

# *Sic transit materia mundi*

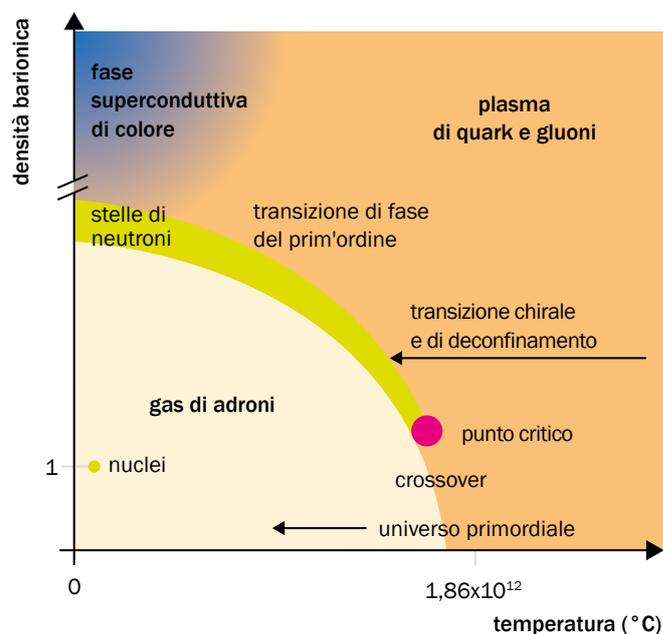
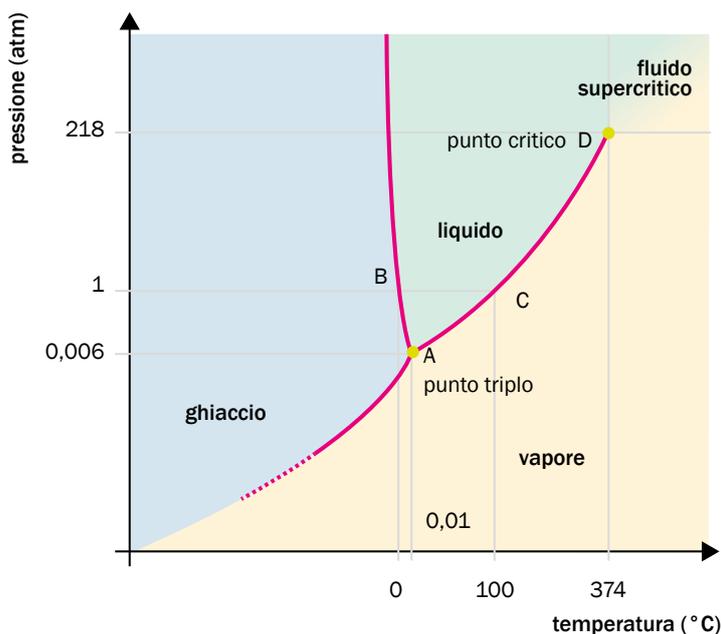
## Le fasi della materia adronica

di Alessandro Drago



Conosciamo fin dall'antichità il comportamento dell'acqua al variare della temperatura: sappiamo che, se siamo al livello del mare (ovvero alla pressione atmosferica di riferimento), l'acqua è solida sotto 0 gradi Celsius, è un vapore al di sopra dei 100 gradi (la temperatura di ebollizione) e un liquido alle temperature intermedie. Abbiamo anche imparato che la temperatura di ebollizione diminuisce al diminuire della pressione: in cima a una montagna l'acqua bolle a meno di 100

gradi! Sappiamo anche che la transizione fra liquido e vapore alla pressione atmosferica avviene in modo discontinuo: quando riscaldiamo l'acqua nella pentola, la temperatura resta fissata a 100 gradi finché tutta l'acqua non è evaporata. Il calore che stiamo fornendo viene usato per dissociare le molecole d'acqua e non per innalzare la temperatura del liquido. Questa energia, necessaria per trasformare l'acqua liquida in vapore, si chiama "calore latente" e la sua esistenza caratterizza quelle che si



b.

