

La differenza di potenziale che si viene a stabilire fra parti del miocardio già attivate e parti ancora in riposo dà luogo a deboli correnti elettriche. Queste correnti modificano lo stato elettrico dello spazio che circonda il cuore, i cui diversi punti acquistano un potenziale che varia in rapporto ai diversi momenti della attività cardiaca: da essi è possibile derivare una corrente elettrica che l'elettrocardiografo registra, amplificandola, come oscillazioni rispetto ad una linea di base. L'elettrocardiografo consiste appunto di un sistema di amplificazione ed di un sistema di registrazione.

## CENNI DI ELETTROFISIOLOGIA

### Il Potenziale di azione

Le fibrocellule cardiache posseggono una membrana permeabile in maniera selettiva, e variabile nel tempo, ai diversi ioni: questi presentano pertanto concentrazioni fortemente diverse fra interno ed esterno della cellula, perché processi secretori attivi (che si svolgono cioè con consumo di energia) portano, contro gradiente, sodio verso l'interno e potassio verso l'esterno.

In condizioni di riposo, la differente concentrazione di potassio (molto superiore all'interno) fa sì che si stabilisca una differenza di potenziale di -90 mV; a questo potenziale, la membrana si mantiene stabile nelle fibre di lavoro, si depolarizza molto lentamente in quelle specifiche (le fibre del nodo del seno e di quello atrioventricolare hanno, come vedremo, un comportamento diverso). Un qualsiasi stimolo che sposti il potenziale a -60 fa aprire un "canale" per il sodio, che fluisce rapidamente verso l'interno: la membrana si depolarizza fino al potenziale zero, poi inverte la polarizzazione fino a +20 o +30 mV. L'inversione del potenziale si arresta quando le concentrazioni di sodio sono in equilibrio dai due lati della membrana: si passa in questo momento dalla fase 0 del potenziale di azione

(corrispondente alla depolarizzazione) alla fase 1, in cui una prima ripolarizzazione rapida, per fuoriuscita di potassio, porta la membrana intorno agli 0 mV.

Il potenziale si mantiene intorno allo zero per un discreto periodo, descrivendo un tratto pianeggiante: questa stabilità è data dalla attivazione di una corrente lenta di  $Ca^{++}$  e  $Na^+$  verso l'interno bilanciata dalla fuoriuscita di potassio e dalla entrata di  $Cl^-$ , che riduce ulteriormente il potenziale all'interno della cellula, portandovi cariche negative. Questa fase 2 (ripolarizzazione lenta, plateau) termina quando cessa la corrente lenta: la fuoriuscita di potassio, che continua, riporta il potenziale ai -90 mV dei valori di riposo (fase 3, ripolarizzazione rapida, e fase 4 di riposo) (fig.1).

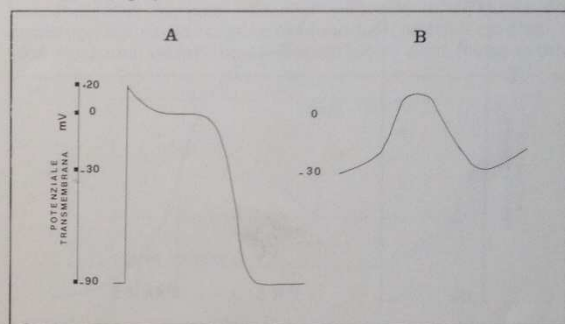


Fig. 1. - Il potenziale di azione.

A sinistra è riportato il potenziale di azione di una fibrocellula a risposta rapida, a destra quello di una fibra a risposta lenta: quest'ultima è anche una fibra segnapassi e, in fase 4, si depolarizza lentamente.

Il potenziale 0 è quello che si ha quando entrambi gli elettrodi esploranti sono all'esterno della fibra; quello di -90 mV si stabilisce invece quando uno dei due elettrodi penetra all'interno.

Per le diverse fasi (0, 1, 2, 3, 4) vedi il testo.

