

Thomas Young: una stima delle dimensioni atomiche nel primo '800

Giuseppe Fera - Unità di Ricerca in Didattica della Fisica,
Università di Udine - giuseppe.fera@uniud.it

Abstract: Today we share the atomic hypothesis that Feynman (1963, p. 4) states as follows: all things are made of atoms – little particles that move around in perpetual motion, attracting each other when they are a little distance apart, but repelling upon being squeezed into one another. Two different interpretations of atomism crossed Western culture over the centuries: 1) the hypothesis that matter is made of real particles in perpetual motion, 2) more sophisticated conception that “atom” is just an abstract entity that we should use to simplify the description of the phenomena. The first conception dates to the ancient Greece philosophers Leucippus, Democritus and Epicurus. The second originates perhaps from Ockham, which from the perspective of a radical empiricism claims that everything that goes beyond the limits of experience cannot be known nor demonstrated. It is supported by countless subsequent thinkers including Ernst Mach, who regarded the atoms as mental artifices (Whyte 1961a). Within the framework (1), ascertain reality of the atoms raises problems to be addressed. We must measure the fundamental physical properties of an atom (mass, size, ...) and the number of atoms present in a given amount of matter (for example, a liter of water). Among the numerous attempts at evaluation of atomic size developed since the mid-1600, that of Thomas Young highlights for different features: i) it is very innovative compared to the times; II) it fits organically into the microscopic model of surface tension in liquids developed by Young and Laplace; III) it provides an estimate of the intermolecular forces range.

Keywords: Thomas Young, atomic size, intermolecular forces

1. L'ipotesi atomica nel quadro della filosofia meccanicista

La maggior parte degli storici della scienza fa iniziare la concezione atomistica della materia a inizio '800 con Dalton; tuttavia alcuni ricercatori, quali Stones (1928) e più tardi Whyte (1961a) e Hessenbruch (2000, p. 57) hanno sottolineato che idee sulla natura particellare della materia, come pure l'opposizione a tali idee, risultano presenti con continuità a partire dal 1400. Il Medioevo è stato generalmente visto dagli storici della scienza come un periodo in cui l'atomismo è assente, per riemergere poi nel Rinascimento; Pabst (1994) al contrario, dimostra la presenza in tutto il Medioevo di una continua riflessione sulla natura corpuscolare della materia, che differiva notevolmente dalle teorie greche antiche, e che ha raggiunto il suo culmine nel XII secolo. Nella stessa

linea di pensiero, Ciardi (2003) afferma che uno dei più importanti manuali di alchimia, la *Summa perfectionis magisterii*, che iniziò a circolare in Europa verso il 1280, descrive i metalli in termini di una visione corpuscolare. Gli studiosi concordano comunque nel ritenere che nel corso del XVII secolo la diffusione in tutta Europa delle idee di Galileo, Keplero, Bacone, Cartesio consolidò una nuova visione della scienza. L'attenzione che la filosofia scolastica rivolgeva alle essenze, ai principi qualitativi, alle *sostanze elementari* quali terra, fuoco, acqua e aria, fu gradualmente superata a favore di sperimentazioni che permettevano di rilevare caratteristiche quantitative dei fenomeni, delle disposizioni spaziali e del movimento prima dei corpi materiali e successivamente dei corpuscoli ipotizzati come loro componenti. Questa nuova visione confluisce come corrente empirista e atomista nella filosofia meccanicista.

