

Il tensore energia-impulso per un fluido relativistico accelerato all'equilibrio termodinamico

(The stress-energy tensor for a relativistic accelerated fluid at thermodynamic equilibrium)

RELATORE: Prof. Francesco Becattini (francesco.becattini@unifi.it) CANDIDATO: Andrea Aniello

In meccanica statistica relativistica, lo stato di equilibrio di un sistema fisico continuo è descritto da un operatore densità $\hat{\rho}$, e dipende da un campo quadri-vettoriale β chiamato quadri-temperatura e proporzionale, tramite l'inverso della temperatura propria, alla quadri-velocità locale. Nel caso di equilibrio termodinamico locale, la forma dell'operatore densità canonico è determinata massimizzando l'entropia, che è un funzionale dipendente dallo stesso $\hat{\rho}$, con vincoli sui valori locali di densità di energia e di impulso. L'operatore densità ottenuto in tal modo risulta in generale dipendente dal tempo, e dunque non coincide con l'operatore densità vero (che, in rappresentazione di Heisenberg, deve essere indipendente dal tempo), a meno che il campo di quadri-temperatura non soddisfi una condizione particolare, nota col nome di *equazione di Killing*. Se dunque la quadri-temperatura è un campo di Killing, allora $\hat{\rho}$ diventa indipendente dal tempo ed è adatto a descrivere l'equilibrio termodinamico globale del sistema quantistico relativistico in esame.

A seconda delle caratteristiche del campo di Killing, si hanno, nello spazio-tempo piatto di Minkowski, tre diversi tipi di equilibrio termodinamico globale: quello omogeneo, caratterizzato dalla richiesta che β sia un quadri-vettore costante accoppiato all'operatore quadri-impulso, generatore delle traslazioni spazio-temporali; quello rotante, in cui, accanto all'operatore di quadri-impulso, compare nell'espressione di $\hat{\rho}$ un termine aggiuntivo proporzionale, tramite una velocità angolare, al generatore delle rotazioni intorno ad un asse; ed infine quello accelerato, in cui il termine aggiuntivo, nell'argomento dell'esponenziale presente nell'espressione di $\hat{\rho}$, è dato dal prodotto di un'accelerazione per il generatore del boost di Lorentz lungo un asse. Questo lavoro di tesi è dedicato allo studio di quest'ultimo caso.

Si studiano dunque le proprietà termodinamiche di un fluido relativistico accelerato all'equilibrio termodinamico, calcolando il tensore energia-impulso costruito a partire da un campo scalare reale libero nel caso di massa nulla. La media esatta del tensore, cui è sottratto il contributo divergente del vuoto, viene effettuata dapprima sfruttando le cosiddette condizioni KMS, che istituiscono delle utili relazioni tra i correlatori fisici, e successivamente partendo dalla soluzione completa dell'equazione di Klein-Gordon: in ambo i casi, si trovano valori consistenti di densità di energia e di pressione, che differiscono dai valori assunti nel caso di equilibrio omogeneo per correzioni quadratiche nell'accelerazione.

Si tenta quindi di studiare il caso massivo, mettendosi nel limite (in generale rispettato) di masse molto grandi rispetto alle accelerazioni in gioco nel problema (in unità naturali), senza trovare tuttavia risultati significativi.

Nel secondo metodo, quello della soluzione completa, il campo scalare reale libero viene sviluppato in due regioni dello spazio-tempo di Minkowski, dette *Right Rindler Wedge* (RRW) e *Left Rindler Wedge* (LRW), nelle quali il campo di Killing risulta time-like ed è dunque possibile definire univocamente uno stato di vuoto, detto *vuoto di Rindler*. Tale stato non coincide con la restrizione dello stato di vuoto di Minkowski a queste due regioni esterne al cono luce, e anzi il vuoto di Minkowski, per l'osservatore accelerato, rappresenta un bagno termico di particelle con una distribuzione di Bose-Einstein a temperatura fissata e proporzionale all'accelerazione: tale fenomeno è noto col nome di *effetto Unruh*, e viene trattato nell'ultima parte del lavoro.

Si discute infatti la sottrazione del termine di vuoto, osservando che è possibile sottrarre alla media statistica del tensore energia-impulso sia lo stato di vuoto di Rindler sia quello di Minkowski, e che la sottrazione di quest'ultimo comporterebbe un ulteriore termine, rappresentato proprio da una distribuzione di Bose-Einstein a temperatura fissata e proporzionale all'accelerazione. Da qui si congetture l'esistenza di un limite inferiore per la temperatura inerziale (e anche per quella propria del fluido accelerato), noto col nome di *temperatura di Unruh*. Al di sotto di tale valore, le medie delle osservabili fisiche risulterebbero in generale negative.