LEZIONE VI. (*)

Sui fenomeni fisico-chimici dei corpi viventi

DEL PROF. CARLO MATTEUCCI.

Respirazione — Endosmosi gasoso.

L'azione dell'ossigeno dell'aria atmosferica sul sangue venoso, le variazioni che avvengono nell'aria inspirata introdotta nelle cellule polmonari, le modificazioni provate dal sangue che scorre nella rete capillare distesa sulle pareti sottilissime delle *vescichette aeree*; ecco i fenomeni principali che costituiscono la funzione della *respirazione* degli animali, e che formeranno il soggetto di questa Lezione.

Non v'è animale, sia preso pure fra i gradi più infimi dell'organizzazione, la di cui vita non sia essenzialmente legata alle modificazioni che induce nella sua sostanza l'ossigeno atmosferico. Secondo la sua diversa struttura, gli organi in cui quest'azione ha luogo sono più o meno sviluppati, ed hanno forma ed organizzazione diversa, secondo il mezzo in cui l'animale vive abitualmente. Così nei pesci l'organo della respirazione è una membrana mucosa ripiegata più volte sopra se stessa, divisa in filamenti o in lamine, ripiena di vasi sanguigni, la quale trovasi costantemente a contatto dell'acqua che s'introduce nella loro bocca e si espelle per le fessure branchiali. Tutto in questi animali è disposto perchè il contatto fra l'acqua, in cui è disciolta l'aria atmosferica, e le pareti vascolari si faccia sopra una superficie la più estesa possibile. In una *razza* ordinaria, le branchie hanno una superficie di 2250 pollici quadrati.

Nei rettili, negli uccelli, nei mammiferi l'organo respiratorio consiste in una espansione dei bronchi ramificati a guisa d'un albero, le di cui estremità più sottili terminano in un gran numero di vescichette emisferiche, addossate le une alle altre, circondate da sottilissimi vasi sanguigni. Alcuni rettili, almeno nei primi tempi, della loro vita, parte-

(1) Le cinque antecedenti, trovansi inserite nella Parte Prima - *Miscellanea Medico-Chirurgico-Farmaceutiche* - dal N. 13 al N. 16,

cipano della respirazione dei pesci e di quella dei mammiferi, per cui hanno ad un tempo branchie e polmoni.

I movimenti necessari a questa funzione, dei quali alcuni sono involontarii, altri dipendono dalla volontà, possono ridursi a un atto d' introduzione d'aria e ad un altro di emissione. Tutte le vie aeree dell'apparecchio respiratorio si dilatano nell'*inspirazione*, tutte si restringono nell'*espirazione*. L'azione riunita della forza muscolare, dell'elasticità delle parti ossee e cartilaginee del torace, quella propria delle pareti delle vescichette aeree, infine le proprietà fisiche dell'aria, formano le cagioni dei movimenti della funzione respiratoria. Tutta la cavità toracica si dilata nell'inspirazione e l'aria precipita nei bronchi; nell'espirazione questa cavità si restringe, le cellule aeree del polmone per la loro elasticità riprendono il volume primitivo, e l'aria così compressa e divenuta anche più elastica per il riscaldamento subito nel polmone è spinta al di fuori. Il giuoco semplice d' un soffiello vi rappresenta tutto il meccanismo dei movimenti respiratorii.

Nei pesci questo movimento ha luogo senza il concorso delle coste, gli archi branchiali si aprono, le lamine si separano, ha luogo il contatto fra esse e l'acqua, poi si richiudono e l'acqua esce per la fessura branchiale che rimane aperta intanto che l'opercolo si abbassa. Negli animali inferiori la respirazione è meno pressante, e i movimenti della funzione respiratoria sono quasi involontarii. Negli anelidi, nei molluschi la corrente dell'acqua, in cui è disciolta l'aria, sembra aiutata dai movimenti vibratili proprii dei *cigli* impiantati sulle branchie dei medesimi.

L'uomo in una inspirazione introduce nel polmone circa un terzo di litro d'aria atmosferica; l'aria espirata contiene da 3 a 5 per 100 d'acido carbonico, e in una espirazione molto profonda vi si trovano anche da 6 ad 8 per 100 d'acido carbonico. L'aria introdotta ha intanto perduto da 4 a 6 per 100 del suo ossigene.

