

402 Potenziale d'azione e scorrimento parallelo. Scorrimento parallelo delle cariche all'interno di ogni canale: la sequenza dei pieni e vuoti compie una serie di passi, mantenendo la rigidità dello schieramento sequenziale.

6. IL SISTEMA NERVOSO CENTRALE

6.1 Il sistema nervoso centrale

6.2 Tre utili schemi di rappresentazione

6.3 Struttura e finalità del neurone

6.4 Qual'è la velocità di propagazione degli impulsi nervosi?

6.5 L'impulso nervoso nella concezione tradizionale della fisiologia

6.6 Potenziale di riposo e potenziale d'azione

6.7 La propagazione di una serie temporale di impulsi

6.8 Velocità di conduzione

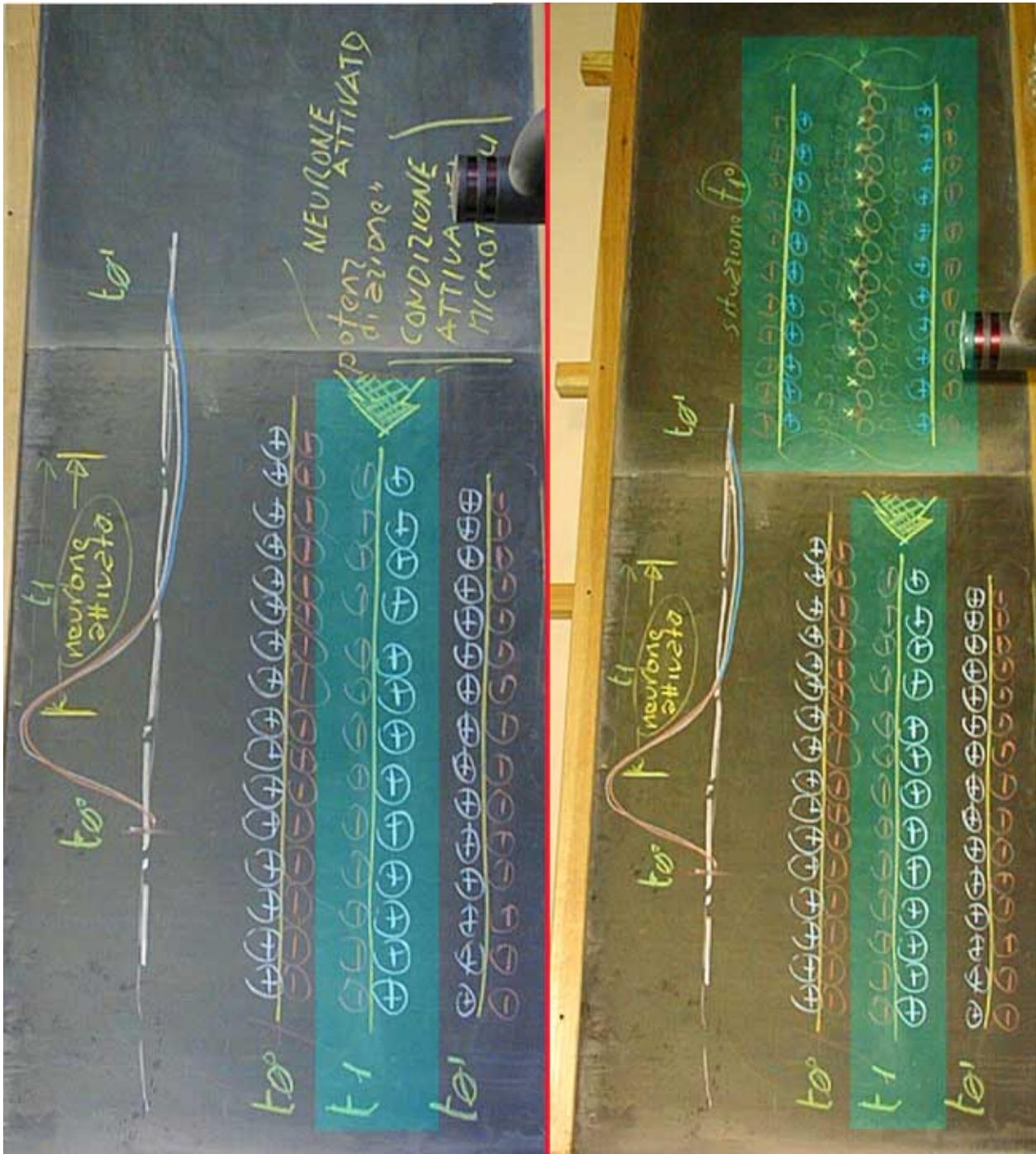
6.9 Schema iconico della propagazione di una serie di impulsi

6.1 Il sistema nervoso centrale. Lo studio del sistema nervoso di animali a vari livelli di organizzazione, dai più semplici ai più complessi della scala zoologica fino all'uomo, ha dimostrato che non esistono sorprendenti differenze nella loro struttura fondamentale. Le cellule nervose sono morfologicamente simili tra loro e anche i meccanismi attraverso i quali sono in comunicazione tra loro non differiscono in maniera sostanziale. Ciò che cambia, passando dal più semplice al più complesso, è il numero delle cellule nervose, la estensione delle interconnessioni e il formarsi di sottosistemi variamente integrati.

*tele di ragno fuori e tele di ragno dentro la
mia pelle
preda
so' catturato*

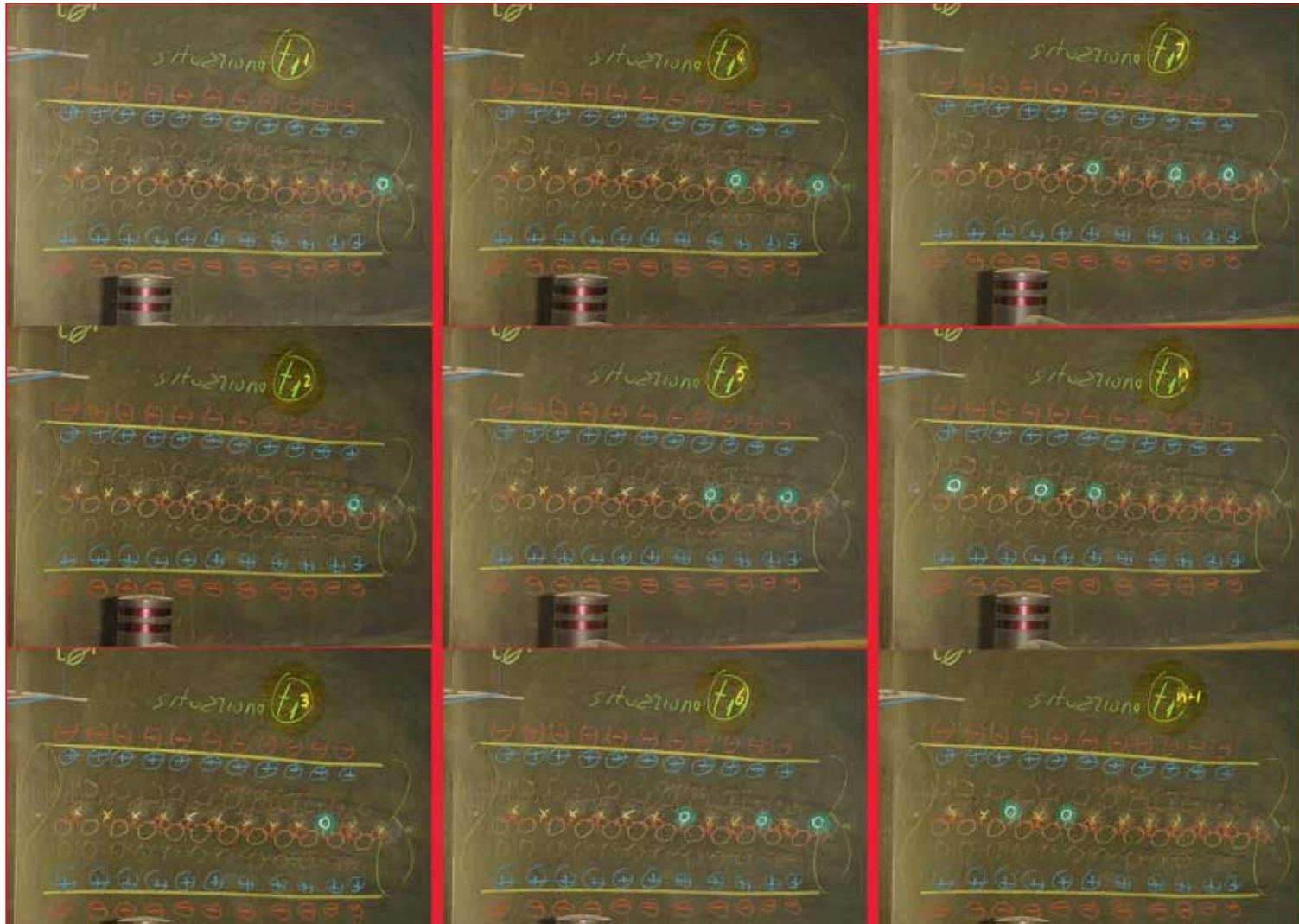
Una proprietà generale del *protoplasma*, cioè della materia vivente che costituisce la cellula, è la sua *irritabilità* o *eccitabilità*. Essa consiste nella capacità di avvertire uno stimolo esterno e di reagire ad esso.

