state svolte nel Laboratorio di Ingegneria dell'Istituto Superiore di Sanità, quando si studiarono e si applicarono con successo giunti speciali su condotte in cemento amianto, su condotte di ghisa ed anche su alcune condotte di plastica (²), con l'intento di creare giunti a sicura tenuta, elastici e smontabili.

Sostanzialmente si trattava di un tipo di giunzione composto di due elementi a bicchiere infilati sulle testate dei tubi e trattenuti da scanalature ricavate alle testate dei tubi stessi mediante colata di una resina.

La tenuta è affidata all'elemento di gomma interposto tra le due testate strette tra loro dal manicotto esterno.

Questo tipo di giunto, pur essendo ridotto a pochi elementi, richiede la presenza di due scanalature alle testate dei tubi e tale genere di lavorazione, pur risultando possibile in fabbrica, risulta alquanto laborioso in cantiere allorchè i tubi devono essere tagliati in spezzoni, di lunghezza diversa da quelle standard di fabbricazione.

Si è invece osservato che una ottima giunzione tra tubazioni in poliestere armato con lana di vetro può realizzarsi semplicemente disponendo di manicotti il cui diametro interno sia corrispondente al diametro esterno dei tubi ed incollati con resina poliestere. Tecnologicamente questa soluzione non presenta delle difficoltà costruttive in quanto i tubi sono prodotti per centrifugazione e quindi calibrati esternamente, mentre i manicotti possono essere eseguiti su spina e quindi risultare calibrati internamente.

L'uso di giunti che conferiscono all'insieme delle tubazioni una continuità longitudinale, comporta una normalizzazione di calcolo sia per tenere conto delle sollecitazioni che inducono sforzi tangenziali alla circonferenza del tubo e sia delle sollecitazioni che inducono sforzi longitudinali lungo la parete del tubo.

Come è noto, nel primo caso il carico unitario cui è sottoposto il materiale sarà:

$$K_1 = \frac{P \cdot d}{2 \cdot s}$$

e nel secondo caso il carico unitario sarà:

$$K_2 = \frac{P \cdot d^2}{4 s (d+s)}$$

ed il carico unitario risultante sarà:

$$K_3 = \sqrt{K_1^2 + K_2^2}$$

dove:

P = pressione interna nel tubo

d = diametro interno del tubo

s = spessore del tubo

La condizione di stabilità sarà espressa da:

$$K_3 < K_r$$

dove K_r = carico di rottura a trazione del materiale.

La condizione di sicurezza sarà espressa da:

$$K_3 = K_0$$

dove K_0 = carico di rottura diviso il coefficiente di sicurezza adottato per il materiale in considerazione.

Considerando i tubi collegati fra di loro da manicotti, si otterranno analoghe espressioni per i carichi unitari K'_1 ; K'_2 ; K'_3 dei manicotti, per cui ponendo le condizioni di equiresistenza dei materiali costituenti i tubi ed i manicotti si otterrà che:

$$K_1^2 + K_2^2 = K'_1{}^2 + K'_2{}^2$$

$$K_1^2 = K'_1{}^2$$

$$K_2^2 = K'_2{}^2$$

Indicando con s' lo spessore del materiale del manicotto e con Ω' l'area della sua sezione piena anulare normale all'asse; indicando con Ω l'area della sezione piena anulare del tubo di spessore s , si potranno dedurre le sollecitazioni di dipendenza tra spessore s' del manicotto rispetto lo spessore s del tubo per gli sforzi tangenziali, e di sezione Ω' rispetto Ω per gli sforzi longitudinali:

$$s' = s + \left(1 + \frac{2}{d}\right) s$$

$$\Omega' = \Omega + \frac{\Omega^2}{A}$$

dove A = area della sezione anulare vuota del tubo.

Per quanto riguarda le prove di resistenza agli agenti atmosferici e di invecchiamento naturale, è stato notato, dopo circa un anno di espo-

sizione, uno scolorimento ed una opacizzazione dell'originale colore rosato dei tubi. Si è anche riscontrata una migrazione superficiale delle fibre esterne del mat vetroso con lento distacco dai tubi. Questa ultima osservazione riveste particolare importanza poichè pone in evidenza la opportunità che durante il processo costruttivo di centrifugazione per la costruzione dei tubi, sia applicato un abbondante strato interno di resina pura in modo da costituire una congrua protezione al processo migratorio. Ciò soprattutto nel caso che le tubazioni siano impiegate per l'adduzione di acque potabili.

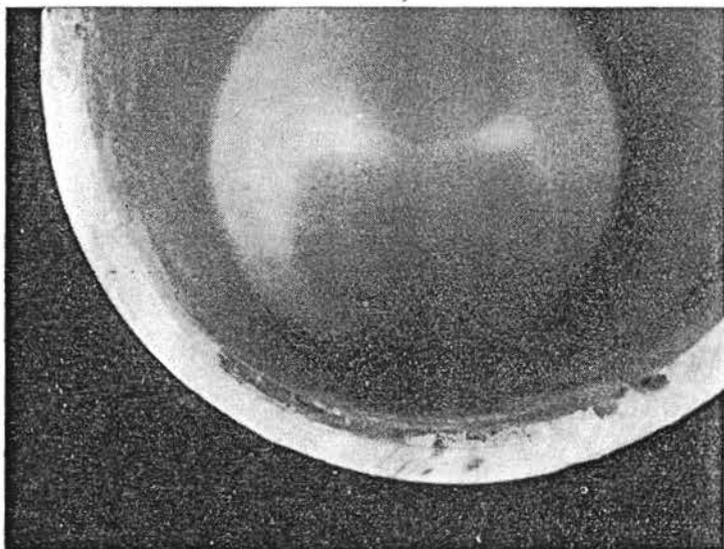


Fig. 6. - Screpolatura dello strato interno di resina poliestere posta nelle tubazioni centrifugate, sotto l'azione di un riscaldamento a 130°C per 20 ore.

Tale strato interno di resina pura si è però dimostrato sensibile alla azione del calore. Infatti, sottoponendo uno spezzone di tubo a riscaldamento prolungato di 130° C per 20 ore si sono verificate delle lesioni, che appaiono visibili su tale strato interno. Fig. 6. Al disotto di 100° C non si sono verificate lesioni.

