



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## **Anyonic, cosmic, and chaotic: three faces of Majorana fermions**

Cheipesh, Y.I.

### **Citation**

Cheipesh, Y. I. (2022, November 17). *Anyonic, cosmic, and chaotic: three faces of Majorana fermions*. *Casimir PhD Series*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3487143>

Version: Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/3487143>

**Note:** To cite this publication please use the final published version (if applicable).

# Samenvatting

Majorana-fermionen zijn nooit waargenomen als fundamentele deeltjes. Ze verschijnen echter in verschillende systemen als excitaties met lage energie - quasideeltjes. Bovendien kunnen gewone neutrino's uit het Standaardmodel en een deeltje van donkere materie lijken op Majorana-fermionen. Dit proefschrift bestudeert verschillende aspecten en eigenschappen van de Majorana-fermionen in vrije en wisselwerkende systemen. De laagste energie-excitaties in topologische supergeleiders hebben Majorana-aard (de zogenaamde Majorana-zero-modes of MZM's). Deze toestanden zijn geen fermionen in de normale zin, maar wanneer de twee zodanig worden gekoppeld dat hun golf functies elkaar overlappen (fusion), vormen ze een fermion. Dergelijke MZM's zijn ruimtelijk gescheiden, hebben precies nul excitatie-energie, zijn vrij van decoherentie en hebben een niet-abelse anyonische statistiek onder de uitwisseling. Men kan tekenen van MZM's en hun anyonische statistiek zien door middel van fusie. Als men vier MZM's (aangeduid met  $\gamma_i$ ) voorbereidt in de toestand waarin  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$  een toestand vormen met een bepaalde fermionpariteit, dan zal de uitkomst voor de pariteit van de toestand gevormd uit  $\gamma_2, \gamma_3$  niet-deterministisch zijn, namelijk  $\langle i\gamma_2\gamma_3 \rangle = 0$ . Dit gebeurt voor een ideaal systeem waarbij de MZM's goed gescheiden zijn van het continuüm. Zoals echter in hoofdstuk 2 wordt aangetoond, is dit in een echt systeem met enige mate van wanorde niet langer een onderscheidend kenmerk van niet-abelse MZM's. De onderliggende reden hiervoor is dat de systemen die topologisch beschermde MZM's hosten ook vatbaar zijn voor andere parasitaire toestanden in de buurt van nul-energie die de echte MZM's in de waarneembare objecten kunnen nabootsen. Desalniettemin, zoals wordt aangetoond in hoofdstuk 3, kan men dit obstakel overwinnen door te kijken naar de dynamische kenmerken van de ontarding van de grondtoestand. In het bijzonder moet men de tijdsafhankelijke evolutie in de parameterruimte van koppelingsconstanten vergelijken via twee alternatieve routes. De topologische ontarding van de grondtoestand van Majorana-zero-modes veroorzaakt een afbraak van adiabaticiteit die kan

worden gemeten als een padafhankelijke fermionpariteit. De correlatie tussen twee paden voor de toevallige ontaarding van de Andreev-niveaus is verschillend van wat zou volgen uit de Majorana-fusieregels. Een systeem van sterk wisselwerkende Majorana-fermionen wordt erg interessant als het aantal fermionen  $N$  groot is, interacties allen-op-allen zijn en willekeurig worden verdeeld. Zo'n model wordt het Sachdev-Ye-Kitaev-model (SYK) genoemd en bevat verschillende speciale eigenschappen: het heeft een exacte oplossing bij sterke koppeling zonder quasideeltjes, het heeft een conforme symmetrie in het infrarood en het is quantum-chaotisch. In dit proefschrift bestuderen we hoe deze eigenschappen zich manifesteren in waarneembare objecten. In het bijzonder vinden we in hoofdstuk 4 hoe de paar gap  $\Delta$  zich gedraagt als men het SYK-systeem koppelt aan een supergeleider. Een lagere kritische temperatuur ontstaat met een verdere toename van de koppelingssterkte. Dit gebeurt niet als men in plaats daarvan de supergeleider koppelt aan ongeordende maar niet-wisselwerkende fermionen. In dat geval valt bij het vergroten van de koppeling de supergeleiding gewoon weg. In hoofdstuk 5 hebben we het SYK-systeem bestudeerd als het gekoppeld is aan een groot fermionische reservoir dat op temperatuur nul wordt gehouden. In een dergelijk systeem verschijnt een tunnelstroom en de dynamiek van het ontladproces van het SYK-systeem (een quantum dot) onthult een onderscheidend kenmerk van de niet-Fermi toestand. In het bijzonder schaalde de halfwaardetijd van de stroom lineair met de temperatuur bij lage temperaturen, terwijl deze voor de Fermivloeistof kwadratisch schaalde. Het laatste deel van dit proefschrift, de hoofdstukken 6, 7 en 8, is gewijd aan een experiment dat zich richt op de detectie van neutrino's. We laten zien dat er een fundamentele intrinsieke beperking is op de energieresolutie van een gangbaar experiment. Het komt voort uit het onzekerheidsprincipe van Heisenberg: wanneer we de  $\beta$ -straal-emitter beperken tot een eindig volume in de ruimte, verwerft het een onzekerheid in zijn impuls die het spectrum uitsmeert. We laten ook zien dat de enige manier om dit effect te verminderen is om een zwaardere  $\beta$ -emitter te gebruiken. Meer gedetailleerd onderzoek toont aan dat de enige levensvatbare kandidaat  $^{171}\text{Tm}$  is. Dit lost echter niet alle problemen op, aangezien vastestofmaterialen een hele reeks elementaire excitaties herbergen die de intrinsieke onzekerheid van de detector beïnvloeden via een reeks mechanismen. Het onderzoek van al deze mechanismen vereist nauwe samenwerking tussen experts in zowel theoretische als experimentele vastestoffysica en kan leiden tot verdere aanpassingen van de experimentele apparatuur.