

BREVE STORIA DEL VUOTO
(lezione tenuta presso il Liceo Peano dal prof. Vincenzo Barone,
professore associato dell'Università del Piemonte Orientale)

(Questa nota è costituita dagli appunti presi dalla prof.ssa De Bernardi durante la lezione del prof. Barone. Non è una trascrizione curata dal professore stesso. Pertanto qualsiasi errore è unicamente da imputare alla sottoscritta)

In quel bellissimo libro di Calvino che è “Lezioni americane” troviamo citati e discussi alcuni autori che si sono occupati del vuoto già nei tempi più antichi.

Nella prima lezione dedicata alla “leggerezza” si parla di Lucrezio e del “De Rerum Natura”. L’opera di Lucrezio sposa alla descrizione precisa della natura il senso estetico. (In questo senso è quasi un libro di fisica teorica: anticipa la concezione estetica e non più etica o religiosa che ha la fisica teorica moderna, cioè quella sviluppatasi dopo Galilei).

Nella lezione dedicata alla “molteplicità” si tratta di Goethe e Lichtenberg e dell’idea romantica di scrivere un romanzo sull’universo e quindi sul vuoto, sul nulla, per dare vita alla vera essenza del libro: la scrittura pura. Scrittore e lettore sono sullo stesso piano di fronte alla pagina bianca. Ogni lettore scrive il suo libro.

Rifacendoci a tale idea romantica possiamo dire che la cultura scientifica ha in realtà prodotto questo libro sul vuoto. Questo libro è la fisica. La fisica, in particolare quella dell’ultimo secolo, è un lungo racconto sul vuoto e ha trasformato l’idea comune che si ha di esso.

La teoria che ha rivoluzionato il concetto di vuoto è la **TEORIA QUANTISTICA DEI CAMPI** che ha sintetizzato i risultati dovuti alle altre rivoluzioni concettuali della fisica del novecento: la relatività, la meccanica quantistica e la teoria dei campi (di matrice ottocentesca).

Al centro di tale teoria è il vuoto.

Portiamo subito come esempio un risultato sconvolgente della teoria quantistica dei campi: immaginiamo di immettere due piastre metalliche nel vuoto a temperatura di 0 °K, in modo che non vi sia nemmeno radiazione. Non vi è nessun tipo di campo né nessun tipo di radiazione: ci aspettiamo che le due piastre non interagiscano con alcuna forza tra di loro. Esperimenti molto accurati della fine degli anni cinquanta hanno dimostrato con misure di altissima precisione che esiste tra le due piastre una forza attrattiva inversamente proporzionale alla quarta potenza della distanza tra di esse. L’origine di questa forza non sta nelle due piastre ma nel vuoto: questa forza è una manifestazione della variazione di energia del vuoto dovuta alla presenza delle due piastre: il vuoto esercita sulla due piastre una pressione.

La teoria quantistica dei campi introduce l’idea che il vuoto ha una energia.

STORIA CLASSICA DEL VUOTO

La storia che potremmo definire “classica” del vuoto è racchiusa tra due momenti:

- l’atomismo di Leucippo e Democrito, reso in poesia da Lucrezio (passo sul vuoto dal Libro I)
- la scoperta di Rutherford (l’atomo è fatto in gran parte di vuoto): questa scoperta fu sconvolgente per aver introdotto l’idea della materia come discontinua. Interessante un passo di Eddington (da “La natura del mondo fisico”) in cui il fisico osservando un tavolo, descrive la sua duale percezione del tavolo stesso. C’è un tavolo 1 che è materiale, pesante, concreto, è il solito tavolo. Poi c’è un tavolo 2, il tavolo della fisica, leggero quasi completamente vuoto, fatto di atomi quasi completamente “vuoti”.

Qui inizia la storia moderna del vuoto che si conclude con la teoria quantistica dei campi.

Per iniziare il nostro racconto sul vuoto diamone una definizione provvisoria:

vuoto = spazio privo di materia. Per definire il vuoto dobbiamo ricorrere ad altri due concetti.

Si pensa allo spazio come qualcosa di vuoto e al vuoto come assenza di materia.

Dai Greci a Galilei nella discussione sul vuoto si pone l'accento sullo spazio e sul moto.