Comunque, anche per la resistenza termica sono in corso ulteriori prove il cui esito sarà in futuro comunicato.

Infine, assai interessanti sono risultate le prove di resistenza agli urti. Per queste prove le tubazioni sono state sottoposte a normale routine di cantiere. Alcune, appoggiate a terra verticalmente, sono state lasciate

cadere su un piano di battuto di cemento. Le lesioni che si sono verificate sono del tipo a raggera con origine dal punto di urto. Fig. 7. Non si è mai avuto sfondamento o distacco del materiale. Non si è riscontrato un avanzamento progressivo nel tempo delle lesioni stesse ed alle prove di pressione non si sono verificate perdite nei punti di lesione. Tuttavia, sono in corso ulteriori prove per indagare sugli effetti singoli e combinati del tempo e della temperatura sulle lesioni, per accertare l'effettivo comportamento pratico.

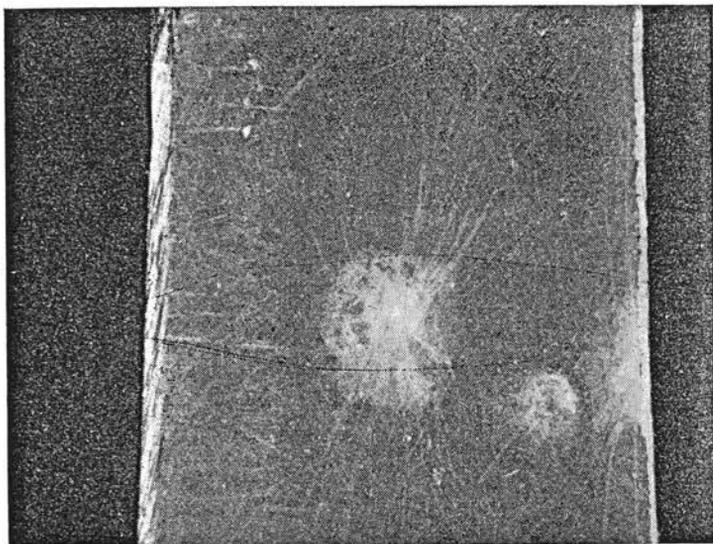


Fig. 7. - Lesioni a raggera con origine dal punto d'urto in un tratto di tubazione di resina poliestere rinforzata.

Ultimo accenno alle modalità di lavoro dei tubi di poliestere armato in cantiere.

Per i tagli possono essere usate le normali seghe con lame di ferro, usando eventualmente per la lubrificazione ed il raffreddamento acqua saponata. Per il resto non vi sono difficoltà per effettuare fori e collegamenti. La leggerezza dei tubi ne facilita la posa in opera incidendo favorevolmente sul rendimento operaio. Quando le tubazioni debbono essere poste verticalmente entro canalette a muro, è possibile fissarle solidamente mediante staffe stringenti.

In conclusione, dall'esame dei dati riportati nella presente memoria possono dedursi elementi di incoraggiamento e di studio per l'applicazione.

cazione delle tubazioni di resine poliestere armate negli impianti tecnici e tecnico-sanitari.

E' assai importante usare il materiale razionalmente sia da parte dei progettisti all'atto della impostazione dei lavori che da parte delle maestranze durante la esecuzione. Forse il punto di maggiore attenzione è quello delle giunzioni ed in proposito occorrerà ancora studiare e perfezionare i sistemi anche nel senso indicato nel presente studio, tenendo presente che le elevate caratteristiche di resistenza meccanica delle tubazioni in resine poliestere armate aprono un nuovo campo di applicazione, fino ad oggi esclusivo dominio dei metalli.

Roma — Istituto Superiore di Sanità - Laboratori di Ingegneria Sanitaria.

BIBLIOGRAFIA

- (¹) UGOLINI F. - Tubazioni plastiche in sostituzione di quelle metalliche. Atti del XI Congresso Int. Materie Plastiche. Torino (1959).
- (²) VACINO E. e UGOLINI F. - Giornale del Genio Civile, fascicolo 4, gennaio 1955.
-

94. G. CASTELNUOVO, A. GAUDIANO, M. MORELLINI, G. PENSO e C. ROSSI. —
Gli antigeni dei micobatteri.

Riassunto. — Estratti di micobatteri ottenuti per criomacinazione e antisieri micobatterici ottenuti inoculando una sospensione di questi estratti in conigli sono stati saggiati con la tecnica dell'immunolettroforesi. Sono stati così determinati gli antigeni presenti nelle varie specie micobatteriche. Si sono trovati antigeni di genere, di gruppo e di specie. L'antigene di genere sembra sia un polisaccaride complesso contenente anche il fosforo.

Summary. — Mycobacterial extracts obtained by breaking the cells at very low temperatures, and immune mycobacterial sera obtained by injecting rabbits with these extracts, have been tested in immunoelectrophoresis.

The antigens present in different species of Mycobacteria have been demonstrated and analyzed in this way. The presence of genus, group and species antigens was demonstrated.

The genus antigen, the exact constitution of which is still under investigation, appears to be a complex polysaccharide containing phosphorus.

Lo studio degli antigeni dei micobatteri è stato oggetto di numerose ricerche fin dai primi tempi della scoperta del bacillo di Koch. I ricercatori si resero subito conto che la conoscenza dello spettro antigenico dei micobatteri poteva essere estremamente utile per chiarire il meccanismo patogenetico di tali germi, nonchè la loro sistematica, indagandola attraverso gli anticorpi da essi suscitati negli organismi infettati.

Indirizzo generale di tali ricerche fu soprattutto l'individuazione degli antigeni di virulenza, e degli antigeni propri alle varie specie del genere *Mycobacterium*.