Questo tipo di **potenziale di azione** (così viene detta la successione di depolarizzazione e ripolarizzazione ora descritta) è proprio delle cellule dette **rapide** e cioè, in pratica, di tutte le cellule cardiache ad eccezione di quelle del nodo del seno e del nodo atrioventricolare (fig.2) Le cellule rapide possono essere o non dotate di **automatismo**: in quest'ultimo caso (fibre di Purkinje, ad esempio) la membrana in fase 4 si depolarizza lentamente, perché un costante, lento ingresso di sodio viene bilanciato solo in un primo tempo da una fuoriuscita di potassio: quando questa corrente si attenua, fino a cessare del tutto, la entrata di cariche positive porta il potenziale di mem-

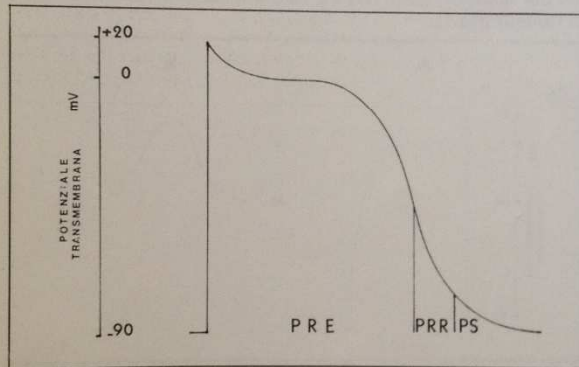


Fig. 2. - Il periodo refrattario.

Sono rappresentati i diversi periodi refrattari, in rapporto alla fasi del potenziale di azione: PRE è il periodo refrattario effettivo, PRR il periodo refrattario relativo, PS il periodo supernormale.

Nel periodo refrattario effettivo è compreso anche il periodo refrattario assoluto.

Vedere anche il testo.

brana al livello di soglia, e cioè al livello cui corrisponde la attivazione della corrente rapida di sodio. Questo livello viene raggiunto in tempi più o meno lunghi, caratteristici di ogni tipo di segnapassi secondario.

Le cellule **lente** hanno caratteristiche molto diverse (fig.1b). Il potenziale transmembrana a riposo, nelle cellule lente dotate di automatismo, è sensibilmente inferiore a quello delle fibre a risposta rapida, e cioè da -35 a -70mV. Il potenziale di azione ha una fase di ascesa relativamente lenta, e non raggiunge, o supera di poco, il potenziale zero: le fasi 1 e 2 sono appena accennate, mentre ben netta è la fase 3. Tutto ciò è in rapporto ad un diverso movimento ionico: manca la corrente rapida di sodio, e la depolarizzazione è causata da una corrente lenta di calcio.

Anche le cellule lente possono essere dotate o non di automatismo (quelle del nodo sinusale ad esempio sono automatiche, quelle del nodo atrioventricolare no); nel primo caso, il potenziale massimo transmembrana viene mantenuto per un tempo brevissimo, dopo di che, nella fase 4, si ha una depolarizzazione spontanea relativamente veloce, dovuta forse ad una corrente "lenta" di calcio. Il tempo di recupero delle fibre lente è maggiore delle altre.

### Conduzione dello stimolo

Le fibre a risposta rapida conducono velocemente lo stimolo (da 0,5 a 5 m al sec); quelle a risposta lenta, molto lentamente (0,01-0,1 m/sec). Ciò trova spiegazione nelle diverse caratteristiche del potenziale di azione; perché uno stimolo venga condotto rapidamente occorre - se lo stimolo stesso è un potenziale di azione, come di norma avviene - che esso abbia una notevole velocità di ascesa in fase 0 e che raggiunga una adeguata ampiezza. E' questo che, insieme alla durata del periodo refrattario e alla responsività di membrana,

condiziona una normale **conduzione** a tutti i livelli; e da quanto si è detto, appare evidente che il potenziale delle cellule a risposta rapida è più adatto per una facile conduzione.