A sinistra, diagramma di fase dell'acqua nel piano temperatura (in gradi Celsius) e pressione (in atmosfere). Alla pressione di una atmosfera, l'acqua è nella sua forma liquida fra 0 gradi (punto B) e 100 gradi (punto C). Alla temperatura di 374 gradi e alla pressione di 218 atmosfere (punto critico D) la transizione fra liquido e vapore avviene in modo continuo, senza calore latente. Nel punto A le tre fasi (solido, liquido e vapore) co-esistono. Le linee rosse denotano le transizioni di fase del prim'ordine. A destra, diagramma di fase della materia fortemente interagente (materia adronica) nel piano temperatura (in gradi Celsius) e densità barionica (in unità della densità nucleare, pari a circa  $2,7 \times 10^{14}$  g/cm<sup>3</sup>).

chiamano "transizioni di fase del primo ordine".

In fig. 1 è mostrato un esempio schematico di diagramma di fase dell'acqua. Il diagramma mostra per quali valori di temperatura e di pressione esiste una delle tre fasi. È indicato un punto critico (il punto D, vd. fig. b a sinistra): a temperature superiori a circa 374 gradi non c'è più una transizione del primo ordine fra la fase liquida e la fase gassosa, ma le due fasi si trasformano in modo continuo, senza calore latente.

Il diagramma di fase racchiude molte informazioni cruciali riguardo al comportamento di una sostanza in funzione di due variabili termodinamiche, ad esempio temperatura e pressione. La scelta di questa coppia di variabili termodinamiche non è univoca: si sarebbero potute scegliere al loro posto, ad esempio, la densità e la temperatura. La struttura del diagramma di fase dell'acqua discende dal tipo di interazione fra le molecole. Nel caso dall'acqua la forza che si esercita fra le varie molecole è ben descritta dall'interazione di Van der Waals, a sua volta interpretabile in termini di interazioni elettromagnetiche fra atomi e quindi fra elettroni. Essa è attrattiva a distanze dell'ordine di mezzo nanometro (un miliardesimo di metro) e diventa fortemente repulsiva a distanze inferiori.

In tempi recenti si è studiato il comportamento di un tipo di materia molto più estremo: la materia nucleare, ovvero quella che costituisce i nuclei atomici. Se nel caso dell'acqua le distanze coinvolte sono dell'ordine del nanometro, nel caso della materia nucleare sono dell'ordine del femtometro, un milione di volte più piccole. E se le temperature rilevanti nel caso dell'acqua sono dell'ordine delle centinaia di gradi, nel caso della materia nucleare sono un miliardo di volte più grandi.

Come sappiamo, i nuclei atomici sono composti da neutroni e protoni, ma questi, a loro volta, sono costituiti da quark che interagiscono scambiandosi gluoni, in modo simile a come gli elettroni di una molecola interagiscono scambiandosi fotoni. Possiamo immaginare i neutroni e i protoni (e più in generale tutti i barioni) come delle piccole sacche all'interno di ciascuna delle quali ci sono tre quark. Una delle domande che la fisica si è posta negli ultimi decenni riguarda la possibilità di formare uno stato della materia in cui i quark, invece che essere racchiusi nelle sacche a formare i barioni, si possono muovere liberamente in uno spazio molto più grande. Questo processo viene chiamato "deconfinamento".

Si può allora tracciare un diagramma di fase per il comportamento della materia nucleare (vd. fig. b a destra). Esso mostra il comportamento della materia nucleare in funzione della temperatura e della densità. La regione di basse densità e temperature è costituita dalla materia ordinaria, cioè da quark che sono raggruppati a tre a tre a formare barioni, oppure in coppie quark-antiquark a formare mesoni. È il tipo di materia che conosciamo da sempre, costituita da barioni con masse grandi, che costituiscono oltre il 99,9 % della massa della materia ordinaria. Queste grandi masse sono legate a un meccanismo in cui una simmetria, detta "chirale", è rotta. Se invece quella simmetria è preservata (come capita alle alte temperature), le masse dei quark sono circa cento volte più piccole di quelle dei neutroni e protoni (a basse temperature). La regione di alte temperature e bassissime densità è ben studiata: tanto i calcoli teorici, quanto gli esperimenti di collisioni di nuclei ad altissime energie indicano che non c'è una vera transizione di fase fra la

regione popolata da barioni e mesoni e quella in cui i quark deconfinati convivono con i gluoni. Si tratta di una transizione graduale detta “crossover”, analoga a quella che si ha alle altissime temperature nel caso dell’acqua.