L'insieme delle ricerche su tali antigeni non portò però mai a grandi risultati finchè si adoperarono le antiche tecniche sierologiche vavevoli per gli altri germi (agglutinazione, precipitazione, deviazione del complemento); con tali tecniche, infatti, non si riuscì mai a distinguere gli antigeni responsabili della virulenza, nè si riuscì a classificare sistematicamente le varie specie del genere *Mycobacterium*. Unica semplicistica divisione fu quella di suddividere i micobatteri patogeni in tre gruppi: micobatteri dei mammiferi, micobatteri degli uccelli, micobat-

teri degli animali a sangue freddo [TULLOCH e altri (1), WILSON (2), CUMMING (3), FURTH (4), KLOPSTOCK (5) e KAUFFMAN (6)].

Le tecniche più moderne, quali l'elettroforesi in fase libera [SEIBERT (7, 8)], l'emoagglutinazione con cellule tannate [BOYDEN e SORKIN (9)], l'emoagglutinazione con eritrociti sensibilizzati [THURSTON e altri (10)], la precipitazione in agar [PARLETT e YOUMANS (11, 12), AFFRONTI (13), LIND (14), PEPYS (15)] e la purificazione di alcuni antigeni [AFFRONTI (13), INOUE (16), MANKIEWICZ (17), PEPYS e altri (15), SEIBERT (8), e altri] hanno permesso indagini più spinte ma non esenti da critica, poiché il materiale antigenico studiato era costituito o da micobatteri vivi mescolati ad agar tamponato [PARLETT e YOUMANS (11)] o da filtrati di colture micobatteriche [PARLETT e YOUMANS (12)] o da frazioni ottenute per via chimica [SEIBERT (7, 8), AFFRONTI (13) e altri]. Si trattava perciò di un materiale in cui gli antigeni erano o biologicamente fissati (germi vivi), o scarsi in quantità e in numero (filtrati di colture), o alterati (ottenuti per via chimica).

Nel 1938 noi iniziammo lo studio degli antigeni micobatterici cercando di lavorare con antigeni — sia eso- che endocellulari — il meno possibile alterati o denaturati, e ciò per evitare quello che PORTER (18) per l'albumina bovina, LAPRESLE (19) per l'albumina umana, e KAMINSKI e altri (20) per l'ovoalbumina videro e cioè la possibile demolizione dell'antigene originario in partigeni, demolizione che si può ottenere allorchè si adoperano enzimi proteolitici o determinate sostanze chimiche.

La preparazione dei nostri antigeni venne eseguita con la tecnica della criomacinazione, messa a punto nel nostro laboratorio da ZAMPIERI (21). Questa tecnica si basa sul seguente principio: un materiale organico sottoposto a temperature molto basse, oscillanti intorno ai -60°C , perde ogni caratteristica di elasticità e plasticità, diviene indeformabile e presenta la stessa fragilità del ghiaccio a quella temperatura. I microrganismi si comportano nella stessa maniera, per cui una sospensione batterica, congelata a -60°C , può venir frantumata, impiegando un mezzo meccanico, con le stesse modalità con cui si tritura un cubo di ghiaccio: si avrà rottura dei microrganismi là dove le linee di frattura della massa congelata, sottoposta a processo di macinazione, coinvolgeranno le singole cellule batteriche. Il rendimento di rottura, per una sospensione omogenea di una data concentrazione batterica, sarà quindi in relazione al volume dei singoli frammenti della massa macinata.

Per ottenere tale rottura abbiamo impiegato l'apparecchio di Zampieri: un molino a palle in acciaio inossidabile e a chiusura ermetica.

Le colture micobatteriche da noi usate furono veli cresciuti su Sauton, lavati ripetutamente per varie ore con soluzione fisiologica, onde

allontanare ogni traccia di terreno. I veli così lavati venivano introdotti nel molino e questo, una volta chiuso, immerso per un'ora in una soluzione refrigerata a -60°C . Dopo di che il molino veniva agitato violentemente per mezzo di un motore elettrico per tre minuti. Si lasciava quindi scongelare la massa batterica, poi si ricongelava e si sbatteva per altri tre minuti. L'operazione si ripeteva per tre volte.

Dopo l'ultimo scongelamento, il materiale così trattato, veniva raccolto e centrifugato a 18.000 giri per 30 minuti, onde allontanare il materiale cellulare non solubile.

Con questo sistema si prepararono estratti batterici aventi un tasso di azoto totale dello 0,3-0,4 e persino dello 0,5%.

Nello studio degli antigeni batterici è utile standardizzare gli estratti batterici in funzione dell'azoto diluendo le sospensioni con soluzione fisiologica in maniera tale da far loro avere sempre lo stesso tasso di azoto totale: 0,3%.

I micobatteri da noi saggiati in queste ricerche sono gli stessi micobatteri da noi precedentemente studiati a fondo con altre tecniche [PENSO e coll. (²²⁻²⁷)] e precisamente tubercolari umani (ceppi H37, H322, H6, H3); tubercolari bovini (Boeuf 11 e Vallée); tubercolari aviari (Faisan I, Faisan IV, Kirchberg, Sheard); *Myc. minetti* (ceppi C 70, Goring, Enteritidis C 42); *Myc. battaglini* (ceppi Battaglini e Lanterna); *Myc. marianum* (ceppo Chauviré); micobatteri di animali a sangue freddo: *Myc. marinum*, *Myc. platypocillus*, *Myc. thamnopheos*; *Myc. smegmatis* (ceppo Smegmatis University of Washington); *Myc. lacticola* (ceppo Milch); *Myc. phlei* (ceppi Timoteo, Vip 27, L 619, Moeller).

Gli antisieri sono stati preparati inoculando sottocute conigli con germi vivi (3 mg) sospesi in $0,5\text{ cm}^3$ dell'estratto batterico descritto più sopra, a cui venivano aggiunti $0,5\text{ cm}^3$ di adiuvante: Bayol F ($0,45\text{ cm}^3$) e Arlancel A ($0,05\text{ cm}^3$). Tale miscela si è rivelata la più atta a produrre antisieri a titolo sufficientemente alto. Le iniezioni venivano ripetute una volta alla settimana e per 6 settimane.

