Dinamica del punto materiale.

Per poter proseguire nello studio del moto dei corpi dobbiamo introdurre un concetto nuovo e precisamente quello di forza come causa del cambiamento dello stato di moto dei corpi. Nello studio della Cinematica era sufficiente disporre dei metodi sperimentali per la misura di lunghezza ed intervalli di tempo; ciò in sostanza viene fatto mediante regoli ed orologi tarati opportunamente con opportuni campioni convenzionalmente adottati come unità di misura. Per quello che concerne la teoria della misura i presupposti erano già stati dati nell' antichità sopratutto da Euclide ed Archimede. Nel caso della lunghezza è adottato il metro campione, un regolo di materiale opportuno, conservato nell' ufficio internazionale di Pesi e Misure di Parigi. Nel caso della misura di intervalli di tempo l' unità è di origine astronomica ed è il secondo solare medio cioè $\frac{1}{86400}$ del giorno solare medio. I confronti di lunghezze si possono fare con la precisione di qualche frazione della lunghezza d ' onda della luce gialla (circa 10^{-7} metri) mentre i confronti di intervalli di tempo si eseguono con la precisione di 10^{-12} sec. Si pone quindi il problema di trovare dei procedimenti per definire operativamente un campione di forza riproducibile e di realizzare la divisione in multipli e settomultipli. Il problema è complicato dal fatto che le forze hanno carattere vettoriale come l' esperienza c' insegna. Dato che la geometria c' insegna a determinare convenientemente la direzione, si tratta di stabilire un metodo per la misura del modulo del vettore forza detto anche intensità della forza. A tale scopo ci aiuta l' esistenza di corpi (naturali o anche prodotti artificialmente) detti "elastici". Tali corpi hanno la proprietà che le deformazioni prodotte dall' azione di forze esercitate su di essi risultano proporzionali all' intensità delle forze, entro certi limiti. Introduciamo pertanto uno strumento, detto dinamometro, il quale sostanzialmente consiste di una molla elastica ed una scala graduata. Le deformazioni longitudinali (allungamenti o accorciamenti) della molla sono misurate sulla scala graduata. In base alla definizione di corpo elastico tali deformazioni sono proporzionali all' intensità della forza applicata all' estremità della molla. Quivi sembra di essere arrivati in un circolo vizioso: infatti pretendiamo di misurare l' intensità delle forze da letture sul dinamometro presupponendo la validità generale della proprietà dei corpi elastici la quale può essere verificata solo se conosciamo a priori le intensità delle forze applicate alla molla.

Per girare l' ostacolo si fanno le seguenti constatazioni. Sulla superficie terrestre tutti i corpi sono soggetti ad un tipo di forza che è la forza peso, diretta verticalmente verso il basso. Possiamo verificare che preso un materiale allo stato solido di forma geometrica semplice (cubo,sfera etc. .....) e suddiviso in un numero dato di volumi uguali $V' = \frac{V}{n}$, dove V è il volume originale, le deformazioni prodotte dal peso di essi sul dinamometro tendono ad essere tanto più uguali quanto più omogenee è il materiale di partenza, cioè mancanza di impurità ed assenza di cavità all' interno di esso. Perfezionando la costruzione di tali volumi V' uguali (cioè verificandone l' omogeneità mediante il dinamometro) possiamo constatare che le deformazioni prodotte dai pesi realizzati da 1, 2,.,. ...... n volumi dati sono indicate sulla scala graduata da numeri del tipo a, 2a, ... n a, almeno per pesi non troppo grandi, tali cioè da provocare deformazioni permanenti della molla.

Verificata così la proporzionalità della deformazione alla forza peso basta introdurre un corpo di riferimento che con il suo peso realizza su di un dinamometro dato la deformazione unitaria. La graduazione lineare della scala del dinamometro sarà un indicatore di un multiplo e settomultiplo qualsiasi dell' intensità di una forza qualsiasi dato che pensiamo la forza - peso una particolare forza la cui natura non cambia passando ad altre forze di qualsiasi tipo.

Il vantaggi della forza - peso è dovuta al fatto della sua costanza nel tempo se il corpo non viene alterato nella sua struttura.

Come corpo campione viene conservato presso l' Ufficio Internazionale di Pesi e Misure di Parigi un blocco di lega di platino ed iridio data la particolare resistenza di questo materiale alla corrosione chimica.