I numeri che qui vi cito sono scelti, fra i tanti che abbiamo, come quelli che mi sembrano degni della maggiore fiducia. È facile di calcolare con questi dati quanto ossigene si consuma dall'uomo nella respirazione d'un giorno, ammettendo che si facciano da 15 a 20 inspirazioni in un minuto. Secondo Lavoisier e Seguin l'ossigene consumato in un giorno nella respirazione d'un uomo adulto è in peso di 1015 grammi. L'ossigene che scompare nel-

la respirazione dell' uomo e degli uccelli trovasi sensibilmente in volume eguale all' acido carbonico che si espira. Si è trovato da qualche osservatore molto diligente, che il volume dell' ossigeno scomparso nella respirazione supera quello dell' acido carbonico prodotto. Questa differenza è specialmente marcata nei carnivori, nei quali Dulong ha trovato che l' ossigeno scomparso è qualche volta doppio in volume dell' acido carbonico espirato.

Dulong e Despretz hanno messo fuori di dubbio che facendo respirare un animale in un volume determinato d' aria, una quantità notevole d' azoto è costantemente espirata. Questo fatto dimostra che l' azoto così esalato in eccesso ha origine dagli alimenti, e forse anche da quell' azoto che abbiamo visto trovarsi nello stomaco e negli intestini, come residuo dell' aria ingerita. E se la quantità dell' azoto rimane costante nell' aria atmosferica, Bous-singault ha provato che ciò proveniva dall' assorbimento che alcune piante fanno di questo gas.

Questi stessi cangiamenti che la respirazione produce nella composizione dell' aria atmosferica inspirata avvengono pure nell' aria disciolta nell' acqua. Si sa che nell' acqua comune e nell' acqua del mare, sta sciolta una certa quantità d' aria atmosferica che se ne va coll' ebullizione dell' acqua stessa, o mettendo l' acqua in contatto di gas diversi da quelli che vi son disciolti, o togliendole col vuoto la presenza dell' aria atmosferica. Questi fenomeni interamente fisici si operano colle leggi ben note dell' assorbimento dei gas dai liquidi, trovate da Dalton.

Le sperienze recenti di Morren hanno pure stabilito che v' è una certa quantità d' acido carbonico disciolta in quelle acque, la quale sembra variare in ragione inversa dell' ossigeno che vi è insieme contenuto. La proporzione dell' ossigeno trovata in un dato volume d' aria disciolta nell' acqua, supera quella in cui si trova nell' aria atmosferica. Humboldt e Gay-Lussac trovarono nell' aria dell' acqua dolce 32 per 100 d' ossigeno. L' ossigeno secondo Morren sembra variare nell' acqua del mare nelle diverse ore del giorno ed essere al massimo sul mezzogiorno, e il contrario accadere per l' acido carbonico.

I pesci consumano una porzione di quest' ossigeno disciolto e restituiscono acido carbonico che si trova così disciolto nell' acqua, e non è che per la successiva dissoluzione di nuova aria atmosferica, e per il successivo e-

scirne dell'acido carbonico, che la respirazione di questi animali può continuarsi: perciò nell'acqua privata dell'aria per l'ebullizione e nell'acqua coperta d'olio, i pesci cessano presto di vivere. Riferirò qui una mia esperienza fatta, è già molto tempo, sulla respirazione della torpedine. L'aria disciolta nell'acqua dell'Adriatico presa presso la spiaggia si componeva per 100 di 11 d'acido carbonico, di 60,5 d'azoto, di 29,5 d'ossigeno. Una grossa torpedine fu tenuta per lo spazio di 45 minuti in poco più di 4 litri di quest'acqua: la torpedine fu irritata spesso, e se ne ebbero molte scosse, a modo che cessò presto di vivere. L'aria disciolta nell'acqua non conteneva più tracce d'ossigeno ed invece v'erano 36 per 100 d'acido carbonico, e il rimanente d'azoto. Furono dunque consumate nella respirazione della torpedine 29,5 parti d'ossigeno e furono restituite 25 d'acido carbonico.