### Refrattarietà

Le fibrocellule non sono in grado di rispondere, se stimolate, fino a quando il potenziale non è tornato intorno ai -55 mV (**periodo refrattario assoluto**). In una fase successiva, stimoli molto intensi possono ottenere risposte di debole intensità, che non si propagano: è il **periodo refrattario effettivo** che termina appena è possibile ottenere una risposta propagata. Da questo momento a quello in cui viene ripristinata la soglia normale si ha il **periodo refrattario relativo**.

La **fase supernormale** di eccitabilità è un breve intervallo, alla fine del periodo refrattario relativo, in cui stimoli più deboli che di norma ottengono risposte normali.

Il periodo refrattario dipende in pratica dal livello raggiunto in quel momento dal potenziale transmembrana: quanto più questo è vicino ai valori normali di membrana, tanto più il potenziale di azione che si ottiene ha caratteristiche normali e pertanto buone capacità di trasmissione.

## LA ATTIVITA' ELETTRICA DEL CUORE NEL SUO COMPLESSO

I fenomeni descritti a livello cellulare si verificano contemporaneamente in un grande numero di fibrocellule, le quali si attivano in risposta ad una onda di attivazione che dal nodo del seno progredisce, in senso grosso modo cranio caudale, fino ai ventricoli; ne risulta, per ogni successivo istante, una forza elettrica che è la somma delle singole attivazioni cellulari. Essa è caratterizzata, oltre che dalla intensità, da un senso e da una direzione; è pertanto un **vettore**, che influenza lo stato elettrico di tutti i punti dello spazio definito dallo schema corporeo. Il

vettore diretto nello spazio può essere scomposto in due componenti corrispondenti alla sua proiezione su diversi piani (fig. 3)

Noi possiamo osservare l'effetto del vettore sul potenziale elettrico di alcuni punti determinati, che vengono a definire le cosiddette **derivazioni elettrocardiografiche**. Poiché possiamo risalire al vettore partendo dalla sua proiezione sui diversi piani, noi disponiamo i nostri punti di osservazione (le derivazioni) su due piani appunto scelti arbitrariamente: il piano orizzontale e quello frontale.

### Derivazioni poste sul piano frontale

Il piano frontale viene identificato per mezzo di due assi, perpendicolari fra loro, che si intersecano in un punto nel quale immaginiamo l'origine dei fenomeni elettrici cardiaci, e cioè dei diversi vettori (fig.4). Questo piano viene diviso in due