Questa transizione è avvenuta una volta nell’universo primordiale, quando aveva l’età di circa 10 microsecondi ed è passato dalla fase di plasma di quark e gluoni a quella di adroni. Molti ritengono però che al crescere della densità si raggiunga un punto critico, oltre il quale la transizione diventa del primo ordine. Al momento non ci sono però dati sperimentali che lo confermino. Da notare che alle alte temperature non solo i quark sono deconfinati, ma la simmetria chirale non è più rotta e quindi le masse dei quark sono molto più piccole. La ricerca riguardo al processo di adronizzazione è ancora in pieno sviluppo: ad esempio, recentemente è stato mostrato che, se la frazione di elettroni, muoni e tauoni, all’epoca dell’adronizzazione nell’universo primordiale, fosse più grande di quanto finora ipotizzato, la densità dei quark crescerebbe anch’essa e potrebbe essere più grande di quella critica, ottenendo quindi una transizione del primo ordine.

La regione di altissime densità e temperature non troppo elevate è stata molto studiata teoricamente e si pensa che quella materia sia in uno stato “superconduttore”, ovvero che i quark deconfinati formino delle coppie correlate, come succede nel caso degli elettroni nei materiali detti, appunto, “superconduttori”. Questa materia ha una bassissima viscosità e può essere anche molto legata. È importante notare che questo stato della materia non sarebbe costituito solo da quark up e down (quelli presenti nei neutroni e protoni), ma anche da quark strange. Questi ultimi sono presenti, ad esempio, negli “iperoni” (simili per certi versi a neutroni e protoni, ma con appunto almeno un quark strange). Alle altissime densità, i quark up, down e strange sarebbero quindi deconfinati e formerebbero delle coppie correlate. In particolare, è possibile che questo stato della materia sia realizzato almeno al centro delle stelle di neutroni, dove vengono raggiunte le più alte densità nell’universo (vd. p. 22, ndr).

Per chiudere, vale la pena menzionare una possibilità teorica suggerita oltre quaranta anni fa da Arnold R. Bodmer ed Edward Witten: che lo stato fondamentale della materia, quello più legato, sia proprio costituito da una miscela di quark up, down e strange. Il motivo per cui la materia ordinaria, costituita da neutroni e protoni, non decadrebbe in quello stato ancora più legato è che i quark strange possono essere prodotti solo tramite le interazioni deboli, che, alle normali densità dei nuclei atomici, richiederebbero tempi lunghissimi per generare un numero sufficientemente grande di quark strange. Le implicazioni dell’ipotesi di Bodmer e Witten sono innumerevoli: dall’esistenza di stelle fatte integralmente di quark deconfinati alla possibilità che la materia oscura sia costituita, appunto, da grumi di quark up, down e strange. La validazione o la negazione di questa ipotesi richiede ancora molto lavoro, e passa anche attraverso lo studio dei processi di adronizzazione che avvengono dopo la formazione del plasma di quark e gluoni negli esperimenti come ALICE al CERN, in cui l’INFN gioca un ruolo cruciale.



c. Edward Witten negli anni in cui propose l’ipotesi che la materia oscura sia costituita da agglomerati macroscopici di quark up, down e strange. Witten è uno dei massimi fisici teorici viventi, ha ricevuto molti premi non solo per la fisica ma anche per la matematica, fra cui una medaglia Fields, l’equivalente per la matematica del premio Nobel.

#### Biografia

**Alessandro Drago** è professore ordinario di fisica teorica presso l’Università di Ferrara. È stato il coordinatore nazionale della iniziativa specifica dell’INFN che si occupa di stelle di neutroni e della materia che le costituisce. Negli ultimi dieci anni ha studiato in molti articoli varie implicazioni dell’ipotesi di Bodmer-Witten e la possibile co-esistenza di stelle di neutroni e di stelle fatte integralmente da quark deconfinati.