Il pensiero corpuscolare di Gassendi e Boyle è alla base di una serie di tentativi di determinare le dimensioni delle particelle ipotizzate come costituenti della materia. Ancor prima del 1700 almeno sei scienziati europei (cinque di loro anteriormente a Newton) determinarono stime, attraverso misure di vario genere, di un limite massimo per la dimensione delle più piccole particelle della materia: Magnenus (1646), Charleton (1654), Gassendi (1658), Boyle (1669), Leeuwenhoek (1680), Halley (1691). Queste stime sono basate su esperimenti con lamine sottili, fumi, fiamme, polveri, ecc., e la maggior parte di essi ha prodotto per il diametro delle particelle di sostanza coinvolte valori dell'ordine di 10^{-6} m (Whyte 1961a, p. 48). Essi costituiscono i primi tentativi di definire delle proprietà quantitative di un modello particellare della materia, e anche se non danno alcuna prova dell'esistenza di un limite ultimo alla divisibilità della materia, tuttavia segnano la nascita dell'atomismo quantitativo sperimentale in fisica. Spicca il contributo di Walter Charleton, medico londinese, che pubblica nel suo *Physiologia Epicuro-Gassendo-Charltoniana or a fabrick of science natural upon the hypothesis of atoms* una rassegna delle idee sull'atomismo. Egli stima che un grano di incenso (il *grano* è una unità di misura di massa che corrisponde a 64.8 mg) comprende $7.776 \cdot 10^{17}$ atomi (Charleton 1654, p.114). Apparentemente questo risultato anticipa quello che diverrà noto come numero di Avogadro, ma il ragionamento dell'autore non si fonda sulle misure bensì su una speculazione sul numero dei corpuscoli contenuti in un granello di sabbia che risale al $\Psi\alpha\mu\mu\tau\eta\zeta$ (Arenario) di Archimede.

Nei *Principia* (1685-1687) Newton, applicando il principio di similitudine dinamica alle interazioni delle particelle, mostra che la legge di Boyle per i gas può essere derivata dal presupposto che particelle impenetrabili si respingono con una forza inversamente proporzionale alla distanza. Egli concorda con Boyle nel ritenere il calore una manifestazione del moto delle particelle ma se ne distacca nettamente nel considerare forze sia attrattive che repulsive tra esse agenti. Chalmers (2009) osserva che gli argomenti riportati da Newton (1952, pp. 350-382) nella *Query 31* a sostegno della sua visione atomistica hanno una base empirica debole e si fondano su analogie non giustificate con il comportamento dei corpi macroscopici. Mentre le leggi della dinamica enunciate nei *Principia* possono essere oggetto di osservazione diretta e di esperimento, la presenza di forze agenti tra le particelle costituenti della materia va oltre ciò che poteva essere dedotto da dati sperimentali. Per questo motivo Newton inserisce la sua teorizzazione in una visione teologica, sulla scia dei pensatori che lo hanno preceduto.

Tuttavia appare degno di nota che Newton (1952, p. 230) riporti una stima pari a $16\frac{1}{4}$ decimillesimi di pollice (circa $4 \cdot 10^{-6}$ m) per la dimensione dei corpuscoli che costituiscono la materia, ottenuta misurando lo spessore di pellicole acquose sulla base delle loro proprietà ottiche. Il grande prestigio di cui godeva e il successo che riportò la fondazione della meccanica enunciata nei *Principia* favorirono la diffusione della visione atomistica nella cultura scientifica europea fino alla fine del 1700, segnando una tappa importante nel progresso dell'atomismo in fisica.

Gli storici della scienza (Whyte 1961b) concordano nell'attribuire a Ruggiero Giuseppe Boscovich (1711-1787) la formulazione del primo modello matematico dell'atomismo, elaborato sulla base della visione meccanicista ed esposto nel trattato *Theoria philosophiae naturalis redacta ad unicam legem virium in natura existentium* (Boscovich 1763). Il modello si basa sulle seguenti ipotesi: (i) esiste un solo tipo di particelle fondamentali, identiche, e ogni corpo è costituito da un numero finito di esse; (ii) le particelle materiali sono puntiformi, ciascuna costituisce un centro di forza permanente; (iii) tra due particelle agisce una forza repulsiva o attrattiva in dipendenza della distanza tra esse (ciò consente l'esistenza di configurazioni di particelle in equilibrio stabile e orbite di dimensioni definite); (iv) l'intera gamma delle proprietà fisiche e chimiche dei corpi è riconducibile ai processi di interazione tra le particelle costituenti; (v) i parametri della legge di interazione e la massa delle particelle possono essere determinati a partire da misure macroscopiche.