L'esperienza ha provato che i descritti cangiamenti dell'aria atmosferica, in contatto d'un animale vivo, non solo avvengono nell'organo polmonare, ma che tutta la superficie del corpo dell'animale può operare in un grado diverso simili cangiamenti. Le rane a cui furono tolti i polmoni, o venne in altri modi impedita la respirazione, continuarono a vivere, e poste in una determinata quantità d'aria si trovò dopo un certo tempo scomparsa una porzione dell'ossigeno, e in sua vece reso l'acido carbonico. Humboldt e Provençal hanno visto le tinche vivere senza gran patimento, avendo la testa e le branchie fuori dell'acqua e il solo corpo immerso. Spallanzani ed Edwards hanno di più provato che la respirazione cutanea è essenziale nei batracchi, di modo che le rane vivono molti giorni senza polmoni, mentre periscono dopo poche ore, se sono scorticate o verniciate alla cute. Sorg tenne per quattro ore un suo braccio in un vaso pieno di gas ossigeno, e trovò che due terzi circa di questo gas era scomparso. Davy analizzando l'aria soffiata in una delle pleure d'un cane trovò non contener dopo un certo tempo che qualche traccia d'ossigeno.

Il meccanismo della respirazione, i cangiamenti chimici che accompagnano questa funzione si operano dunque in tutti gli animali, nell'istessa maniera. L'ossigeno scomparire a contatto degli organi respiratorii degli animali, l'acido carbonico nello stesso tempo si esala da questi or-

gani; v'è un eccesso d'azoto nell'aria espirata su quello dell'inspirata; il volume dell'acido carbonico espirato non è mai maggiore di quello dell'ossigeno scomparso, e in certi animali non è che la metà; l'aria espirata esce saturata di vapor acqueo.

Intanto che la funzione respiratoria opera nell'aria atmosferica i cangiamenti di cui v'ho parlato, cosa avviene nell'organismo? Non v'ha alcuno di voi che ignori che nella respirazione il sangue venoso spinto nel polmone, cangia il suo nero colore in un bel colore vermiglio, diviene arterioso, è rimandato al cuore e da quest'organo a tutte le parti del corpo. La più piccola interruzione di questo cangiamento del sangue cagiona l'asfissia, la morte.

Potrei descrivervi centinaia d'esperienze che vi proverebbero, che il cangiamento del sangue venoso in arterioso si fa nel polmone, nell'atto della respirazione. Bichat tagliò in un cane la trachea e un'arteria, ed applicò prontamente ad ognuno di questi vasi un *robinet*: chiudendo il *robinet* della trachea poco dopo una inspirazione, il sangue arterioso cominciava ad escire nerastro, e non era passato un minuto che appariva completamente venoso. Rifacendo l'esperienza chiudendo il *robinet* della trachea subito dopo una espirazione, il sangue arterioso esciva nero dopo pochi secondi. Togliendo con una pompa convenientemente disposta l'aria dal polmone, il sangue esciva dall'arteria immediatamente nero, e se al contrario si spingeva un poco d'aria nel polmone il sangue più lungamente esciva col suo colore vermiglio. Avendo cura di aprire di tanto in tanto il *robinet* della trachea, si vedeva alternativamente un'ondata di sangue vermiglio succedere a quella di sangue nero. Eccovi un coniglio alla cui trachea è stato unito un *robinet*; osservate il peritoneo messo allo scoperto e vedrete la tinta rossa dei suoi vasi cambiarsi in un bruno-oscuro, se il *robinet* sta chiuso per qualche minuto, e riconparire col suo colore, riaperto il *robinet*. I tessuti di tutte le parti del corpo, i reni, i muscoli, la lingua, le labbra, prendono il colore nerastro negli asfissii.

Tagliate i due nervi pneumogastrici in un animale qualunque; i movimenti respiratorii non tarderanno a turbarsi, e nello stesso tempo il sangue rimarrà nerastro, e le labbra, le narici, le fauci dell'animale perderanno il loro color rosso.

Se invece d'introdurre nel polmone d'un animale aria atmosferica si fa respirare l'animale nel gas azoto, nell'idrogene carbonato, nell'idrogene puro, nell'ossido di carbonio, nell'acido carbonico, nel deutossido d'azoto, nell'idrogene solforato, la morte succederà più o meno prontamente, e non troverete che sangue nero per tutto il corpo. All'infuori dell'aria atmosferica, l'ossigene e il gas protossido d'azoto, possono per un qualche tempo mantenere la respirazione. Forse nell'ossigene questa funzione potrebbe lungamente mantenersi: ma respirando questo gas, i movimenti respiratorii si fanno più frequenti, le pulsazioni arteriose si accelerano, e il sangue prende per tutto un color scarlatto vivacissimo. Nel protossido di azoto, la respirazione si prolunga per qualche minuto senza gravi inconvenienti, ma come nell'ossigene il movimento respiratorio è accelerato, sono turbate le funzioni sensoriali, e succede una specie d'inebriamento.

