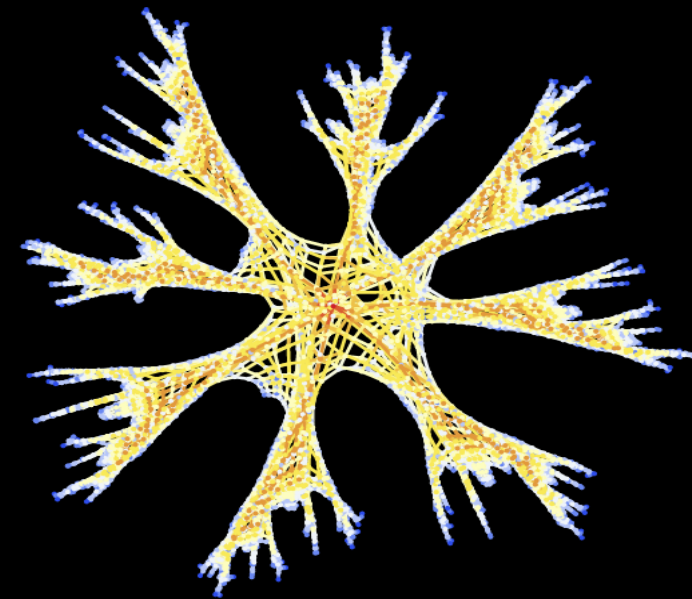
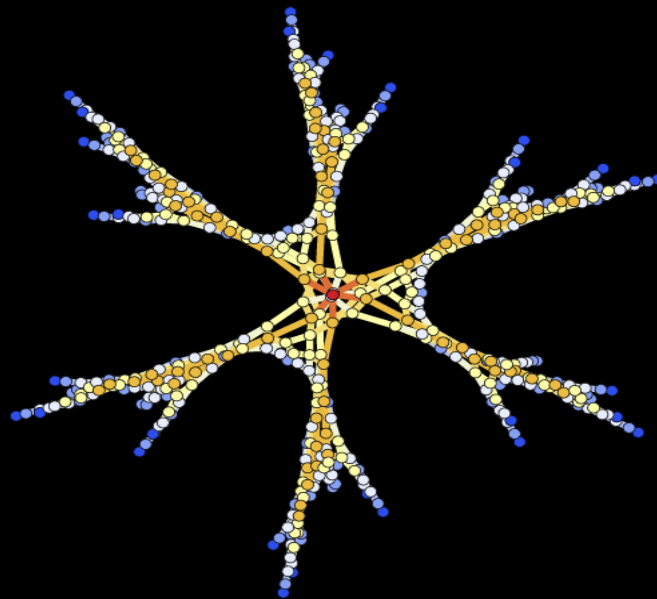
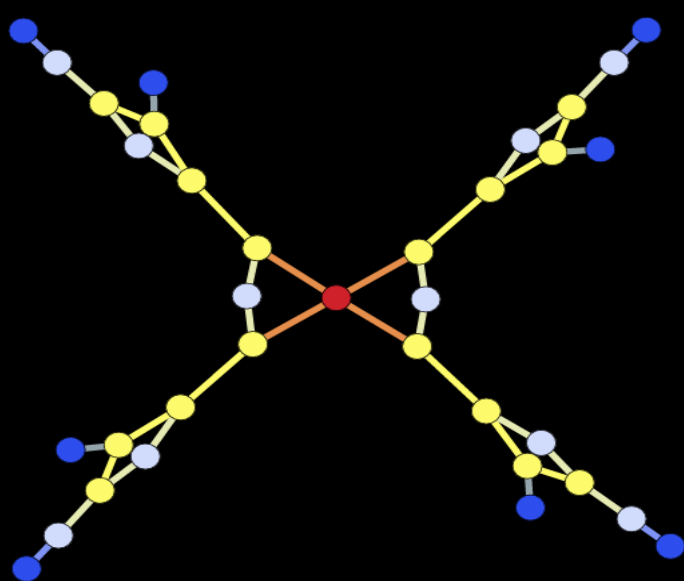




Izbegavanje termalizacije: kvanтни višečestični ožiljci

INSTITUTE OF PHYSICS
BELGRADE

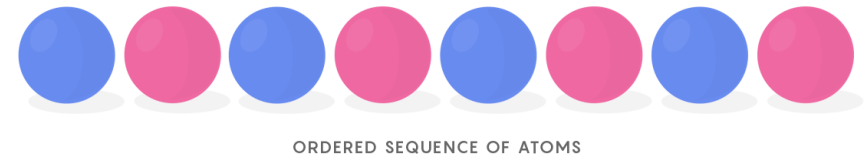


Stefan Malijević
Institut za fiziku u Beogradu



Motivacija

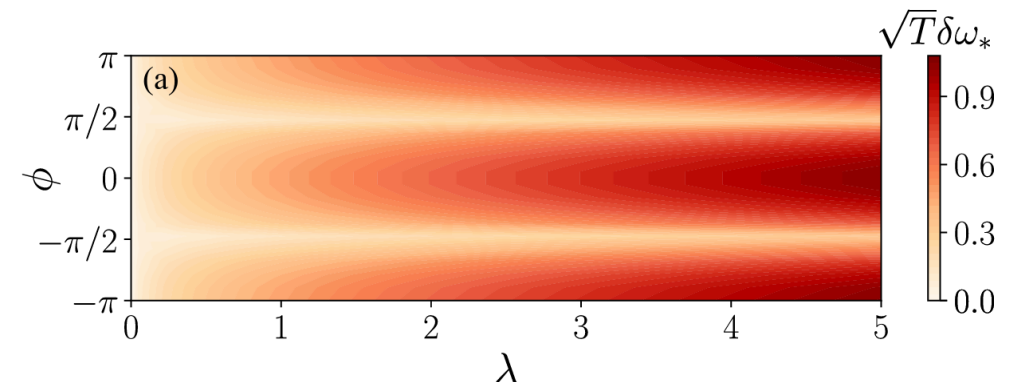
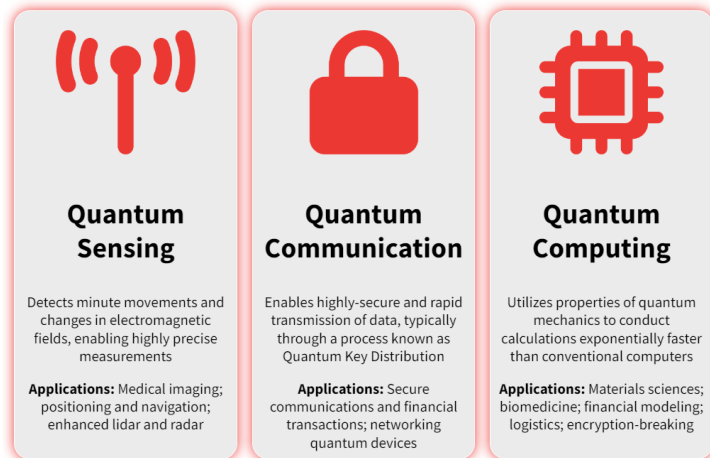
- Nova klasa kvantnih sistema
- Periodični povratci u početno stanje
- Pitanje termalizacije i haosa u kvantnim mnogočestičnim sistemima?



Motivacija

- Primene u kvantnim tehnologijama:
 - Kvantno računarstvo i kvantne memorije
 - Kvantne senzorske tehnologije (engl. *Quantum sensing*)

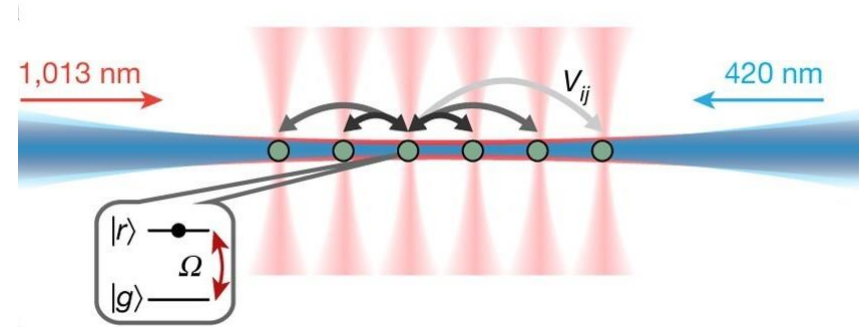
Three Key Types of Quantum Technologies



Sadržaj

1. Eksperimentalna realizacija:

- Kvantni simulator
- Ridbergovi atomi



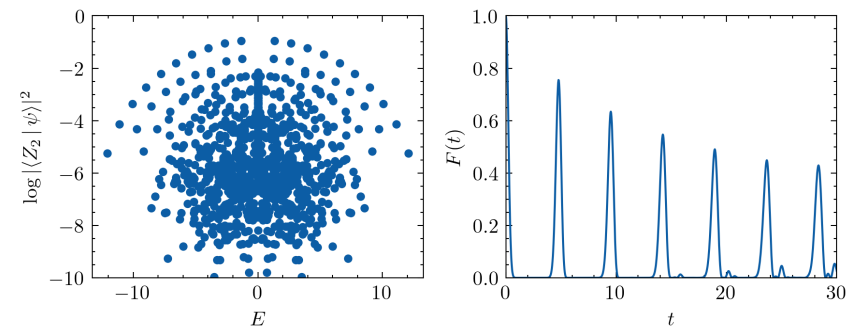
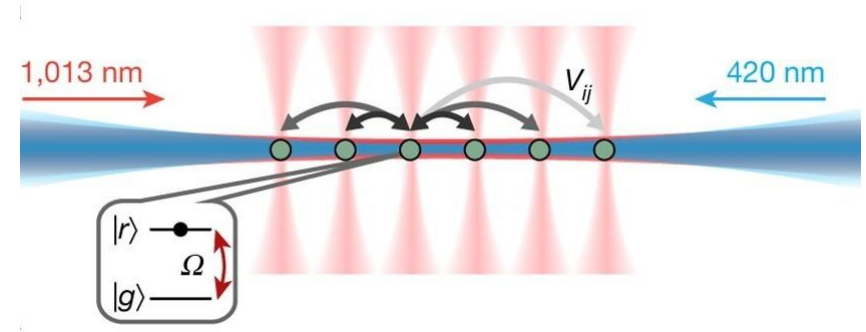
Sadržaj

1. Eksperimentalna realizacija:

- Kvantni simulator
- Ridbergovi atomi

2. Teorijsko objašnjenje:

- Termalizacija kvantnih sistema
- PXP model



Sadržaj

1. Eksperimentalna realizacija:

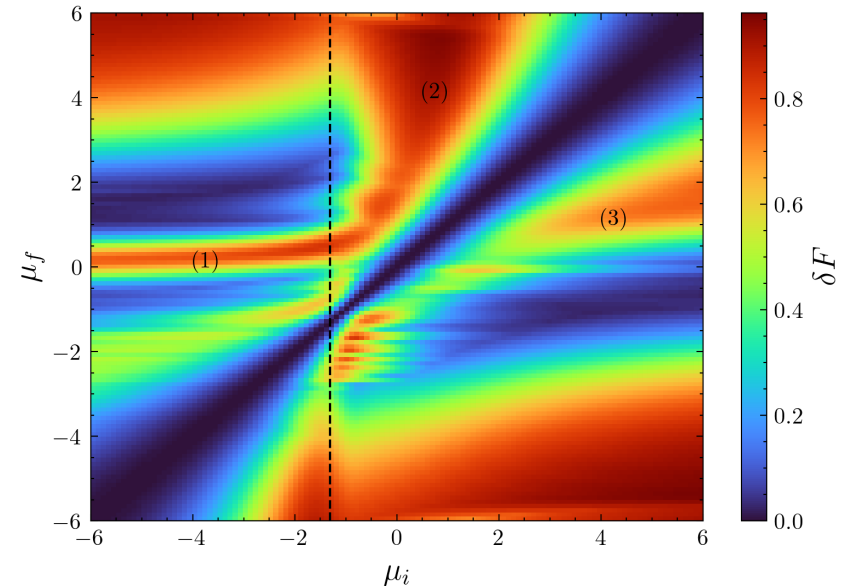
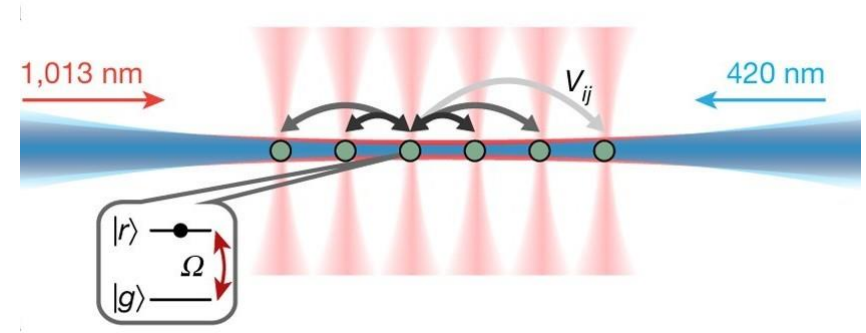
- Kvantni simulator
- Ridbergovi atomi