Dopo Galilei si parlerà prevalentemente di vuoto e materia, in antitesi tra loro; dall'ottocento la discussione si sposta principalmente sull'etere. Con la teoria quantistica dei campi si arriverà ad un nuovo concetto di vuoto svincolato da spazio e materia, definendolo come uno "stato" dell'universo, essendo il concetto "stato" quello della meccanica quantistica. Il vuoto è lo stato fisico di energia più bassa, è lo stato fondamentale.

Riprendendo la nostra storia dalla filosofia greca dobbiamo riferirci principalmente ad Aristotele, il quale, nel quarto libro della "Fisica", colloca la discussione sul vuoto tra quella sul "luogo"(spazio) e quella sul "tempo".

E' da Aristotele che apprendiamo inoltre le teorie sul vuoto degli atomisti e degli altri autori precedenti le cui opere originali non ci sono pervenute.

Aristotele scrive, parlando di Democrito e Leucippo, che chi ammette l'esistenza del vuoto afferma che non vi sarebbe moto (degli atomi) se non vi fosse il vuoto. (Se l'atomo deve lasciare una posizione per occuparne un'altra lo può fare solo se nel luogo dove deve andare c'è il vuoto).

Aristotele confuta questa argomentazione affermando il contrario: il vuoto renderebbe impossibile il movimento (Galilei riprenderà questa tesi 2000 anni dopo). Per Aristotele i corpi si muovono verso un "luogo naturale", ma il vuoto è indifferenziato, e allora non può essere un "luogo naturale" per il moto di un corpo.

Se l'argomento è valido, è la premessa che è errata: è vero che un corpo si muove verso un luogo naturale?

Il secondo argomento introdotto da Aristotele (che verrà invece confutato da Galilei) è di carattere più empirico. Aristotele afferma che le velocità di un corpo attraverso mezzi diversi sono inversamente proporzionali alle densità dei mezzi. Quindi il rapporto tra le velocità è uguale al reciproco del rapporto delle densità corrispondenti, ma se la densità del vuoto è zero, si avrebbe nel vuoto una velocità infinita. Cioè per Aristotele il moto nel vuoto è impossibile.

La teoria aristotelica e l'atomismo democriteo si fronteggiano per vari secoli. L'idea di vuoti interstiziali nella materia è viva ancora nel terzo secolo a. C. nella tradizione ellenistica. Le fonti originali si perdono. Per rileggere Aristotele bisogna attendere il 1000-1100 quando si hanno le prime traduzioni prima dall'arabo in latino, poi dal greco in latino.

Prima vi è solo una tradizione di tipo orale, manualistica. (?)

Intorno al 1200 rinasce la discussione sul vuoto: si tratta di una polemica filosofica di stampo scolastico.

Il problema diventa un problema fisico con Galilei e con la scuola galileiana, in particolare con Torricelli.

Nel trattato giovanile "De Motu" Galileo confuta l'argomento di Aristotele. Se per Aristotele la relazione tra velocità e densità del mezzo era :

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{d_2}{d_1}$$

Galilei introduce una correzione:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{w_{corpo} - w_1}{w_{corpo} - w_2}$$

dove w è il peso specifico: se il peso specifico del vuoto è zero, la velocità nel vuoto è comunque finita.

Cade l'argomento di Aristotele per sostenere la non esistenza del vuoto tramite il moto.

In realtà Galilei è abbastanza incerto nella concezione del vuoto e così pure lo sarà Newton.

L'atomismo nel '600 era visto dalla Chiesa come teoria eretica: alcuni sostengono che uno dei motivi della condanna di Galilei fu la sua presunta adesione all'atomismo, che andava contro il dogma della transustanziazione.

L'esperienza che fonda il discorso sperimentale sul vuoto è quella famosa di Torricelli.

In una lettera a Michelangelo Ricci, Torricelli descrive il suo esperimento fatto con il mercurio.