Conosciamo dunque i fenomeni che avvengono nell'atto della respirazione tanto nell'aria, quanto nell'organismo: ossigene assorbito, acido carbonico esalato, sangue nerastro venoso cangiato in sangue vermiglio arterioso; e questi due cangiamenti in uno stesso organo in cui per la sua particolare struttura, l'aria atmosferica, che perde il suo ossigene, e il sangue venoso che diviene vermiglio, si trovano quasi a contatto o separati da una membrana estremamente sottile.

Questi cangiamenti dell'aria e del sangue sono essi un fenomeno che si opera nel solo corpo vivente? Accade fra l'ossigene dell'aria atmosferica, e il sangue venoso fuori del corpo vivente, anche da qualche tempo, un cangiamento simile a quello che avviene nella respirazione? L'esperienza la più facile risponderà presto a queste domande, e non vi lascerà dubbio sulla natura assolutamente fisico-chimica di questa funzione.

Eccovi una massa di sangue coagulato da qualche ora, e che vedete rosso alla superficie e d'un colore nerastro nella nuova superficie che vi mostro col taglio. Non passeranno pochi minuti che prenderà il color rosso anche questa nuova superficie. Spingo un getto d'acido carbonico sulla superficie rossa di questo coagulo, e ben presto diverrà nerastro. Spingo questo stesso gas attraverso un liquido formato con sangue disciolto nell'acqua e dopo poco il color del liquido diviene nerastro. Questo liquido così

nerastro lo verso in una boccia piena di gas ossigene, lo agito per pochi istanti, e l' suo colore nerastro si cangia in vermiglio.

Sin dai tempi di Priestley si sapeva che, se questo sangue fatto nerastro coll'acido carbonico, si teneva in una vescica umida e quindi si metteva a contatto dell'ossigene, diveniva rosso egualmente e che perciò lo strato interposto della membrana umida non impediva il cangiamento di colore. È dunque provato dall'esperienza che il cangiamento del colore nero del sangue in vermiglio che accompagna costantemente l'introduzione dell'ossigene nelle vescichette aeree dell'animale vivente, in circostanze identiche a quelle or ora indicate, è un fenomeno interamente di natura fisico-chimica, consistente nell'azione dell'ossigene sopra un liquido preparato dall'organismo vivente.

Quale è dunque la natura di questo fenomeno, con quali egli si opera? Ecco le particolarità di cui dobbiamo ancora occuparci.

Se si raccoglie il sangue venoso che esce al ferire una vena in un animale vivo, in un recipiente che contenga gas idrogene puro e indi si agita questo sangue nel gas suddetto, vi si trova tal porzione d'acido carbonico, che di certo non è il prodotto di nessuna combinazione chimica del gas idrogene cogli elementi del sangue, nè può dirsi discacciato dal sangue per l'affinità dell'idrogene col corpo con cui potrebbe supporre combinato l'acido carbonico. Il gas acido carbonico esiste dunque disciolto nel sangue stesso, ed è discacciato dall'idrogene per quell'azione che ha un gas sopra gas di natura diversa disciolti in un liquido. Se invece di sangue venoso si fosse operato sull'arterioso si sarebbe trovata una quantità minore d'acido carbonico emessa dal sangue. Anche l'azoto, adoperato invece dell'idrogene produce in contatto del sangue una emissione d'acido carbonico in quantità più che doppia dal venoso, di quella che proviene dall'arterioso. Nè il solo acido carbonico può con questo mezzo aversi dal sangue, giacchè insieme ad esso escono ancora l'ossigene e l'azoto: ed è provato dalle esperienze esattissime di Magnus, che la quantità d'ossigene che è emessa e che esiste per conseguenza nel sangue venoso, è minore della metà di quella dell'ossigene esistente nel sangue arterioso. I risultamenti di Magnus meritano tanta fiducia, e sono d'altra parte tanto importanti che io credo di dovervi

qui dare i numeri trovati da questo chimico. Magnus ha estratto ed analizzato i gas disciolti nel sangue con un apparecchio particolare per mezzo del quale si faceva il vuoto sul sangue stesso, e se ne raccoglievano i gas che così escivano. Se io introducessi una certa quantità di sangue, appena estratto dall' animale, nel vuoto del barometro, vedreste abbassarsi grandemente la colonna di mercurio, e potreste anche in questa maniera raccogliere i gas del sangue. Ecco i numeri di Magnus ridotti ai volumi dei diversi gas esistenti in 1000 parti in volume di sangue.