Prima di salassare i conigli, veniva saggiato il titolo del loro siero per mezzo della deviazione del complemento eseguita contro l'estratto micobatterico omologo. Si salassava soltanto se i sieri davano un titolo di almeno 1:32. Gli antisieri ottenuti dai vari conigli venivano quindi mescolati tra di loro per ottenere un *pool* che, prima dell'impiego, veniva nuovamente saggiato con la deviazione del complemento.

Nelle prime esperienze gli estratti batterici vennero cimentati contro antisieri omologhi ed eterologhi (sempre antimicobatterici) usando sia la tecnica della doppia diffusione in agar, secondo il metodo di OUCHTERLONY (²⁸), che la tecnica dell'immunolettroforesi, secondo il me-

todo di GRABAR e WILLIAMS (29-30). La tecnica di Ouchterlony non ci diede però, col nostro materiale tanto ricco di antigeni, risultati così facilmente interpretabili come quelli ottenuti con la tecnica dell'immunolettroforesi, per cui la abbandonammo nelle nostre successive ricerche.

Ogni estratto batterico veniva cimentato varie volte contro il suo antisiero, omologo o eterologo, sia variando i rapporti quantitativi tra antigeni e anticorpi, sia adoperando estratti batterici e sieri immuni di differenti preparazioni. Ciò venne fatto per assicurarci che i risultati ottenuti potessero essere considerati costanti e tali da mettere in evidenza il maggior numero possibile di complessi antigene-anticorpo.

Il principio della immunolettroforesi è, com'è noto, il seguente: l'estratto batterico da analizzare è sottoposto a elettroforesi in gel; quando la migrazione dei suoi componenti è giudicata sufficiente, s'interrompe l'elettroforesi e si fa diffondere, perpendicolarmente all'asse di migrazione degli antigeni, un siero immune precipitante.

Gli anticorpi presenti nel siero diffondono nel gel e, allorchè si incontrano in proporzioni ottimali di equivalenza con i corrispondenti antigeni, si formano complessi antigene-anticorpo che si evidenziano sotto forma di ben visibili archi di precipitazione.

Ciascun antigene o aptene presente nella sospensione reagisce col suo anticorpo omologo; essendo la reazione molto sensibile, si possono con essa mettere in evidenza anche piccolissime quantità di antigene.

Ripetendo più volte con la dovuta tecnica standard l'immunolettroforesi sullo stesso estratto batterico e usando lo stesso antisiero omologo si ottengono sempre gli stessi risultati; come gli stessi risultati si ottengono impiegando ceppi diversi, appartenenti sicuramente alla stessa specie batterica e cimentandoli con lo stesso antisiero.

Dal punto di vista metodologico, noi abbiamo applicato la tecnica originale di Grabar e Williams usando un tampone al veronal sodico-acido cloridrico a pH 8,2 e forza ionica 0,05.

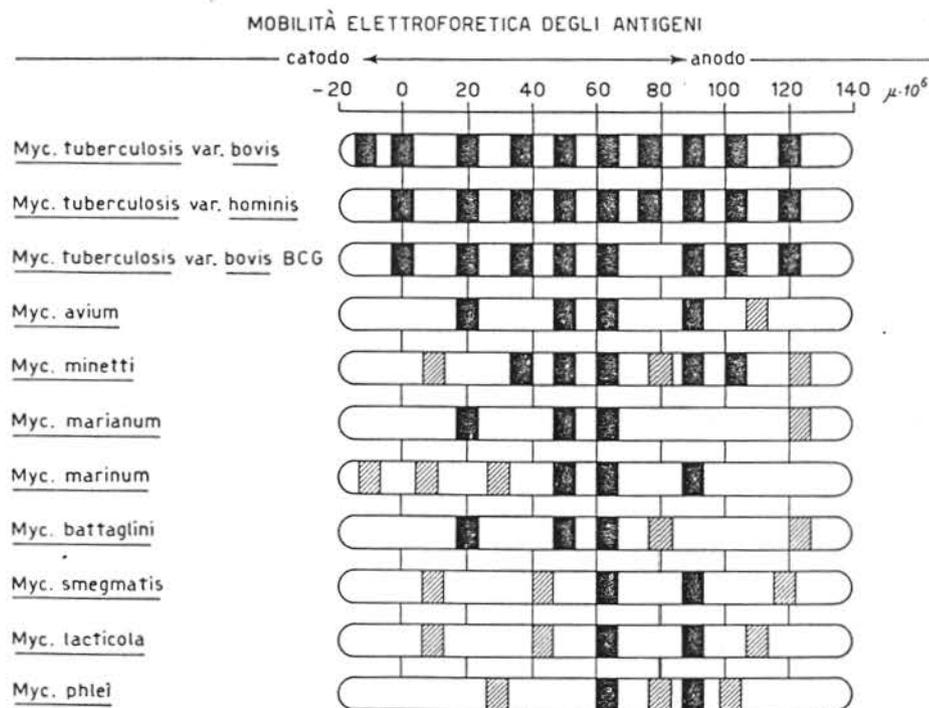
Con questa tecnica, nei nostri primi lavori siamo riusciti a mettere in evidenza, per ogni specie di micobatterio, un certo numero di antigeni che va da un massimo di 10 per specie a un minimo di 4 sicuramente determinati. Il numero degli antigeni messi in luce in esperienze successive è un po' aumentato per alcune specie.

Il numero e la mobilità elettroforetica dei vari antigeni di una specie è costante, qualunque sia il ceppo esaminato e qualunque sia l'ambiente culturale da cui esso proviene.

Disponendo, per le varie specie esaminate, gli antigeni secondo il valore della loro mobilità elettroforetica, ci fu possibile nel 1938 (31)

e nel 1959 ⁽³²⁾, costruire una tabella, ora leggermente modificata (Tab. 1) che dà, in un certo qual modo, una idea sulla composizione del mosaico antigene di ogni specie e sui rapporti esistenti tra specie e specie in funzione dei propri antigeni.

TABELLA 1



Naturalmente noi non presumiamo che la disposizione degli antigeni, così come la raffiguriamo, sia rigorosamente esatta, dato che il calcolo della mobilità elettroforetica può comportare un errore fino al 10 per cento, errore giustificato dal fatto che il percorso elettroforetico è di pochi centimetri, che la differenza di potenziale non rimane costante durante il periodo in cui passa la corrente, che variazioni di temperatura possono anche leggermente influenzare tale mobilità, che la composizione dell'agar non è costante e che il suo contenuto in acqua può cambiare durante l'elettroforesi.

