

Materia e vuoto

Fognano, 30 settembre 2017

Jaime Julve

Consejo Superior de Investigaciones Cientificas. Madrid.

Nell'antichità, il concetto stesso di **materia** e le ipotesi sulla sua natura, inestricabilmente legati a quelli relativi al **vuoto**, sono nati avvolti nel mistero, "spiegati" dalle cosmogonie religiose e infine, oggetto di speculazione filosofica. Nell'era moderna, lo studio delle loro proprietà ha validato il vecchio atomismo greco e ci ha scoperto anche un mondo subatomico, ma la perplessità sta caratterizzando nuovamente la nostra conoscenza al riguardo, per via soprattutto della più recente Cosmologia. In questa relazione, inevitabilmente breve, ripasseremo sommariamente l'evoluzione storica delle idee, contesto imprescindibile per meglio capire il paradigma particellare, oggi comunemente accettato, prima di azzardare un riassunto delle sorprese e dei grandi interrogativi attuali. Questi provengono sia dalla teoria quantistica che dalla cosmologia, e ci stanno riconsegnando un mistero se possibile ancora più profondo. Assumiamo il rischio della scelta e della ponderazione della rilevanza dei problemi aperti nel momento attuale.

Un poco di storia.

Per quanto la ricerca sul pensiero antico è riuscita a concludere, le idee preistoriche sulla natura del mondo materiale cominciano a uscire dall'ambito magico con l'avvento dei miti creazionisti, nei quali i confini tra le cosmogonie religiose, le mitologie e le speculazioni filosofiche vere e proprie sono molto sfumati. Nell'evoluzione del pensiero fino alla modernità è cruciale il contributo della filosofia greca con la concezione e prima chiara formulazione dell'ipotesi atomistica ad opera della scuola di Leucippo e Democrito. Come sappiamo, l'ateismo materialista implicito in questa visione del mondo (che riguarderebbe persino il mondo "spirituale" costituito pure esso da "atomi" spirituali *psychè*, in corrispondenza agli *archè* materiali), destò la viva reazione degli idealisti, con Platone in testa. Anche Aristotele non crede all'atomismo, che invece viene ripreso posteriormente da Epicuro e Lucrezio.

A noi interessa sottolineare, anche in maniera molto semplificata, che le concezioni classiche di materia (articolata negli elementi primordiali Acqua-Terra-Aria-Fuoco, pensabili in termini atomistici per la scuola democritea) e di vuoto sono caratterizzate da un insieme di proprietà contrapposte:

Materia: essere, percettibilità, movimento, molteplicità e divenire, che sono, nell'atomismo, il risultato del comportamento di aggregati (che si possono anche disperdere) di entità microscopiche non osservabili che sono eterne, immutabili e indivisibili, appunto gli *atomi*.

Vuoto: non essere, nulla metafisico, continuo, infinito, senza centro né altri riferimenti (alto, basso, estremo), eterno, contenitore passivo e inerte dei fenomeni protagonizzati dalla materia.

Dopo secoli in cui l'indagine si restringe alla speculazione filosofica, segnata nel cristianesimo dal platonismo e dall'aristotelismo, bisogna aspettare al progresso della chimica con Dalton, Proust e Lavoisier per avere conferma dell'ipotesi atomistica come spiegazione più naturale delle proporzioni stechiometriche osservate nelle reazioni chimiche. Sorge il concetto di elementi chimici (costituiti da

atomi semplici ed uguali), sistematizzati più tardi nella tavola periodica di Mendeleev, che si combinano per dare luogo alle molecole che costituiscono l'immensa varietà delle sostanze chimiche. Dagli antichi quattro elementi primordiali si passa ad una classificazione degli stati della materia secondo il tipo di aggregazione delle molecole, in solido, liquido e gas, e solo nel ventesimo secolo si riesce ad avere riscontro sperimentale della realtà degli atomi (raggi canali, spettroscopia di massa), della loro struttura (esperimenti di Rutherford), e finalmente a “toccarli con mano” realmente (nei solidi) con la microscopia ad effetto tunnel.