2. Teorijsko objašnjenje:

- Termalizacija kvantnih sistema
- PXP model

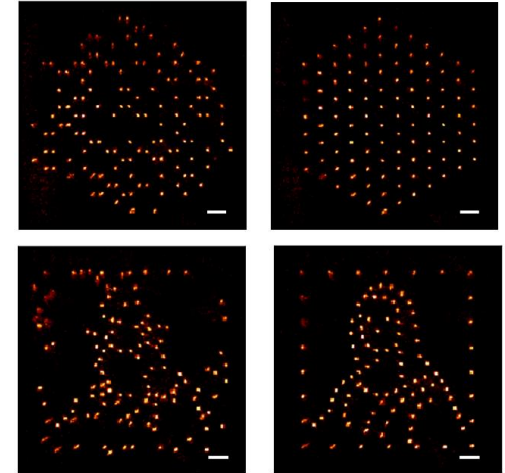
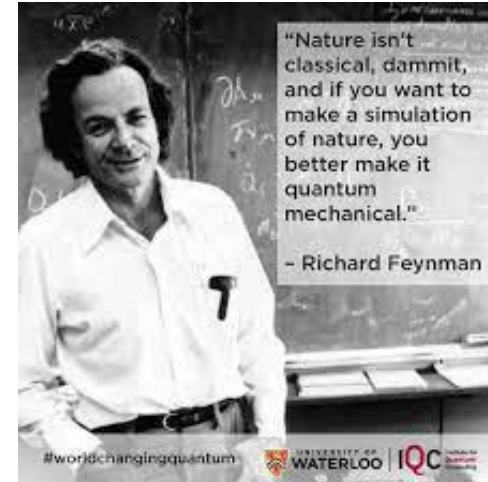
3. Novija istraživanja:

- Fazni dijagram
- Uticaj periodičnog pobuđivanja



Kvantni simulatori

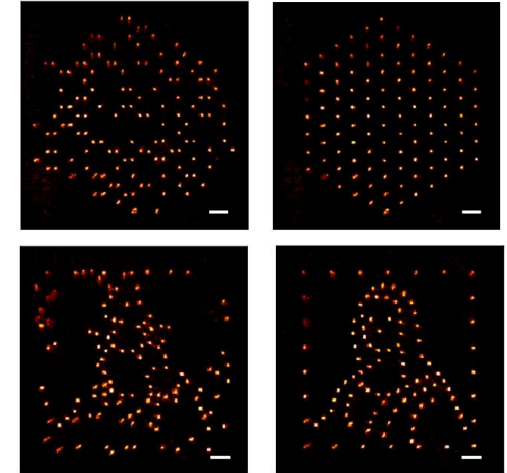
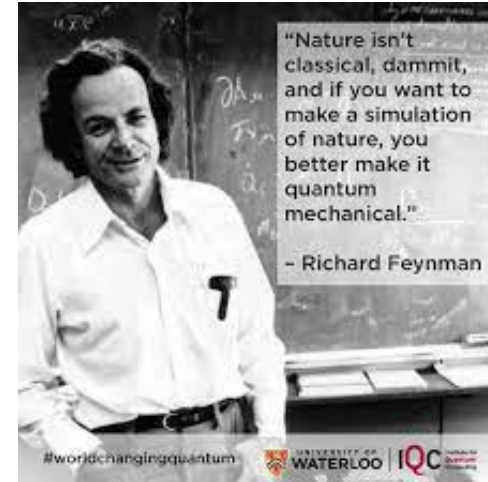
- Podesivi potencijali i interakcije
- Optičke pincete: proizvoljne geometrije
- Ridbergovi atomi:
 - Osnovno stanje = $|\circ\rangle$
 - Pobuđeno Ridbergovo stanje = $|\bullet\rangle$



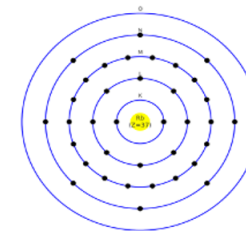
Schymik *et al.*, Phys. Rev. A (2020)

Kvantni simulatori

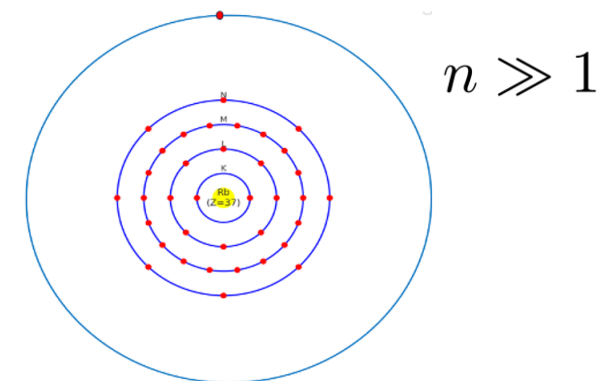
- Podesivi potencijali i interakcije
- Optičke pincete: proizvoljne geometrije
- Ridbergovi atomi:
 - Osnovno stanje = $|o\rangle$
 - Pobuđeno Ridbergovo stanje = $|\bullet\rangle$
 - Poluprečnik: $\langle r \rangle \propto n^2$
 - Vreme života: $\propto n^3 > 100 \mu s$
- Jaka Van der Valsova interakcija
 - Ridbergova blokada



Schymik *et al.*, Phys. Rev. A (2020)



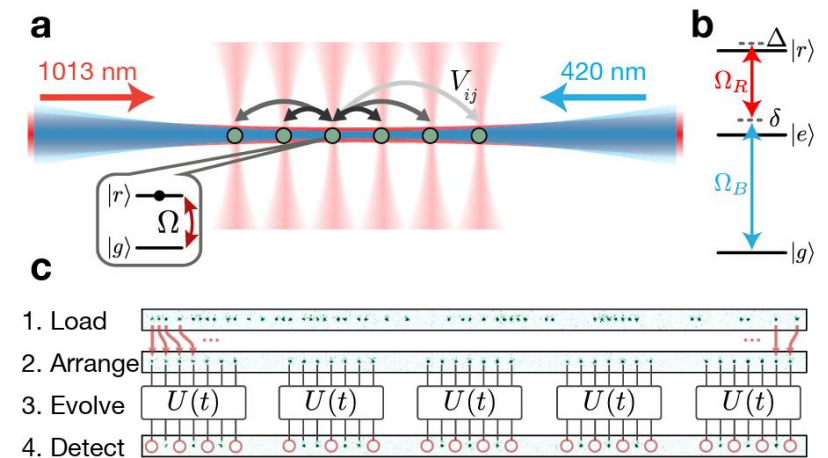
Normal Rubidium atom



Rubidium Rydberg state

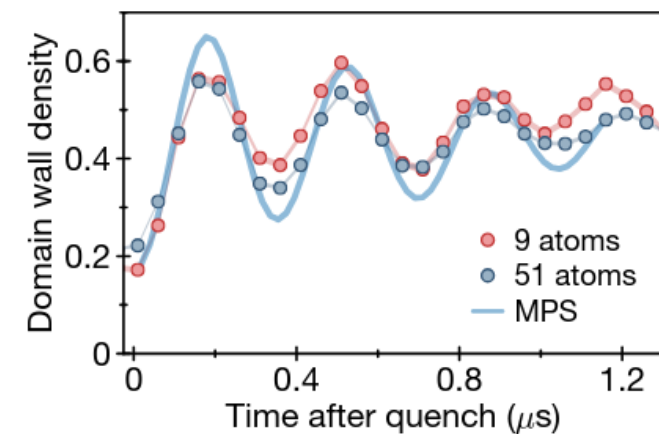
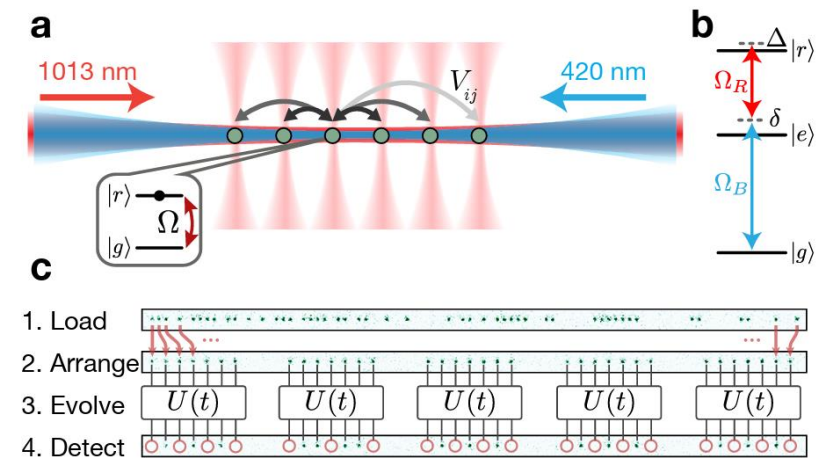
Eksperimentalni rezultati

- Kvantni simulator sa 51 atomom
 - Rubidijumovi atomi
- Jačina interakcije zavisi od rastojanja
- Dodatnim laserima se pobuđuju



Eksperimentalni rezultati

- Kvantni simulator sa 51 atomom
 - Rubidijumovi atomi
- Jačina interakcije zavisi od rastojanja
- Dodatnim laserima se pobuđuju
- Dinamika zavisi od početnog stanja
- Dugotrajne oscilacije gustine
- Primer: $|Z_2\rangle = |\bullet \circ \bullet \circ \dots\rangle$



Termalizacija kvantnih sistema

- Mehanizam termalizacije u izolovanim kvantnim sistemima?
 - **Unitaran** i **reverzibilan** operator evolucije: $U = e^{-iHt}$
- Hipoteza o termalizaciji putem svojstvenih stanja (engl. eigenstate thermalization hypothesis)

Termalizacija kvantnih sistema

- Mehanizam termalizacije u izolovanim kvantnim sistemima?
 - **Unitaran** i **reverzibilan** operator evolucije: $U = e^{-iHt}$
- Hipoteza o termalizaciji putem svojstvenih stanja (engl. eigenstate thermalization hypothesis)

Svojstvena stanja Hamiltonijana su termalna!