6.2 Tre utili schemi di rappresentazione. Nella letteratura specializzata si trovano rappresentazioni del corpo umano che ne precisano alternativamente la costituzione (il cosiddetto *schema anatomico*), la raffigurazione sommaria di alcune proprietà (il cosiddetto *schema iconico*) e la funzionalità di alcune porzioni biodinamiche (il cosiddetto *schema sistemico*). Vediamoli con un dettaglio appena più circostanziato. Nello schema



400 La prima lavagna rappresenta una membrana del neurone in tre tempi diversi. Il classico segnale del potenziale d'azione viene interpretato in maniera molto più articolata e complessa: la sua funzione è quella di *clock* di avanzamento di un registro di scorrimento che fa muovere in questa o quella direzione il contenuto del treno di cariche all'interno del neurone sottostante. Durante l'intervallo di tempo in cui il potenziale di azione risulta positivo, viene abilitato il passaggio di treni di cariche (vagoni pieni, vagoni vuoti). Potenziale di azione ma di quale azione? L'azione esterna, forse. Tuttavia, per realizzare quei movimenti esterni, sono necessari migliaia, milioni, miliardi di segnali interni al livello neurale. Inoltre, l'energia di trasferimento è contenuta nel potenziale di azione. Quindi, il potenziale d'azione è al tempo stesso, orologio e benzina del meccanismo. Come è fatto il treno di cariche? Il parallelo frontale, il filmato particolare delle microcomponenti di un gesto.

Potenziale d'azione. In corrispondenza al potenziale d'azione, soltanto all'istante $t1$ la relazione ambientale tra l'interno e l'esterno della membrana permette l'attivazione del passaggio di cariche. Negli istanti precedente e successivo a $t1$ (vale a dire in $t0$ e $t0P$) le condizioni ambientali non permettono alcun passaggio di carica. La durata temporale $t1$ è di qualche ms ed è quella generalmente riportata in letteratura e quella rilevata dalle sonde di sperimentazione e analisi.



401 Dinamica del passaggio delle cariche. Se (o quando) nel canale sono presenti una o più cariche (perturbazioni), sfruttando la condizione di polarizzazione (campo elettrochimico) interna, il treno di cariche scorre, passo dopo passo, fino a uscire dal canale e fino a che è presente la condizione di potenziale d'azione positivo.

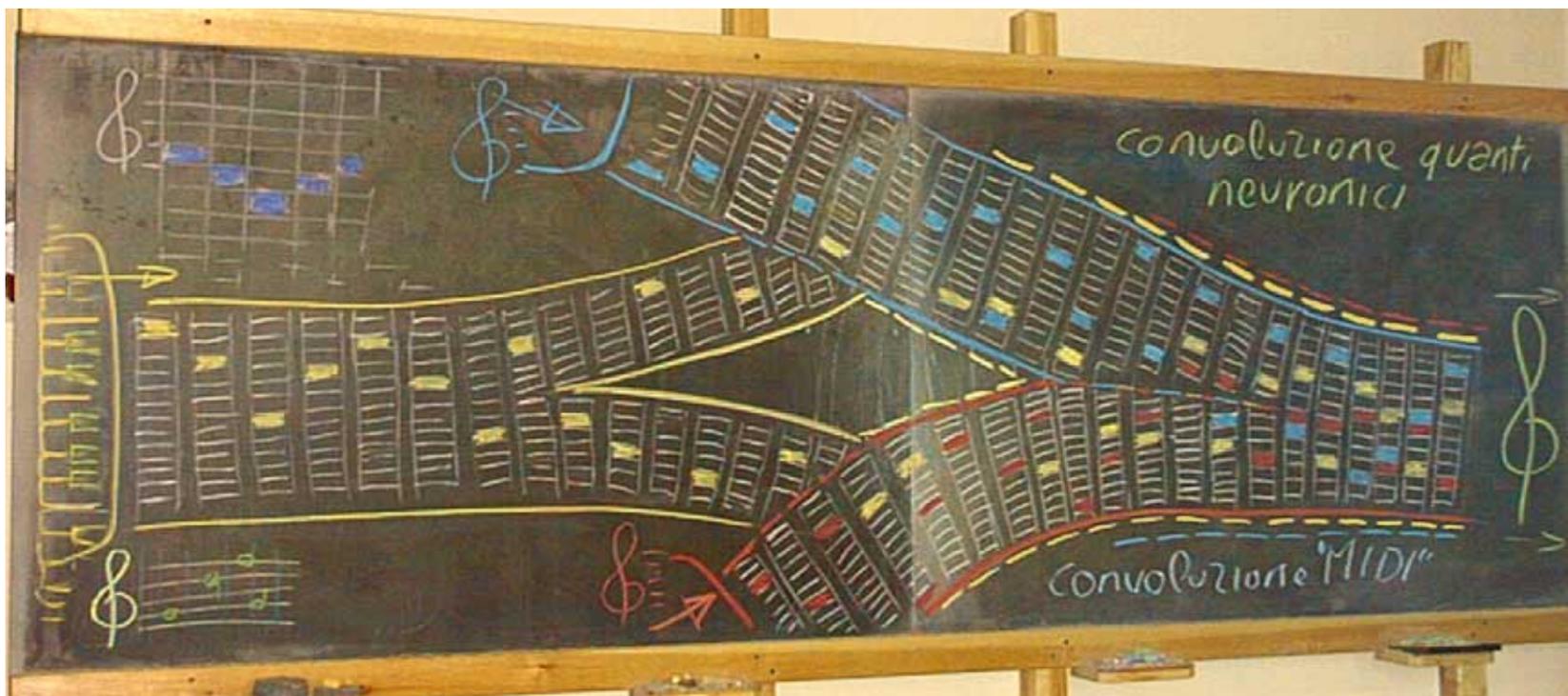
anatomico si immagina di aprire e sezionare il corpo umano, asportandone opportunamente alcune parti che impediscono la visione di elementi più interni, allo scopo di evidenziare porzioni, gruppi e insiemi di particolari settori del corpo sotto analisi in una sorta di geografia conoscitiva.

strumenti
risorse
poi d'ovatta
l'attraversar d'idee
tele di ragno
a generar di volta in volta
ologrammi

Nello schema iconico la visione interna del corpo umano viene semplificata, a volte, oppure viene avvicinata in dettaglio, altre volte, tramite accurati disegni in bianco & nero o a colori, oppure direttamente attraverso immagini derivate dall'uso del microscopio ottico o elettronico. Nello schema sistemico, vengono adottate tecniche che provengono dalla descrizione dell'elettronica dei circuiti elettrici, dalle carte di flusso dell'analisi di sistemi ingegneristici, dalle rappresentazioni formali dei programmi di *software* nell'ambito dell'elaborazione dei dati tramite *computer*. A volte gli schemi si completano a vicenda, altre volte non sono perseguibili nelle tre forme distinte, altre volte ancora uno degli schemi è fortemente prevalente rispetto ai restanti.