Nel tubo si forma una zona dove presumibilmente c'è il vuoto. Un argomento a favore dell'esistenza del vuoto è che, prendendo tubi di forma diversa, l'altezza della colonna di mercurio rimane la stessa indipendentemente dal volume del "vuoto" sovrastante. Se in quel volume ci fosse qualcosa di diverso dal vuoto dovrebbe cambiare l'altezza del mercurio per una sorta di "repugnanza" del vuoto. L'esperimento torricelliano ebbe vastissima risonanza a livello europeo: dal 1644 in poi tutti lo replicavano. In Francia Pascal e in Inghilterra Boyle si occuparono della questione appena vennero a conoscenza dell'esperienza di Torricelli. Nel giro di dieci anni tutti i circoli culturali di Europa parlavano di questo esperimento. L'argomento "vuoto" fino ad allora discusso tra frati diventa a metà '600 in voga nei salotti culturali e nei cenacoli scientifici.

Anche Newton si occuperà più tardi della questione. Nell' "Ottica" opera ingiustamente sottovalutata rispetto ai Principia, in cui Newton mostra quello che è il vero lavoro del fisico, con aggiustamenti, contraddizioni, aggiunte, viene trattata anche la teoria della materia, non meno importante e in correlazione con la teoria della gravitazione.

Non è chiaro tuttavia se Newton creda nell'esistenza del vuoto o no.

In ogni caso, fino all'800 la teoria della materia resta strutturata alla maniera newtoniana secondo il modello di punti materiali che interagiscono con forze a distanza.

Tale teoria verrà soppiantata dalla teoria di Faraday e Maxwell del campo. La propagazione del campo (delle onde elettromagnetiche) deve essere però supportata da un mezzo. Questo mezzo è l'etere.

Maxwell crede ancora nell'etere, sostanza che permea tutto lo spazio e riempie i luoghi apparentemente vuoti.

Se da un lato la scoperta di Rutherford mette in crisi l'idea di materia continua, la relatività mostra definitivamente l'inutilità dell'etere.

STORIA MODERNA DEL VUOTO

Con Rutherford ci si deve convincere che il vuoto esiste.

Diamo allora una nuova definizione provvisoria di vuoto: è ciò che rimane in una regione dello spazio dopo che è stato eliminato tutto ciò che può essere rimosso con mezzi sperimentali.

La teoria quantistica del campo condurrà ad un concetto di vuoto più strutturato, più complesso, con una dinamica, un'energia, una pressione.

Introduciamo alcuni esempi di trattazione del vuoto con l'approccio della teoria relativistico-quantistica di Dirac.

CREAZIONE DI COPPIE NEL VUOTO

Nella teoria quantistico-relativistica si ottiene per l'energia l'espressione:

$$E^2 = m^2 c^4 + c^2 p^2$$

Si avrebbero quindi teoricamente due soluzioni per E: una positiva e una negativa.

Classicamente si trascura la soluzione negativa. Ciò si può giustificare con il fatto che in fisica classica la variazione di energia avviene in modo continuo. Non c'è perciò nessun modo per il sistema di passare da uno stato di energia positiva ad uno stato ad energia negativa. Per fare ciò il sistema dovrebbe passare attraverso tutti gli stati intermedi che sono però stati non permessi per il sistema.

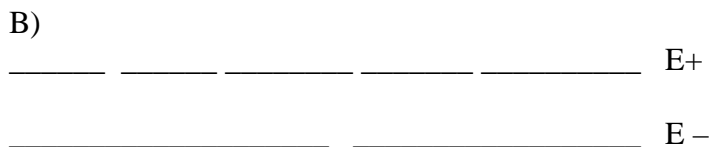
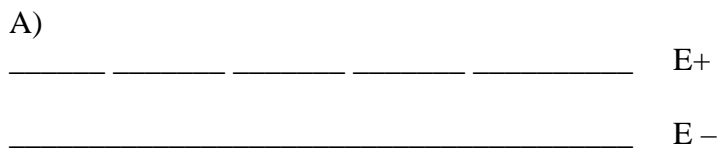
Quantisticamente sono possibili transizioni da energia positiva ad energia negativa. In questo senso però le particelle dovrebbero saltare spontaneamente sempre a stati ad energia negativa (stati di energia minore e quindi più stabili).

Per risolvere tale incongruenza Dirac ipotizza che tutti gli stati di energia negativa siano già occupati e per il principio di esclusione di Pauli, non se ne possano aggiungere altri.

TEORIA DEL MARE DI DIRAC (1930)

Gli elettroni, essendo fermioni, soddisfano il principio di Pauli: due elettroni non possono occupare uno stesso stato. Gli stati di energia positiva corrispondono agli elettroni che vedo. Gli stati di energia negativa sono sempre occupati e costituiscono il VUOTO.