Tuttavia è bene ricordare che, per dare spiegazione a fenomeni concreti, lungo questo percorso sono state immaginate ipotesi, come quelle del Flogisto (per i fenomeni di combustione) o dell'Etere (per la propagazione della luce), presto abbandonate, che hanno interessanti analogie con alcuni aspetti della situazione attuale.

La caratterizzazione dei diversi tipi o stati della materia è data dalla loro **Equazione di Stato**, fondamentale per descrivere le loro proprietà termodinamiche e altre. L'archetipo è la ben nota equazione di stato dei gas ideali (Clapeyron, 1834) che lega le proprietà macroscopiche di pressione (P), volume (V) e temperatura (T , in gradi Kelvin) corrispondenti a una data quantità di materia:

$$P V = n R T \quad [1]$$

dove R è la costante dei gas perfetti e n è il numero di mole presenti (una mole è una quantità di sostanza che abbia $6,022 \cdot 10^{23}$ molecole, cioè il Numero di Avogadro; la massa di questa quantità vale $m = n M$, cioè dipende dalla Massa Molecolare M della sostanza, multiplo di quella dell'Idrogeno). La materia condensata, liquida o solida, segue altre equazioni che rendono conto della loro ben maggiore incompressibilità. Il progresso sperimentale ha poi portato alla scoperta di altri stati della materia come la materia nucleare o il plasma. In questi ultimi casi non si tratta più di materia fatta di pacifici aggregati di atomi o molecole neutri, ma di forme più estreme che si danno in condizioni in cui le anteriori non possono più sussistere.

L'equazione [1] si può riscrivere in forma più generale e adatta al confronto con gli altri tipi di “materia” di interesse cosmologico, come la “polvere fredda”, la radiazione pura ed altre. Passando il volume V come divisore al secondo membro e introducendo la densità $\rho_m = m/V = nM/V$ di massa per unità di volume abbiamo l'espressione $P = \rho_m RT/M$. Sempre per uso cosmologico, è più conveniente fare riferimento alla densità di energia $\rho = \rho_m c^2$ (derivata dalla formula $E = mc^2$), con la quale abbiamo

$$P = \omega \rho \quad [2]$$

dove, per i gas ideali, si ha:

$$\omega = RT/(M c^2) \ll 1 \quad [3]$$

che, dato il valore molto elevato della velocità c della luce, ha sempre valori molto piccoli.

Ricordiamo per ultimo che fino all'arrivo della Teoria Quantistica dei Campi (QFT, elaborata negli anni venti del secolo scorso), tutte le forme di materia fin qui contemplate, così come il loro evolversi, avvengono in seno ad un tempo e uno spazio **vuoto** galileiani-newtoniani preesistenti (fusi nello spazio-tempo einsteniano), ritenuti da Kant categorie aprioristiche.

Materia, forze e vuoto: il Modello Standard

Allo stato attuale dell'evidenza sperimentale, come descritta dal Modello Standard delle Particelle Elementari (SMP), il mondo fisico è composto da particelle elementari di materia ("barionica" i quark e "leptonica" gli elettroni, muoni, tau ed i loro neutrini) e forze fondamentali tra di esse (elettromagnetica, nucleare debole e nucleare forte). La natura quantistica del mondo fa sì che queste forze interparticellari abbiano anch'esse un volto particellare o "quanti" (fotone, bosoni deboli e gluoni), sicchè la distinzione tra materia e forze (o radiazione) sia molto più sfumata che in precedenza. Il quadro si completa (o complica) con il Campo di Higgs (il cui quanto è il famoso Bosone), a sua volta responsabile della "acquisizione della massa" da parte della maggioranza delle particelle elementari (fanno eccezione solo il fotone, i gluoni e l'ipotetico gravitone), proponendo una novella e ultima "tavola periodica" dei costituenti subatomici (dove la gravitazione non viene contemplata).