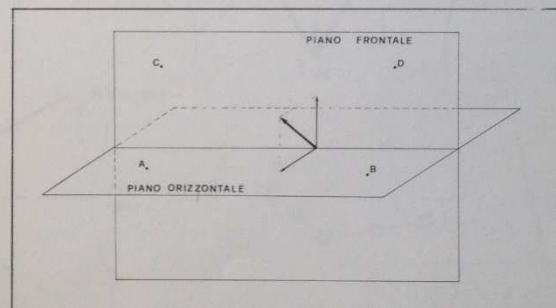
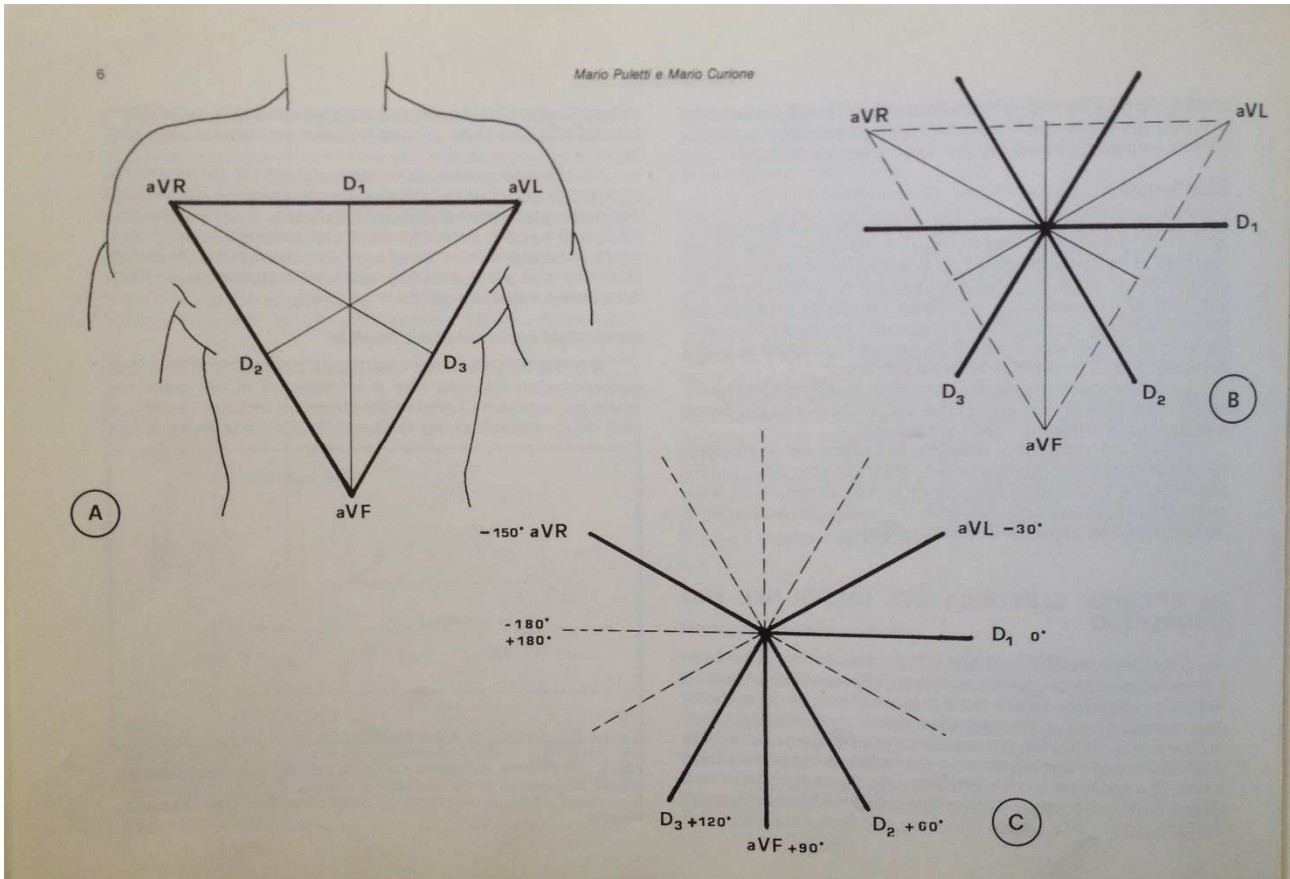


Fig. 3. - Proiezione del vettore spaziale sul piano frontale e su quello orizzontale. A e B sono ipotetiche derivazioni sul piano orizzontale, C e D su quello frontale.



semipiani, uno superiore graduato convenzionalmente da 0 a  $-180^\circ$ , andando in senso antiorario da destra verso sinistra, e uno inferiore graduato da 0 a  $+180^\circ$ , andando in senso orario sempre da destra verso sinistra.

Le derivazioni poste sul piano frontale sono sei, di cui tre **bipolari** (D1 D2 D3) e tre **unipolari** (aVR aVL aVF): nelle prime i due elettrodi variano entrambi il loro potenziale per effetto dell'attività elettrica del cuore, nelle seconde un solo elettrodo modifica il suo potenziale, mentre l'altro è un elettrodo di riferimento.

**Nota:** le tre bipolari sono le derivazioni originali di Einthoven: esse costituiscono i lati di un triangolo equilatero, i cui vertici corrispondono ai due polsi ed al malleolo sinistro: il triangolo giace sul piano frontale, e, nella ipotesi di Einthoven, il cuore si trova al centro di esso, a una distanza uguale dagli apici. Gli elettrodi di D1 sono ai due polsi, quelli di D2 al polso destro ed alla caviglia sinistra, quelli di D3 al polso sinistro ed alla caviglia sinistra.