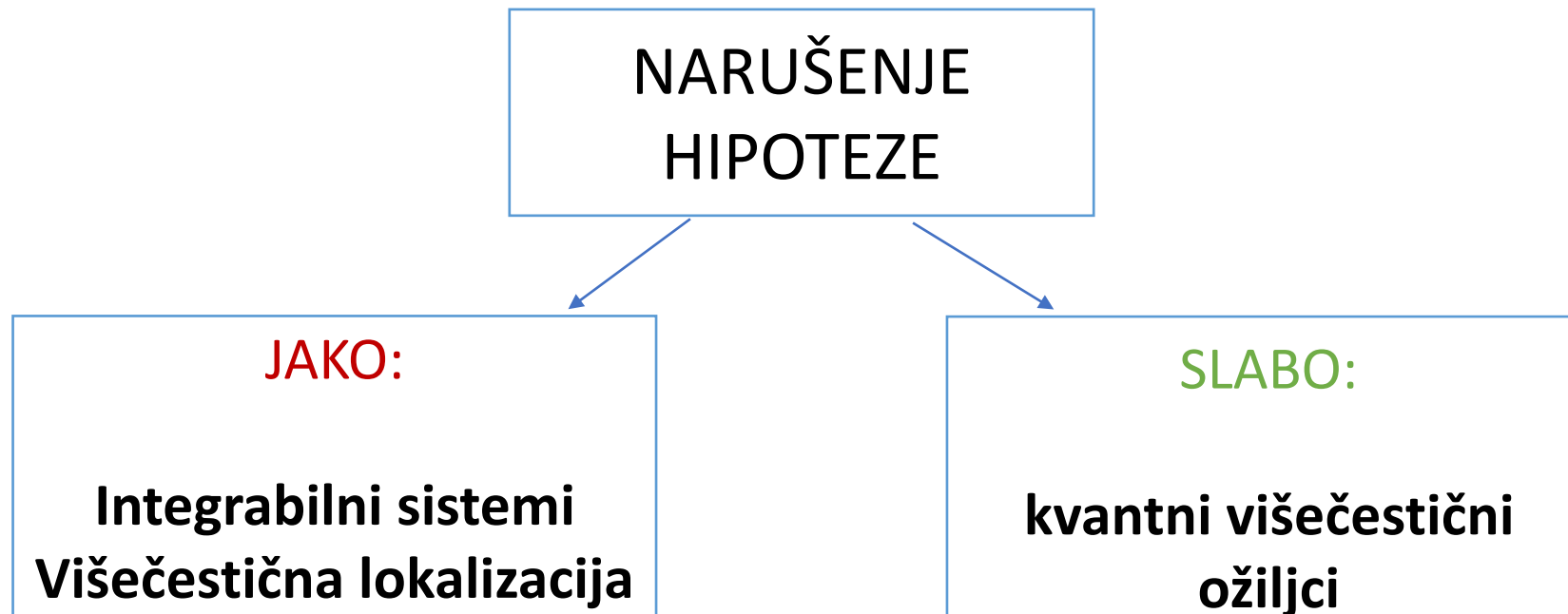
- Očekivane vrednosti predviđene statističkim ansamblima

Narušenje hipoteze

- Nije dokazana analitički
- Potvrđena u brojnim eksperimentima i numeričkim istraživanjima
- Ipak, pronađeno je par izuzetaka

Narušenje hipoteze

- Nije dokazana analitički
- Potvrđena u brojnim eksperimentima i numeričkim istraživanjima
- Ipak, pronađeno je par izuzetaka



PXP model

- Hamiltonijan niza Ridbergovih atoma:

$$H = \sum_{i=1}^L \frac{\Omega_i}{2} X_i - \sum_{i=1}^L \Delta_i Q_i + \sum_{i < j}^L V_{i,j} Q_i Q_j$$

PXP model

- Hamiltonijan niza Ridbergovih atoma:

$$H = \sum_{i=1}^L \frac{\Omega_i}{2} X_i - \sum_{i=1}^L \Delta_i Q_i + \sum_{i < j}^L V_{i,j} Q_i Q_j$$

Rabi oscilacije

$$P_i = |\circ_i\rangle\langle\circ_i| \quad Q_i = |\bullet_i\rangle\langle\bullet_i|$$

$$X_i = |\circ_i\rangle\langle\bullet_i| + |\bullet_i\rangle\langle\circ_i|$$

PXP model

- Hamiltonijan niza Ridbergovih atoma:

$$H = \sum_{i=1}^L \frac{\Omega_i}{2} X_i - \sum_{i=1}^L \Delta_i Q_i + \sum_{i < j}^L V_{i,j} Q_i Q_j$$

Rabi oscilacije

Razdešavanje
(engl. detuning)

$$P_i = |\circ_i\rangle\langle\circ_i| \quad Q_i = |\bullet_i\rangle\langle\bullet_i|$$

$$X_i = |\circ_i\rangle\langle\bullet_i| + |\bullet_i\rangle\langle\circ_i|$$

PXP model

- Hamiltonijan niza Ridbergovih atoma:

$$H = \sum_{i=1}^L \frac{\Omega_i}{2} X_i - \sum_{i=1}^L \Delta_i Q_i + \sum_{i < j}^L V_{i,j} Q_i Q_j$$

Rabi oscilacije

Razdešavanje
(engl. detuning)

Van der Valsova
interakcija

$$V_{i,j} = C/R_{i,j}^6$$

$$P_i = |\circ_i\rangle\langle\circ_i| \quad Q_i = |\bullet_i\rangle\langle\bullet_i|$$

$$X_i = |\circ_i\rangle\langle\bullet_i| + |\bullet_i\rangle\langle\circ_i|$$

PXP model

- Hamiltonijan niza Ridbergovih atoma:

$$H = \sum_{i=1}^L \frac{\Omega_i}{2} X_i - \sum_{i=1}^L \Delta_i Q_i + \sum_{i < j}^L V_{i,j} Q_i Q_j$$

Rabi oscilacije

Razdešavanje
(engl. detuning)

Van der Valsova
interakcija

$$V_{i,j} = C/R_{i,j}^6$$

- Režim Ridbergove blokade i interakcija između najbližih suseda:

$$H_{PXP} = \sum_{i=1}^L P_i X_{i+1} P_{i+2}$$

$$P_i = |\circ_i\rangle\langle\circ_i| \quad Q_i = |\bullet_i\rangle\langle\bullet_i|$$

$$X_i = |\circ_i\rangle\langle\bullet_i| + |\bullet_i\rangle\langle\circ_i|$$

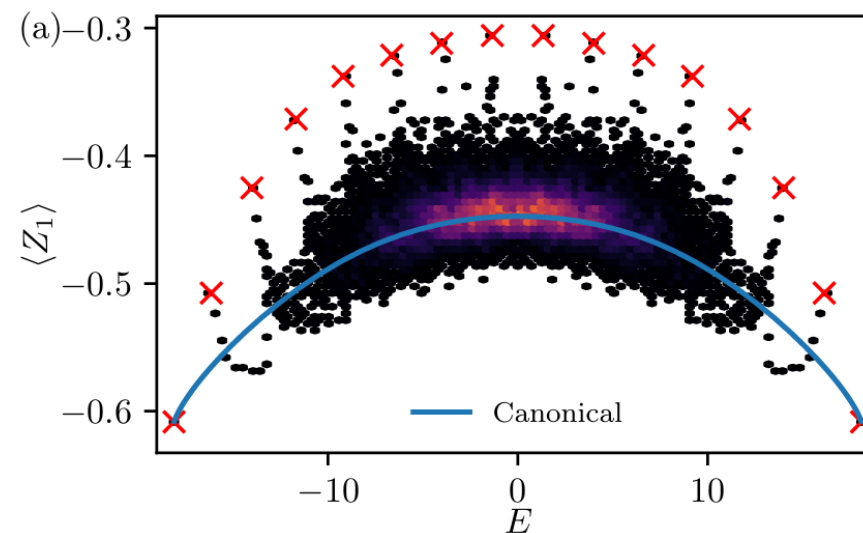
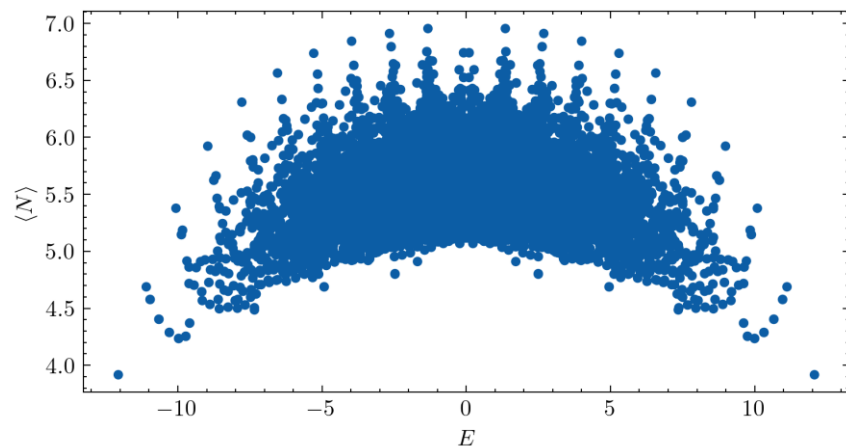
Slabo narušenje hipoteze o termalizaciji

- Operator broja pobuđenja:
$$N = \sum_{i=1}^L n_i$$
- Broji koliko je atoma u Ridbergovom stanju

Slabo narušenje hipoteze o termalizaciji

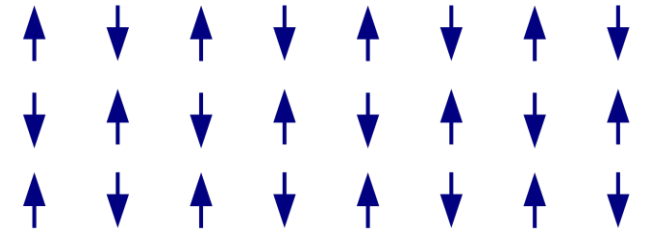
- Operator broja pobuđenja:
- Kanonski ansambl predviđa parabolu
- PXP model:
 - Određen broj atipičnih svojstvenih stanja
 - Simetričan grafik
 - Paradigmatski model

$$N = \sum_{i=1}^L n_i$$



Dinamika Z_2 stanja

- Početno stanje: $|Z_2\rangle = |\bullet \circ \bullet \circ \dots\rangle$
- Translatorno simetričan par: $|Z'_2\rangle = |\circ \bullet \circ \bullet \dots\rangle$



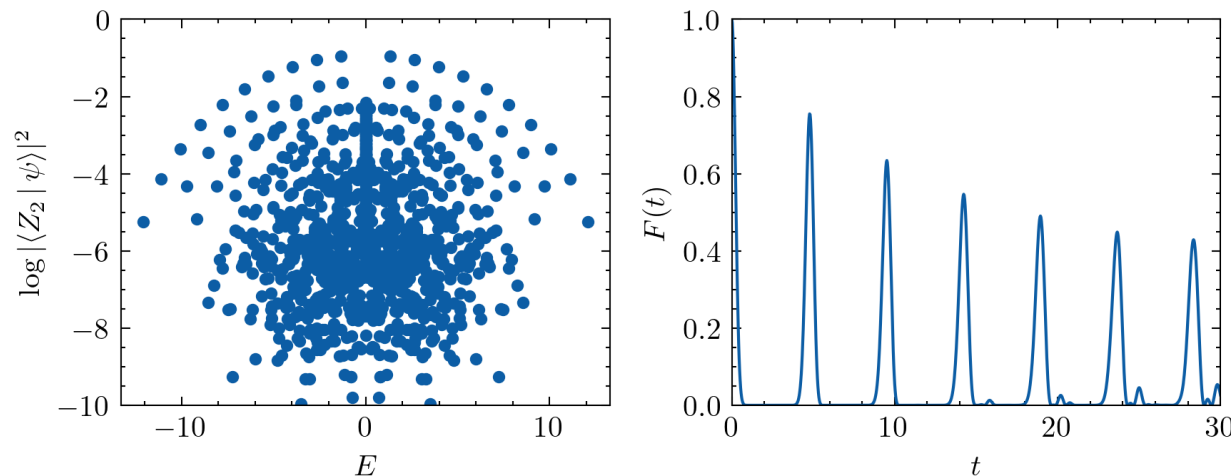
Nelovo stanje kod antiferomagneta

Dinamika Z_2 stanja

- Početno stanje: $|Z_2\rangle = |\bullet \circ \bullet \circ \dots\rangle$
- Translatorsno simetričan par: $|Z'_2\rangle = |\circ \bullet \circ \bullet \dots\rangle$
- Preklapanje sa svojstvenim stanjem: $O_\psi = |\langle Z_2|\psi\rangle|^2$
- Kvantna vernost: $F(t) = |\langle \psi(0)|\psi(t)\rangle|^2$
 - Verovatnoća da se sistem vrati u početnom stanju

