

Çok Cisimli Açık Kuantum Sistemlerinde Senkronizasyon

Göktuğ Karpaz

Sabancı Üniversitesi- Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, 34956, İstanbul.

Bu çalışmada, yerel genlik sönümlenmesine maruz kalan XX spin zincirlerinde senkronizasyonu inceliyoruz. Modelin karanlık alt uzay yapısını analiz ederek, bu yapının gürültülü konumlar ve zincir uzunluğuna bağlı basit bir aritmetik fonksiyonla belirlendiğini gösteriyoruz. Yerel gözlenebilirler için kapalı bir ifade elde ediyor ve uç spinler arasında kararlı senkronizasyonun, keyfi başlangıç durumları için, ancak karanlık alt uzayın tam olarak bir tek-uyarım özdurumu desteklemesi halinde ortaya çıktığını gösteriyoruz. Aynı koşulun zincirin ucundaki spinler arasında sabit asimptotik dolaşıklığı da garanti ettiğini ispatlıyoruz.

Açık kuantum sistemlerinde çevreyle etkileşim çoğu zaman eşevresizliğe ve enerji kaybına yol açar. Bununla birlikte, uygun simetri ve karanlık alt uzay yapıları altında çevresel etkiler yalnızca bozucu bir mekanizma olmak zorunda değildir. Bu çalışmamızda, yerel genlik sönümlenmesine maruz kalan çok cisimli bir XX spin zincirinde senkronizasyonun hangi şartlar altında ortaya çıktığını inceliyoruz. Temel sonuçlardan ilki, senkronizasyonun doğrudan karanlık alt uzayın yapısı tarafından belirlendiğidir.

Ele aldığımız modelde N adet iki seviyeli sistem, en yakın komşu XX etkileşimiyle bağlanmıştır ve çevre zincirin belirli konumlarını yerel olarak etkilemektedir. Yerel genlik sönümlenmesi, bu konumlarda genliği olmayan olan tek uyarımlı özdurumları etkilemez. Dolayısıyla uzun zaman dinamiğinde yalnızca bu karanlık özdurumlar ve taban durumu kalır. Gürültülü konumlar olan m_i için tek uyarımlı karanlık özdurumların sayısı

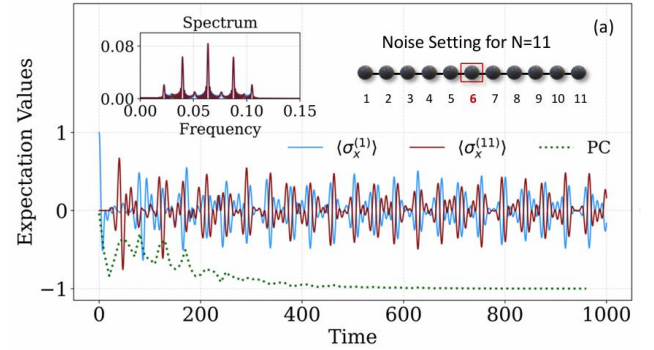
$$r = OBEB(N + 1, m_1, m_2, \dots, m_q) - 1,$$

şeklinde bir aritmetik koşulla bulunur. Bu ifade, aslında gürültülü bölgelerde düğüm oluşturan ve bu nedenle de genlik sönümlenmesinden hiçbir şekilde etkilenmeyen modları saymaktadır.

Çalışmamızın ikinci temel sonucu ise zincirde gözlemlenebilir büyüklükler için (örneğin belirli bir yöndeki spin-1/2 beklenen değerleri) kararlı senkronizasyonun ancak ve ancak uzun zaman dinamiğinde yalnızca bir tek-uyarımlı karanlık özdurum olması durumunda zincirin başlangıç halinden bağımsız bir şekilde ortaya çıkmasıdır. Başka bir deyişle, gösteriyoruz ki $r = 1$ olarak oldukça basit bir şekilde ifade edilen aritmetik koşul, zincirin uçları arasındaki senkronizasyon oluşumu için yeter ve gerek şarttır. Bu durumda

zincirin ucundaki spinler aynı frekansta salınır ve spin-1/2 beklenen değerleri de sabit bir genlik oranıyla birbirine bağlanır. Buna karşılık, birden fazla karanlık tek-uyarım özdurumu varsa, uzun zaman dinamiği genel olarak çok-frekanslı hale gelir ve senkronizasyon oluşumu ve özellikleri başlangıç durumuna bağlı olur.

Bahsettiğimiz sonuçlar, kuantum sistemlerinde senkronizasyonun Hilbert uzayı içinde bulunan karanlık alt uzayların geometrik ve spektral yapısından kaynaklanan bir fenomen olduğunu göstermektedir. Ayrıca aynı mekanizma, uzun zaman rejiminde zincirin uç noktalarında olan spinler arasında sabit bir değere sahip kuantum dolaşıklığı oluşmasına da yol açmaktadır.



Şekil 1

Yerel genlik sönümlenmesi altındaki $N = 11$ uzunluklu XX spin zincirinde uç spin senkronizasyonu. Gürültü zincirin orta konumuna, $m = 6$, uygulanmıştır. Mavi ve kırmızı eğriler sırasıyla sol ve sağ uçlardaki spinlerin $\langle \sigma_x^{(1)} \rangle$ ve $\langle \sigma_x^{(11)} \rangle$ beklenti değerlerini, yeşil kesikli eğri ise senkronizasyon ölçütünü göstermektedir. Üstteki zincir şeması gürültülü konumu, sol üstteki ek grafik ise baskın frekans bileşenlerini göstermektedir.

Kaynakça

1. Synchronization in a dissipative quantum many-body system, B. Çakmak, K. Sümer, S. Campbell, G. Karpaz, arXiv:2604.18707 (2026).