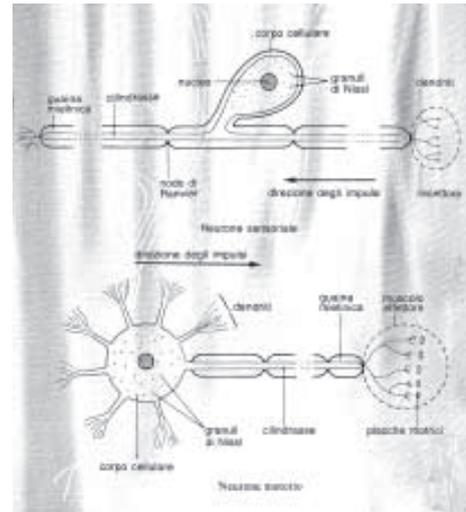
d'esser miscelato a tutto
che a distillar le parti
m'accingo

6.3 Struttura e finalità del neurone. Il sistema nervoso è costituito dal tessuto nervoso vero e proprio, da un tessuto di sostegno e da vasi sanguigni. Il tessuto nervoso si compone di cellule nervose e di fibre nervose. Il *neurone* è una cellula nervosa allungata e ramificata (nella figura qui sotto sono riportati gli schemi anatomici di un neurone sensoriale e uno motorio) specializzata per la conduzione di impulsi nervosi, che rappresenta l'unità fondamentale del sistema nervoso sia dal punto di vista strutturale sia da quello funzionale.



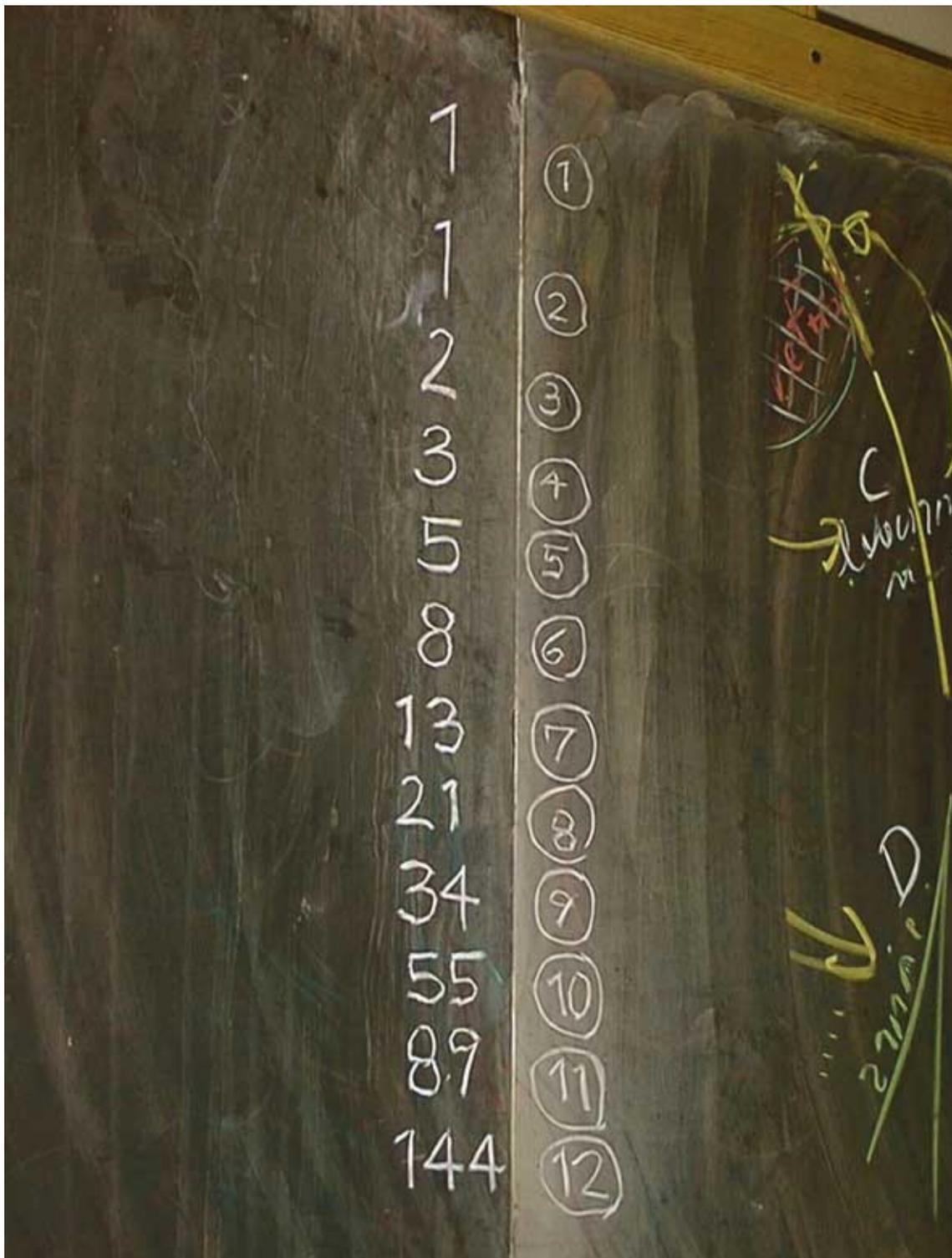
401a L'indizio entrante è costituito da un tema musicale. Prendiamo un macrocanale (esso è costituito dall'insieme di più microcanali) della macchina cibernetica, che riceve impulsi dalla tastiera di un pianoforte. Ogni volta che viene premuto un tasto, nel microcanale corrispondente parte un quanto di energia che inizia il suo viaggio verso l'interno del sistema. Se il macrocanale si sdoppia, in ognuno dei due rami saranno presenti (in media) un numero di microcanali pari alla metà del valore totale degli stessi. Se uno dei due rami confluisce in un altro macrocanale, in cui era presente una serie di quanti in movimento, i due flussi quantici coesistono. Se due macrocanali indipendenti confluiscono in uno, la circostanza si rivela identica. La sequenza dei pieno/vuoto all'interno dei microcanali può essere interpretata come: (1) un codice numerico; (2) un codice di funzionamento di un processore elettronico; (3) un codice musicale. Nella terza ipotesi, il codice in questione prende il nome di MIDI.

Da un punto di vista anatomico, il neurone non è altro che una cellula nervosa provvista dei suoi prolungamenti; da un punto di vista fisiologico esso costituisce una cellula in grado di *generare e trasmettere* impulsi bioelettrici. Gli impulsi passano da un neurone all'altro per mezzo delle *sinapsi* che formano vere e proprie terminazioni dei canali di collegamento (*assoni e dendriti*) con altri neuroni. I neuroni *sensoriali* trasmettono informazioni dai recettori al sistema nervoso centrale, i neuroni *motori* trasmettono informazioni dal sistema nervoso centrale agli *effettori*, per esempio i muscoli o le ghiandole.



Nella Lavagna 1000 viene riportato uno schema sistemico del neurone in due casi specifici: sensoriale (grigio) e motorio (violetto). Prende il nome di *neurotrasmettitore* la sostanza che opera da agente intermedio. Per questo esso viene anche denominato con il termine *mediatore chimico* ed è responsabile della trasmissione di un impulso nervoso attraverso una sinapsi. Costituiscono esempi di neurotrasmettitori l'*adrenalina*, la *noradrenalina* e l'*acetilcolina*. Infatti, dato che il corpo umano viene continuamente informato di messaggi di natura estremamente differenziata, gli impulsi che pervengono al suo interno sono sempre gli stessi o variano a seconda della natura del segnale. Una cellula e, in senso generale, la materia vivente, immersa in un determinato ambiente, riuscirà a sopravvivere soltanto se avvertirà gli eventuali cambiamenti che possono verificarsi nell'ambiente e soltanto se, modificandosi di conseguenza, riuscirà ad *adattarsi* ad essi. Questa capacità di registrare uno stimolo e di rispondere cercando di adattarvisi, viene denominata *irritabilità*. È evidente che la irritabilità è una caratteristica della materia vivente in quanto costituisce il dispositivo attraverso il quale essa continua a mantenersi in vita.