D'altro canto la mobilità elettroforetica di un componente può non essere sempre costante a causa della possibile microeterogeneità delle sue molecole, mentre non si esclude la possibilità che due antigeni diversi possano spostarsi, elettroforeticamente, in maniera analoga.

Malgrado queste riserve, i risultati da noi ottenuti permettono di trarre alcune conclusioni da considerarsi provvisorie e da costituire materiale di ricerca per lo sviluppo e la verifica di nuove ipotesi di lavoro.

Esaminiamo perciò un po' da vicino i risultati riassunti nella nostra tabella nella quale sono stati marcati in nero gli antigeni che si presumono comuni con quelli del tubercolare bovino.

Il *Myc. tuberculosis* var. *bovis* risulta subito come il micobatterio che presenta il più alto numero di antigeni; ben 10 sicuramente accertati e forse anche più.

Ad esso segue il *Myc. tuberculosis* var. *hominis*, che sembra avere tutti gli antigeni del bovino meno uno.

Il BCG presenta gli stessi antigeni del tubercolare umano meno uno. Il BCG, dunque, sarebbe, antigenicamente, più vicino al tubercolare umano che al tubercolare bovino.

In ogni modo i tre germi in questione formano un gruppo molto omogeneo dal punto di vista antigenico.

E' bene precisare qui che l'esame della costituzione antigenica di questi tre micobatteri è stata particolarmente indagata, presentando essi un numero rilevante di antigeni a mobilità elettroforetica molto simile, per cui la differenza intercorrente tra due antigeni è stata spesso di difficile interpretazione. Solo attraverso un numero notevole di analisi immunoelettroforetiche dirette e crociate, ripetute a distanza di tempo le une dalle altre con antisieri ed estratti diversi, siamo indotti a credere, data la riproducibilità dei risultati, che le nostre conclusioni possano essere esatte.

E' importante qui far rimarcare come l'analisi antigenica del *Myc. tuberculosis* var. *hominis* resti identica e costante usando ceppi classici di collezione — come l'H 37, — ceppi di primo isolamento da pazienti con tubercolosi florida, e ceppi sia antibiotico-sensibili che streptomicina e isoniazide resistenti, il che sta a dimostrare tre fatti: la bontà del metodo, l'immutabilità antigenica di una specie ben sicura, il nessun rapporto intercorrente tra resistenza agli antibiotici e composizione antigenica (33).

La composizione antigene di un micobatterio è quindi strettamente legata alla entità specifica di quest'ultimo e non influenzata da condizioni estranee.

I risultati da noi conseguiti nell'analisi elettroforetica degli antigeni dei micobatteri tubercolari concordano con quanto lo SCHAEFER (34) aveva intraveduto nel 1940 allorchè, lavorando con sieri adsorbiti e de-

viazione del complemento, potè convincersi che nel tubercolare bovino esiste un antigene specifico assente nel tubercolare umano e nel BCG.

Il tubercolare bovino sembra dunque essere il micobatterio antigenicamente più complesso, sembra essere in un certo qual modo il capostipite del genere *Mycobacterium*.

Noi abbiamo successivamente saggiato col metodo dell'immunolettroforesi anche ceppi considerati aviari (Kirchberg, Sheard, Faisan III e Faisan IV) ed abbiamo constatato come la loro composizione antigenica sia costante e caratteristica ⁽³⁵⁾.

Proseguendo nell'analisi del contenuto antigenico dei vari micobatteri vediamo come il *Myc. minetti* conti almeno 8 antigeni, 5 dei quali in comune con i tubercolari, il *Myc. marinum* ne abbia 3 in comune coi tubercolari, il *Myc. battaglini* 3 in comune coi tubercolari.

I saprofiti presentano numerosi antigeni, 2 soli dei quali sembrano in comune con quelli dei tubercolari.

Se esaminiamo la tabella nel suo complesso vedremo come tutti i micobatteri, patogeni o no, abbiano un antigene in comune la cui mobilità è un pò più elevata di quella dell'albumina bovina.

L'antigene in comune venne già constatato da GRIFFITH ⁽³⁶⁾, usando la tecnica dei sieri adsorbiti. Antigene in comune lo dimostra indirettamente la positività delle reazioni praticate con antisieri eterologhi su antigeni da *Mycobacterium tuberculosis* var. *hominis* quando si applica la tecnica di deviazione del complemento.

La possibile esistenza di un antigene di « genere » spiega la parziale affinità immunologica esistente fra tutte le specie di questo genere e ci spiega come sia possibile ottenere reazioni allergiche positive anche sperimentando con antigeni eterologhi.

I micobatteri non sono soltanto legati tra loro da un antigene comune, ma sono riunibili in più gruppi aventi ognuno, almeno un altro antigene in comune.

Se prendiamo, ad esempio, i due tubercolari umani e bovino, vedremo come essi abbiano in comune un antigene, antigene che manca in tutti gli altri micobatteri, compreso il BCG. E' a questo antigene che dobbiamo attribuire la specifica azione patogena dei tubercolari veri? E' un'ipotesi allettante, ma semplicemente un'ipotesi.

Gli antigeni superficiali rivelabili con la tipizzazione fagica, permettono anch'essi la suddivisione dei micobatteri in vari gruppi, e tale suddivisione non è in contrasto con quello che l'immunolettroforesi mette in evidenza: il *Phagus fromani*, per esempio, mette in evidenza un antigene comune a molti micobatteri e assente nel *Myc. marianum* e nel *Myc. battaglini*.