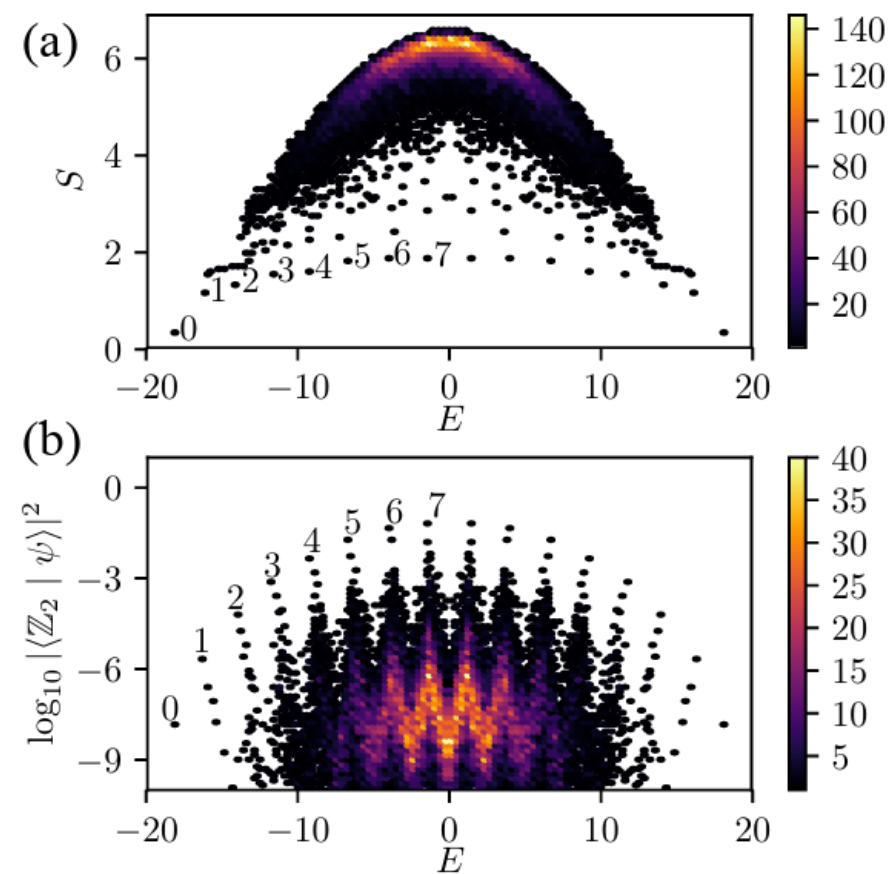
Dinamika Z_2 stanja

- Početno stanje: $|Z_2\rangle = |\bullet \circ \bullet \circ \dots\rangle$
- Translatorsno simetričan par: $|Z'_2\rangle = |\circ \bullet \circ \bullet \dots\rangle$
- Preklapanje sa svojstvenim stanjem: $O_\psi = |\langle Z_2|\psi\rangle|^2$
- Kvantna vernost: $F(t) = |\langle\psi(0)|\psi(t)\rangle|^2$
 - Verovatnoća da se sistem vrati u početnom stanju



Kvantni višestični ožiljci

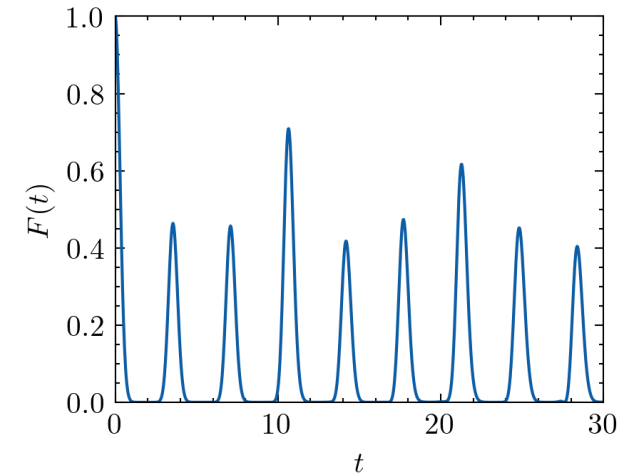
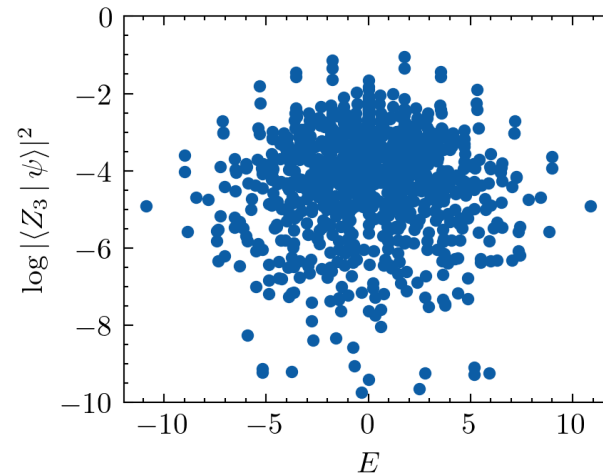
- Atipična netermalna svojstvena stanja
- Narušavaju hipotezu o termalizaciji
- Približno jednako energijski udaljeni
- Veliko prelapanje sa Z_2 stanjem
- Mala entropija spletenosti



Dinamika Z_3 i polarizovanog stanja

- **Z_3 stanje:**

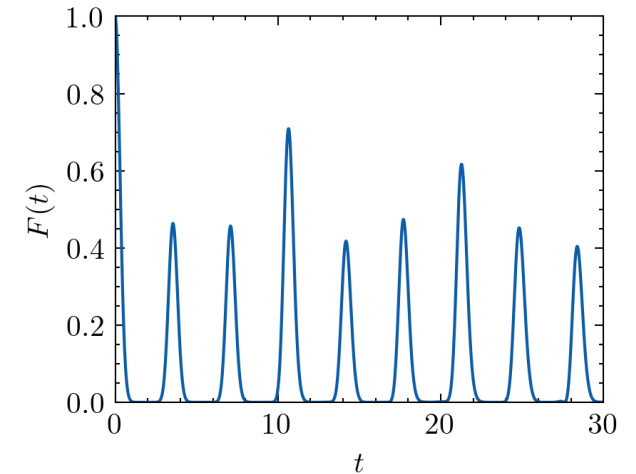
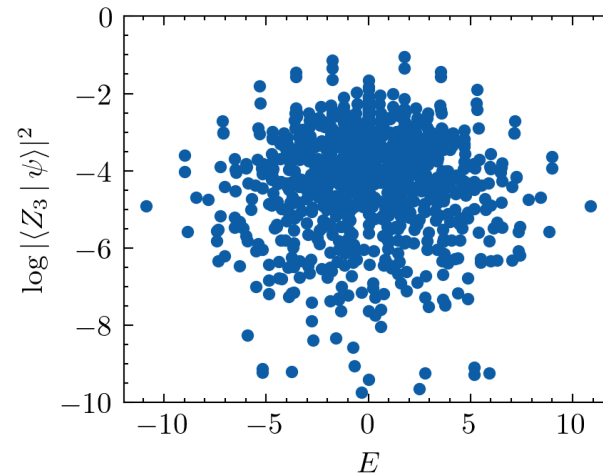
- $|Z_3\rangle = |\bullet \circ \circ \bullet \circ \circ \dots\rangle$
- Veliko preklapanje sa kvantnim ožiljcima
- Povratci u početno stanje



Dinamika Z_3 i polarizovanog stanja

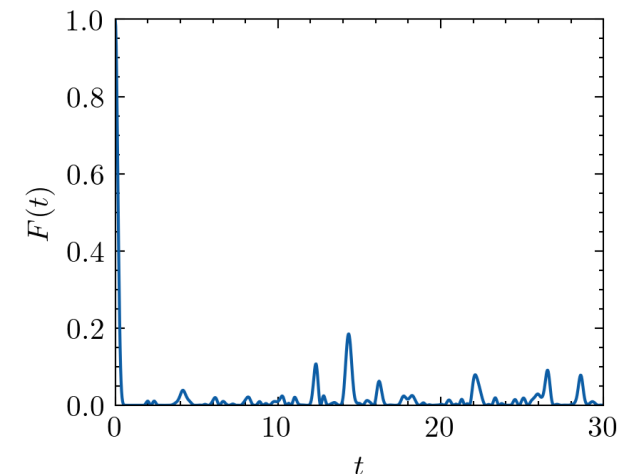
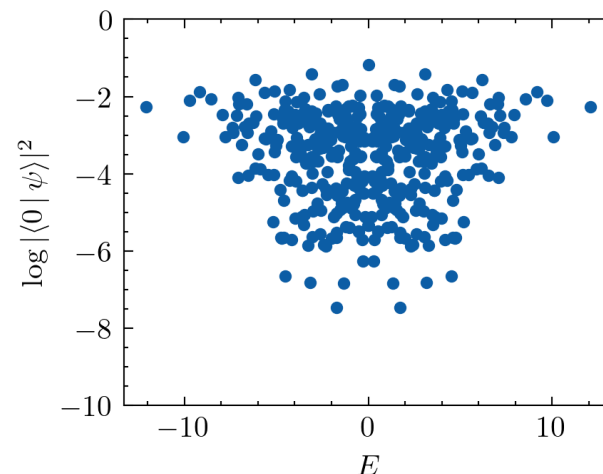
- **Z_3 stanje:**

- $|Z_3\rangle = |\bullet \circ \circ \bullet \circ \circ \dots\rangle$
- Veliko preklapanje sa kvantnim ožiljcima
- Povratci u početno stanje



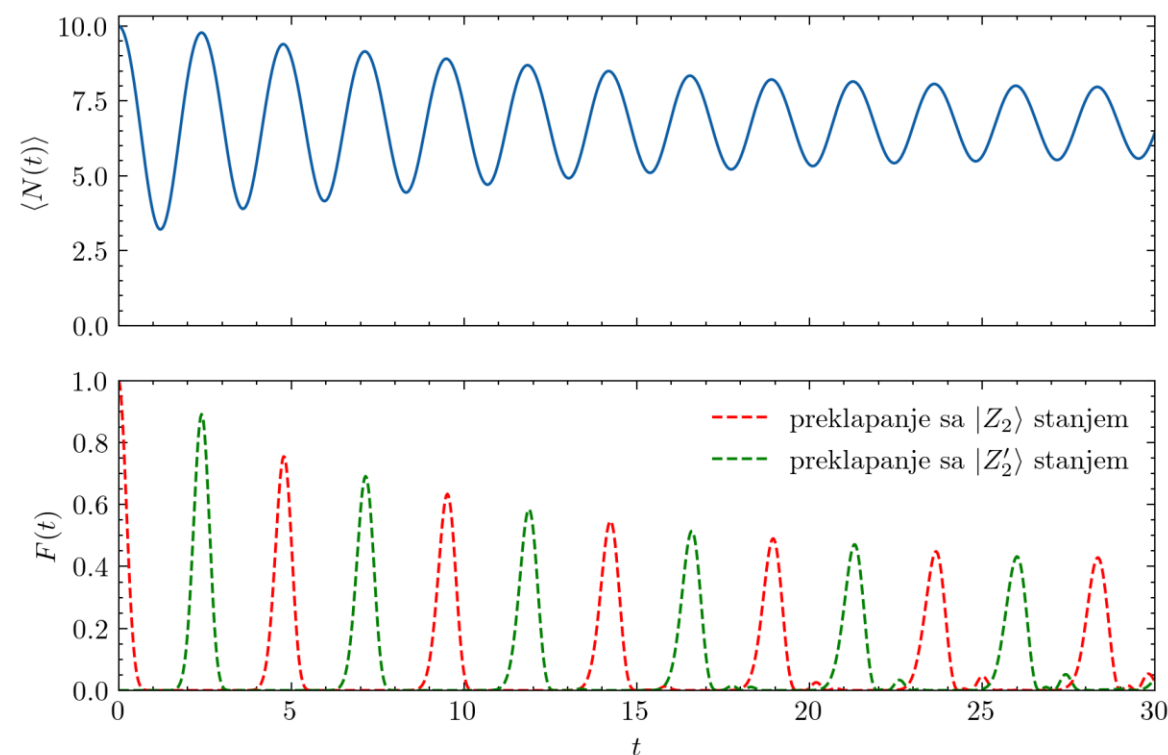
- **Polarizovano stanje:**

- $|0\rangle = |\circ \circ \circ \circ \dots\rangle$
- Nema izdvojenih stanje u spektru
- Brza termalizacija



Očekivana vrednost observable

- Ponašanje merljivih veličina
- Neloovo početno stanje
- Primetne oscilacije
- Frekvencija dva puta veća od frekvencije kvantne vernosti
- Naizmenični prelaz iz Z_2 u Z'_2



Dodatak hemijskog potencijala

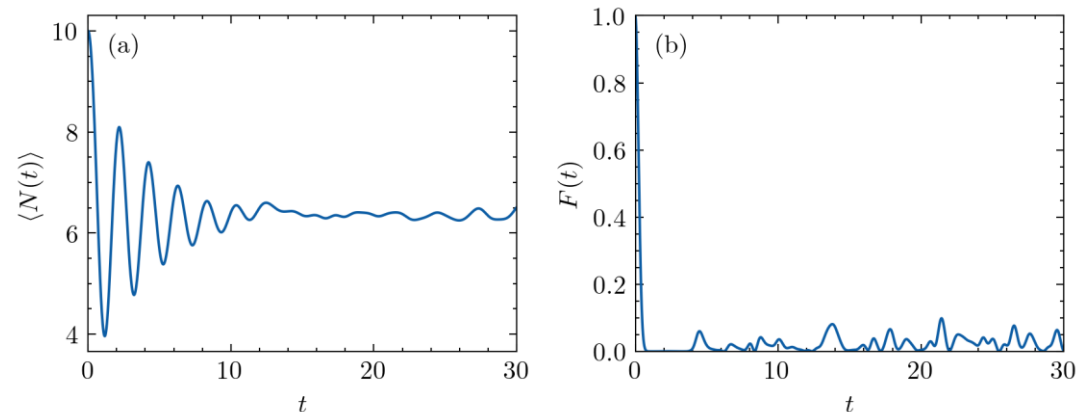
- Novi Hamiltonijan: $H = H_{PXP} + \mu \sum_{i=1}^L Q_i$
- Jednostavno ostvarenje u eksperimentu
- $\mu < 0$ - favorizuje ekscitacije
- $\mu > 0$ - suzbija ekscitacije