Sangue venoso		Sangue arterioso	
di Cavallo	di Vitello	di Cavallo	di Vitello
Ac. Carb. 547 = 0,6889 —	536 = 0,7765 ..	702 = 0,6679 —	703 = 0,6043
Ossigeno 128 = 0,1613 —	95 = 0,1326 ..	250 = 0,2378 —	279 = 0,2398
Azoto .. 119 = 0,1498 —	65 = 0,0909 ..	99 = 0,0943 —	180 = 0,1537
<hr/>		<hr/>	
Somma 794	716	1051	1163

Evidentemente i gas trovati da Magnus nel sangue nelle proporzioni riferite, non possono esservi che disciolti, poichè non è che in questo stato, che possono ottenersi liberi per la presenza di altri gas o nel vuoto. Nel sangue arterioso il rapporto fra il volume dell' ossigene e quello dell' acido carbonico è all' incirca di 1 : 2, nel venoso invece questo rapporto è di 1 : 5.

L' ossigene dell' aria atmosferica portato a contatto del sangue venoso, scaccia adunque una porzione d' acido carbonico, e vi si discioglie in sua vece.

Abbiamo veduto che il cangiamento di colore che subisce il sangue venoso per divenire arterioso, operato dall' azione dell' ossigene, avviene anche allorchè questo ossigene è separato dal sangue per mezzo d' una membrana. Importa ora di provare che questi fenomeni, cioè l' azione reciproca dei gas e il cangiamento di colore nel sangue, s' operano fuori del corpo vivente, attraverso a strati di membrana e con leggi interamente fisiche.

Un gas qualunque contenuto in una vescica ben chiusa, non tarda molto ad escire dai pori della medesima e intanto l' aria atmosferica vi penetra in sua vece. Se il gas esterno non fosse d' un volume indefinito rispetto al

volume del gas contenuto nella vescica, verrebbe presto arrestato il cambio dei gas, e tanto al difuori che al di dentro si troverebbe un miscuglio dei due gas. Ponete una vescica piena d'acqua leggermente acidulata con acido carbonico, sotto una campana piena di gas idrogeno d'ossigene, d'azoto, e una porzione dell'acido carbonico abbandonerà l'acqua, si troverà libera nella campana mentre una porzione del gas esterno si sarà in sua vece disciolta nell'acqua. In generale due gas uno dei quali libero o in dissoluzione in un liquido e un altro separato dal primo per mezzo d'una membrana, operano l'uno sull'altro, si mescolano in rapporti determinati.

Sarebbe a desiderarsi che una lunga serie d'esperimenti determinasse le leggi di questo fenomeno, in relazione alla natura reciproca dei gas, delle loro densità, della natura delle membrane interposte. Forse un fenomeno analogo a quello dell'endosmosi avviene fra i gas. Eccovi una esperienza che vi proverà, come si barattano i gas attraverso le membrane, e come anche qualche cosa d'analogo all'endosmosi vi è in questo cambio. Riempio in parte di gas ossigene il polmone d'un agnello ucciso, son pochi istanti, e dopo averlo vuotato col succhiamento dell'aria, per quanto mi fu possibile. Legata strettamente la trachea, introduco il polmone in una campana piena di acido carbonico, rovesciata sull'acqua. Dopo pochi istanti si vede il polmone gonfiarsi e distendersi per quanto gli permette la capacità della campana. Analizzo il gas dopo l'esperimento e trovo che l'acido carbonico è penetrato nelle cellule polmonari, che l'ossigene è uscito da queste; il cambio però non è stato in volumi eguali, e l'acido carbonico introdotto è in maggior quantità dell'ossigene uscito. In un polmone preparato al modo descritto, trovai dopo quattro ore, che il gas contenuto entro il medesimo era composto di $\frac{1}{4}$ di ossigene e di $\frac{3}{4}$ di acido carbonico; mentre quello che era nella campana risultava da $\frac{2}{5}$ d'ossigene e da $\frac{1}{5}$ d'acido carbonico.