Le derivazioni unipolari hanno un elettrodo esplorante posto sull'arto e un elettrodo indifferente, al quale viene attribuito, per convenzione, un potenziale zero: esso viene ottenuto mettendo in corto circuito i tre arti per mezzo di resistenze di 5000 Ohms (terminale centrale di Wilson), oppure, come si fa comunemente per evitare che i voltaggi siano troppo bassi, cortocircuitandone solo due (derivazioni "aumentate" di Goldberger: aVR, aVL, aVF). L'asse delle bipolari degli arti, e cioè la retta che unisce l'elettrodo esplorante al punto zero, corrisponde alle bisettrici degli angoli del triangolo di Einthoven: aVR ha l'elettrodo al polso destro, aVL a quello sinistro, aVF alla caviglia.

Il cavo che viene collegato alla caviglia destra è un cavo di

terra, destinato a scaricare le correnti parassite eventualmente presenti, e non corrisponde ad una derivazione.

Tracciando sul piano frontale, a partire dal punto centrale 0 (o centro elettrico teorico) (riferirsi alle fig.) delle semirette a  $30^\circ$  di distanza una dall'altra, le derivazioni vengono a trovarsi nella seguente posizione: D1 è sulla orizzontale, e cioè a  $0^\circ$ ; D2 è a  $+60^\circ$ ; D3 a  $+120^\circ$ . Le unipolari si trovano invece a  $-150^\circ$  (aVR),  $-60^\circ$  (aVL) e  $+90^\circ$  (aVF) (fig. 4c). La derivazione ha un

Fig. 5. - Derivazioni del piano orizzontale.

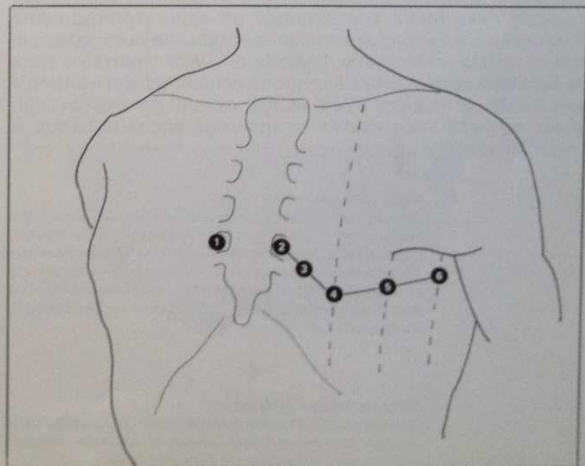


Fig. 4. - Derivazioni sul piano frontale.  
 A) Triangolo di Einthoven, con asse delle derivazioni sul piano frontale.  
 B) Trasferimento delle derivazioni bipolari parallelamente a sè stesse, in modo da attraversare un punto centrale comune.  
 C) Sistema esassiale, o doppio triasse di Bayley, che suddivide il piano frontale in due semipiani di  $180^\circ$ , e posizione delle diverse derivazioni su di esso (linee più scure).

proprio asse (asse di derivazione) costituito dalla retta che la congiunge con il punto 0.

Questa posizione assunta dalle diverse derivazioni nel piano frontale, suddiviso per mezzo delle già dette semirette, è conseguenza dello spostamento di ciascuna di esse parallelamente a sè stessa in modo da farle coincidere con una retta passante per il punto di intersezione 0 dei due assi principali ( $90^\circ$  e  $180^\circ$ ) (fig. 4a-b).

#### Derivazioni poste sul piano orizzontale

Si impiegano di solito sei o più derivazioni, tutte unipolari (ma se ne possono utilizzare anche di bipolari, vedi sotto), disposte nella realtà non secondo un piano rigorosamente orizzontale ma secondo una linea spezzata che va dal quarto al quinto spazio intercostale. La sede di questi elettrodi è stata determinata da Wilson; essi vengono denominati dalla lettera V seguita da un numero d'ordine. Nel caso di derivazioni registrate sull'emitore destro, si aggiunge anche la lettera R (right, destro) (fig. 5).

