

## Abstract

In this thesis we investigate the real-time evolution of strongly coupled systems using holographic techniques. In particular, we study the anomalous transport in strongly coupled plasmas, such as the quark-gluon plasma, and the dynamics of non-hermitian  $\mathcal{PT}$ -symmetric systems.

First, we study the chiral vortical effect (CVE) far from equilibrium in a strongly coupled holographic field theory. Rotation is represented as a perturbation via a gravitomagnetic field on top of a five-dimensional charged AdS Vaidya metric. We also introduce a momentum relaxation mechanism through linear scalar field backgrounds and study the CVE dynamics as a function of charges, temperature and momentum relaxation. We pay special attention to the effects of the gravitational contribution to the axial anomaly in the CVE of the axial current. The far-from-equilibrium behaviour shows that the CVE builds up with a significant time delay compared to the quasi instantaneous equilibration of the background metric. We develop an analytical estimate of this delay and also compute the near-equilibrium quasinormal modes that determine the late time ring down.

We then move on to the study of the out-of-equilibrium chiral magnetic effect (CME). We consider the back-reaction of the magnetic field on the geometry and monitor the pressure and the chiral magnetic current. Our results show that, in general, at small magnetic fields the pressure builds up faster than the CME current, while at strong magnetic fields the opposite is true. At large magnetic fields we also find that equilibration is significantly delayed due to long-lived oscillations. We also match the parameters of our model to QCD parameters and draw conclusions that may be relevant to the realisation of the chiral magnetic effect in heavy ion collisions. In particular, we find an equilibration time of about  $\sim 0.35$  fm/c in the presence of the chiral anomaly for plasma temperatures of the order of  $T \sim 300 - 400$  MeV. We also find in holography that for collider energies like those achieved at RHIC, the lifetime of the magnetic field is long enough to build up the chiral magnetic current, whereas the lifetime of the magnetic field at the LHC seems to be too short.

The CME is further studied in a generalised setup that includes topological charge dissipation. In holography, this is done by giving the bulk gauge field a mass. We study the cases where axial charge is initially present in the plasma and where axial charge is initially generated. For small values of the anomalous dimension, the CME response is qualitatively equivalent in both cases. Large values of the anomalous dimension lead to faster dissipation. A parameter scan of the model shows that, like the CME current, the axial charge also oscillates for sufficiently large magnetic field and/or anomaly strength. We refine the QCD matching and find that the CME signal at the LHC can be comparable to the signal at RHIC, provided that there is at least three times as much axial charge in the plasma:  $n_5^{LHC} = 3n_5^{RHIC}$ .

Finally, we study the evolution of non-Hermitian  $\mathcal{PT}$  symmetric holographic field theories when the couplings are varied with time, with particular emphasis on the question of non-unitary time vs. unitary time evolution. The notion of non-Hermitian  $\mathcal{PT}$ -symmetric quantum theory has recently been generalised to gauge/gravity duality. We show that a non-unitary time evolution in the dual quantum theory corresponds to a violation of the Null Energy Condition (NEC) in the bulk of the asymptotically AdS spacetime. We find that varying the non-Hermitian coupling causes the horizon of a bulk AdS black hole to shrink. On the other hand, varying the Hermitian coupling in the presence of a constant non-Hermitian coupling still violates the NEC, but results in a growing horizon. We also show that by introducing a non-Hermitian gauge field, the time evolution can be made unitary, i.e. the NEC is obeyed in the bulk, and an exactly equivalent purely Hermitian description can be given.

## Resumen

En esta tesis investigamos la evolución en tiempo real de sistemas fuertemente acoplados utilizando técnicas holográficas. En particular, estudiamos el transporte anómalo en plasmas fuertemente acoplados, como el plasma de quark-gluones, y la dinámica de sistemas  $\mathcal{PT}$ -simétricos no-hermíticos.