gocce di luce
gocce di suono
gocce
e di rimbalzo a sedimento
riemergere storie



037 numeri di Fibonacci

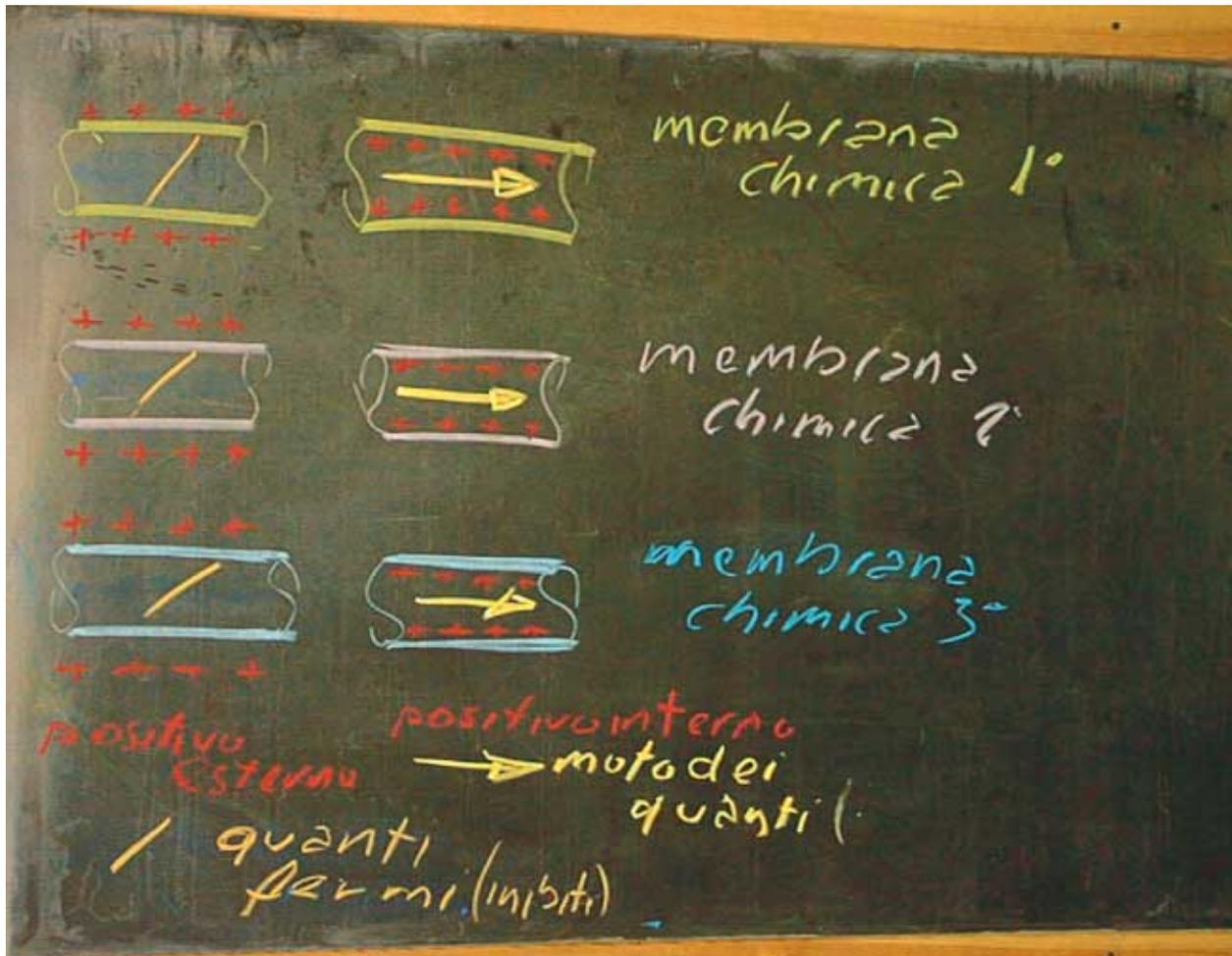
Naturalmente l'irritabilità è una proprietà di carattere generale e indica soltanto la capacità di rispondere a uno stimolo, ma non indica di quale tipo sia questa risposta. Nel caso particolare della cellula nervosa, irritabilità significa *eccitabilità*. In questo senso la cellula nervosa risponde a uno stimolo eccitandosi; altre cellule eccitabili sono le cellule muscolari, le cellule ghiandolari e così via. Al fine specifico di funzionare, al neurone non basta eccitarsi: deve anche trasmettere questa eccitazione. Ecco allora intervenire la seconda proprietà della cellula nervosa, vale a dire la *conduttività*.

6.4 Qual'è la velocità di propagazione degli impulsi nervosi? Al principio del XIX secolo, Johannes Mueller, il grande maestro tedesco di fisiologia, affermò che gli impulsi nervosi, in altri termini il pensiero, dovevano muoversi a velocità così elevate da potere essere confrontate con la velocità della luce nell'universo. La stima si è rivelata subito assai grossolana perché forse la grandezza da prendere per eventuale riferimento non era la velocità della luce ma quella del suono.

Hermann von Helmholtz (1821-1894), eminente fisiologo e fisico, nonché allievo di Mueller, dimostrò che il suo professore si sbagliava. In un famoso esperimento del 1848, Helmholtz provocò la contrazione di un muscolo di rana eccitandone il nervo in due posizioni poste a distanze diverse rispetto al muscolo. In ambedue i casi, misurò il tempo che intercorreva tra il momento di eccitazione del nervo e l'inizio della contrazione muscolare. Quando Helmholtz stimolava il nervo a 5 cm dal muscolo, la contrazione iniziava 1,3 ms più tardi di quando la stimolazione era data a 1 cm dal muscolo. Sulla base di questi dati egli calcolò che la velocità di propagazione dell'impulso nervoso era dell'ordine di $(0.04)/(0.0013) \text{ m/s} = 30 \text{ m/s}$. Il risultato, pari a meno di $(1/10)$ della velocità del suono nella atmosfera, stupì molto i suoi contemporanei, soprattutto perché dimostrava che l'impulso nervoso, un concetto che fino a quei tempi era apparso del tutto astratto, poteva essere misurato quantitativamente.

*reciprocar di specchi
e ad incrociare i flussi
l'idea s'avvampa*

La scoperta che gli impulsi nervosi viaggiano a velocità relativamente mo-



410 Anestesia in chiave cibernetica. Diverse membrane neurologiche in azione sensibili alle chimiche dell'inibizione in una classificazione a tre a titolo unicamente esemplificativo. I treni di quanti passano o non passano a seconda della stato di eccitazione della membrana. Si può fare riferimento alla lavagna 400. Se, nel modello cibernetico, il canale in giallo rappresenta le reti periferiche, il canale in rosa quella intermedia e il canale in celeste quelle interne, le diverse tecniche anestetiche sono basate fondamentalmente in un'opportuna diversificazione di intervento sulle chimiche delle varie membrane.

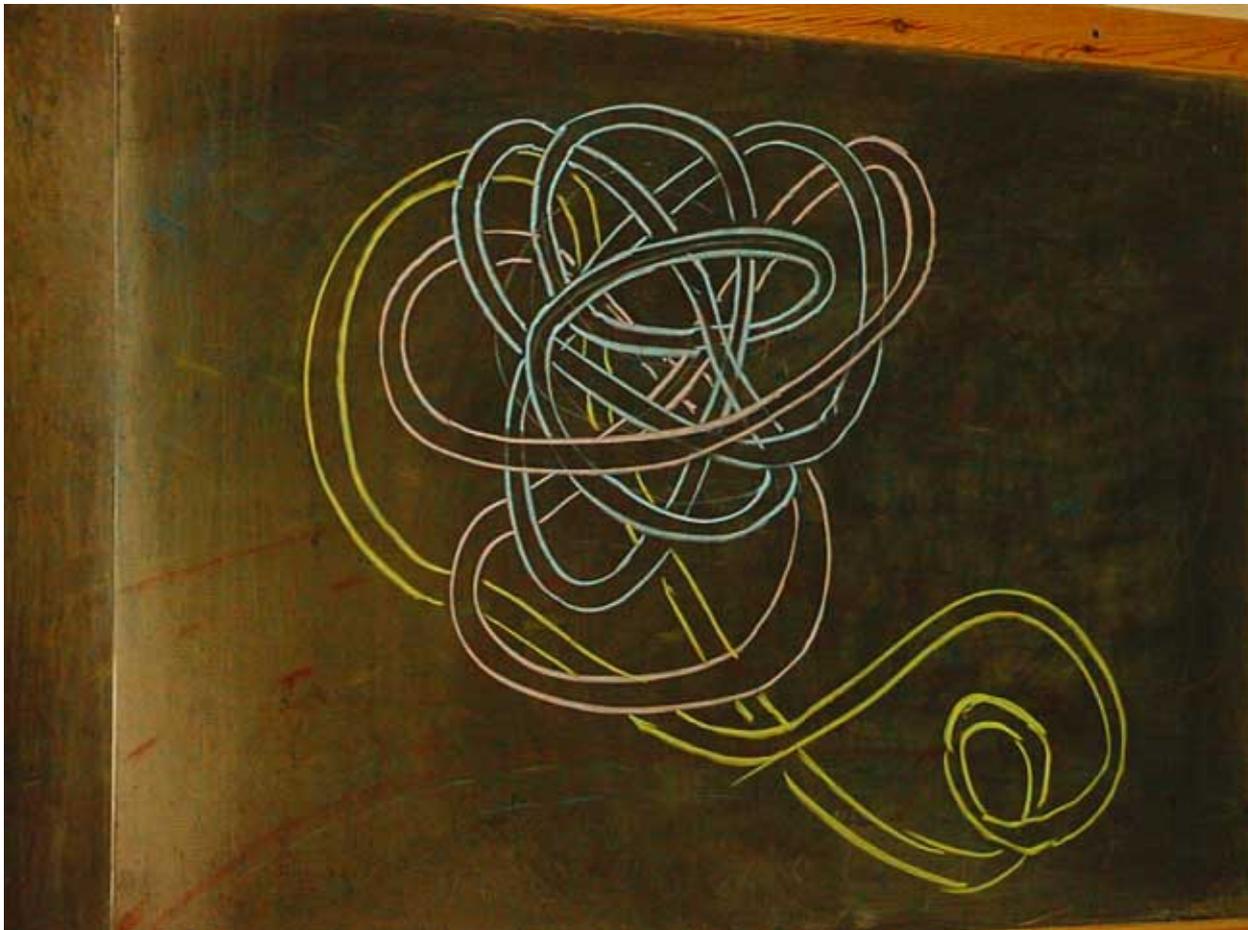
"Cibernetica e anestesia" fig: 410; 411; 412; 413; 414; 415; 416