##### Nota: Altre derivazioni.

Altre derivazioni uni- o bipolari, sono state via via proposte, ma non sono entrate nell'uso generale; fra le bipolari, ricordiamo quelle utilizzate per lo studio dell'attività atriale (Condorelli): una di esse è la atriale destra, con elettrodi al 2° e 4° spazio di destra (si ottiene connettendo il cavo del braccio destro e quello del braccio sinistro con una ventosa analoga a quella usata per le precordiali).

##### Nota: Derivazioni esofagee.

Di impiego poco abituale, sono derivazioni unipolari ottenute con un sondino esofageo munito di elettrodo; vengono indicate dalla distanza in cm dalla rima orale.

#### REGISTRAZIONE DEGLI EVENTI ELETTRICI DA PARTE DELLE DIVERSE DERIVAZIONI

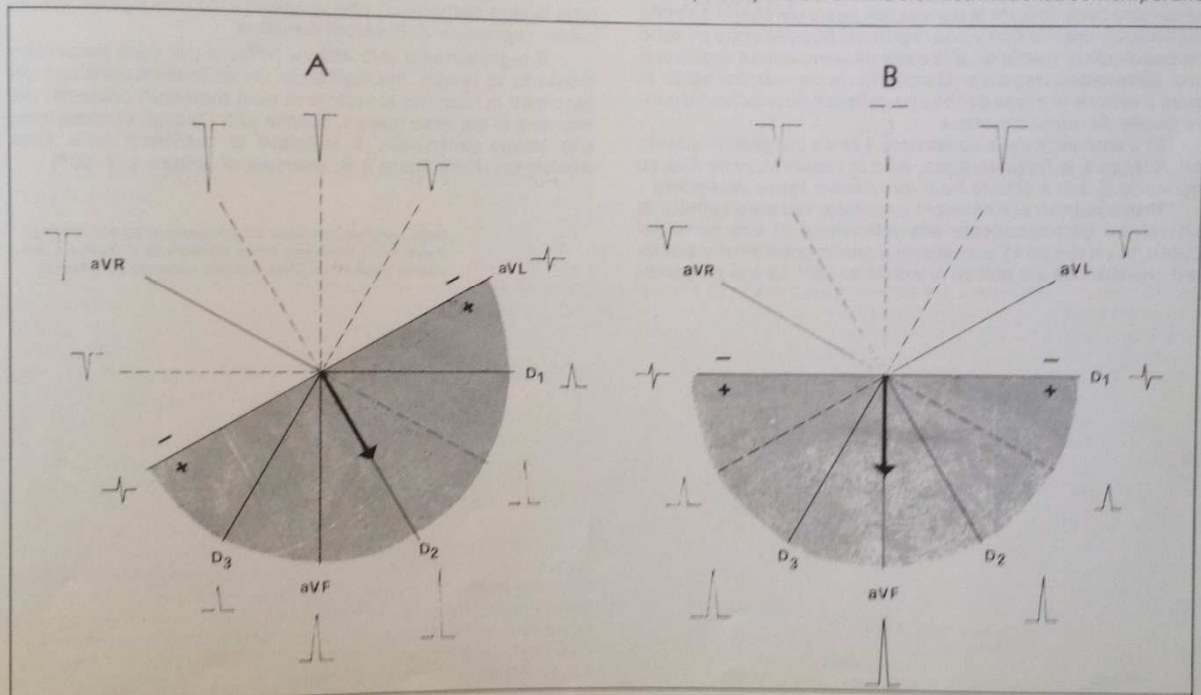
Esaminiamo, a modo di esempio, l'effetto sulle derivazioni del piano frontale di una determinata attività elettrica conseguente all'eccitazione, al tempo t, di una qualsiasi parte del cuore. Abbiamo detto che questa attività dà luogo ad un vettore, ha cioè una direzione e un senso; essa è diretta nello spazio, ma, come si è visto, può essere scomposta in due forze, una delle quali è data dalla sua proiezione sul piano frontale, con origine al punto 0.