Tale corpo realizza con il suo peso, a Parigi, l'unità di forza ed é chiamato chilogrammo peso(kg_p).L'inalterabilità del corpo garantisce la bontà del campione tempo.Possiamo dire altrettanto della sua bontà nel trasporto in qualsiasi altro posto della Terra diverso da Parigi? Ciò implicherebbe che il peso di un dato corpo é indipendente dalla sua posizione sulla Terra ,il ché é verificato non esser vero. Sappiamo infatti che allontanandosi dalla Terra il peso di un corpo diminuisce fino ad arrivare ad annullarsi.Restando però sulla superficie terrestre le variazioni di peso di un dato corpo non superano l'uno per cento del suo valore in un dato punto.In base a questa osservazione fu costruito un sistema di unità di misure in cui oltre al metro ed al secondo solare medio viene presa come terza unità fondamentale la forza (o meglio la sua intensità);tale sistema viene detto " pratico" ed é ancora oggi un uso in ingegneria.Si può dimostrare a posteriori che l'introduzione della terza unità fondamentale é sufficiente per lo studio della Meccanica ed anche della Termodinamica.L'imprecisione che deriva dal sistema pratico può essere ovviata con le seguenti considerazioni dovute a Galileo.La forza-peso non equilibrata da vincoli,é responsabile della caduta dei gravi,il moto di caduta dei gravi,soggetti alla sola forzapeso é tale che si può determinareperfettamente se si suppone che l'accelerazione in un dato punto della Terra,sia un vettore $\vec{g}$,diretto verticalmente verso il basso,<u>uguale per tutti i corpi</u>.Le discrepanze(confronto ad es. palla piombo e pezzo di carta)talvolta grossolane,furono giustamente attribuite da Galileo al fatto che i gravi non sono soggetti soltanto alla forza-peso ma che in condizioni di moto sono soggetti a forze di natura complicata dovute alla resistenza del mezzo cioé l'aria. É la presenza dell'attrito dell'aria o di altri tipi di attrito che fa violare in pratica le leggi di caduta dei gravi dalle conseguenze della costanza di $\vec{g}$.L'intuizione fondamentale di Galileo permise di far progredire decisamente lo studio della Meccanica e quindi di tutta la fisica;ciò é tanto più significativo in quanto Galileo sostanzialmente non era in possesso di tecniche sperimentali più raffinate di quelle possedute da Aristotele ed altri pensatori dell'antichità i quali pur affrontando gli stessi problemi,non sono stati in grado di avanzare di un solo passo a causa del loro atteggiamento mentale che stranamente non andò in questo campo oltre i limiti del senso comune.Ammessa quindi la costanza di $\vec{g}$ per un certo intorno di un punto della superficie terrestre resta da spiegare la differenza o anche l'uguaglianza del peso di corpi di natura e forma diversa.A questo punto Galileo e Newton invocano per tutti i corpi l'esistenza di una proprietà intrinseca dei corpi detta massa;alla massa dei corpi é dovuta la proprietà di possedere un certo peso. In che relazione sta questo nuovo ente massa con la forza - peso prima misurate? A tale questione é possibile dare una risposta soltanto quando si conosca una relazione fra la forza agente su di un corpo e l'accelerazione del moto impresso al corpo dalla forza;ciò implica l'ammettere le forze responsabili del moto dei corpi e più precisamente della deviazione del moto dei corpi da quello rettilineo ed uniforme.Esperienze dimostrarono che per un dato corpo l'accelerazione del moto incipiente(con velocità iniziale nulla) risulta proporzionale (in senso vettoriale)alla forza agente.Inoltre applicata la stessa forza a corpi dello stesso materiale di volumi tali che V= V',2V',.........nV' l'accelerazione impressa é inversamente proporzionale a detti volumi.Newton compendiò questi risultati nella relazione vettoriale $\vec{F} = m\vec{a}$ dove m,massa del corpo,é una quantità scalare caratteristica di qualsiasi corpo e tale che per uno stesso materiale,se omogeneo,risulta proporzionale al volume del medesimo. Applicata questa relazione,nota anche come Secondo Principio della Dinamica,al caso del peso dobbiamo tener conto che g é <u>indipendente</u> dal corpo per cui il peso $\vec{P} = m\vec{g}$ risulta proporzionale alla massa del corpo ed il moto incipiente é determinato da g se non sono presenti forze di attrito.L'introduzione del concetto di massa permette quindi di considerare il problema del moto di un corpo qualsiasi sottoposto ad una forza qualsiasi pur di conoscere la sua massa ed istante per istante la forza F agente.La natura vettoriale della relazione $\vec{F} = m\vec{a}$ può essere verificata,non con grande precisione,da esperimenti sui moti incipienti misurando le forze applicate staticamente con dinamometri.Resta da vedere come viene risolto il problema della determinazione della massa dei corpi.Evidentemente la relazione P=mg presa scalarmente ci dà la possibilità di misurare le masse tramite i loro pesi che si misurano con dinamometri.L'introduzione di pesi campione permette,mediante l'uso di bilance,la determinazione di qualsiasi peso incognito con precisione di gran lunga superiore di quella ottenibile con un dinamometro a molla.A questo punto si é pensato di cambiare la situazione per ciò che riguarda il sistema di unità di misura.Infatti nell'intorno di una bilancia possiamo ritenere con grandissima approssimazione che g sia costante in modulo(entro 10^{-3}) per cui l'uguaglianza dei pesi comporta anche,l'uguaglianza delle masse.Gli stessi corpi usati come pesi-campione per la misura delle forze possono essere quindi usati come masse campione.Pertanto l'unità di massa di questo nuovo sistema sarà data da quello stesso corpo che,a Parigi,serve come unità di peso e viene detto chilogrammo -massa (Kgm o Bes).Il vantaggio é che in qualsiasi punto della Terra la misura con la bilancia ci permette di determinare entro gli errori sperimentali circa 10^{-6}) la massa di un corpo qualsiasi indipendentemente dalla variazione di g.Riassumendo nel sistema pratico la terza unità fondamentale é il Kgp;in questo sistema un corpo avrà massa unitaria se $\frac{P}{g} = 1$ quindi sarà un corpo il cui peso é circa 9,8 Kg peso. Nel nuovo sistema (detto M.K.S.) la terza unità fondamentale é il Kgm;in questo sistema le forze e quindi i pesi sono unità derivate dalla massa.Pertanto nel sistema M.K.S. il kgm ha un peso in modulo dato da P = g,cioé circa 9,8 unità di forza.L'unità di forza,detta Newton,sarà tale per cui per m= 1 kgm risulta a= $1 m/sec^2$,cioé la forza che imprime alla massa unitaria l'accelerazione unitaria nella direzione e verso della forza se il moto é incipiente.