deste diede avvio a una serie di ulteriori ricerche fisiologiche e comportamentali. Un collega di Helmholtz, Emile Du Bois-Reymond, misurò il potenziale di azione elettrico del nervo e il suo allievo Julius Bernstein misurò la velocità di conduzione della corrente elettrica, dimostrando che era la stessa del segnale funzionale misurato da Helmholtz. Questa serie di misure fisiche contribuì ad un ulteriore progresso scientifico: quello che riguarda i rapporti tra comportamento e processi fisiologici.

*e son qui dentro
che del mio corpo
avverto tutti i messaggi*

La scoperta e la misurazione della velocità di propagazione dell'impulso nervoso incoraggiò anche lo studio dei tempi di reazione e proprio questo tipo di ricerca ha costituito uno dei fondamenti scientifici della psicologia: ancora oggi si compiono sofisticate ricerche sui tempi di reazione.

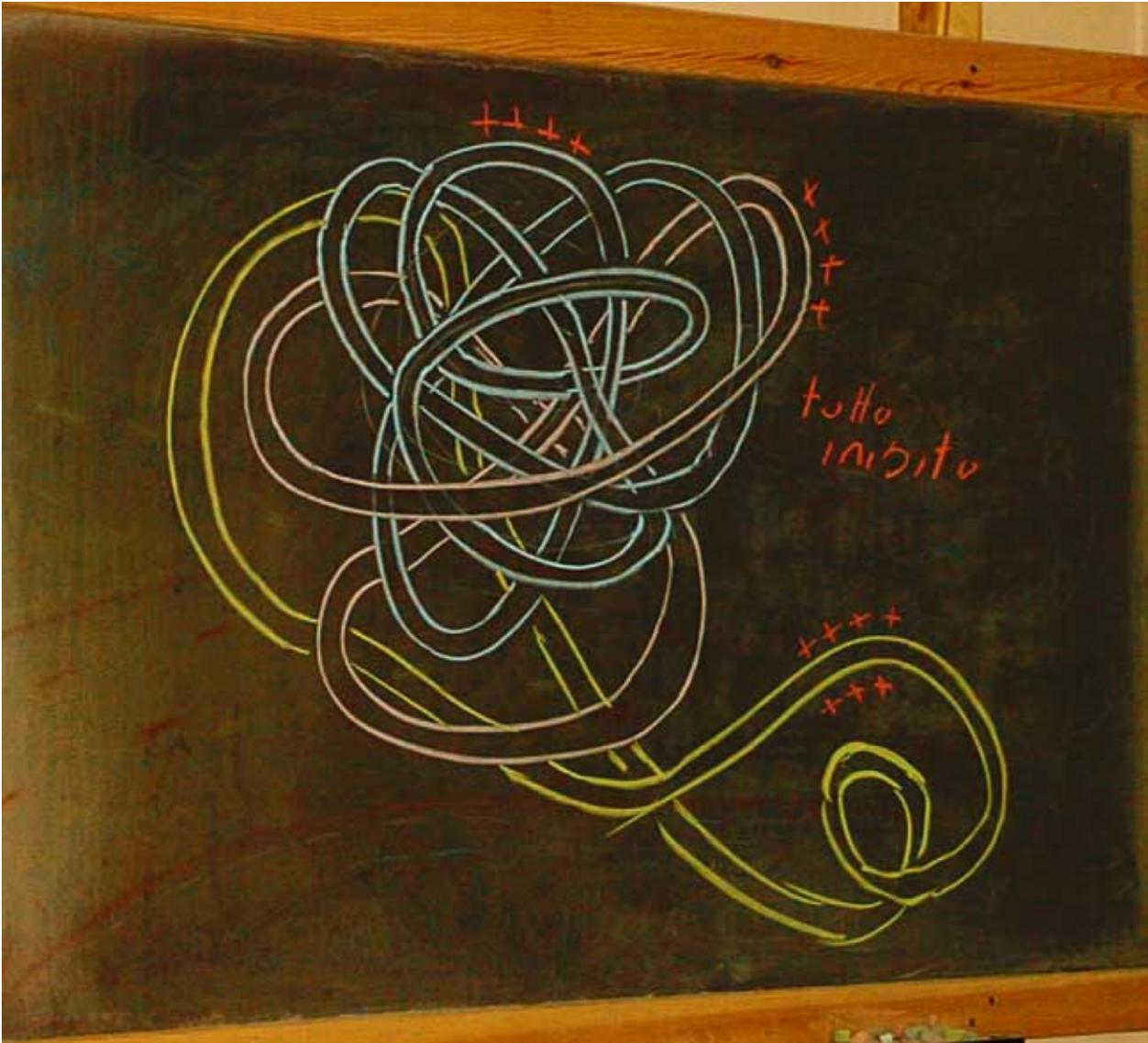
6.5 L'impulso nervoso nella concezione tradizionale della fisiologia. Per comprendere come avviene il meccanismo della conduttività, è necessario ricordare che la membrana di ogni cellula si comporta come una barriera che separa due ambienti: quello all'interno della cellula e quello all'esterno della cellula. I due non presentano le medesime concentrazioni di particelle elettricamente cariche. Questa differenza di concentrazione stabilisce e origina una differenza di potenziale elettrico di circa 70 mV, con la parte interna negativa verso quella esterna. Questo potenziale, che può essere misurato, viene definito e denominato come *potenziale di riposo*. Alcune cellule, quali le nervose muscolari e ghiandolari menzionate in precedenza, se sottoposte a stimoli provenienti dall'esterno, entrano in attività, presentando una variazione transitoria del potenziale di riposo della membrana. Questo nuovo potenziale viene a sua volta definito e denominato *potenziale di azione*. Quando le cellule eccitabili hanno forme opportunamente allungate, la modificazione del potenziale elettrico di riposo non rimane circoscritta alla zona in cui è stato applicato lo stimolo ma tende a propagarsi alle regioni vicine, fino ad interessare tutta la cellula. Questa modificazione dello stato elettrico, che interessa tutta la cellula, viene chiamato *impulso*. A questo punto, riescono più comprensibili le due proprietà fondamentali della cellula nervosa o neurone: l'eccitabilità



411 Tre diversi sistemi nervosi sintetici. In celeste, rosa e giallo tre canali, ognuno dei quali contiene il successivo, di vie nervose a titolo simbolico. Questa struttura simboleggia la concentricità del sistema nervoso. La chiave generale di lettura consiste nel volere sottolineare il fatto che le tre membrane reagiscono a tre perturbazioni chimiche diverse. È quindi possibile inibire il passaggio di cariche al loro interno, andando a modificare la condizione chimica all'esterno di ogni tipo di membrana.

e la conduttività. I più recenti testi di neuroscienze insistono nel non fare confusione tra stimolo esterno e impulso. Lo stimolo è una qualsiasi modificazione dell'ambiente esterno la cui applicazione suscita l'insorgere di un impulso, cioè l'insorgere di una variazione transitoria del potenziale di membrana che poi interesserà rapidamente il resto della cellula. Quindi ciò che si propaga non è lo stimolo, ma l'impulso. Vediamo ora in maniera ordinata che cosa accade quando una cellula nervosa si eccita o, in altri termini, quando in essa si origina e si propaga un impulso.