Dodatak hemijskog potencijala

- Novi Hamiltonijan:
$$H = H_{PXP} + \mu \sum_{i=1}^L Q_i$$
- Jednostavno ostvarenje u eksperimentu
- $\mu < 0$ - favorizuje ekscitacije
- $\mu > 0$ - suzbija ekscitacije

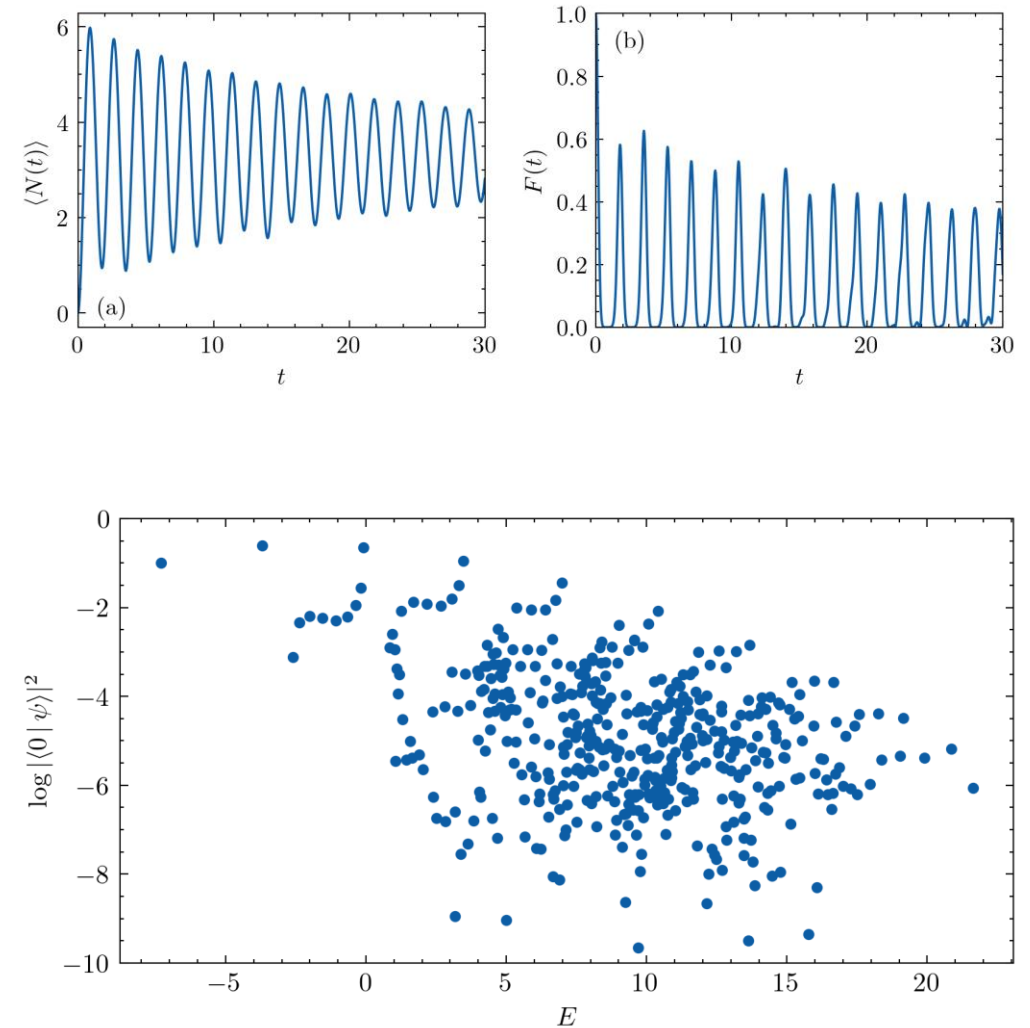
- **Uništenje stanja sa ožiljcima**

- Primer Z_2 stanje
- $\mu = 1$



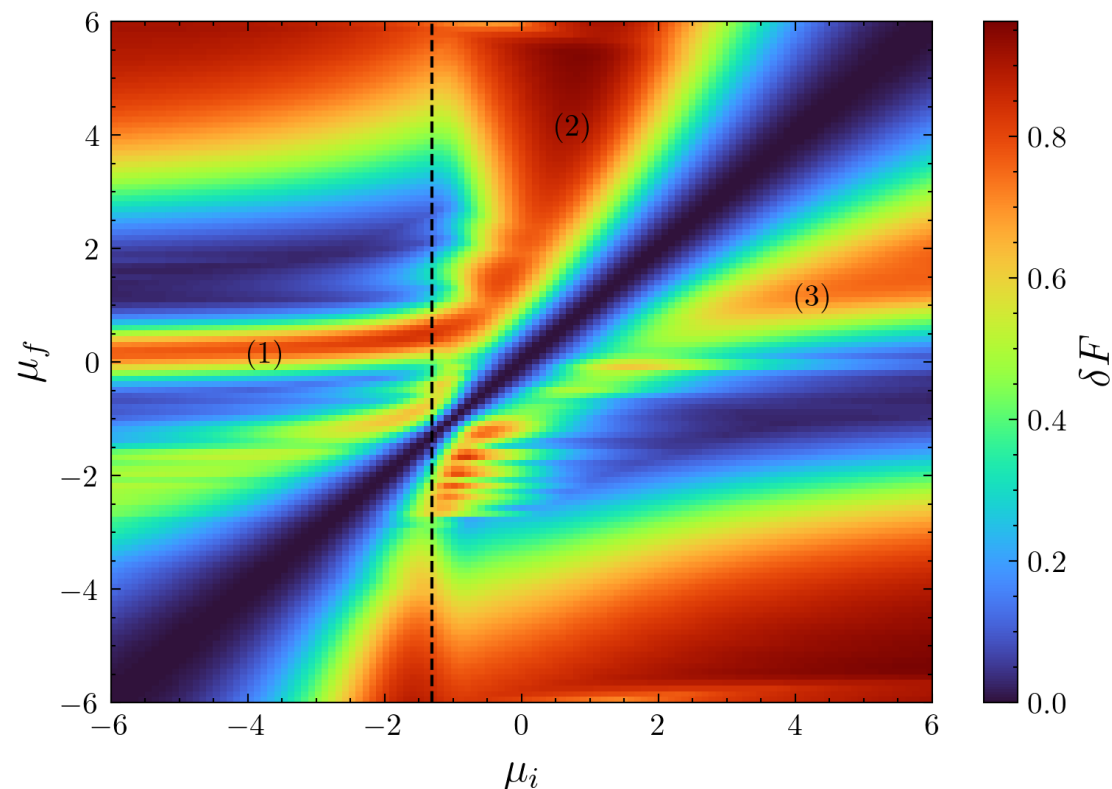
Stvaranje ožiljaka

- Primer:
 - polarizovano stanje
 - $\mu \approx 1,6$
- Ožiljačna stanja su ekvidistantna
- Veliko preklapanje sa polarizovanim stanjem
- Pitanje: da li i ostala početna stanja mogu imati ožiljke?



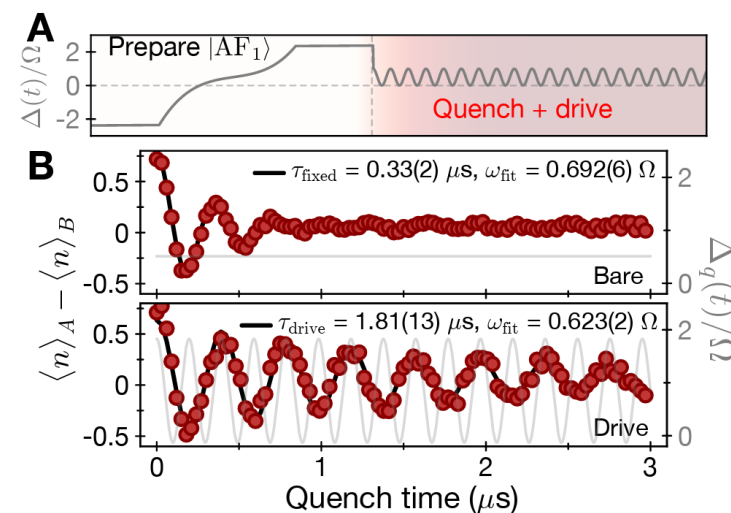
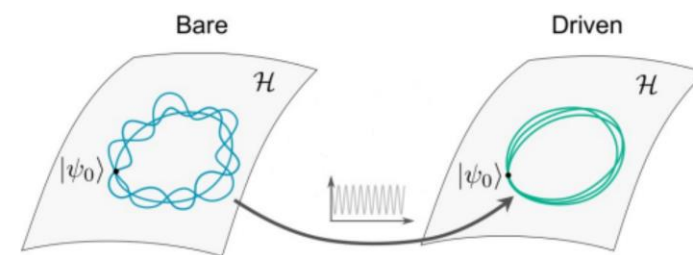
Dinamički fazni dijagram

- Nagla promena od μ_i (početno stanje) do μ_f (dinamika)
- **Kontinualni fazni prelaz** Izingovog tipa
- Osnovna stanja
 - $\mu \rightarrow -\infty$: Nelovo stanje
 - $\mu \leq \mu_c$: dvostruko degenerisano
 - $\mu_c = -1,31$: kritična vrednost
 - $\mu > \mu_c$: nedegenerisano
 - $\mu \rightarrow +\infty$: polarizovano stanje
- Isključujemo trivijalan slučaj $\mu_i \approx \mu_f$
$$\delta F = F_{max} - F_{min}$$
- Oblasti (1), (2) i (3) odgovaraju pojavi QMBS
 - Kontinualna familija stanja sa QMBS u oblastima (1) i (2)



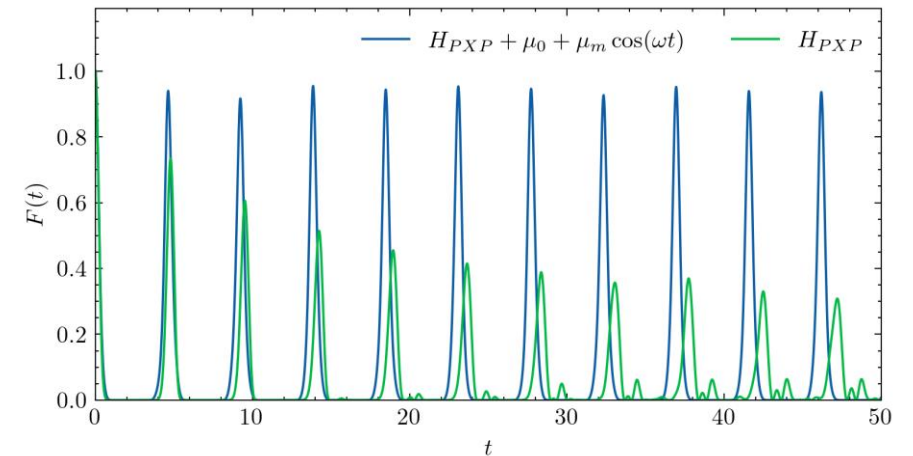
Periodično pobuđivanje PXP modela

- Stabilizacija i poboljšanje ožiljaka
- Z_2 stanje - dolazi do **subharmonijskog odziva**
- Optimalni parametri:
 - Pronađeni empirijski
 - Optimalna frekvencija bliska dvostrukoj frekvenciji čistog PXP modela
- Polarizovano stanje
 - Harmonijski odziv
 - Optimalna frekvencija bliska frekvenciji čistog PXP modela



Stabilizacija Nelovog i polarizovanog stanja

- Numerička simulacija
- **Nelovo stanje**
 - $\mu_0 = 1,15$
 - $\mu_m = 2,67$
 - $\omega = 2,72$