In questo sistema, detto assoluto, si rispetta il fatto che la massa dei corpi é una loro proprietà caratteristica indipendente dalla loro posizione nell'Universo, mentre il peso dei corpi, pur essendo necessario per il confronto di masse mediante la bilancia, può variare a seconda della posizione nell'Universo. Dobbiamo tener presente che la relazione $\vec{F} = m\vec{a}$ si verifica sperimentalmente con poca precisione e soltanto per moti incipienti o comunque nei casi in cui le velocità iniziali dei corpi ai quali vengono applicate le forze non siamo molto elevate. D'altra parte alcune proprietà della massa dei corpi, come la proporzionalità al volume per corpi omogenei, hanno dato e danno ancora la sensazione intuitiva di quantità di materia contenuta nel corpo.
Tale visione di tipo aristotelico non è confermata dall' esperienza alle alte velocità (confrontabili con quella della luce nel vuoto $c = 3.\ 10^8$ m/sec.). Senza entrare nei dettagli possiamo dire che la teoria della Relatività particolare di Einstein ha stabilito, a partire da presupposti molto semplici, che la relazione $\vec{F} = m\vec{a}$ debba essere considerata valida soltanto a velocità tali per cui il rapporto $\frac{v}{c} << 1$, il che si verifica in pratica per tutti i corpi macroscopici in moto sulla terra o anche nel sistema solare (satelliti naturali ed artificiali). Soltanto nel moto di particelle atomiche e di Galassie molto lontane, velocità dell' ordine di grandezza di c sono presenti comunemente. Vale la pena di accennare che il moto degli elettroni in un tubo di televisore non obbedisce più alla legge $\vec{F} = m\vec{a}$. La modificazione più rilevante, fra tante, introdotta da Einstein è che la massa m di un corpo non si possa considerare come qualche cosa di assoluto ma dipende dalla velocità del corpo secondo la relazione: $m = \frac{m_o}{\sqrt{1-(\frac{v}{c})^2}}$ dove m_o è la massa in "quiete" misurata secondo i procedimenti descritti. Si vede quindi quanto poco senso abbia il pensare alla massa come quantità di materia contenuta in un corpo.
La relazione $\vec{F} = m\vec{a}$ permette un' estensione verificabile, sempre però entro limiti poco precisi, sperimentalmente; questa estensione è una conseguenza diretta della natura vettoriale di $\vec{F}$ ed $\vec{a}$.