Three generations of matter (fermions)

	I	II	III	
mass →	2.4 MeV/c ²	1.27 GeV/c ²	171.2 GeV/c ²	0
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name →	u up	c charm	t top	γ photon
Quarks	4.8 MeV/c ²	104 MeV/c ²	4.2 GeV/c ²	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	d down	s strange	b bottom	g gluon
Leptons	<2.2 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<15.5 MeV/c ²	91.2 GeV/c ²
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z⁰ Z boson
Gauge bosons	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²	80.4 GeV/c ²
	1	-1	-1	±1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e electron	μ muon	τ tau	W[±] W boson

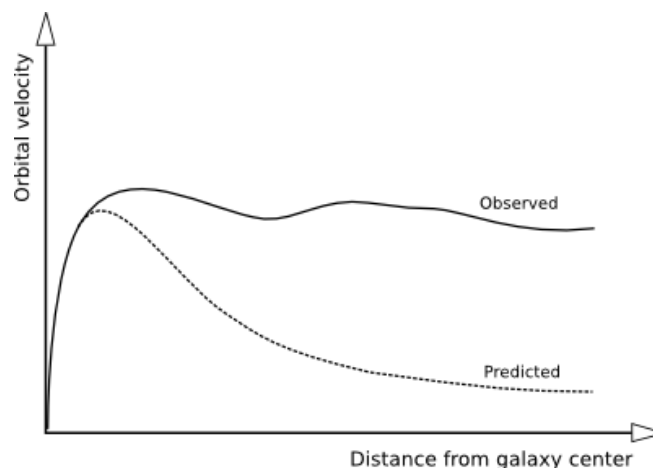
125 GeV/c²
0
0
H
Higgs boson

Va detto subito che una caratteristica, quale la massa, tradizionalmente associata al concetto intuitivo di materia, nella visione attuale è molto meno esclusiva di quest'ultima dal momento che la teoria della Relatività (ristretta) assegna una massa ad ogni forma di energia ($E = mc^2$), anche a quella "pura" della radiazione, e (per il Principio di Equivalenza, alla base della Relatività Generale) si tratta di massa nel senso più ampio: massa inerziale e massa gravitazionale. Una certa chiarificazione viene comunque dalla precisazione che le particelle di vera materia (quark e leptoni) hanno una "massa a riposo" non nulla, a differenza delle eccezioni sopracitate. Per concludere questo punto, diciamo che si conviene chiamare Materia quella costituita dalle prime, che sono **fermioni** (spin $\frac{1}{2}$, cioè semi-intero) e sono sostanzialmente o danno luogo ad aggregati stabili (atomi, ecc.), e Forze alla manifestazione delle altre, che sono **bosoni** (spin intero: 0 il bosone di Higgs, 1 il fotone, i bosoni deboli ed i gluoni, mentre il gravitone avrebbe spin 2). Tuttavia i bosoni di Higgs e quelli deboli W e Z hanno una massa a riposo assai elevata, rimescolando di nuovo il confine tra materia e forze.

L'integrazione della teoria quantistica con quella relativistica porta alla QFT già menzionata, lo strumento formale oggi usato per descrivere il comportamento delle particelle elementari e fare i calcoli. In questo formalismo le particelle sono eccitazioni di una entità che impregna tutto lo spazio, cioè il corrispondente “campo quantistico”, di cui il “vuoto” è il suo stato di minima energia, a “numero di occupazione” (di particelle) zero, qualcosa di ben diverso dal nulla metafisico. Non solo, il formalismo prevede che lo spazio vuoto fisico brulichi in realtà di coppie particella-antiparticella “virtuali”, cioè che si creano dal nulla (meglio, dallo stato di numero di occupazione zero), vivono durante un brevissimo istante inosservabile (rendendo questa violazione della conservazione dell'energia compatibile con il principio di indeterminazione tempo-energia) e si annichilano tra di loro. Questo fenomeno viene chiamato “polarizzazione del vuoto”, ha conseguenze fisiche indirette osservabili, e illustra il fatto che lo spazio “vuoto” è uno stato fisico diverso dal nulla, con proprietà fisiche concrete come determinati valori della costante dielettrica e della permeabilità magnetica. Possiamo riassumere dicendo che, nello schema della QFT, lo spazio vuoto non contiene materia “reale”, ma non è neanche una realtà radicalmente distinta o contrapposta ad essa. Ma, come vedremo nel seguito, nella successione di veli che faticosamente solleviamo nello studio della natura, la QFT (concretizzata nello SMP) non è neppure l'ultimo.