La teoria di Boscovich si discosta dal meccanicismo newtoniano in aspetti importanti: 1) ciò che ha senso fisico sono solo le distanze e i moti relativi delle particelle, non le loro posizioni nello spazio assoluto; in questi termini Boscovich aderisce a una filosofia relazionale in contrasto con Newton, 2) le particelle ipotizzate da Boscovich non hanno proprietà fisiche quali raggio, massa, carica, ecc.; quindi la discontinuità introdotta dagli urti tra sfere rigide e impenetrabili che modellizzavano gli atomi viene superata dall'ipotesi di una interazione variabile con continuità su tutto lo spazio.

Con la sua formulazione Boscovich supera il dualismo democriteo e newtoniano tra spazio occupato e vuoto sostituendo a esso un monismo di relazioni spaziali. Nonostante non fornisca previsioni quantitative, la sua teoria rappresenta un quadro concettuale unitario fondato su un sistema minimale di postulati che esercitò un grande influenza sulla fisica del XIX e XX secolo. Il postulato sulla interazione centrale a due corpi dipendente dalla distanza, che contribuisce a dare senso al concetto di struttura fisica microscopica statica o dinamica rappresentabile con un modello di punti nello spazio tridimensionale, guiderà le considerazioni dei chimici nel secolo successivo.

2. Le forze tra le particelle in Laplace e Young

Alla fine del '700 molti scienziati europei tentarono di interpretare i fenomeni naturali in termini del meccanicismo newtoniano. Nel quadro della filosofia meccanicista si aveva un generale accordo sull'esistenza e sulle proprietà della forza di gravità descritta da Newton per spiegare i moti osservati dei corpi celesti. Nel 1785 Charles-Augustin de

Coulomb (1736-1806) mostra che anche le forze elettriche di attrazione e repulsione tra sfere cariche seguivano una legge analoga a quella della gravitazione. Una indicazione sull'esistenza di forze agenti tra le particelle costituenti della materia fu fornita dall'esperienza di Cavendish (1798) che affermava la presenza dell'interazione gravitazionale anche tra due corpi di laboratorio. Tuttavia fu chiaro ben prima del 1800 che le forze gravitazionali non erano sufficienti per spiegare i fenomeni capillari e altre proprietà di superficie dei liquidi. Francis Hauksbee, come esecutore di dimostrazioni sperimentali presso la Royal Society, mostrò già nel 1709 che la risalita di un liquido in un tubo capillare è indipendente dallo spessore del vetro (Rowlinson & Widom 2002, p. 8). Di conseguenza si pensava che le forze esercitate sulle molecole del liquido fossero solo quelle delle molecole appartenenti allo strato superficiale del vetro. Questo comportamento non era in accordo con quanto era noto sulle forze gravitazionali, che agivano indipendentemente dalla materia interposta. Gli esiti degli esperimenti di Hauksbee contribuiscono alla stesura della ben nota *Query 31*, con cui Newton chiudeva la sua *Opticks* riportando importanti riflessioni sulle particelle costitutive della materia e sulle forze tra esse agenti.

Il programma newtoniano viene sviluppato ed esteso da Pierre-Simon de Laplace (1749-1827). Egli voleva rendere conto di tutti i fenomeni, dalla scala astronomica a quella microscopica, in termini di forze centrali attrattive o repulsive agenti tra le particelle della materia (*molécules*) non sempre identificate con le forze gravitazionali o elettriche:

les phénomènes de l'expansion, de la chaleur, et des vibrations des gaz, sont ramenés à des forces attractives et répulsives qui ne sont sensibles qu'à des distances imperceptibles (Laplace 1825).

Un'ampia classe di fenomeni comuni suggeriva la presenza di forze intermolecolari attrattive: l'aderenza (*cohesion*) delle gocce dei liquidi ai solidi, la condensazione dei vapori, la risalita dei fluidi nei tubi capillari; veniva riconosciuta la presenza di forze più intense della gravità, ma agenti solo su piccole distanze. Una trattazione matematica delle forze intermolecolari è esposta a partire dal 1806 da Laplace nella sua teoria dei fenomeni capillari: la spiegazione dei fenomeni è ricondotta alla presenza di forze attrattive agenti a breve distanza tra le particelle costituenti la materia (Laplace 1807, p. 487). Queste forze attrattive sono importanti perché, secondo Laplace, determinano le affinità chimiche. La presenza di forze repulsive non poteva essere negata: dovevano bilanciare le forze di attrazione per prevenire il collasso della materia, ma la loro natura restava oscura. Laplace considera il calore come agente responsabile della repulsione tra le molecole (Laplace 1807, p. 490), in quanto se un liquido viene riscaldato esso si espande e poi bolle, dando così luogo alla separazione delle molecole a distanze molto maggiori di quelle caratteristiche nel liquido. Un altro modo per spiegare la repulsione delle molecole risaliva a un'idea di Newton che riconduceva la pressione di un gas alla repulsione delle sue molecole supposte statiche, e non, come aveva sostenuto Bernoulli, alle loro collisioni con le pareti del contenitore (Talbot, Pacey 1966; Fox 1990). A partire dal 1819 Laplace approfondisce la trattazione delle forze repulsive intermolecolari:

Dans la nature, les molécules des corps sont animées de deux forces contraires: leur attraction mutuelle et la force repulsive de la chaleur (Laplace 1880, vol. 14, p. 261).

Egli sottolinea che l'attrazione molecolare agisce in modo differente nei fenomeni capillari e nelle reazioni chimiche, in contrasto con quanto affermava nel 1807. Inoltre le forze repulsive dovute al calore diminuiscono più rapidamente all'aumentare della distanza rispetto alle forze attrattive, secondo Laplace, che intende controbattere la visione di Young in cui forze repulsive intermolecolari dovute al calore sono assenti. Quando ha rivolto la sua attenzione ai fenomeni termici, infatti, Thomas Young (1773-1829) ha abbracciato l'idea che il calore fosse una manifestazione del moto particellare, respingendo la diffusa visione che il calore fosse una sostanza, il fluido imponderabile chiamato *calorico*, la cui quantità nei corpi poteva aumentare o diminuire:

If heat is not a substance, it must be a quality; and this quality can only be motion. It was Newton's opinion, that heat consists in a minute vibratory motion of the particles of bodies (Robinson 2006, p. 128).

Lord Rayleigh¹ sottolinea il contributo di Young alla teoria microscopica delle forze intermolecolari. Nonostante l'indiscussa autorevolezza di Laplace, afferma Rayleigh, è stato Young per primo con *An Essay on the Cohesion of Fluids* (Young 1805), letto il 20 dicembre 1804 alla Royal Society, a ricondurre i fenomeni di superficie dei fluidi alle *ultimate properties of matter*. Le ipotesi di Young sono enunciate nel paragrafo VI del suo saggio, dal titolo significativo *Physical Foundation of the Law of Superficial Cohesion*:

We may suppose the particles of liquids, and probably those of solids also, to possess that power of repulsion, which has been demonstratively shown by Newton to exist in aeriform fluids, and which varies in the simple inverse ratio of the distance of the particles from each other. In air and vapours this force appears to act uncontrolled; but in liquids it is overcome by a cohesive force, while the particles still retain a power of moving freely in all directions. [...] It is simplest to suppose the force of cohesion nearly or perfectly constant in its magnitude, throughout the minute distance to which it extends, and owing its apparent diversity to the contrary action of the repulsive force which varies with the distance.

Quindi per Young le forze attrattive a corto raggio sono sostanzialmente costanti, mentre le forze repulsive aumentano rapidamente al diminuire della distanza tra le molecole. Sulla base di questa ipotesi egli afferma che la pressione nel liquido varia per un termine aggiuntivo determinato dalla forma della superficie del liquido, proporzionale alla somma delle curvature principali della sua superficie: quella che oggi conosciamo come legge di Young-Laplace: $\Delta p = \frac{H}{2} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R} \right)$ riportata in (Laplace 1806, p. 367), dove H rappresenta la tensione superficiale del fluido. Young e Laplace concepiscono un liquido avente concentrazione c particelle/volume come un sistema di particelle di-