Si abbiano infatti n forze $f_1, f_2, \ldots\ f_n$, applicate separatamente ad un corpo di massa m; per ognuna di queste forze vale la relazione $\vec{f}_i = m\vec{a}_i$. Supponendo di applicare invece la forza $\vec{F} = \sum_{i=1}^{n} \vec{f}_i$, detta risultante delle forze data, si verifica che l' accelerazione prodotta $\vec{a}$ soddisfa alla relazione $\vec{a} = \sum_{i=1}^{n} \vec{a}_i$ cioè l' accelerazione $\vec{a}$ è la somma vettoriale delle accelerazioni $\vec{a}_i$ che nascono dalle varie $\vec{f}_i$ agenti indipendentemente. In ciò consiste il principio di indipendenza delle azioni simultanee, messo in evidenza da Galileo; esso trova numerose applicazioni nella risoluzione pratica di problemi di Dinamica.
La relazione $\vec{F} = m\vec{a}$ viene posta a valore di principio della Dinamica e precisamente del secondo principio. Tale posizione è giustificata in quanto la sua validità è fondata piuttosto sulle conseguenze indirette della sua applicazione che sulle verifiche dirette. Va tenuto ancora presente che la sua validità è limitata anche ai sistemi di riferimente inerziali. Infatti il moto di caduta dei gravi sulla terra non è descritto in maniera esatta senza l' introduzione dell' accelerazione di trascinamento e di Coriolis dovute al moto della Terra. Pertanto la $\vec{F} = m\vec{a}$ dove con $\vec{F}$ si introduce il peso $\vec{P} = m\vec{g}$ non è perfettamente valida a meno di non introdurre nella $\vec{F}$, oltre a $\vec{P}$, le forze $- m\vec{a}_\tau$ e $m\vec{a}_c$. Queste forze furono chiamate da Newton forze "fittizie" e forze d' inerzia in quanto non risultate di un' interazione diretta (gravitazionale) fra Terra e Corpo, ma come risultato dell' inerzia della massa m anche in assenza di peso.
La distinzione fra forze d' interazione e forze d' inerzia fu criticata da Mach la cui critica fu ripresa da Einstein il quale postula l' equivalenza a tutti gli effetti dinamici, fra forze d' inerzia e forze d' interazione. Ciò comporta però modifiche radicali nell' impostazione della Meccanica e condusse Einstein alla formulazione della Relatività generale le cui conseguenze vanno ben oltre quelle della Relatività particolare. Possiamo qui soltanto dire che la Meccanica Newtoniana si presenta di nuovo come un caso limite della Relatività generale; le deviazioni però sono così piccole da farsi sentire soltanto al livello Cosmologico.

La precisazione sulla validità nel sistema inerziale del 2° Principio della Dinamica è essenziale in quanto storicamente adesso viene preposto il primo principio della Dinamica detto anche principio d'inerzia. Il 1° Principio afferma che, in un sistema di riferimento inerziale un corpo materiale qualsiasi permane in uno stato di quiete e di moto rettilineo uniforme se il corpo non è sottoposto ad azione di forze esterne. Chiaramente si tratta di un principio in quanto lo consideriamo il risultato limite di esperienze compiute in assenza di attrito. Si capisce chiaramente come il primo principio valga soltanto in un sistema inerziale perchè altrimenti anche in assenza di attriti, sarebbero presenti le forze d' inerzia. Possiamo anzi dire che la definizione di sistema inerziale implica la validità del 1° Principio. Non è giusto pertante, come spesso viene fatto, considerare il primo principio come una conseguenza del secondo principio per $\vec{F} = 0$; senza il primo principio non sarebbe infatti possibile porre logicamente il secondo per l' assenza di definizione di sistema inerziale. In questo senso si dice che il 1° Principio è <u>compatibile</u> con il 2° (per $\vec{F} = 0$, $\vec{a} = 0$ cioè si ha moto rettilineo ed uniforme). Inoltre non possiamo nemmeno dire che la relazione $\vec{F} = m\vec{a}$ costituista una definizione della forza, in quanto per verificarla è stato necessario definire preliminarmente e separatamente, con metodi statici, la misura delle forze e delle masse. Ricordiamo infine che la Relatività generale, introducendo l' identità essenziale fra forze fittizie e forze d' ~~interazione~~ inerzia deve portare alla formulazione di leggi più generali in cui anche il Principio d' Inerzia subisce una radicale modificazione, perchè tali leggi debbono valere sia in sistemi inerziali che non inerziali.

