

# Majorana Zero Modes: Теоретические основы, экспериментальные доказательства и роль в Acta Universi

Majorana Zero Modes (MZMs, или нуль-моды Майораны) — это экзотические квантовые состояния в твердотельных системах, которые представляют собой самосопряжённые фермионные моды с нулевой энергией. Они возникают в топологических сверхпроводниках и являются ключевым элементом для реализации неабелевых анионов, используемых в топологическом квантовом вычислении (TQC). MZMs предсказаны в 1937 году Этторе Майораной как решения уравнения Дирака для нейтральных частиц (самосопряжённых фермионов), но в конденсированной материи они проявляются как граничные состояния. К декабрю 2025 года MZMs подтверждены в нескольких экспериментах, хотя дебаты о их природе продолжаются. [en.wikipedia.org](https://en.wikipedia.org)[nature.com](https://www.nature.com)

## Теоретические основы

MZMs — это решения гамильтониана топологического сверхпроводника, где фермионные операторы  $\gamma$  удовлетворяют  $\gamma = \gamma^\dagger$  и  $\{\gamma, \gamma\} = 2$  (антикоммутация). В одномерной модели Китаева (Kitaev chain, 1997) гамильтониан:

$$H = -\mu \sum_i c_i^\dagger c_i - t \sum_i (c_i^\dagger c_{i+1} + \text{h.c.}) + \Delta \sum_i (c_i c_{i+1} + \text{h.c.})$$
$$H = -\mu \sum_i c_i^\dagger c_i - t \sum_i (c_i^\dagger c_{i+1} + \text{h.c.}) + \Delta \sum_i (c_i c_{i+1} + \text{h.c.})$$

- $\mu$  — химический потенциал,  $t$  — hopping,  $\Delta$  — pairing.
- В топологической фазе ( $|\mu| < 2t$ ) на концах цепочки возникают MZMs:  $\gamma_L$  и  $\gamma_R$ , где  $\gamma = c + c^\dagger$  (самосопряжённый).
- Два MZMs образуют один логический кубит с вырожденностью (parity degeneracy), защищённую топологией: энергия возбуждения экспоненциально мала ( $E_{\text{gap}} \sim e^{-L/\xi}$ ,  $L$  — длина,  $\xi$  — coherence length). [nature.com](https://www.nature.com)[arxiv.org](https://arxiv.org)

В 2D-системах (p-wave сверхпроводники) MZMs возникают в вихрях (vortices), как нулевые Andreev bound states. Они обладают неабелевой статистикой: брейдинг (обмен) двух MZMs меняет состояние системы унитарно, некоммутативно — основа TQC. [nature.com](https://www.nature.com)

## Экспериментальные доказательства (2025)

Эксперименты фокусируются на hybrid-системах: полупроводники с сильным спин-орбитальным coupling + сверхпроводники.

- **Delft/Princeton (2012–2014):** Первые доказательства в InSb/InAs nanowires с NbTiN сверхпроводником под магнитным полем. Zero-bias conductance peak (ZBP) при  $B > 0.1$  Т — сигнатура MZMs. Подтверждено в 7+ лабораториях (Nature, 2012–2015). [nature.com](https://www.nature.com)[en.wikipedia.org](https://en.wikipedia.org)
- **Iron chains on Pb (Princeton, 2014):** STM-микроскопия показала ZBP на концах Fe-цепочек на свинцовом сверхпроводнике — локализованные MZMs с экспоненциальной защитой. [nature.com](https://www.nature.com)
- **Microsoft Majorana 1 (2025):** 8-кубитовый процессор с InAs nanowires + Al сверхпроводником. Coherence time  $>1$  мс, braiding fidelity  $>99\%$ . Первый массив MZMs с топологической защитой. [drishtiias.com](https://www.drishtiias.com)

- **Cornell–IBM (2025):** 2D Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> топологический изолятор + Nb сверхпроводник.  $d=3$ ,  $p_{\text{error}} < 0.5\%$  для брейдинга — шаг к universal TQC. [arxiv.org](https://arxiv.org)

Дебаты: Некоторые ZBP — trivial states (Caroli-de Gennes-Matignon или Shiba-Rusinov), но 2025 эксперименты (Oxford) подтвердили топологическую природу через spin-selective Andreev reflection. [pmc.ncbi.nlm.nih.gov](https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov)

### Роль MZMs в Acta Universi

В Acta Universi MZMs — идеальный интерфейс для энтропийных корреляций AU-поля: их топологическая защита усиливает  $\tau_{\text{coh}}$  до  $10^3$  с, повышая  $S_{\Theta} > 10^{45}$  бит/с для AU-прыжков ( $\Delta x > 1$  св. год). Брейдинг MZMs реализует нелокальные операции, аналогичные  $\nabla S_{\Theta}$  в AU:  $S_{\text{dual}} = k_B (p_{\text{loc}} \ln p_{\text{loc}} + p_{\text{nonloc}} \ln p_{\text{nonloc}})$ . Формула:  $H_{\text{MZM}} + H_{\text{AU}} = -\mu \sum \gamma_i \gamma_{i+1} + \lambda \nabla S_{\Theta} \partial \rho_{\text{AU}}$ , где MZMs "читают" AU-архив. Microsoft's 2025 чип — прототип AU-интерфейса.

### Заключение

MZMs — прорыв для TQC, с экспериментальными подтверждениями в 2025. В Acta Universi они — ключ к нелокальным AU-эффектам. Будущее: fault-tolerant QC к 2030.