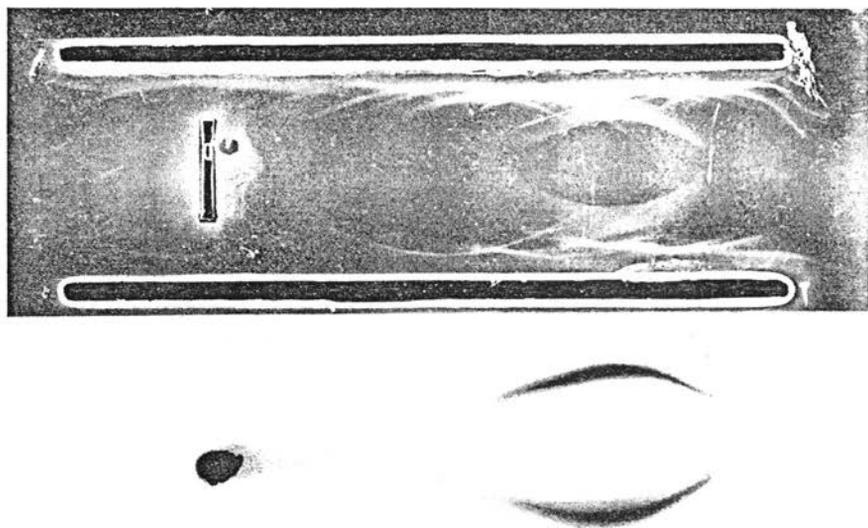


Fig. 1 — *In alto*: Immunolettroforesi del *Myc. lacticola*, ceppo Milch, eseguita con siero omologo (sopra) e siero eterologo (sotto).
In basso: Autoradiografia della medesima. E' visibile solo l'antigene comune che ha fissato il fosforo radioattivo.

Il *Myc. lacticola* e il *Myc. smegmatis* — che secondo la Gordon sarebbero identici — differirebbero invece tra loro solo per un antigene: l'immunolettroforesi ha messo in evidenza in ciascun di essi vari antigeni dei quali, uno in comune con tutti gli altri micobatteri, uno in comune con gran parte di essi, e proprio con quei micobatteri che sono sensibili al *Phagus fromani*, uno caratteristico di queste due specie, ambedue sensibili al *Phagus lacticola*, e uno proprio del *Myc. smegmatis*, il solo micobatterio sensibile al *Phagus smegmatis* a basse concentrazioni. I due metodi coincidono ancora una volta e permettono di differenziare nettamente le due specie.

Lo studio degli antigeni, comunque lo si faccia, può dunque contribuire alla identificazione della specie. Questo studio può essere però fatto solo disponendo di antigeni il più possibile naturali.

Il trattamento chimico a cui il germe viene sottoposto per l'estrazione di antigeni porta inevitabilmente a un'alterazione degli antigeni stessi o per lo meno a una loro demolizione anche parziale e conseguente artificiosa creazione di antigeni nuovi o partigeni non esistenti in realtà. Un anticorpo è capace di reagire anche con i partigeni — come le recentissime ricerche di LAPRESLE (19) hanno dimostrato — per cui una ricerca immunoelettroforetica compiuta con questi partigeni non potrà — almeno per il momento — rendere alcun servizio per l'identificazione dei micobatteri stessi.

Se si vuole sfruttare lo studio della costituzione antigenica dei micobatteri a fini sistematici, occorre dunque adoperare antigeni non alterati chimicamente e preparati secondo una tecnica standard.

Col metodo da noi preconizzato e attuato, ci è stato possibile riconoscere l'identità di alcuni ceppi di aviari (Faisan III, Faisan IV, Kirchberg e Sheard) (35) ci è stato possibile dimostrare l'identità di ceppi creduti appartenenti a specie diverse (*Myc. marinum* e *Myc. platypoecilus*) e ci è stato possibile differenziare ceppi creduti appartenenti alla stessa specie (37).

Constatato l'insieme dei fatti più sopra riferiti, abbiamo voluto estendere le nostre ricerche verso nuove mete soprattutto allo scopo di indagare sulla natura degli antigeni micobatterici da noi messi in evidenza attraverso l'analisi immunoelettroforetica.

Abbiamo così pensato di sottoporre i nostri antigeni a determinate azioni fisiche o enzimatiche per studiare la natura degli antigeni stessi (38).

Abbiamo cominciato col trattarli col calore.

Gli antigeni venivano riscaldati a 100°C per 30-60 minuti, dopo di che venivano centrifugati (15' a 3000 giri/minuto) e il soprannatante ve-

niva sottoposto ad immunoelettroforesi. Così facendo la maggior parte degli antigeni venivano distrutti, permanendone uno, presente in tutti gli estratti micobatterici da noi saggiati e rivelabile con tutte le reazioni crociate. In qualche caso, strettamente associato a questo antigene se ne trova anche un altro a mobilità assai vicina.

Trattando gli estratti micobatterici con enzimi proteolitici (tripsina, papaina, pancreatina) si ottengono risultati analoghi a quelli ottenuti con il calore, nel senso che quasi tutti gli antigeni vengono distrutti salvo quell'antigene comune, sempre presente negli estratti portati a 100°C e che reagisce con siero omologo ed eterologo, anche quando cimentato nella reazione di deviazione del complemento.

La resistenza al calore e la resistenza agli enzimi proteolitici ci dice come quell'antigene comune non debba essere una semplice proteina.

Primo problema da risolvere è stato quello di ottenere tale antigene allo stato puro. A tale scopo sono stati fatti vari tentativi con una serie di separazioni, ma ancora non è stato possibile ottenere la sostanza allo stato veramente puro. Per essere certi che le varie separazioni da noi usate non alterassero il carattere antigene di tale sostanza, venivano eseguiti controlli periodici con immunoelettroforesi dopo ogni separazione chimica.

Le varie analisi chimiche sono ancora in corso e perciò i risultati che qui riferiamo sono ancora suscettibili di qualche modifica. Esse sono state eseguite soprattutto sul *Myc. lacticola* ceppo Milch.