¹ In una serie di articoli (Rayleigh 1890) ristampati in (Rayleigh 1899, pp. 397-425)

strubuite uniformemente nello spazio che si attraggono tra loro ma che non condensa per la presenza di forze repulsive a corto raggio tra le particelle. Le forze attrattive determinano una pressione interna al liquido che Laplace chiama K e che esprime con un integrale sul volume dell'energia potenziale di interazione $u(r)$ tra coppie di particelle a distanza r :

$$K = -\frac{c^2}{2} \int_0^a u(r) dx dy dz$$

(Rayleigh 1899, p. 402; Rowlinson, Widom 2002, p. 5) dove a è il raggio delle forze attrattive. Nella formulazione originale Laplace assume unitaria la concentrazione c . Rimuovendo questa ipotesi, il termine correttivo K per la pressione assume la forma riportata da van der Waals nella sua tesi del 1873 sulla continuità tra lo stato liquido e gassoso. Laplace (1807, p. 492) ritiene che la grandezza K non possa essere misurata:

Il est presque impossible de déterminer par l'expérience l'intensité de la force attractive des molécules des corps; nous savons seulement qu'elle est incomparablement supérieure a l'action capillaire.

La prima stima di questa grandezza per l'acqua è senza dubbio quella di Young, in straordinario accordo con il valore moderno, secondo Rayleigh (1899, p. 400). Nell'articolo "Cohesion" scritto nel 1816 per l'Enciclopedia Britannica, Young (1855, vol. I, pp. 454-490) discute la presenza delle forze repulsive tra le particelle di un fluido comprimibile:

It is natural to inquire whether this repulsive force [...] would be capable of affording the resistance exhibited by the same bodies in a liquid or solid form, and holding the cohesive force in equilibrium (Young 1855, vol. I, p. 455).

Nelle pagine seguenti le sue argomentazioni gli consentono di affermare che, in termini moderni: la pressione interna K del liquido, dovuta all'azione delle forze repulsive tra le particelle, si manifesta come resistenza del liquido alla compressione. Quindi egli identifica K con il modulo di comprimibilità del liquido, che nel caso dell'acqua in condizioni ordinarie di temperatura e di pressione gli era ben noto (Young 1855, vol. I, p. 458) attraverso le misure di John Canton (1764, pp. 261-262). Quindi:

Now since there is reason to suppose the corpuscular forces of a section of a square inch of water to be equivalent to the weight of a column about 750,000 feet high (Young 1855, vol. I, p. 461).

Young riporta come densità dell'acqua il valore 252.5 grains/in³. In termini moderni, poiché 12 in = 1 foot = 30.48 cm, risulta che Young stima $K=2.24 \cdot 10^4$ atm. Secondo Rayleigh (1899, p. 423), una stima posteriore sarebbe dovuta ad Athanase Dupré (1808-1869) che collega K al calore latente di ebollizione dell'acqua. Ciò è plausibile in quanto l'ebollizione può essere vista come un processo in cui ad una molecola del fluido di massa m è necessaria un'energia fa per distaccarsi dal fluido stesso, essendo f il modulo

delle forze attrattive delle altre molecole. Considerando N molecole che evaporano provenienti da uno strato di area S , la pressione interna K dà luogo ad una forza $f=KS/N$. Quindi il calore latente risulta $L=fa/m=KSa/Nm=KV/M=K/\rho$, essendo $V=Sa$ il volume di fluido coinvolto nell'evaporazione e ρ la densità del fluido. Con i valori moderni $L=2.2 \cdot 10^6$ J/kg, $\rho=10^3$ kg/m³ per l'acqua in condizioni ordinarie di temperatura e di pressione risulta $K = \rho L = 2.2 \cdot 10^4$ atm, in accordo con la stima di Young del 1816.

3. La valutazione delle dimensioni atomiche

In una lettera ad Arago datata 12 gennaio 1817 Young (1855, vol. I, pp. 380-384) scrive:

I have been reconsidering the theory of capillary attraction, and have at last fully satisfied myself with respect to the fundamental demonstration of the general law of superficial contraction [...]. This solution has very unexpectedly led me to form an estimate, something more than merely conjectural, though not fully demonstrative, of the magnitude of the ultimate atoms of bodies.