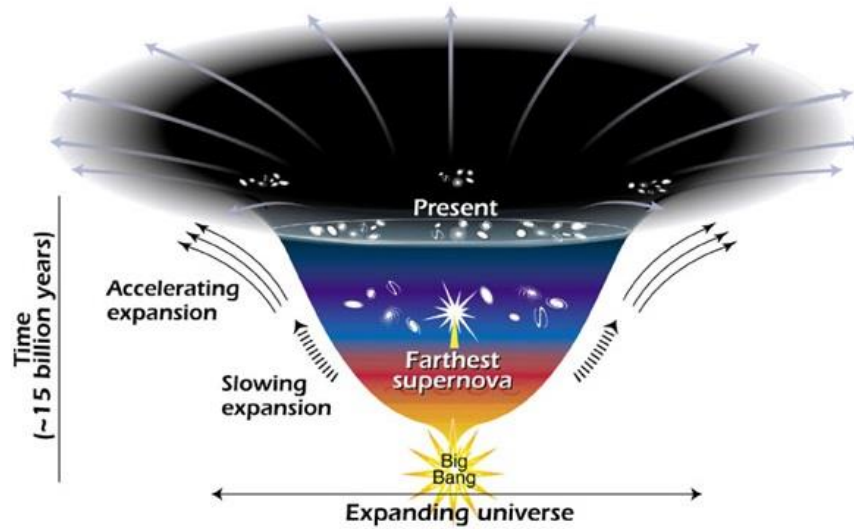
Materia oscura e Fluidi cosmologici

Infatti, l'osservazione della rotazione delle galassie mostra che la velocità orbitale delle stelle attorno al centro della galassia non decresce come ci si aspetterebbe dal contenuto di materia visibile, ma rimane pressochè costante o addirittura, in certi casi, aumenta con l'aumentare della distanza al centro, quasi si trattasse della rotazione di un disco rigido.



La spiegazione più immediata è che, oltre alla materia visibile nelle galassie (stelle, polveri, gas ionizzati e gas neutro), esiste anche, e in quantità molto superiore, un altro tipo di materia, detta “oscura”, assolutamente diversa da quella conosciuta e che si fa sentire solo dalla sua attrazione gravitazionale. Ritenuta “non barionica”, sarebbe fuori dall'ambito dello SMP.

A sua volta l'osservazione dello spazio lontano pare mostrare, in maniera abbastanza incontrovertibile, che l'intero universo non è solo in espansione, ma che questa espansione sta accelerando.



La descrizione globale del Cosmo maggioritariamente accettata è quella che ci offre la Relatività Generale (RG) tramite la famosa Equazione di Campo di Einstein,