Una prima caratterizzazione della sostanza in esame è stata tentata direttamente sull'immunoelettroforesi usando antigeni marcati. Essi erano ottenuti facendo sviluppare le colture di micobatteri in un terreno a cui veniva aggiunto dell'ortofosfato sodico marcato ³²P in soluzione isotonica a pH 7 in quantità di 0,5 microcurie per millilitro di terreno. L'estratto batterico preparato da tali colture veniva dializzato prima di essere sottoposto ad immunoelettroforesi. La rivelazione degli antigeni marcati era effettuata mediante autoradiografia dell'immunoelettroferogramma dal quale erano state precedentemente allontanate, mediante lavaggio in soluzione fisiologica, le sostanze che non precipitavano con gli anticorpi. L'autoradiografia era eseguita ponendo, per almeno una settimana, una pellicola radiografica a contatto della lastra di agar, in cui era stata fatta l'immunoelettroforesi, dopo essiccamento a 37°C.

Con tale sistema si è osservato che solo uno dei numerosi antigeni contiene fosforo in quantità rivelabile all'autoradiografia (fig. 1). Questo antigene è il solo presente nell'immunoelettroferogramma di un estratto *Myc. lacticola* ceppo Milch precedentemente tenuto a 100° C per

30' come precedentemente descritto. In realtà a volte, in tali immunoelettroferogrammi, si nota accanto a questo antigene contenente ^{32}P , anche un altro antigene che però non contiene fosforo in quantità rivelabile all'autoradiografia.

Per la separazione ed analisi del suddetto antigene contenente fosforo, venivano usati estratti batterici di Milch sottoposti prima alla temperatura di 100°C e dai quali il precipitato veniva allontanato con centrifugazione a 3000 giri per 15'.

Un'ulteriore purificazione di questo stesso materiale veniva a volte effettuata mediante aggiunta di un volume eguale di alcool etilico a 95°. Il precipitato, così ottenuto, veniva risolubilizzato in tampone TRIS a pH 7 dopo centrifugazione e lavaggio con alcool-etero.

Un primo indizio sulla natura chimica dell'antigene è stato fornito dalle cromatografie su carta degli zuccheri e degli aminoacidi ottenibili da esso per idrolisi. Per gli zuccheri l'idrolisi è stata effettuata scaldando a 100° per un'ora il materiale dopo aggiunta di un egual volume di HCl 2N. La cromatografia veniva effettuata in butanolo-acido acetico-acqua (40 : 11 : 25). La rivelazione era fatta con ftalato di anilina in butanolo saturo di acqua.

Gli aminoacidi venivano ricercati dopo idrolisi dell'estratto, eseguita aggiungendo ad esso un egual volume di HCl 12N e scaldando in tubo chiuso a 110°C per 24 ore. Per la cromatografia, bidimensionale, si usava come solvente 1°: butanolo secondario (75 cm^3), acido formico all'88% ($15,5\text{ cm}^3$) acqua ($14,5\text{ cm}^3$); come solvente 2°: fenolo (80 cm^3), acqua (20 cm^3), ammoniaca (1 cm^3 , $d = 0,91$). La rivelazione era effettuata con ninidrina.

Sono stati inoltre dosati il fosforo legato e labile (con il metodo di BERENBLUM e CHAIN ³⁹); gli zuccheri (esosi) con il metodo dell'antrone secondo la modifica di BARTLETT ⁽⁴⁰⁾; gli aminoacidi con il metodo della ninidrina [secondo YEMM e COCKING ⁽⁴¹⁾].

E' stata anche eseguita la registrazione dello spettro di assorbimento della sostanza in esame tra 230 e 300 m μ , con lo spettrofotometro Cary, ed è stato misurato l'assorbimento a 260 m μ con lo spettrofotometro Beckman.

Il maggior numero di queste analisi venne effettuato sull'estratto batterico ricavato dal *Myc. lacticola* ceppo Milch, benchè prove siano state fatte anche su ceppi umani, bovini e aviari.

Un confronto tra l'estratto, dal quale erano solo state allontanate le sostanze precipitate a 100°C , e la soluzione ottenuta per purificazione di esso mediante precipitazione con alcool e successiva risolubilizzazione.

mostra che entrambe presentano qualitativamente lo stesso spettro di assorbimento nell'ultravioletto (del tipo comune alle basi puriniche) e circa la stessa composizione in zuccheri (esosì e pentosì) ed aminoacidi, controllata mediante cromatografia su carta. I rapporti tra le micromoli di zuccheri (esosì) dosate con l'antrone, le micromoli di acido fosforico e quelle di « adenina » (nella quale è stato convenzionalmente trasformato l'assorbimento a 260 m μ) sono all'incirca eguali nelle due soluzioni.

Quanto invece alle moli di aminoacidi totali, il loro rapporto rispetto alle sopradette sostanze scende con la purificazione dell'antigene, ciò che fa pensare alla presenza di un contaminante proteico.

Pertanto lo stato attuale delle indagini chimiche mostra che nei materiali in esame si ritrova sempre un polisaccaride (che per idrolisi dà esosì e pentosì), acido fosforico, un componente con spettro simile a quello dell'adenina ed un componente che per idrolisi dà oltre 10 aminoacidi tra i quali: acido aspartico, acido glutammico, glicina, alanina, arginina, valina, leucina.

Le indagini chimiche proseguono per chiarire quali di questi componenti siano legati chimicamente tra loro a costituire l'antigene e quali semplicemente siano adsorbiti da esso.

* * *

Da quanto abbiamo esposto risulta che i micobatteri sono provvisti di un notevole e vario numero di antigeni, alcuni caratteristici di una sola specie, altri caratteristici di un gruppo di specie, e altri ancora comuni a tutte le specie del genere; possiamo quindi parlare di antigeni di specie, di antigeni di gruppo, di antigeni di genere.

La natura di questi vari antigeni è diversa; alcuni sono sicuramente di natura proteica, altri non lo sono; l'antigene comune al genere, per esempio, sembra essere un polisaccaride complesso in cui è presente anche il fosforo.

Lo studio degli antigeni può quindi servire a darci una conoscenza più intima dei micobatteri e a permetterci, utilizzandolo insieme a quello di altri elementi differenziali, di determinare le caratteristiche di ogni vera specie micobatterica.

La ricerca degli antigeni dei micobatteri non è quindi di solo interesse immunologico, ma è un problema la cui soluzione può portare un chiarimento e un contributo nello stabilire l'esatta sistematica di questo genere.