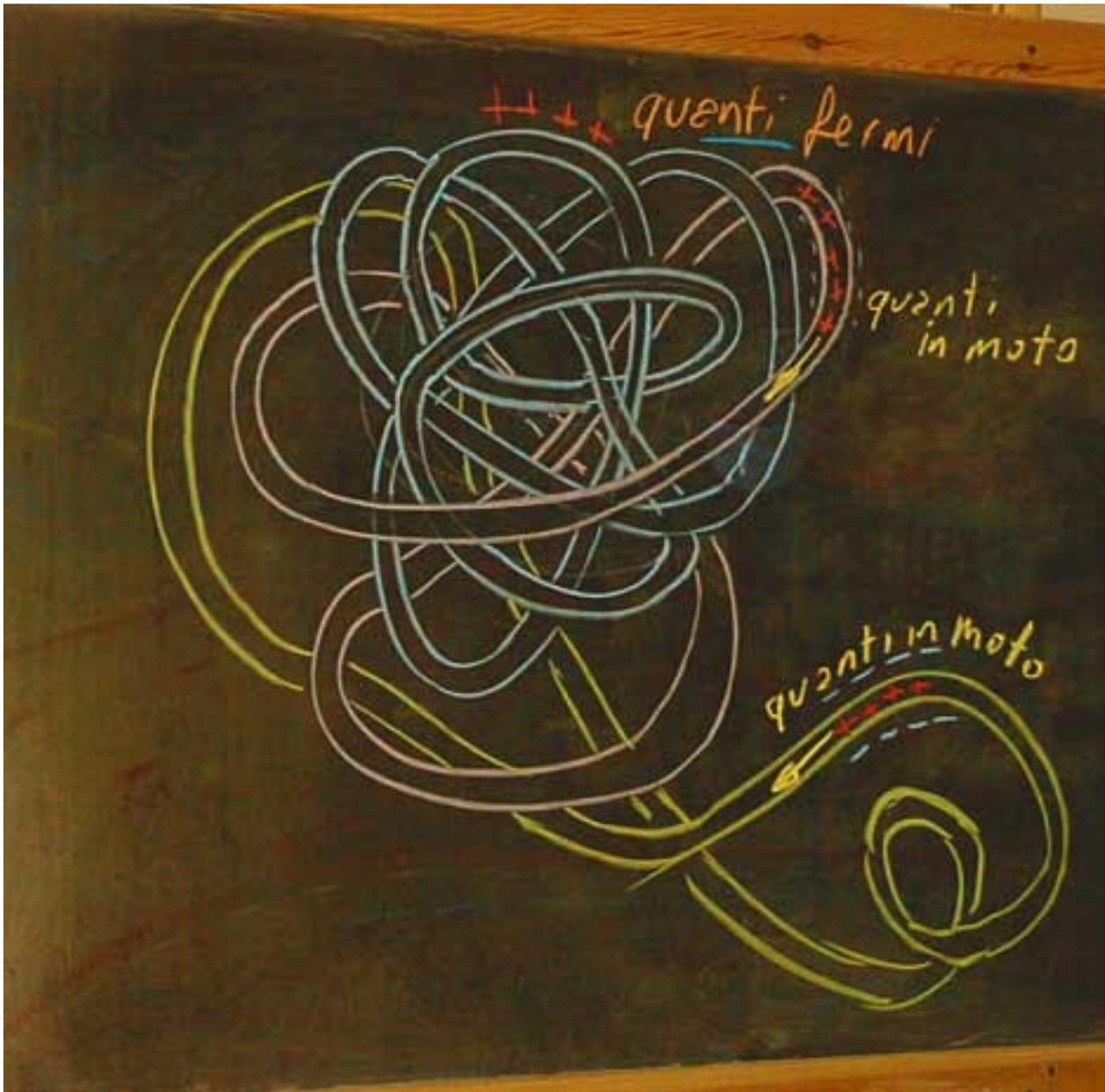
6.6 Potenziale di riposo e potenziale d'azione. È stato dichiarato in precedenza che, in condizioni di riposo, esiste un potenziale elettrico di membrana di circa 70 mV, con interno negativo rispetto all'esterno. Questo potenziale è dovuto al fatto che all'interno e all'esterno della membrana vi sono particelle elettricamente cariche in concentrazioni diverse. All'esterno abbonda il sodio: gli ioni (Na^+) sono in un rapporto di concentrazione di 10 a 1 rispetto alla sua presenza nel liquido intracellulare. All'interno abbonda il potassio (K^+) in un rapporto di concentrazione di 30 a 1 rispetto alla sua presenza nel liquido extracellulare. Deve essere inoltre sottolineato che, in condizioni di riposo, la membrana della cellula nervosa è 50 volte più permeabile al potassio che al sodio. Se ora applichiamo alla cellula uno stimolo, per esempio una ridotta scarica elettrica, osserviamo che il potenziale si innalza da -70 a +30 mV nel giro di 1 ms per poi tornare alle condizioni iniziali in un intervallo di tempo del medesimo ordine di grandezza. Quali fenomeni sono avvenuti per spiegare questa brevissima modificazione? Quando lo stimolo agisce, la membrana risponde modificando la sua permeabilità nella zona in cui è stato applicato lo stimolo. Se, in condizioni di riposo, era più permeabile al potassio, ora diventa più permeabile al sodio in un rapporto di 500 a 1. In tal modo gli ioni Na^+ , dotati di carica positiva e più abbondanti all'esterno della membrana, attraversano in gran numero la membrana stessa, attratti anche dalle cariche negative presenti all'interno della membrana, la cui superficie interna si trova a -70 mV. Il flusso degli ioni Na^+ , diretto verso l'interno della membrana, raggiunge un massimo portando il potenziale locale al livello di +30 mV. A quel punto la permeabilità nei confronti degli ioni Na^+ comincia a diminuire fino a ridursi a zero, mentre comincia ad aumentare la permeabilità nei confronti degli ioni K^+ . Le due reazioni, che avvengono simultaneamente, tendono a ricondurre la membrana nelle con-



412 Totale inibizione. In questa condizione, tutte e tre le membrane si trovano immerse in un campo elettrico positivo rispetto al loro interno e quindi non esistono le condizioni per il passaggio dei quanti.

dizioni fisiche iniziali, vale a dire quelle relative al potenziale di riposo di -70 mvolt, in cui si trovava immediatamente prima dell'arrivo dello stimolo dall'ambiente esterno. L'insieme di tutti i fenomeni appena descritti va a formare quella modificazione transitoria chiamata *impulso*, in un tempo complessivo dell'ordine di 2 ms. Poiché entrambe le famiglie di ioni Na^+ e K^+ sono formate da particelle elettricamente cariche, il loro movimento è accompagnato da un passaggio di corrente elettrica, nella direzione e nel verso del moto delle cariche positive, la quale può essere rivelata e registrata, tramite opportuna amplificazione. Essa costituisce dunque una realtà sperimentale.