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

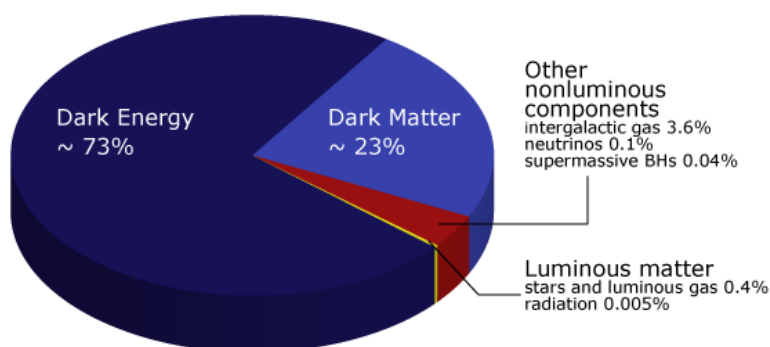
dove G è la costante gravitazionale, $g_{\mu\nu}$, $R_{\mu\nu}$ e R (rispettivamente il tensore metrico, la curvatura di Ricci e la curvatura scalare; gli indici greci prendono valori da 1 a 4 corrispondenti alle coordinate dello spazio-tempo) sono oggetti matematici che descrivono la geometria dello spazio-tempo, e $T_{\mu\nu}$ è il “Tensore di energia-impulso” che esprime il contenuto di materia. Quest’ultimo determina quindi la geometria come una soluzione dell’equazione. Nell’ipotesi che questa descrizione sia corretta, per avere una soluzione corrispondente ad uno spazio-tempo in espansione accelerata si è costretti ad introdurre termini *ad hoc* in $T_{\mu\nu}$, cioè ad invocare la presenza di un misterioso contenuto nell’universo che produca questo effetto: la famosa “Energia oscura”.

L’aspetto straordinario è che questa sostanza, che giustamente si stenta a chiamare Materia e la si assegna alla vaga categoria di “Fluido cosmologico”, deve avere un’equazione di stato del tutto anomala. Infatti, per avere accelerazione dell’espansione, il parametro ω nell’equazione di stato [2] deve avere valore negativo $\omega < -1/3$, e i valori negativi di ω per un gas tradizionale (formule [2] e [3]) implicherebbero l’assurdità di avere pressione o temperatura negative. Una tale sostanza è completamente estranea ad ogni evidenza sperimentale in laboratorio terrestre fino ad oggi, e non se ne immagina un possibile correlato o riscontro atomico-particellare concepibile. La famosa “Costante cosmologica” einsteniana Λ , che corrisponde al valore $\omega = -1$ e produce una accelerazione esponenziale, rientra in questa categoria di sostanze esotiche. Un valore $\omega < -1$ produrrebbe una accelerazione ancora più violenta, raggiungendosi una espansione infinita (Big Rip) in un tempo finito.

Per avere una idea complessiva della situazione proponiamo il seguente quadro che esprime i valori di ω per i diversi tipi “materia” e gli effetti che producono nell’evoluzione globale del cosmo.

Contenuto cosmologico	Valore di ω	Dinamica risultante
<div><div>↑</div><div>Familiare o concepibile</div><div>Campi scalari</div><div>Radiazione</div><div>Materia calda</div><div>Materia fredda</div><div><div>Oscura, Gas</div><div>Polvere</div></div></div>	<div>1</div> <div>1/3</div> <div>0</div>	Decelerazione
<div><div>↓</div><div>Esotico</div><div>Energia oscura</div><div>Λ</div><div>Energia fantasma</div></div>	<div>-1/3</div> <div>-1</div>	
		Big Rip

Allo stato attuale delle osservazioni, e tenuto conto del contributo frenante dell’espansione degli altri ingredienti dell’universo, il valore di ω che meglio si aggiusta ai dati è $\omega \approx -1$, quindi il dominio di una costante cosmologica come responsabile dell’accelerazione osservata. In termini quantitativi di energia, la distribuzione dei componenti che si desume da molteplici dati astrofisici è la seguente:



Possibili candidati particellari per la materia oscura sono oggetto di ricerca al CERN e in altri laboratori, senza risultati per ora. Scartato un possibile rilevante (da quando si è scoperto che hanno una massa non nulla) contributo dei neutrini, per ragione della loro velocità relativistica, si cercano candidati in ipotetici modelli oltre lo SMP, come Assioni, WIMPS (particelle pesanti debolmente interagenti), particelle “supersimmetriche”, ecc. Altri candidati presi in considerazione sarebbero miriadi di piccoli buchi neri primordiali, ma per definizione il tipo di materia in esso contenuta è nascosto alla osservazione. Dal punto di vista dei riscontri sperimentali in laboratorio, l’energia oscura appartiene invece, in maniera ancora più spinta, al regno della pura speculazione.