Stabilizacija Nelovog i polarizovanog stanja

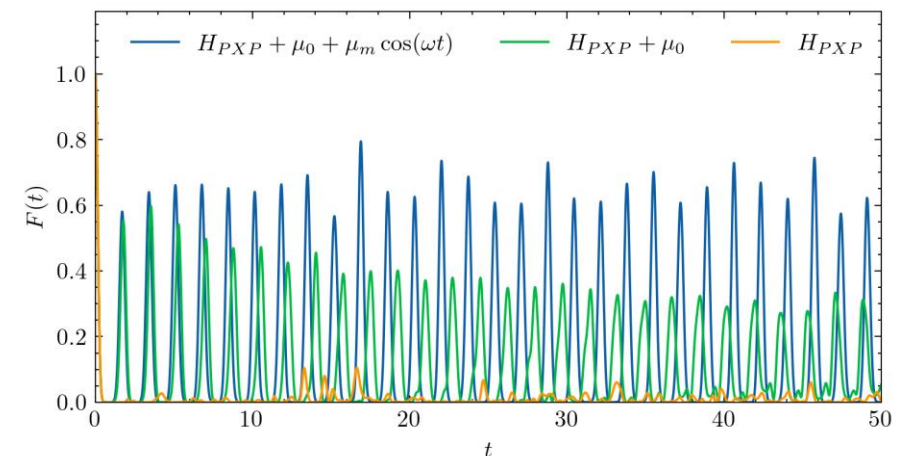
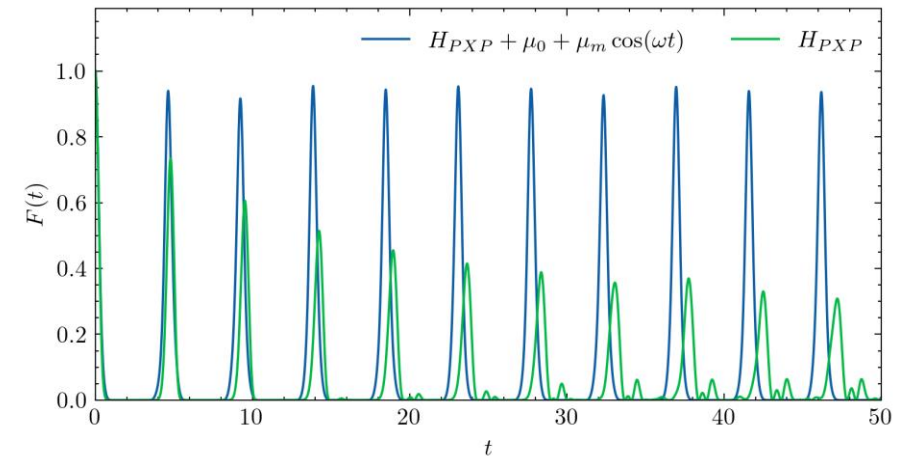
- Numerička simulacija

- **Nelovo stanje**

- $\mu_0 = 1,15$
- $\mu_m = 2,67$
- $\omega = 2,72$

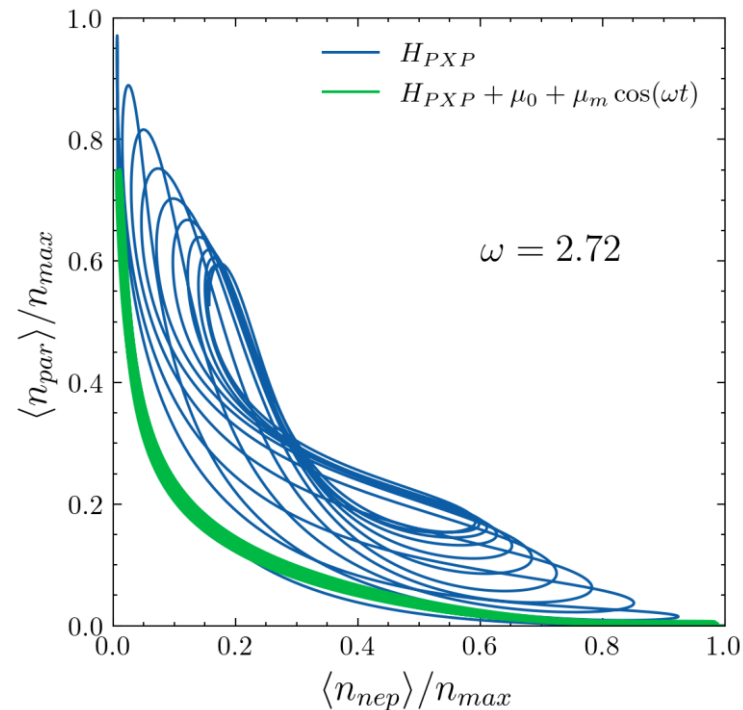
- **Polarizovano stanje**

- $\mu_0 = 1,68$
- $\mu_m = -0,5$
- $\omega = 3,71$



Trajektorija u Hilbertovom prostoru

- Broj pobuđenja na parnim i neparni čvorovima
- Pokazatelj stabilizacije
- Nelovo stanje sa i bez periodičnog pobuđivanja



Teorijsko proučavanje

- Novi Hamiltonijan: $H = H_{PXP} + \mu(t) \sum_{i=1}^L Q_i$

$$\mu(t) = \mu_0 + \mu_m \cos(\omega t)$$

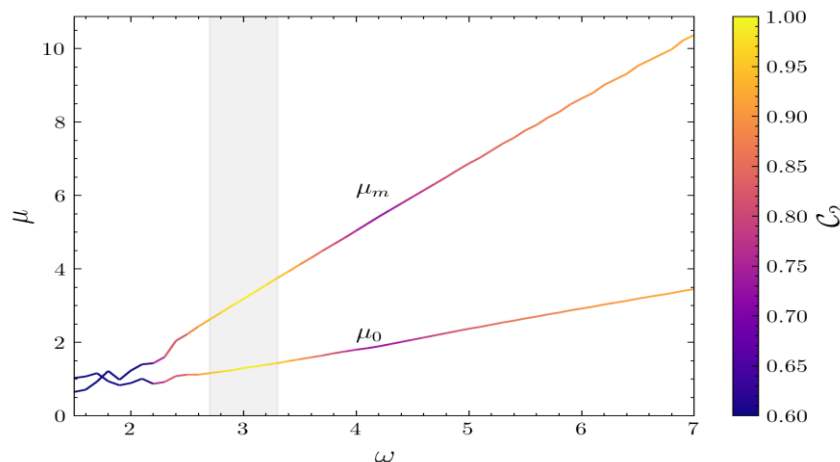
- Potraga za optimalnim parametrima:

1. Srednja vrednost kvantne vernosti
2. Funkcija troška (engl. cost function)

$$\langle F \rangle = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} F(t) dt$$

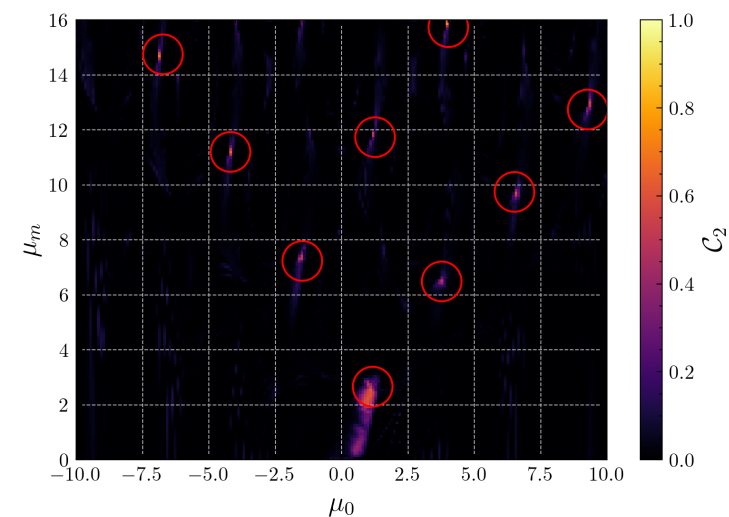
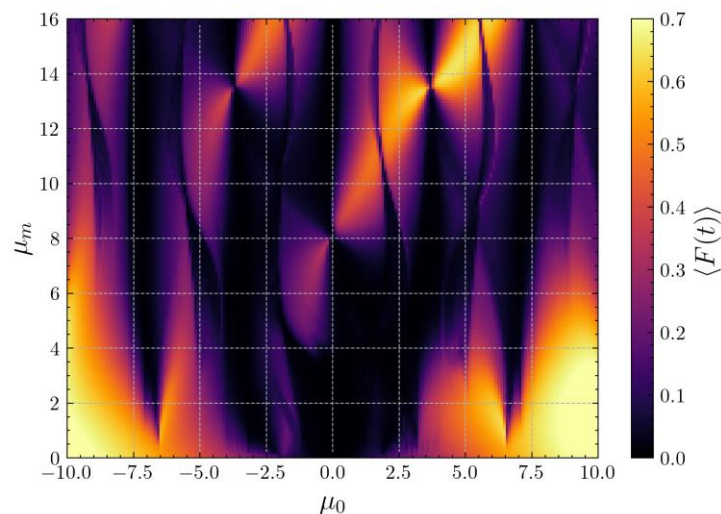
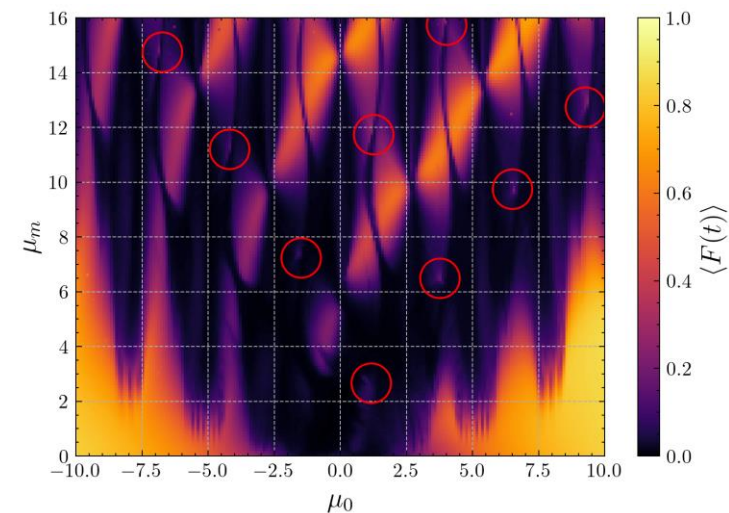
$$C_l = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M [F(nlT) - F((n - 1/2)lT)]$$