6.7 La propagazione di una serie temporale di impulsi. In linea generale si può dire che ogni volta che si verifica un movimento di particelle elettricamente cariche si ha come conseguenza un passaggio di corrente elettrica. A sua volta, il passaggio di corrente elettrica induce il movimento delle particelle cariche che erano ferme prima della descritta evenienza. L'impulso nervoso si propaga come un'onda. Possiamo fornire alcuni esempi, assai utili, perché essi ci condurranno alla scelta di opportuni modelli iconici di equivalenza del fenomeno nervoso e quindi organico con altri fenomeni di natura inorganica, che risultano molto più familiari a coloro che provengono dalla fisica e dall'ingegneria. Il *primo* esempio è fornito dalle onde di acqua che si formano sulla superficie di un lago o di altro specchio stagnante alla caduta di un sasso gettato dall'alto verso il basso, lungo la ben nota verticale gravitazionale. Il sasso costituisce lo stimolo. L'onda è di natura circolare e quindi simmetrica in tutte le direzioni, ma di essa può venire presa in considerazione soltanto una componente radiale. Il *secondo* esempio viene fornito dalle onde acustiche che si propagano lungo un binario ferroviario se questo viene percosso da una martellata secca. La martellata costituisce lo stimolo. L'acciaio della rotaia trasporta la perturbazione meccanica della martellata a distanze notevoli da dove è stata apportata al metallo. Chi lavora al mantenimento della rete ferroviaria sa molto bene come sia possibile anticipare notevolmente l'arrivo di un treno dall'auscultazione della differenza tra il rumore prodotto dalla rotaia in quiete e il rumore che diagnostica la presenza del treno a una certa distanza. Il *terzo* esempio è rappresentato da una miccia innescata al fuoco da un fiammifero. Il fiammifero acceso rappresenta lo stimolo e la fiamma che avanza bruciando la miccia è come



413 Inibizione parziale 1. In questa condizione, la membrana celeste è stata inibita mentre le membrane gialla e rosa hanno la facoltà di lasciar passare i quanti.

l'impulso che viaggia lunga la fibra nervosa. I tre paragoni citati in proposito presentano similitudini o analogie reciproche ma sono anche dotati di sostanziali e profonde diversità. In primo luogo è chiaro che, in tutti e tre gli esempi, la propagazione dell'onda, creata dalla presenza dello stimolo, avviene a spese dell'*habitat* che circonda l'onda stessa.

L'*habitat* della rotaia ha caratteristiche altamente elastiche, vale a dire ripristina assai presto le sue condizioni iniziali ed è quindi in condizione di ricevere altri stimoli, in una modulazione successiva di suoni che ricorda assai da vicino uno strumento musicale come il vibrafono.

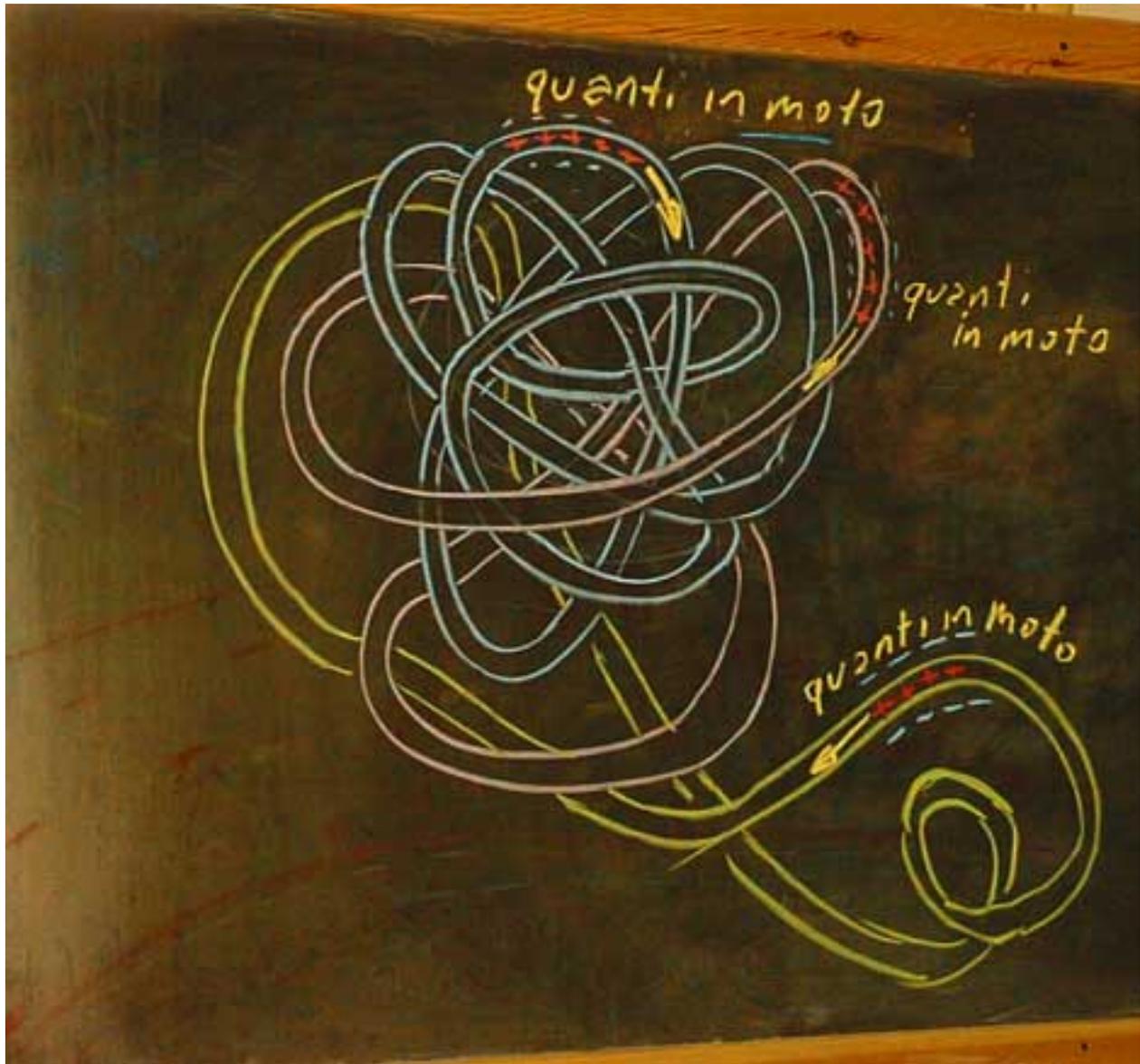
L'*habitat* lacustre non è elastico e deve attendere lo smorzamento completo di tutte le armoniche prima di essere in grado di tornare alle caratteristiche di quiete atte a riprodurre l'effetto della presenza di un secondo stimolo, senza che le onde di propagazione di quest'ultimo interferiscano con quelle del primo stimolo.

Nell'*habitat* pirico il fuoco avanza lungo la miccia lasciandosi alle spalle miccia consumata sotto la specie di cenere. In definitiva, anche l'impulso nervoso avanza sfruttando l'energia fornitagli dalla fibra e, come il fuoco lungo la miccia, ha bisogno di ossigeno. Tuttavia la fibra, a differenza della miccia e con una analogia che sta tra l'acqua e l'acciaio, non si consuma ma è in grado di fornire nuova energia per eventuali e immancabili prossimi impulsi in arrivo.

6.8 Velocità di conduzione. Le fibre nervose non conducono gli impulsi tutti alla stessa velocità. La velocità di propagazione dipende essenzialmente dal diametro della fibra: nelle fibre sottili essa risulta più bassa, nelle fibre più spessa essa risulta più elevata.