BIBLIOGRAFIA

- ⁽¹⁾ TULLOCH W. J., MUNRO W. T., ROSS G. R. e CUMMING W. M. - *Tubercle*, 6: 18 e 37 (1924).
- ⁽²⁾ WILSON G. S. - *J. Path. Bact.*, 28: 69 (1925).
- ⁽³⁾ CUMMING W. M. - *Tubercle*, 7: 105 (1925).
- ⁽⁴⁾ FURTH J. - *J. Immunol.*, 12: 273 (1926).
- ⁽⁵⁾ KLOPSTOCK F. - *Klin. Wschr.*, 40: 967 (1931).
- ⁽⁶⁾ KAUFFMAN F. - *Z. Hyg. Infekt. Kr.*, 114: 121 (1932).
- ⁽⁷⁾ SEIBERT F. B. - *Am. Rev. Tuberc.*, 59: 86 (1949).
- ⁽⁸⁾ SEIBERT F. B. - *Am. Rev. Tuberc.*, 75: 604 (1957).
- ⁽⁹⁾ BOYDEN S. W. e SORKIN E. - *J. Immunol.*, 75: 13 (1955).
- ⁽¹⁰⁾ THURSTON J. R., RHEINS M. e HUIZIWARE T. - *Am. Rev. Tuberc.*, 73: 562 (1956).
- ⁽¹¹⁾ PARLETT R. C. e YOUMANS G. P. - *Am. Rev. Tuberc.*, 73: 637 (1956).
- ⁽¹²⁾ PARLETT R. C. e YOUMANS G. P. - *Am. Rev. Tuberc.*, 77: 450 (1958).
- ⁽¹³⁾ AFFRONTI L. F. - *Abstract in Am. Rev. Tuberc.*, 78, 2: 313 (1958).
- ⁽¹⁴⁾ LIND A. - *Int. Arch. Allergy appl. Immunol.*, 14: 264 (1959).
- ⁽¹⁵⁾ PEPYS J., AUGUSTIN B. e PATERSON A. B. - *Tubercle*, 40: 163 (1939).
- ⁽¹⁶⁾ INOUE I. - *Ann. Tuberc.*, 7: 63 (1957).
- ⁽¹⁷⁾ MANKIEWICZ E. - *Canad. J. Microb.*, 4: 363 (1958).
- ⁽¹⁸⁾ PORTER R. R. - *Biochem. J.*, 66: 677 (1957).
- ⁽¹⁹⁾ LAPRESLE C. - *Ann. Inst. Pasteur*, 97: 626 (1959).
- ⁽²⁰⁾ KAMINSKI M., GUTIERREZ O. e AXEN O. - *Ann. Inst. Pasteur*, 98: 51 (1960).
- ⁽²¹⁾ ZAMPIERI A. - *Rend. Acc. naz. Lincei*, ser. VIII, 5: 265 (1959).
- ⁽²²⁾ PENSO G. e ORTALI V. - *Rend. Acc. naz. Lincei*, ser. VIII, 6: 409 (1948).
- ⁽²³⁾ PENSO G. e ORTALI V. - *Rend. Ist. sup. Sanità*, 12: 903 (1949).
- ⁽²⁴⁾ PENSO G., LELLI G. e ORTALI V. - *Rend. Acc. naz. Lincei*, ser. VIII, 6: 732 (1949).
- ⁽²⁵⁾ PENSO G., ORTALI V., GAUDIANO A., PRINCIVALLE M., VELLA L. e ZAMPIERI A. - *Rend. Ist. sup. Sanità*, 14: 833 (1951).
- ⁽²⁶⁾ PENSO G., CASTELNUOVO G., GAUDIANO A., PRINCIVALLE M., VELLA L. e ZAMPIERI A. - *Rend. Ist. sup. Sanità*, 15: 491 (1952).
- ⁽²⁷⁾ PENSO G., NOËL R., BLANC M. e SOEUR MARIE SUZANNE - *Rend. Acc. naz. XL*, ser. IV, 8: 4 (1957).
- ⁽²⁸⁾ OUCHTERLONY O. - *Acta path. microb. scand.*, 32: 231 (1953).
- ⁽²⁹⁾ GRABAR P. e WILLIAMS C. A. Jr. - *Bioch. biophys. Acta*, 17: 67 (1953).
- ⁽³⁰⁾ WILLIAMS C. A. Jr. e GRABAR P. - *J. Immunol.*, 74: 138 e 397 (1953).
- ⁽³¹⁾ CASTELNUOVO G., GAUDIANO A., MORELLINI M. e POLIZZI-SCIARRONE M. - *Riv. Tuberc. Mal. App. respirat.*, 6: 303 (1958).
- ⁽³²⁾ CASTELNUOVO G., GAUDIANO A., MORELLINI M., PENSO G. e POLIZZI-SCIARRONE M. - *Ann. Ist. C. Forlanini*, 19: 19 (1959).
- ⁽³³⁾ CASTELNUOVO G. e MORELLINI M. - *Ann. Ist. C. Forlanini*, 20: 175 (1960 a).
- ⁽³⁴⁾ SCHAEFER W. - *Ann. Inst. Pasteur*, 64: 317 (1940).
- ⁽³⁵⁾ CASTELNUOVO G. e MORELLINI M. - *Ann. Ist. C. Forlanini*, 20: 180 (1960 b).
- ⁽³⁶⁾ GRIFFITH A. S. - *Tubercle*, 6: 417 (1925).
- ⁽³⁷⁾ CASTELNUOVO G. e MORELLINI M. - *Ann. Ist. C. Forlanini*, 20: 183 (1960 c).
- ⁽³⁸⁾ CASTELNUOVO G. e MORELLINI M. - *Ann. Ist. C. Forlanini*, 20: 190 (1960 d).
- ⁽³⁹⁾ BERENBLUM I. e CHAIN E. B. - *Biochem. J.*, 32: 295 (1938).
- ⁽⁴⁰⁾ BARTLETT G. B. - *J. biol. Chem.*, 234: 439 (1959).
- ⁽⁴¹⁾ YEMM E. W. e COCKING C. - *Analyst*, 80: 209 (1955).