- Optimalna frekvencija se određuje praćenjem jednog pika



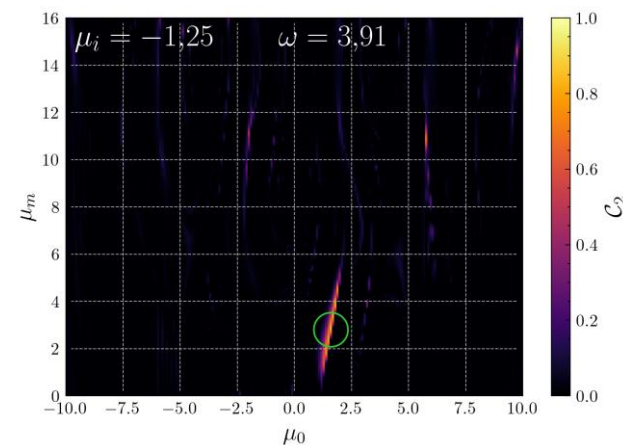
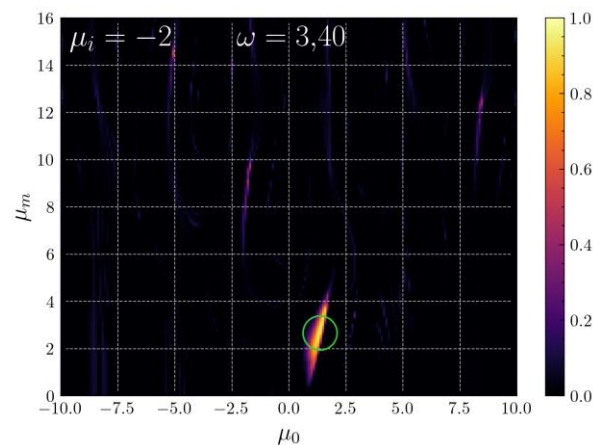
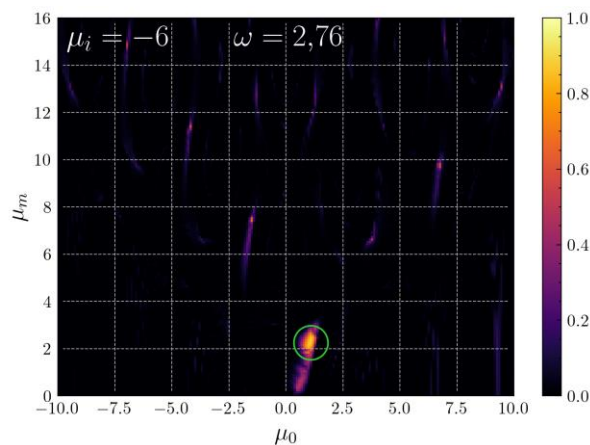
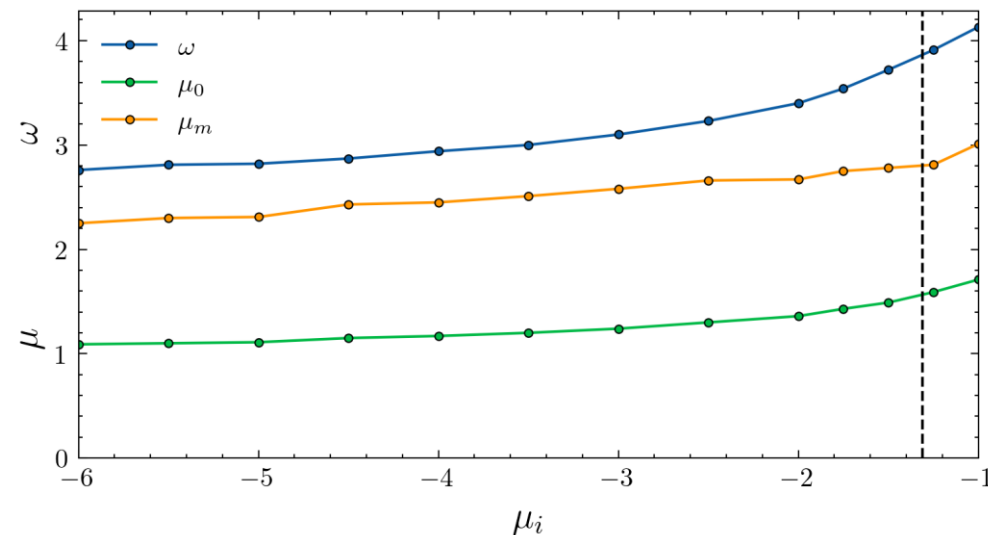
Teorijsko proučavanje

- Vrste pikova:
 - Tip-1 – uži, označeni crvenim krugovima
 - Tip-2 – mnogo širi
- Polarizovano stanje
 - Nema tip-1 pikova



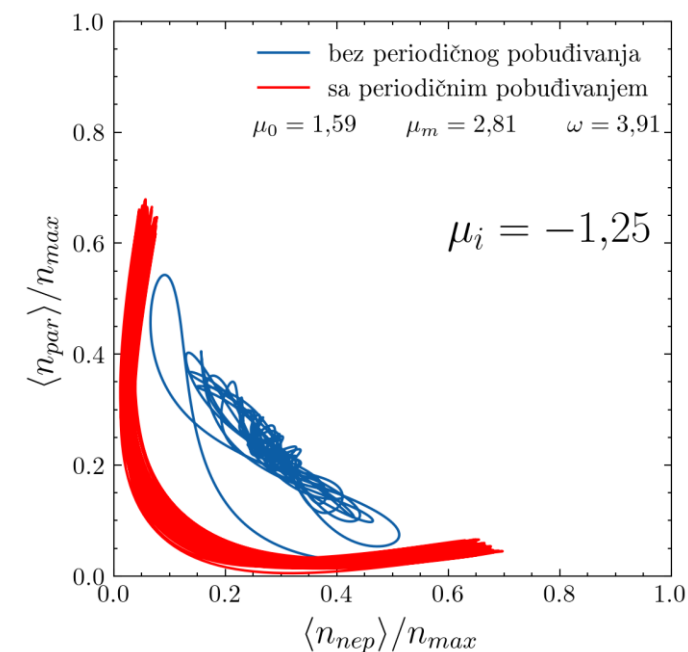
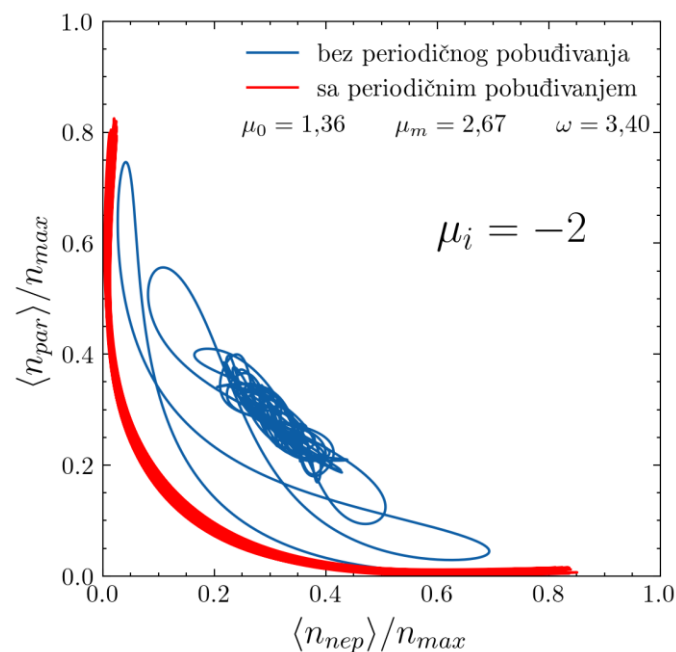
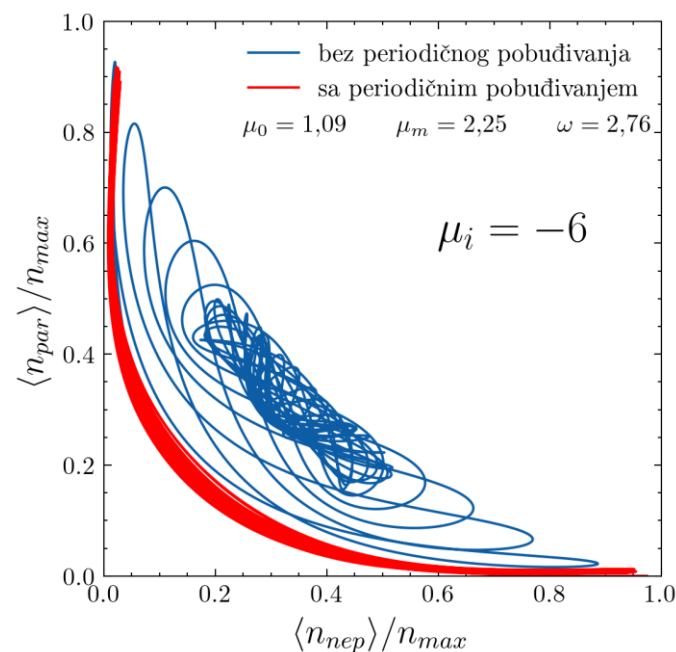
Primena na kontinualnu familiju stanja

- Optimalni parametri (μ_0 , μ_m , ω) za stanja od $\mu_i = -6$ do $\mu_i = -1$
- Stanja blizu kvantnog faznog prelaza
- Nema nagle promene parametara pri prelazu kritične tačke



Primena na kontinualnu familiju stanja

- Trajektorije u Hilbertovom prostoru sa i bez periodičnog pobuđivanja
- Uspešna stabilizacija

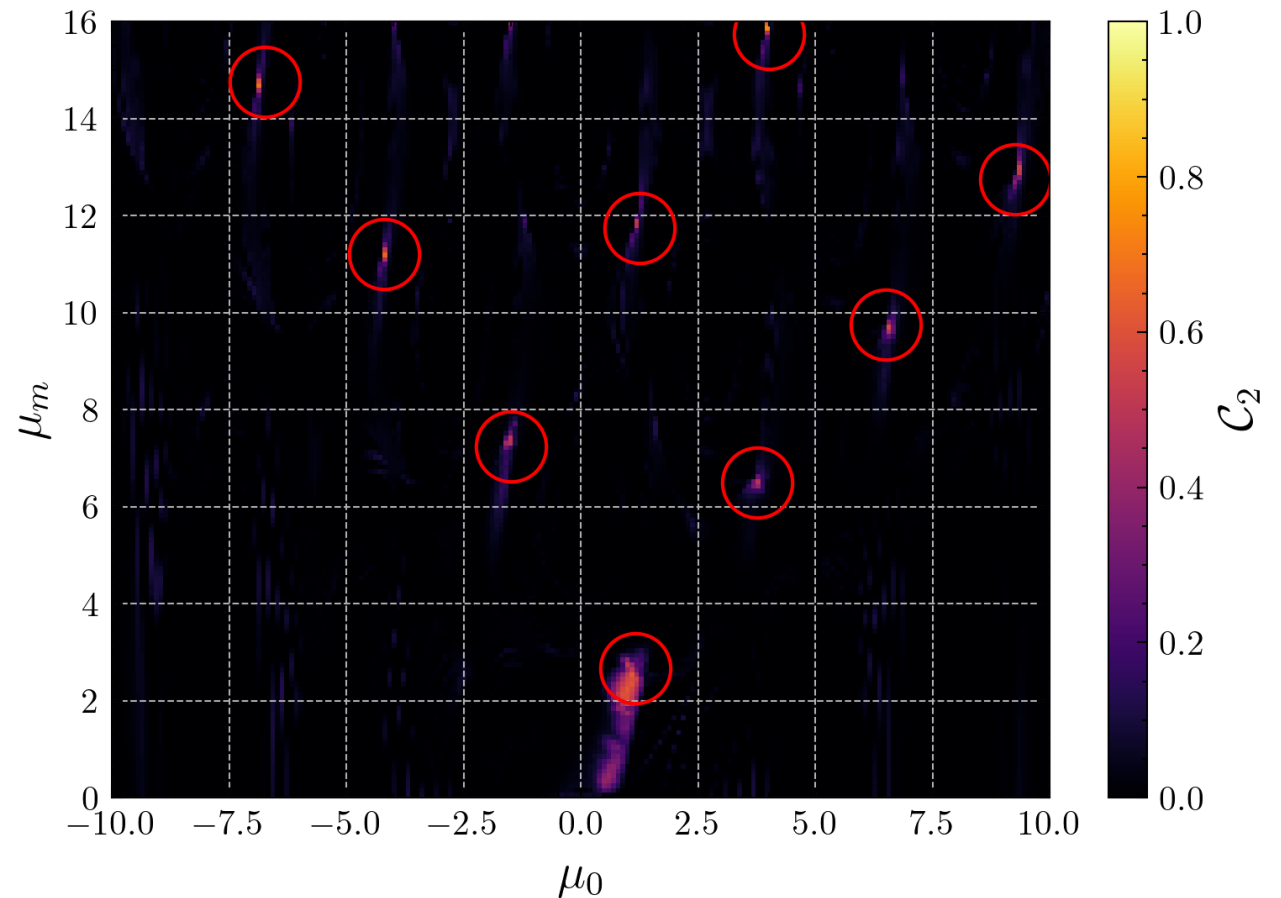


Zaključak

1. Predstavljen je PXP model – prvi i najjednostavniji
2. Kvantne višečestični ožiljci narušavaju dosadašnje hipoteze
3. Njihov efekat se može zapaziti u brojnim početnim stanjima
4. Periodično pobuđivanje stabilizuje i pojačava efekat ožiljaka
5. Predstavljeni optimalni parametri za jednu familiju stanja
6. Nema nagle promene pri prelasku kritične tačke