Poniamo, per ipotesi, che essa si diriga da questo punto verso il basso, a  $60^\circ$  dalla orizzontale, e vediamo come vengono influenzate le diverse derivazioni. Il nostro vettore concide con l'asse di D2, e si dirige verso di essa; D2 registrerà una deflessione positiva (nel tracciato elettrocardiografico corrispondente si avrà cioè uno spostamento verso l'alto della linea isoelettrica), che sarà quella massima perché la derivazione D2 si trova in questo caso in posizione privilegiata rispetto alle altre (il vettore coincide con il suo asse). D1 e aVF sono le derivazioni più vicine a D2: ma la prima ne dista  $60^\circ$ , la seconda solo  $30^\circ$ , e registra pertanto una deflessione, sempre positiva, minore di D2 ma maggiore di D1. D3 è a  $+120^\circ$ , e cioè a  $60^\circ$  dal vettore: viene a trovarsi rispetto ad esso nella identica posizione di D1, e registrerà un'onda, sempre positiva, della stessa ampiezza. aVL è a  $90^\circ$  dal vettore di attivazione: gli è cioè perpendicolare, la proiezione del vettore sul suo asse è uguale a zero, ed essa non registrerà deflessioni, mantenendosi isoelettrica. aVR è al di là della perpendicolare al vettore: la attivazione si allontana da essa che registrerà una deflessione negativa, tanto più grande quanto maggiore sarà la sua distanza dal vettore di attivazione. Si ha così che la perpendicolare al vettore definisce due semipiani, quello che lo contiene, e che registra deflessioni positive in tutte le derivazioni, e l'altro, che registra solo deflessioni negative (fig. 6).

Fig. 6. - Aspetto delle deflessioni registrate nelle diverse derivazioni per effetto di due ipotetici vettori, diretti verso  $+60^\circ$  (A) e verso  $+90^\circ$  (B).

Possiamo a questo punto fare alcune considerazioni, che sono indispensabili per la comprensione dell'elettrocardiogramma:

- 1) Una qualsiasi attività elettrica influenza contemporanea



mente tutte le derivazioni, che la registreranno secondo modalità differenti;

2) Il vettore che corrisponde a questa attività dà una deflessione positiva, proporzionale alla entità della sua proiezione sul loro asse, in tutte le derivazioni poste nel semipiano che lo contiene, mentre non viene registrato da quelle che gli sono perpendicolari; quelle al di là della perpendicolare registrano una deflessione negativa. Corollario: le derivazioni verso le quali il vettore si dirige danno una deflessione positiva, negativa quelle da cui si allontana.

3) L'ampiezza delle deflessioni è tanto più grande quanto più intensa è la forza elettrica, ed è in rapporto, nelle diverse derivazioni, alla distanza fra il loro asse e l'asse del vettore.

Proseguendo nell'esempio proposto, vediamo l'effetto di un vettore corrispondente alla attivazione di una parte del cuore, in un tempo  $t_1$  successivo a quello considerato; poniamo che esso sia per ipotesi orientato a  $-180^\circ$ . La sua perpendi-

colare è a  $+90^\circ$ , dove si trova aVF che non ne resterà influenzata; il semipiano che contiene il vettore comprende due sole derivazioni, delle quali aVR, più vicina, registrerà la deflessione positiva maggiore, e D3 ancora positiva ma più piccola, mentre tutte le altre derivazioni, che vengono a trovarsi sull'altro semipiano, registrano deflessioni negative.

Il ragionamento può essere ripetuto per ogni successivo intervallo di tempo, immaginando un andamento analogo dei fenomeni in rapporto al vettore in quel momento presente; nei momenti in cui esso manca, perchè tutti i tessuti cardiaci sono allo stesso potenziale, il tracciato si mantiene sulla linea isoelettrica (nella figura 9 B, esempio di vettore a  $+90^\circ$ )

**Nota:** la derivazione posta sulla perpendicolare può non registrare alcun fenomeno (linea isoelettrica) o registrare una piccola deflessione difasica di pari voltaggio (isodifasica).