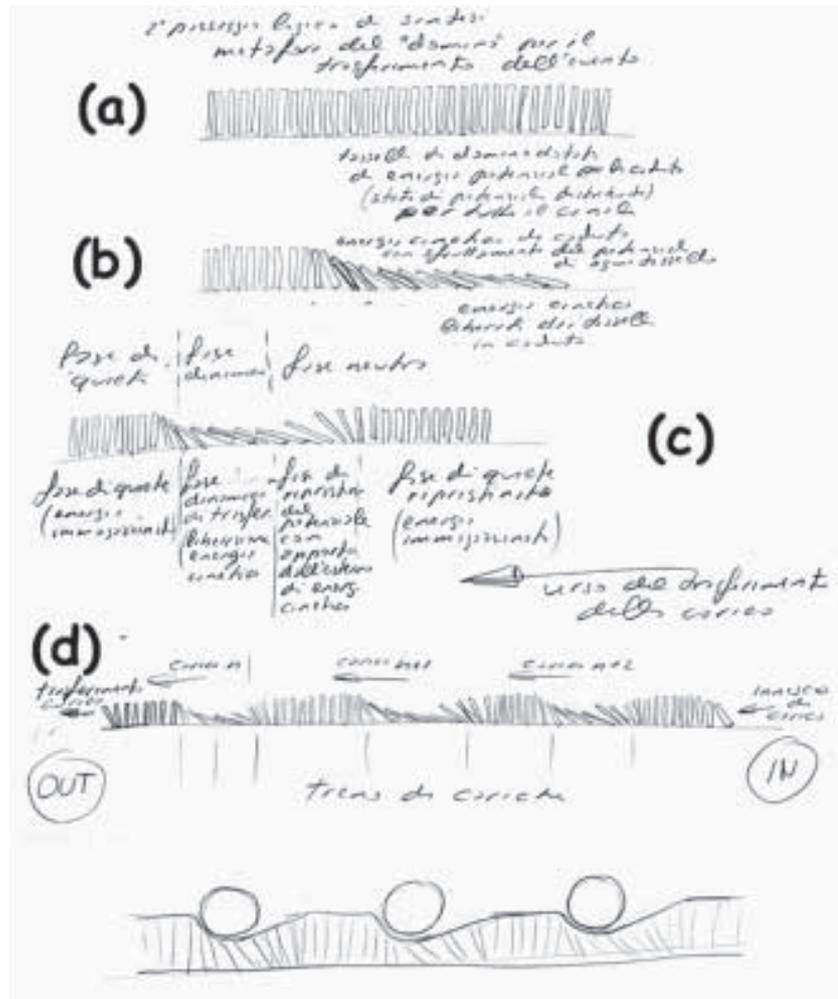
La velocità di conduzione dipende anche dalla circostanza per cui l'assone sia o meno ricoperto di una guaina di mielina: la presenza della mielina implica una velocità di propagazione assai più elevata. Infatti, dato che la guaina di mielina è costituita essenzialmente da uno spesso strato di grassi e di proteine che si interrompe a tratti e opera da isolante, le modificazioni a carico della membrana possono avvenire soltanto nelle regioni in cui la mielina è mancante e quindi dove la membrana è a diretto contatto con l'ambiente esterno.

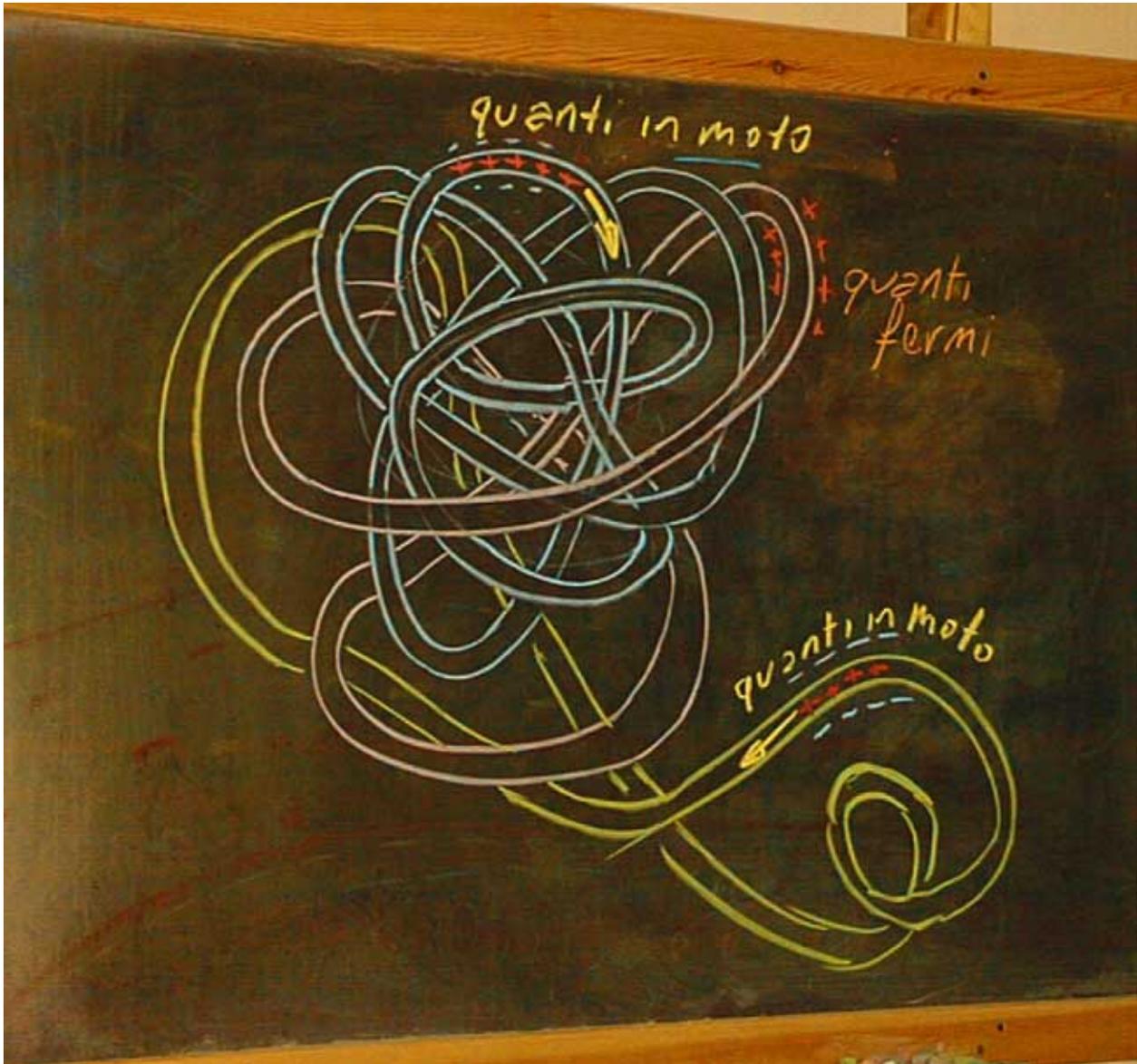
6.9 Schema iconico della propagazione di una serie di impulsi. Nella figura a destra viene fornito il dettaglio della conduzione di segnali elet-



414 Totale apertura. In questa condizione, tutte e tre le membrane permettono il passaggio dei quanti al loro interno.

trici nelle fibre nervose: le velocità tipiche di conduzione vanno da 5 a 120 m/s in ragione della tipologia della fibra in questione. La propagazione del segnale all'interno del canale di trasmissione è un processo di tipo elettrochimico con caratteristiche energivore, cioè avviene a spese dei nutrienti dell'ambiente circostante. Risulta efficace, sia ai fini di una immediata comprensione sia in vista degli obiettivi che il presente lavoro si prefigge nel campo della cibernetica e della robotica, produrre una rappresentazione dinamica del processo sopra descritto. Si pensi alle tessere di un gioco del domino le quali in condizioni di quiete (assenza di segnali nel canale) sono in posizione verticale (a). Il transito di un segnale comporta la caduta progressiva (b) di tutte le tessere secondo un vero e proprio processo a catena, seguita dal ripristino delle condizioni iniziali di verticalità con rispettivi tempi ed energie di ripristino diversi da canale a canale (c). I parametri temporali ed energetici danno conto delle caratteristiche di banda passante del canale stesso: o, più chiaramente, della maggiore o minore capacità che il mezzo trasmissivo ha di veicolare elementi (quanti) di informazione (d). Il canale di trasmissione opera sulla base di regole proprie, che prescindono dalle caratteristiche dello stimolo esterno: qualunque stimolo la cui intensità superi una determinata soglia innesca la creazione di un impulso di ampiezza, forma e velocità di propagazione tipiche del canale stesso. Il per-





415 Inibizione della membrana intermedia.

manere delle condizioni di stimolo sopra la soglia determina la formazione di un treno di impulsi tra loro simili ma distanziati nel tempo. Per quanto riguarda le caratteristiche spaziali del singolo impulso, sorge tuttavia un dubbio: l'impulso tipico della durata di 2 ms che si propaga con velocità comprese tra 5 e 120 m/s occupa una porzione di canale della dimensione lineare compresa tra 1 cm e 25 cm circa, chiaramente esorbitante rispetto alle lunghezze caratteristiche dei neuroni contenuti nel cervello umano. Tuttavia, i fenomeni di comunicazione intercellulare, fino all'integrazione, alla memoria, al comportamento e, infine, al pensiero, devono necessariamente coinvolgere durate temporale di impulsi e intervalli lineari di transito rispettivamente compresi tra 1 μ s e 1ns e tra 1 μ m e 1nm, o anche inferiori, pur restando invariate le velocità macroscopiche di propagazione.

Queste circostanze inducono a pensare che l'indagine vada orientata verso lo studio di fenomeni a scala molecolare se non atomica. Su questo argomento torneremo per i necessari approfondimenti.