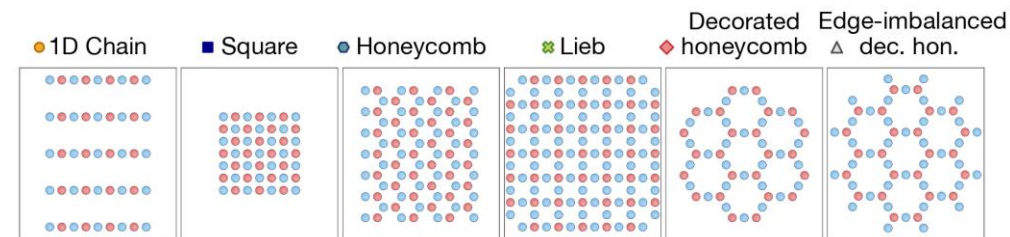
Dalja istraživanja

- Ispitivanje drugih režima



Dalja istraživanja

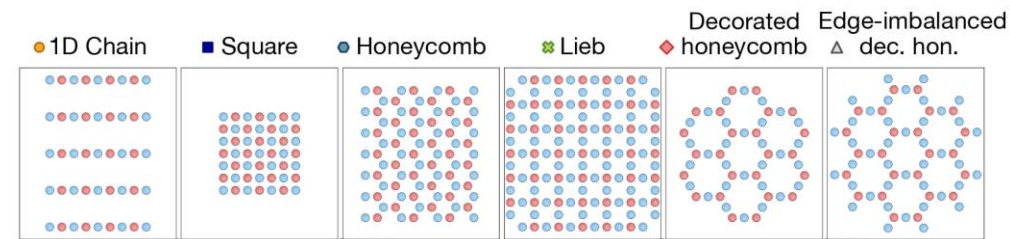
- Ispitivanje drugih režima
- Primena metode na druge modele:
 - PXP model u 2 ili 3 dimenzije



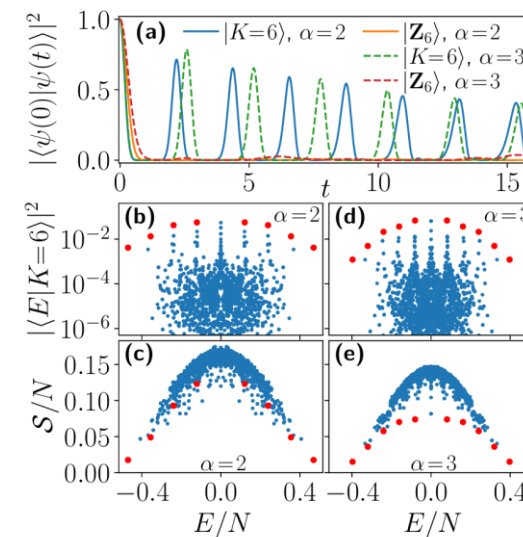
Bluvstein et al., Science 371, 1355 (2021)

Dalja istraživanja

- Ispitivanje drugih režima
- Primena metode na druge modele:
 - PXP model u 2 ili 3 dimenzije
 - $P^\alpha X P^\alpha$ modeli $\rightarrow$ PPXPP i PPPXPPP



Bluvstein et al., Science 371, 1355 (2021)

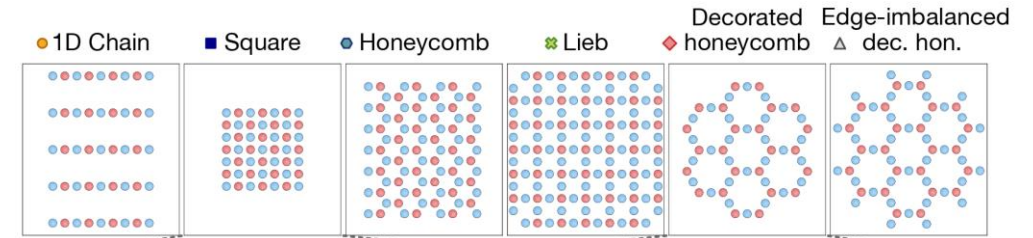


Kerschbaumer et al., Phys. Rev. Lett. 134, 160401 (2025)

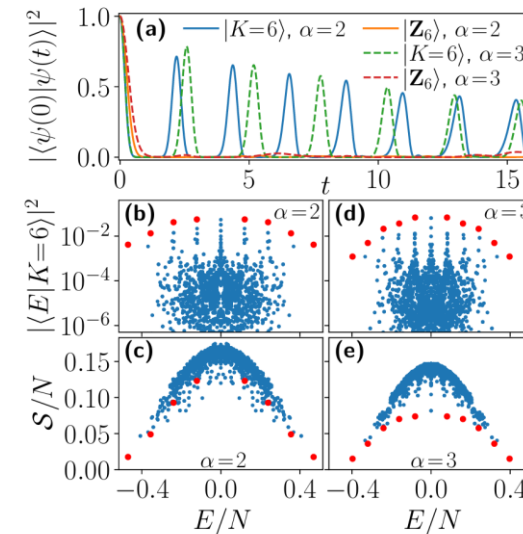
Dalja istraživanja

- Ispitivanje drugih režima
- Primena metode na druge modele:
 - PXP model u 2 ili 3 dimenzije
 - $P^\alpha X P^\alpha$ modeli $\rightarrow$ PPXPP i PPPXPPP
 - Anion-Habardov model

$$H = -t \sum_j (\alpha_j^\dagger \alpha_{j+1} + \text{H.c.}) + \frac{U}{2} \sum_j n_j (n_j - 1)$$



Bluvstein et al., Science 371, 1355 (2021)



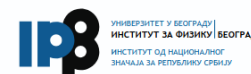
Kerschbaumer et al., Phys. Rev. Lett. 134, 160401 (2025)

Praksa na Institutu za fiziku

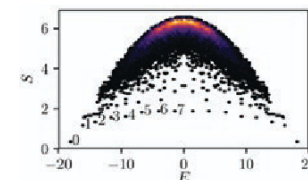
- Otvoren poziv za studentske prakse
- Potrebno samo osnovno znanje kvantne mehanike

- Контакт:

- ana.hudomal@ipb.ac.rs
- stefan.malijevic@ipb.ac.rs



Квантни вишечестични ожиљци



ОПИС ТЕМЕ:

Једно од најважнијих отворених питања у области физике која се бави неравнотежном динамиком квантних система је питање термализације изолованих система. Уобичајено је да се у неинтеграбилним квантним системима сва почетна стања брзо термализују у складу са предвиђањима хипотезе о термализацији путем својствених стања (eigenstate thermalization hypothesis). Међутим, експерименти са квантним симулацијама на нивоима Ридбергових атома изведени пре неколико година на Харвард универзитету довели су до изненађујућих резултата – за одређене почетне конфигурације систем се периодично враћао у своје почетно стање и због тога неочекивано споро термализовао, [Nature 551, 579 (2017)]. Овакво понашање је убрзо теоријски објашњено постојањем такзованих квантних вишечестичних ожиљака (quantum many-body scars) у ефективном моделу који описује јаво интеракције Ридбергове атоме, [Nat. Phys. 14, 745 (2018)]. То су атипична својствена стања која одликује неубичајено ниска ентропија сплетености и која нарушавају хипотезу о термализацији путем својствених стања. Ово откриће је довело до развоја нове и веома активне области истраживања, а квантни ожиљци су пронађени у великом броју других система. Боље разумевање феномена квантних ожиљака могло би да омогући циљану конструкцију модела са спором термализацијом.

ТОК ПРАКСЕ:

У оквиру предложене праксе студент ће радити на развоју и примени нумеричких алгоритама, као и на анализи резултата коришћењем аналитичких метода. Уколико студент не може редовно да долази на Институт за физику, могуће су и онлајн консултације. На почетку праксе студент ће се упознати са литературом из области квантних ожиљака и са стандардним техникама нумеричких

симулација вишечестичних квантних система. Затим ће стечено знање искористити да симулира такзовани РХР модел који испољава ефекте квантних вишечестичних ожиљака. Далеко практичне зависине од интересовања и нивоа предзнања студента. Неке од могућих истраживачких тема су потрага за новим моделима и параметарским режимима са квантним ожиљцима, испитивање утицаја различитих фактора на стабилност и појачање ефеката ожиљака, као и проналажење класичних периодичних орбита које описују динамику квантних стања са ожиљцима. У случају да пракса прерасте у мастер рад или докторску тезу, постоји могућност експерименталне реализације испитиваних модела на квантном рачунару Aquila у сарадњи са компанијом QCEGA из Бостона.

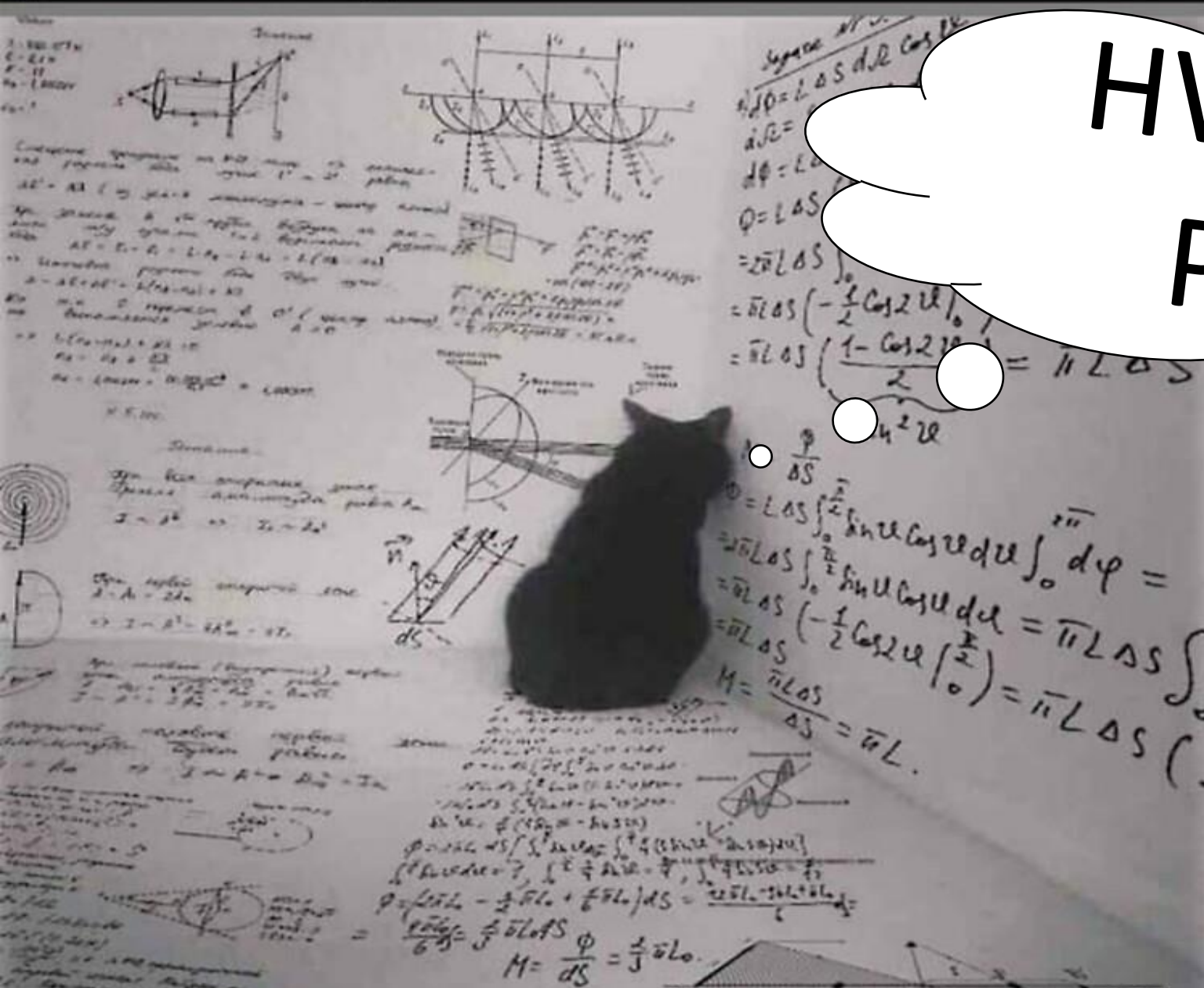
КОМЕ ЈЕ ПРАКСА НАМЕЊЕНА?

Пракса је намењена студентима основних и мастер академских студија физике са предзнањем из квантне механике. Претходно искуство са програмирањем је пожељно, али није неопходно.

ОСНОВНЕ ИНФОРМАЦИЈЕ:

- **Ментор:** др Ана Худомал – научна сарадница
- **Број студената:** 1
- **Лабораторија за примену рачунара у науци**
- **Контакт:** ana.hudomal@ipb.ac.rs

Meanwhile, inside the box, **Schrödinger's cat** plans its revenge.



HVALA NA
PAŽNJI

Kvantni (jednočestični) ožiljci

- Jednočestični **Bunimovičev stadion**
- Klasične nestabilne periodične putanje ostavljaju „ožiljak”
- Povećana gustina verovatnoće u prostoru
- Višečestični slučaj:
 - Potrebno pronaći klasični dvojnik kvantnog višečestičnog sistema