La stima cui si riferisce Young è quella riportata nell'articolo "Cohesion" del 1816 e riguarda in primo luogo il raggio d'azione a delle forze molecolari attrattive. Laplace (1807) esprime la tensione superficiale di un liquido limitato dal piano $z=0$ nella forma:

$$H = -\frac{c^2}{2} \int_0^a zu(z) dx dy dz$$

(Rayleigh 1899, p. 403; Rowlinson, Widom 2002, p. 6) dove i simboli hanno il significato riportato nel paragrafo precedente. Young ipotizza che il potenziale intermolecolare abbia l'andamento semplice (Young 1855, vol. I, p. 460)

$$u(z) = a-z$$

che descrive una forza costante, e di conseguenza riesce a valutare entrambi gli integrali: ciò gli consente di dimostrare la relazione $H = \frac{1}{3}aK$ tra la tensione superficiale H (*contractile force*) e la pressione interna K (*cohesive force*) di un liquido. Questa relazione istituisce un inedito collegamento tra le due grandezze macroscopiche H e K ed il raggio d'azione della forza intermolecolare. A questo punto egli riporta una misura della tensione superficiale per l'acqua $H=3$ grains/in che equivale a 0.075 N/m, in ottimo accordo con i valori oggi accertati in condizioni ordinarie di temperatura e di pressione. Poiché aveva già stimato $K=2.24 \cdot 10^4$ atm, ciò gli consente di determinare il raggio d'azione della forza intermolecolare $a = \frac{3H}{K}$ e di concludere che:

the extent of the cohesive force must be limited to about the 250 millionth of an inch [...] nor is it very probable that any error in the suppositions adopted can possibly have so far invalidated this result as to have made it very many times greater or less than the truth (Young 1855, vol. I, p. 461).

Quindi Young si mostra convinto che l'ordine di grandezza del raggio d'azione a delle forze attrattive intermolecolari sia 10^{-10} m. Riguardo questo risultato Rowlinson (2002) osserva che

It is the first quantitative estimate of any aspect of interparticle cohesion that we can recognise as having been derived by a physically sound method of reasoning.

Successivamente Young illustra

a conjectural estimate [...] of the actual magnitude of the elementary atoms of liquids as supposed to be nearly in contact with each other (Young 1855, vol. I, p. 461).

Nel suo ragionamento un vapore saturo condensa quando la distanza tra le molecole ha l'ordine di grandezza del raggio a . Poiché le misurazioni delle grandezze H e K sono state effettuate a 60 °F (15.6 °C), Young sulla base dell'osservazione che il rapporto delle densità del vapore e del liquido a tale temperatura è 1/60000, conclude che le distanze tra le particelle di acqua a contatto devono essere la radice cubica di 1/60000 (circa 1/40) del raggio a . Young dichiara di non poter conoscere la dipendenza del diametro molecolare dalla temperatura, ma in conclusione afferma che

whatever errors may have affected the determination, the diameter or distance of the particles of water is between the two and the ten thousand millionth of an inch (Young 1855, vol. I, p. 462).

ovvero, in termini moderni, tra 1 e 5 volte il raggio di Bohr. Scott e MacDonald (1965) e French (1967) affermano che la stima di Young

must be regarded as a prime landmark in the history of atomic measurements.

4. Conclusioni

Young affrontò con ragionamenti fisicamente fondati la questione delle dimensioni molecolari ma pubblicò con uno pseudonimo la sua trattazione del 1816 su un supplemento dell'Enciclopedia Britannica che ebbe scarsa diffusione tra i fisici dell'epoca.

Oggi i fenomeni fisici a scala microscopica vengono ricondotti ai principi della fisica quantistica che, nella sua formulazione più ampiamente accettata, descrive lo stato delle particelle in termini di funzioni d'onda. La natura delle funzioni d'onda implica che è possibile definire le dimensioni di atomi, ioni e molecole in modi differenti. Sotto questo aspetto il concetto di dimensione degli atomi appare convenzionale e svuotato di realtà fisica. Tuttavia il concetto di dimensione degli atomi, in termini di raggio atomico che può essere misurato impiegando differenti tecniche, è alla base dei modelli utilizzati per comprendere processi, proprietà fisiche, chimiche e aspetti strutturali della materia condensata. Il raggio atomico compare nei modelli come un parametro fisico importante associato a proprietà fisico-chimiche come elettronegatività, energia di io-

nizzazione, polarizzabilità elettrica, suscettibilità diamagnetica, ecc. (Islam, Ghosh 2011). Da questo punto di vista il contributo di Young appare particolarmente vicino alle concezioni attuali.