En primer lugar, estudiamos el efecto vortical quiral (CVE) lejos del equilibrio en una teoría cuántica de campos holográfica fuertemente acoplada. La rotación se implementa como una perturbación a través de un campo gravitomagnético en una métrica tipo Vaidya cargada de cinco dimensiones. También introducimos un mecanismo para estudiar la disipación del momento. Esto se hace a través de tres campos escalares a los que se da un perfil lineal. Así, estudiamos la dinámica del CVE como función de las cargas, temperatura y disipación de momento. Prestamos especial atención a los efectos que tiene la contribución gravitatoria a la anomalía axial en la corriente vortical quiral. El comportamiento lejos del equilibrio muestra que la CVE se genera con un retraso significativo en comparación con el equilibrio instantáneo de la métrica subyacente. Desarrollamos una estimación analítica de este retardo y también calculamos los modos cuasinormales que determinan la evolución cerca del equilibrio.

A continuación, pasamos al estudio del efecto magnético quiral (CME) fuera de equilibrio. Consideramos la reacción del campo magnético sobre la geometría y monitorizamos la presión y la corriente magnética quiral. Nuestros resultados muestran que, en general, a campos magnéticos pequeños la presión responde más rápido que la corriente CME, mientras que a campos magnéticos fuertes ocurre lo contrario. En campos magnéticos grandes también observamos que el equilibrio se retrasa significativamente debido a la presencia de oscilaciones de larga duración. También ajustamos los parámetros de nuestro modelo a los parámetros QCD y sacamos conclusiones que pueden ser relevantes para la realización del efecto magnético quiral en colisiones de iones pesados. En particular, encontramos un tiempo de equilibrio de aproximadamente  $\sim 0.35 \text{ fm}/c$  en presencia de la anomalía quiral para temperaturas de plasma del orden de  $T \sim 300 - 400 \text{ MeV}$ . También encontramos en holografía que para energías de colisionador como

las alcanzadas en el RHIC, el tiempo de vida del campo magnético es suficientemente largo para construir la corriente magnética quiral, mientras que el tiempo de vida del campo magnético en el LHC parece ser demasiado corto.

El CME se estudia más a fondo en una configuración generalizada que incluye la disipación de carga topológica. En holografía, esto se hace dando una masa al campo gauge. Estudiamos los casos en los que la carga axial está inicialmente presente en el plasma y en los que la carga axial se genera inicialmente. Para valores pequeños de la dimensión anómala, la respuesta de la CME es cualitativamente equivalente en ambos casos. Valores grandes de la dimensión anómala conducen a una disipación más rápida. Una exploración de parámetros del modelo muestra que, al igual que la corriente CME, la carga axial también oscila para un campo magnético y/o una intensidad de anomalía suficientemente grandes. Refinamos las consideraciones experimentales y encontramos que la señal CME en el LHC puede ser comparable a la señal en RHIC, siempre que haya al menos tres veces más carga axial en el plasma:  $n_5^{LHC} = 3n_5^{RHIC}$ .

Finalmente, estudiamos la evolución de las teorías de campo holográficas  $\mathcal{PT}$ -simétricas no hermíticas cuando los acoplamientos varían con el tiempo, con particular énfasis en la cuestión de la evolución temporal no unitaria frente a la unitaria. La noción de teoría cuántica simétrica  $\mathcal{PT}$  no hermítica se ha generalizado recientemente a la dualidad gauge/gravedad. Demostramos que una evolución temporal no unitaria en la teoría cuántica dual corresponde a una violación de la Condición de Energía Nula (NEC) en el espaciotiempo asintóticamente AdS. Encontramos que la variación del acoplamiento no-Hermítico hace que el horizonte de un agujero negro AdS se encoja. Por otro lado, la variación del acoplamiento hermítico en presencia de un acoplamiento no hermítico constante sigue violando la NEC, pero da lugar a un horizonte creciente. También mostramos que, introduciendo un campo gauge no hermítico, la evolución temporal puede hacerse unitaria, es decir, la NEC se cumple, y puede darse una descripción puramente hermítica exactamente equivalente.