Per quanto concerne il 3° Principio della Dinamica la sua formulazione non è univoca e richiede un ulteriore approfondimento delle conoscenze di Dinamica per cui si preferisce rinviarne la trattazione ad uno stadio successivo.

Passiamo ora ad esaminare come si possa affrontare la risoluzione del problema fondamentale della dinamica del punto materiale. In problema consiste in ciò : dato un punto materiale di massa m, determinare le equazioni della traiettoria da esso percorsa nota la forza $\vec{F}$ agente sul punto stesso. Si parte dall'equazione $\vec{F} = m\vec{a}$ scomponendola nelle 3 componenti secondo una terna arbitraria di assi cartesiani. Siano F_x, F_y, F_z le componenti del vettore $\vec{F}$ ed a_x, a_y, a_z, le componenti del vettore $\vec{a}$ rispetto a questa terna. Data la natura vettoriale di $\vec{F}$ ed $\vec{a}$ il problema non cambia prendendo un'altra terna di assi cartesiani ortogonali in quanto nella trasformazione di coordinate ortogonali F_x, F_y, F_z si trasformeranno nelle componenti $F_{x'}, F_{y'}, F_{z'}$, tali che però $F_x^2 + F_y^2 + F_z^2 = F_{x'}^2 + F_{y'}^2 + F_{z'}^2$ ed analogamente per le componenti di $\vec{a}$. Pertanto alla relazione vettoriale $\vec{F} = m\vec{a}$ corrispondono , in una qualsiasi terna di assi cartesiani di riferimento, 3 relazioni scalari equivalenti:

$$F_x = m\,a_x \qquad F_y = m\,a_y \qquad F_z = m\,a_z \ .$$

Ricordando la definizione di accelerazione scalare potremo anche scrivere: $m\dfrac{d^2x}{dt^2} = F_x \qquad m\dfrac{d^2y}{dt^2} = F_y \qquad m\dfrac{d^2z}{dt^2} = F_z$

La soluzione del problema fondamentale della dinamica del punto materiale consiste quindi nella ricerca di 3 funzioni incognite $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ soluzioni del sistema delle 3 equazioni differenziali precedenti date certe condizioni iniziali che sono le posizioni iniziali del punto materiale x_0, y_0, z_0 ad un certo istante del tempo t_0 dato e la velocità iniziale $\left(\dfrac{dx}{dt}\right)_{t=t_0} = v_{0x} \qquad \left(\dfrac{dy}{dt}\right)_{t=t_0} = v_{0y} \qquad \left(\dfrac{dz}{dt}\right)_{t=t_0} = v_{0z}$

nello stesso istante di tempo t_0. Le 6 costanti $x_0, y_0, z_0, v_{0x}, v_{0y}, v_{0z}$, sono arbitrarie; il fissarne i valori é però necessario affinché la soluzione sia determinata.

Oltre al valore di m un altro dato del problema é la conoscenza di 3 funzioni F_x, F_y, F_z, le componenti della forza agente. Orbene la forza agente $\vec{F}$, nel caso piu generale, sarà funzione della posizione del punto, cioé delle coordinate x, y, z, del punto P, del tempo t ed anche della velocità del punto cioè delle componenti $\frac{dx}{dt}$, $\frac{dy}{dt}$, $\frac{dz}{dt}$, come ad esempio nel caso degli attriti dipendenti dalla velocità.

Pertanto nel caso più generale, il sistema delle 3 equazioni differenziali si scriverà:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{1}{m} F_x\left(x, y, z, \frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}, \frac{dz}{dt}, t\right)$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{1}{m} F_y\left(x, y, z, \frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}, \frac{dz}{dt}, t\right)$$

$$\frac{d^2z}{dt^2} = \frac{1}{m} F_z\left(x, y, z, \frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}, \frac{dz}{dt}, t\right)$$

Date le condizioni iniziali, cioé il valore delle 6 costanti arbitrarie prima menzionate, si può dimostrare che la soluzione del sistema dato é unica, sotto condizioni molto ampie per le funzioni date F_x, F_y, F_z. Tale soluzione, $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ é costituita proprio dalle equazioni parametriche della traiettoria percorsa dal punto materiale soggetto a quella forza. Abbiamo già visto, trattando le equazioni differenziali, come i vari problemi pratici costituiscono particolarizzazioni delle espressioni della forza e come il problema si possa ridurre da tridimensionale a bidimensionale e addirittura unidimensionale.