Ringraziamenti

Si ringrazia la professoressa Marisa Michelini che ha promosso questo studio nell'ambito del progetto LACOMGEI.

Bibliografia

- Boscovich R.G. (1763). *Theoria philosophiae naturalis redacta ad unicam legem virium in natura existentium*. Venezia: Remondini.
- Canton J. (1764). "Experiments and Observations on the Compressibility of Water and Some Other Fluids". *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 54, pp. 261-262.
- Ciardi M. (2003). *Breve storia delle teorie della materia*. Roma: Carocci.
- Chalmers A. (2009). *The scientist's atom and the philosopher's stone*. New York: Springer.
- Charleton W. (1654). *Physiologia Epicuro-Gassendo-Charltoniana or a fabrick of science natural upon the hypothesis of atoms*. London: Newcomb.
- Feynman R. (1963). *Six Easy Pieces*. New York: Basic Books.
- Fox R. (1990). *Laplacian physics*, in Olby R.C., Cantor G.N, Christie J.R.R., Hodge M.J.S. (eds.), *Companion to the History of Modern Science*. London: Routledge, pp. 278-294.
- French A.P. (1967). "Earliest Estimates of Molecular Size". *American Journal of Physics*, 35, pp. 162-163.
- Hessenbruch A. (2000). *Reader's Guide to the History of Science*. London: Fitzroy Dearborn.
- Islam N., Ghosh D.C. (2011). "Spectroscopic Evaluation of the Atomic Size". *Open Spectroscopy Journal*, 5, pp. 13-25.
- Laplace P.S. (1825). *Traité de Mécanique Celeste*. Vol 5, Livre XII. Paris: Bachelier. p. 99.
- Laplace P.S. (1806). *Sur l'Action Capillaire*, in Laplace P.S., *Traité de Mécanique Celeste - Supplément au dixième livre*. Paris: Courcier. Ristampato in (Laplace 1880, vol. 4, pp. 349-417).
- Laplace P.S. (1807). *Supplément a la Théorie de l'Action Capillaire*, in Laplace P.S., *Traité de Mécanique Celeste - Supplément au dixième livre*. Paris: Courcier. Ristampato in (Laplace 1880, vol. 4, pp. 419-498).
- Laplace P.S. (1880). *Oeuvres complètes de Laplace*. Paris: Gauthiers-Villars.
- Newton I. (1952). *Opticks*. IV edition. New York: Dover.

- Pabst B. (1994). *Atomtheorien des lateinischen Mittelalters*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- Rayleigh J.W.S. (1890). "On the theory of surface forces". *Philosophical Magazine*, XXX, pp. 285-298 e pp. 456-475.
- Rayleigh J.W.S. (1899). *Scientific papers*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Robinson A. (2006). *The Last Man Who Knew Everything*. New York: Pi Press,
- Rowlinson J.S. (2002). *Cohesion: A Scientific History of Intermolecular Forces*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Rowlinson J.S., Widom B. (2002). *Molecular theory of capillarity*. New York: Dover.
- Scott G.D., MacDonald I.G. (1965). "Young's Estimate of the Size of Molecules". *American Journal of Physics*, 33, pp. 163-164.
- Stones G.B. (1928). "The Atomic View of Matter in the 15th, 16th, and 17th Centuries" *Isis*, 10, pp. 445-465.
- Talbot G.R., Pacey A.J. (1966) "Some early kinetic theories of gases: Herapath and his predecessors". *British Journal for the History of Science*, 3, pp. 133-149.
- Whyte L.L. (1961a). *Essay on atomism*. Middletown: Wesleyan University Press.
- Whyte L.L. (1961b). *Roger Joseph Boscovich, S.J., F.R.S., 1711-1787, Studies of his Life and Work on the 250th Anniversary of his Birth*. London: Allen and Unwin.
- Young T. (1805) "An Essay on the Cohesion of Fluids". *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 95, pp. 65-87.
- Young T. (1855). *Miscellaneous Works of the Late Thomas Young*. London: Peacock.