



# Il tempo e gli orologi

## Time & Clocks

Candidato: Giulio Barni (giulio.barni@stud.unifi.it)  
Relatore: Prof.ssa Paola Verrucchi (verrucchi@fi.infn.it)

Il tempo è un concetto inscindibilmente legato alla natura e all'esperienza dell'uomo; esso viene posto, insieme con il concetto di spazio, a fondamento dei modelli dell'Universo e dei fenomeni che in esso accadono. Fisicamente è una grandezza relativa, definita solo attraverso il metodo usato per la sua misurazione ed il problema della misurazione del tempo è uno dei più rilevanti fra quelli affrontati nel corso dei secoli dagli scienziati. In Meccanica Classica il tempo è considerato un parametro esterno al sistema che evolve. Anche nella Meccanica Quantistica (MQ) convenzionale, il tempo entra nel formalismo come un parametro classico dato a priori ed è l'Hamiltoniana che genera l'evoluzione degli stati. La Relatività Generale, d'altra parte, per assicurare la covarianza generale del sistema richiede che l'Hamiltoniana totale sia nulla cosicché si giunge alla conclusione che "niente si muove", cioè che "non c'è tempo".

Sebbene la nozione classica di tempo riesca a descrivere la maggior parte dei fenomeni fisici, è doveroso darne una descrizione pienamente quantistica. Una prima definizione quantistica di tempo fu proposta dal fisico Bryce DeWitt nel 1960, che afferma: "*Different times are special cases of different Universes*". Solo nel 1983 però, tale definizione è stata formalizzata da Don Page e William Wootters, in un articolo pubblicato su Phys. Rev D, facendo riferimento ad un meccanismo detto, in letteratura, meccanismo PaW. La loro proposta consiste nel promuovere tutte le variabili di un modello ad operatori, uno dei quali opererà sullo spazio di Hilbert di un sistema quantistico che funga da orologio, così da descrivere l'evoluzione del sistema mediante le probabilità di ottenere certi risultati da misure condizionate al fatto che una lettura del sistema orologio dia come risultato il valore  $t$ .

Nel 2013, all'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica a Torino, E. Moreva e coautori hanno effettuato il primo test sperimentale dell'idea di Page e Wootters confermando la validità del meccanismo PaW, tale esperimento è descritto in un articolo pubblicato su Phys. Rev. A. Un successivo lavoro di V. Giovannetti, S. Lloyd e L. Maccone, pubblicato nel 2015 in Phys. Rev. D ha proposto una formalizzazione rigorosa dell'idea di Page e Wootters che, seppur presentando alcune inconsistenze e criticità, ci è sembrato opportuno approfondire.

Scopo di questo lavoro di tesi è stato quello di 1) approfondire il meccanismo PaW ed il ruolo che in esso assume il processo di misura quantistico, 2) analizzare il formalismo introdotto da Giovannetti, Lloyd e Maccone e 3) strutturare una nostra proposta che, a partire da tale formalismo, superasse le inconsistenze e criticità di cui sopra. In particolare nel primo capitolo introduciamo il concetto formale di misura, la definizione di processo di misura proposto da Von Neumann, ed il modello dinamico per realizzarlo proposto da Ozawa. Alla fine di tale capitolo mostriamo che il tempo è legato al processo di misura tanto da emergere proprio quando se ne effettui una. Nel secondo capitolo consideriamo il meccanismo PaW in un caso specifico per descrivere come l'evoluzione di un sistema possa essere descritta in termini di correlazioni. Nel terzo capitolo riprendiamo la proposta V. Giovannetti, S. Lloyd e L. Maccone e ne descriviamo alcune criticità in particolare riguardo al carattere quantistico dell'osservabile temporale ed alla necessità di poterne giustificare l'emergenza nella forma di parametro classico. Nel quarto ed ultimo capitolo proponiamo la nostra descrizione del meccanismo PaW, basata sull'uso di stati coerenti bosonici e delle cosiddette variabili azione-angolo (definite e descritte in appendice). La tesi si conclude mostrando come il problema dell'emergenza di un tempo classico possa così essere formalmente risolto.