Un elettrone però può acquistare energia e andare su strati di energia positiva, per esempio se applico un campo elettrico o magnetico sufficientemente forte.



La situazione A) corrisponde al vuoto, lo stato B) corrisponde all'esistenza di due particelle: un elettrone e un positrone corrispondente alla lacuna lasciata dall'elettrone (antiparticella di energia positiva).

Questa generazione di una coppia di particelle non è un fatto inconsueto. Ci vuole energia sufficiente fornita da un fotone ad esempio.

Ogni elettrone ha un'energia di massa:

$$E = mc^2$$

L'energia necessaria per la generazione delle due particelle è perciò:

$$E = 2mc^2$$

circa un milione di eV: si tratta di un'energia alta ma normale per un acceleratore di particelle dove la creazione di coppie è un fatto frequentissimo.

POLARIZZAZIONE DEL VUOTO

Mare di Dirac

Le particelle 1 e 2 , per esempio protone ed elettrone, polarizzano il vuoto esattamente come un campo elettrico polarizza un dielettrico. Si formano dei dipoli. Il campo elettrico genera un campo di polarizzazione P : il campo risultante è la somma dei due.

Cambia la costante dielettrica, cambia la forza di Coulomb, cambiano pertanto le interazioni.

Si rileva sperimentalmente un effetto dovuto alla polarizzazione del vuoto. Si misura una variazione della forza di interazione. Tale effetto previsto da Serber nel 1945 è stato misurato con grande precisione da Lamb nel 1947.

ENERGIA DEL VUOTO

Riprendiamo l'esempio iniziale delle due piastre. Casimir calcolò l'energia per unità di superficie del vuoto.

$$\frac{E_{vuoto}}{S} = -\frac{\pi\hbar c}{720d^3}$$

Derivando rispetto a d trovo la pressione

$$\frac{F_{vuoto}}{S} = -\frac{\pi_2\hbar c}{240d^4} \cong 10^{-19} \frac{N}{m^2}$$

per piastre di un centimetro.

Tale pressione è stata misurata da Sparnaay (1958).

Si può valutare il rapporto tra l'energia del vuoto e l'energia elettrica in varie situazioni. Per esempio per un condensatore tale rapporto è circa

$$5 \cdot 10^{-30}$$

Per un microchip è circa

$$5 \cdot 10^{-2}$$

Nel primo caso si tratta di un numero bassissimo che dà luogo ad effetti non rilevabili; nel secondo caso è ancora piccolo ma può farsi sentire.

(Sia Casimir che Sparnaay lavoravano alla Philips)

La discussione sul vuoto è tuttora al centro degli studi di fisica teorica, in particolare della teoria quantistica dei campi. Il vuoto è dunque definito come lo stato del sistema di energia minore. In realtà tale energia è infinita: la presenza degli infiniti nella teoria quantistica dei campi ha provocato molte reazioni di dissenso presso alcuni fisici che la guardano come una teoria provvisoria, “brutta” che necessita di essere superata da altre senza infiniti scomodi. Resta il fatto però che, trattando nei problemi non energie assolute, ma differenze di energie in cui gli infiniti si elidono (si pensi per analogia alla differenza di potenziale che viene definita univocamente mentre il potenziale assoluto dipende da un parametro c), è possibile dedurre risultati sensati e le previsioni teoriche sono in perfetto accordo con l’esperienza. Ad oggi la teoria fisica corretta per spiegare fenomeni dove entra in gioco il vuoto è la teoria quantistica dei campi.

In una categorizzazione della fisica su tre livelli:

-STATI

-LEGGI

-SIMMETRIE

il vuoto occupa il livello più basso: è uno stato dell’universo.

Gli studi più recenti hanno quindi posto in luce una nuova idea del vuoto come ente dinamico e pieno di “sorpresa”. Potrebbero esistere vuoti “diversi” che danno origine a fenomeni e a leggi diverse. Il vuoto potrebbe non essere così indifferenziato come pensava Aristotele, potrebbe non rispettare certe simmetrie che invece presentano le leggi fisiche (rottura spontanea della simmetria). Insomma il vuoto non solo esiste ma ha un’energia, una pressione e può creare materia.