<u>Teoremi derivati dal II Principio della Dinamica.</u>

Dalla relazione $\vec{F} = m\vec{a}$ si possono ricavare alcune relazioni che costituiscono dei teoremi della Dinamica del punto materiale; uno di questi é il teorema dell'impulso. Infatti possiamo scrivere: $\vec{F} = m\,\vec{a} = m\frac{d\vec{v}}{dt}$ e moltiplicando per dt, $\vec{F}dt = md\vec{v} = d(m\vec{v})$ se possiamo ritenere costante la massa m. Si chiama impulso elementare la quantità vettoriale infinitesima $\vec{F}dt$ e quantità di moto del punto materiale il vettore $m\vec{v}$; entrambe le quantità hanno le dimensioni $[L][M][T]^{-1}$. La relazione infinitesimale $\vec{F}dt = d(m\vec{v})$ esprime sostanzialmente il teorema dellimpulso nel senso che l'impulso infinitesimo della forza é uguale alla variazione elementare della quantità di moto. Supponendo inoltre che la forza $\vec{F}$ agisce soltanto nell'intervallo di tempo compreso fra gli istanti t_1 e t_2 ($t_2 > t_1$) e che in tale intervallo $t_2 - t_1 = \Delta t$ sia nota la dipendenza di $\vec{F}$ dal tempo possiamo ancora scrivere:

$$\int_{t_1}^{t_2} \vec{F}dt = \int_{t_1}^{t_2} d(m\vec{v}) = m\vec{v}_{t_2} - m\vec{v}_{t_1} = \Delta(m\vec{v})$$

che é l'espressione del teorema dell'impulso in forma finita e cioé l'impulso totale della forza $\vec{F}$, agente nell'intervallo di tempo Δt é uguale alla variazione $\Delta(m\vec{v})$ della quantità di moto del punto soggetto alla forza. Un'applicazione pratica si ottiene applicando all'integrale $\int_{t_1}^{t_2} \vec{F}dt$ il teorema del valore medio.

Per definizione di valore medio della forza $\vec{F}$ fra t_1 e t_2 abbiamo

$$\vec{F}_m = \frac{1}{t_2 - t_1}\int_{t_1}^{t_2} \vec{F}dt$$

e pertanto il teorema dell'impulso ci dà: $(t_2 - t_1)\vec{F}_m = \Delta(m\vec{v})$.

Se é possibile conoscere ($t_2 - t_1$), la relazione precedente ci permette di calcolare il valore medio $\vec{F}_m$ della forza agente dalla determinazione della quantità di moto iniziale e finale del punto materiale. Supponiamo, ad esempio, che con un martello di massa m = 5 kgm si batte un chiodo imprimendo al martello la velocità di 5 m/sec; dopo l'urto con il chiodo il martello rimbalza con la medesima velocità in verso opposto. Se la durata dell'urto é di $\frac{1}{100}$ di secondo la forza media, in modulo, sarà:

$$F_m = \frac{1}{\Delta t}\left|\Delta(m\vec{v})\right| = \frac{2mv}{\Delta t} \quad \text{perchè} \quad m\vec{v}_2 = -m\vec{v}_1$$

Pertanto: F_m = 2000 newton cioé circa 200 kgp! Ciò spiega il fatto empirico che sia possibile conficcare il chiodo a martellate mentre non é possibile (e non sarebbe pratico) realizzare lo stesso sforzo premendo con le mani sul chiodo. Notiamo che a parità di altre condizioni, la forza media é tanto più grande quanto più piccolo é Δt cioé quanto più secco é il colpo.

Il teorema dell'impulso da un'interpretazione notevole e abbastanza intuitiva degli effetti delle forze come responsabili delle variazioni di una quantità dinamica cioé la quantità di moto di un punto materiale. Questo era stato visto chiaramente sia da Newton ancor prima da Cartesio. Contemporaneamente il filosofo matematico-fisico Leibniz metteva in evidenza un altro apetto notevole degli