Considerazioni finali

La situazione sulla natura e sui confini tra il vuoto fisico e le diverse forme di materia o sostanze che sembrano all'opera nella Natura, è più controversa e affascinante che mai.

Limitandoci alla fisica nota nel cielo e nei laboratori terrestri, la RG e la QFT (concretizzata nello SMP) convergono nel proporre che spazio e materia hanno una natura comune e profondamente intrecciata. Per la QFT tutto lo spazio è pervaso dai campi quantistici, di cui il “vuoto” è lo stato di minima energia, ed i corpuscoli elementari di materia sono eccitazioni di questo vuoto (che comunque ribolle sempre di effimere coppie particella-antiparticella “virtuali”). Lo spazio (la sua geometria) a sua volta è modellato dal contenuto di materia secondo le equazioni della RG, quindi è coerente lo scenario del Modello Cosmologico Standard (SCM) secondo cui spazio-tempo e materia si creano insieme come realtà interconnesse nel momento del Big Bang. Tuttavia manca ancora una formulazione compiuta delle QFT in uno spazio-tempo curvo, così come la Teoria delle Stringhe, anche se prevede il gravitone, non riesce neanche a dare ragione di uno spazio-tempo con le caratteristiche della RG. Questo problema dell'unione della Teoria quantistica e la Gravitazione einsteiniana resiste da mezzo secolo ed è tuttora aperto.

La Materia oscura esulerebbe dallo SMP, ma gli effetti gravitazionali dei suoi addensamenti, osservati e misurati nelle galassie, ne rendono la sua ipotesi molto avvincente. Resta il mistero della sua natura microscopica riscontrabile in laboratorio, ma la ricerca in fisica delle particelle elementari spera di trovarla, aprendo la finestra a una nuova fisica oltre lo SMP per la quale abbondano d'altra parte i modelli (nelle “Teorie di grande unificazione” o “Supersimmetriche” per esempio).

L'ipotesi dell'Energia oscura è invece molto insoddisfacente già solo dal punto di vista della filosofia della scienza, dal momento che è molto lontana da ogni riscontro sperimentale. L'unico effetto osservabile, l'accelerazione dell'espansione cosmica, sarebbe quello per cui è stata invocata, e si tratterebbe quindi solo di un'ipotesi “ausiliare” o “convenzionalista”, non falsificabile nel senso di Popper. Come alternativa si può pensare a modifiche della RG, ma al prezzo di altre difficoltà.

A causa di questi inconvenienti, la natura persistentemente speculativa di entrambe le sostanze cosmiche “oscure” può anche essere il sintomo che si tratti di strade errate, come il vecchio Etere di fine ottocento eliminato dalla Relatività, da superare con nuove teorie, per ora ignote, e forse nuovi postulati di partenza. Così per esempio, accettando che l'energia oscura si possa ridurre a una costante cosmologica, si potrebbe pensare a incorporarla nell'assunto che lo spazio-tempo globale di base non sia più quello minkowskiano piatto, ma quello a curvatura costante di de Sitter corrispondente a quella costante cosmologica, e che questa a sua volta, vista come “energia del vuoto”, risulti dalla compresente dinamica quantistica universale non più limitata a causare la “polarizzazione del vuoto”. Il campo di Higgs (il cui “valore d'aspettazione nel vuoto”, all'origine della massa delle particelle elementari, pare scartato come candidato alla costante cosmologica per problemi di ordini di grandezza), sarebbe comunque profondamente coinvolto.

In questa affascinante confusione con cui parte il terzo millennio, al meno alcune acquisizioni paiono ragionevolmente sicure: lo spazio fisico vuoto è diverso dal nulla metafisico e ha uno status più complesso di un semplice apriorismo kantiano-newtoniano; lo spazio-tempo si crea con la materia stessa e con essa ha una inestricabile interconnessione che ne rende i confini molto incerti; e infine che indubbiamente «ci sono più cose in cielo e in terra, Orazio, di quante ne sogni la tua filosofia».