



Scuola di  
Scienze Matematiche  
Fisiche e Naturali  
Corso di Laurea Triennale Fisica e  
Astrofisica

**Relatore:**  
Prof. Lapo Casetti  
lapo.casetti@unifi.it

**Candidato:**  
Michele Segantini

## Stati stazionari fuori dall'equilibrio in sistemi con interazioni a lungo raggio

Con stati stazionari fuori dall'equilibrio si intendono i particolari stati in cui si vengono a trovare i sistemi con interazioni a lungo raggio durante la loro evoluzione. Ogni sistema posto in un qualsiasi stato iniziale, dopo un certo intervallo di tempo, raggiunge lo stato di equilibrio di Boltzmann Gibbs, determinato mediante i parametri termodinamici esterni. Tuttavia, a causa della natura delle loro interazioni, i sistemi con interazioni a lungo raggio sono caratterizzati da una dinamica molto complessa e il tempo di rilassamento verso l'equilibrio diverge con il numero di particelle costituente il sistema. Da questo consegue che nei casi reali è possibile osservare solo stati intermedi, detti quasi-stazionari, nei quali il sistema risulta essere intrappolato per tempi estremamente lunghi.

In natura esistono molti esempi di sistemi con interazioni a lungo raggio e per questo è interessante analizzarne le proprietà. Nella maggior parte dei casi si tratta di problemi aperti per i quali non si è ancora trovata una descrizione quantitativa soddisfacente. L'analisi delle proprietà dinamiche di questi sistemi può essere affrontata seguendo un approccio statistico e probabilistico oppure utilizzando gli strumenti della simulazione numerica. Uno dei primi tentativi fatti per analizzare la dinamica dei sistemi con interazioni a lungo raggio è stato proposto da Lynden-Bell (1967) per cercare di dare una spiegazione della distribuzione della luce nelle galassie ellittiche. I risultati da lui ottenuti hanno come base di partenza modelli stellari 3D ma, in realtà, sono validi in contesti generali anche se non concordano a pieno con i risultati delle simulazioni numeriche effettuate su certi modelli. Uno dei modelli più utilizzati è il modello di hamiltoniana di campo medio (modello HMF) per la sua semplicità di risoluzione analitica e numerica. In questo lavoro di tesi viene presa in esame la dinamica dei sistemi con interazioni a lungo raggio. Per prima cosa viene spiegata la distinzione tra sistemi con interazioni a corto raggio e a lungo raggio. Dato l'interesse verso l'analisi delle proprietà dinamiche viene derivata l'equazione di Vlasov ricavando prima l'equazione di Klimotovich (capitolo 1). Successivamente vengono mostrate le caratteristiche degli stati quasi-stazionari e le ipotesi fatte da Lynden-Bell per lo studio dei modelli stellari 3D arrivando ad ottenere dei risultati generali estendibili anche ad altri casi (capitolo 2). In questa maniera si dispone di tutti gli strumenti necessari per condurre lo studio della dinamica del modello HMF (capitolo 3).

I risultati ottenuti nell'elaborato permettono di fare delle riflessioni circa la teoria sviluppata da Lynden-Bell. Le ipotesi fatte da questo ultimo non possono essere applicate in generale a tutti i sistemi con interazioni a lungo raggio. Infatti, la soluzione trovata per l'equazione di Vlasov è diversa dai risultati ottenuti mediante le simulazioni numeriche. Teorie alternative a quella di Lynden-Bell sono state proposte ma in questo lavoro di tesi non sono state esaminate. Ognuna delle proposte fatte fino ad ora è valida in certi casi e presenta dei problemi in altri. Questo significa che ancora non esiste una teoria generale che sia in grado di descrivere in maniera soddisfacente la dinamica di tutti i sistemi a lungo raggio.