Le bolle di sapone piene d'aria atmosferica o d'idrogeno fatte cadere nell'acido carbonico hanno mostrato al Marianini un fenomeno simile a quello osservato nel polmone. Le bolle gonfiano, ed è curioso che nel gonfiare cadono in fondo al vaso che contiene il gas acido carbonico. L'eccesso dell'acido carbonico penetrato nella bolla e che cagiona l'aumento di volume, produce un aumento di peso

che fa equilibrio alla diminuzione che essa soffre per il suo aumento di volume, ma intanto il velo d'acqua della bolla discioglie certamente acido carbonico e diviene così più pesante.

Ho provato a tenere una vescica ben chiusa, a pareti sottilissime, piena di gas ossigeno in contatto dell'acido carbonico, avendo cura che la vescica non fosse bagnata. Il gonfiamento non avviene, ma bensì dopo un certo tempo si trova che il cambio fra i due gas ha avuto luogo, senza però che l'acido carbonico introdotto superi l'ossigeno uscito. Ho provato in fine ad empire interamente il polmone d'acido carbonico e così introdurlo nell'ossigeno: il polmone si sgonfia, i due gas si mescolano, ma l'ossigeno che entra è meno dell'acido carbonico che esce. In tutti questi fatti, oltre all'azione reciproca dei due gas attraverso alle membrane, conviene tener conto della presenza dell'acqua, che bagna la membrana, e in cui l'acido carbonico è solubile. Il liquido acido così formato si trova da una parte in presenza d'un gas diverso da quello disciolto, rispetto al quale il gas libero agisce come uno spazio vuoto. Potrebbe dunque intendere l'introduzione maggiore dell'acido carbonico, nel polmone o nella bolla, attribuendolo o ad una azione particolare dei due gas, ciò che costituirebbe l'endosmosi gasoso, e ad un effetto del gas prima disciolto, poi esalato. Per rischiarare questa questione fa d'uopo ricorrere a gas che non abbiano affinità per l'acqua. E d'un tal soggetto che mi occupo presentemente.

Alcuni fatti di Fisiologia sperimentale che mi rimangono a citarvi, porteranno tutta l'evidenza nelle nostre conclusioni. Alcune rane, alle quali Spallanzani, Nysten, Martigny, Edwards, avevano colla compressione del petto e dell'addome, con tutte le cure proprie di questi diligenti osservatori, tolta l'aria dei polmoni, furono messe talora nell'idrogeno, talora nel gas azoto. Cani, conigli e molti altri animali furono ora nel modo descritto, ora con respirazioni artificiali, assoggettati ad esperimento. Si trovò costantemente che il gas idrogeno o l'azoto erano assorbiti, e che in loro vece si esalava acido carbonico, e azoto. Nell'azoto puro si esalava il solo acido carbonico. Introducendo, dopo aver vuotato il polmone con una siringa, un miscuglio assai più carico d'ossigeno dell'aria atmosferica, si trovò che l'acido carbonico esalato era in proporzione assai maggiore di quello in cui si esala nel-

la respirazione dell'aria. Le rane emettono acido carbonico nell'idrogeno e nell'azoto, anche quando sono state prima private dei polmoni.

Non possiamo dopo tutto ciò che si è detto esitare a concludere, che la funzione respiratoria è un fenomeno puramente fisico-chimico; che i gas disciolti nel sangue venoso si fanno liberi per l'assorbimento d'altri gas; che una porzione dell'acido carbonico, esistente in maggior copia nel sangue venoso che nell'arterioso, è esalata per l'assorbimento che fa questo stesso sangue del gas ossigeno dell'atmosfera; che non è nei polmoni, dove, almeno per la massima parte, si forma l'acido carbonico espirato; che questo esiste disciolto nel sangue venoso e che si rende libero nell'atto della respirazione, in presenza dell'ossigeno che s'introduce in sua vece, come si rende libero in presenza dell'azoto o dell'idrogeno nelle respirazioni artificiali di questi gas; che per le sperienze di Magnus risulta essere disciolta nelle 5 libbre di sangue che traversano il polmone in un minuto, una quantità d'acido carbonico che supera quasi del doppio quella che si espira nello stesso tempo.