

한국고에너지물리학회 (KSHEP) 의 2026년도 봄 학술대회

양자컴퓨팅과 하이브리드 고전-양자 계산으로 여는 차세대 핵이론

KISTI 6호기 "한강" 시대의 준비와 전망

박주빈 (숭실대학교 우주물질연구소)

with colleagues from Nuclear Quantum Computing & Hybrid Calculations
Study Group

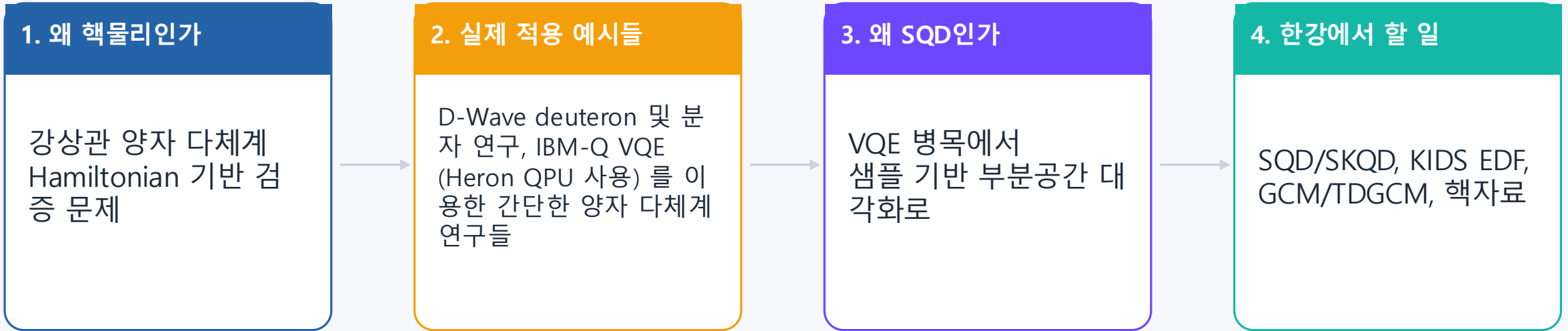
일시: 2026년 6월 11일 - 13일

장소: 제주대학교 아라캠퍼스 자연과학대학 1호관



Fig. 국가슈퍼컴퓨터 6호기 "한강" 이미지..

오늘의 이야기: 실제 경험에서 6호기 비전까지



핵심 메시지: 핵이론 계산의 병목을 풀기 위한 하이브리드 계산 전략을 이야기한다.

핵물리는 양자컴퓨팅의 자연스러운 시험장이다

중기적 다방성

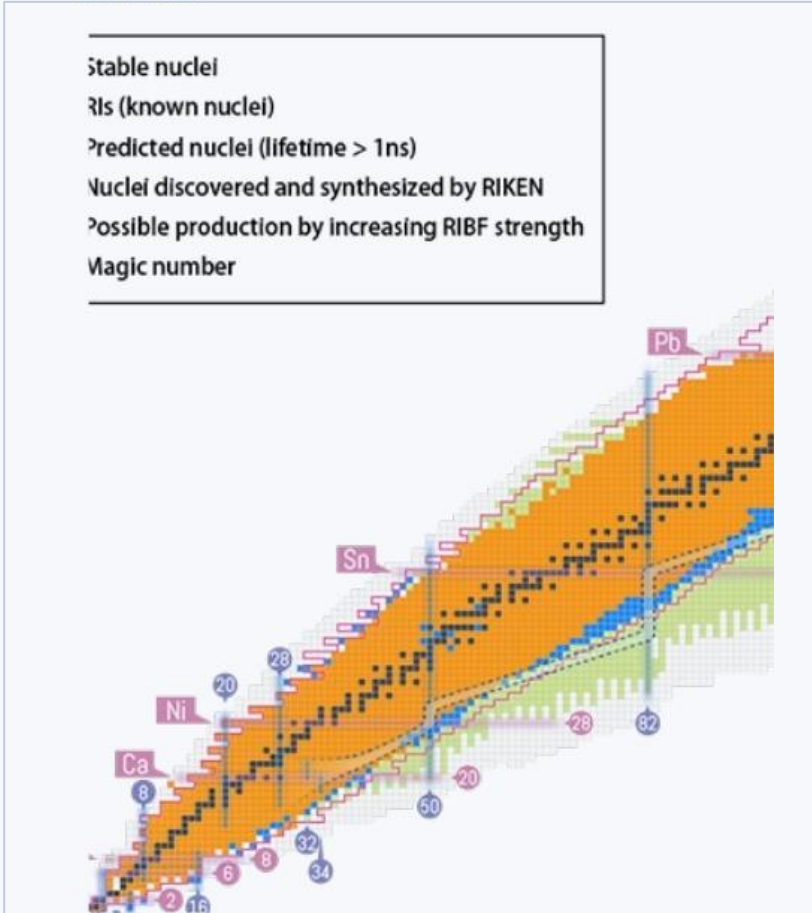


Chart of nuclides: 핵종별 안정성 · 붕괴
Fig. 핵종도: 질량·준위·붕괴·반응 데이터는 계산 결과 검증의 기준이 된다.

• 강상관 페르미온 다체계

- 핵자 간 상호작용, pairing, 대칭성, 집단운동이 동시에 작동한다.

• Hamiltonian → 저에너지 상태 → 관측량

- 양자화학과의 같은 구조를 갖고, 질량·전이세기·반응률과 직접 비교된다.

• 기초과학과 국가 전략 데이터가 만나는 지점

- 희귀동위원소, 핵천체, 핵융합, 동위원소 생산, 방사선 응용으로 이어진다.

우리가 풀고 싶은 문제는 “큰 양자상태를 정확히 다룰 수 있는가”이다.
핵물리는 그 질문을 실험 자료와 비교할 수 있는 드문 분야다.

문제의 본질: 전체 Hilbert 공간은 너무 빨리 커진다

example
STO-3G 3,136
6-31G 19,079,424
cc-pVDZ 4.33×10^9

메시지
 • full diagonalization 은 basis 만 키워도 급격히 어려워진다
 • VQE 도 expectation estimation + variational optimization 부담이 커진다
 • 핵 shell-model / many-body 공간도 본질적으로 같은 조합 폭증을 겪는다

• The Power of 'good sampling' for simulating a chemistry Hamiltonian with SQD
 → 기저를 택하면 파동함수 $|\psi\rangle$ 는 벡터로, 해밀토니안은 행렬로 표현 가능
 → 해밀토니안의 크기는 전자들이 공간 오비탈에 배치될 수 있는 조합의 수로 결정됨
 이 조합수는 지수적으로 증가하므로 해밀토니안을 대각화하는 것은 불가능

→ EX. N_2 해밀토니안 사이즈 계산

핵심 질문: 전체 공간을 다 보지 않고 저에너지 상태만 뽑아낼 수 있을까?

핵물리에서도 같은 일이 벌어진다

- Shell-model active space가 커질수록 configuration 수가 폭증
- GCM/TDGCM은 집단좌표 차원 증가에 따라 kernel 수가 급증
- EDF global scan은 핵종·변형·파라미터 축으로 계산량이 누적
- 양자컴은 모든 계수를 직접 만드는 것이 아니라, 중요한 부분공간을 찾는 역할이 유망

핵심 질문: 전체 공간을 보지 않고도 저에너지 상태의 support를 찾을 수 있을까?

Fig. 분자 basis 확장 예: 작은 시스템에서도 full diagonalization 비용이 급증한다.

왜 지금인가: KISTI 6호기 한강은 계산 핵물리의 새 출발점

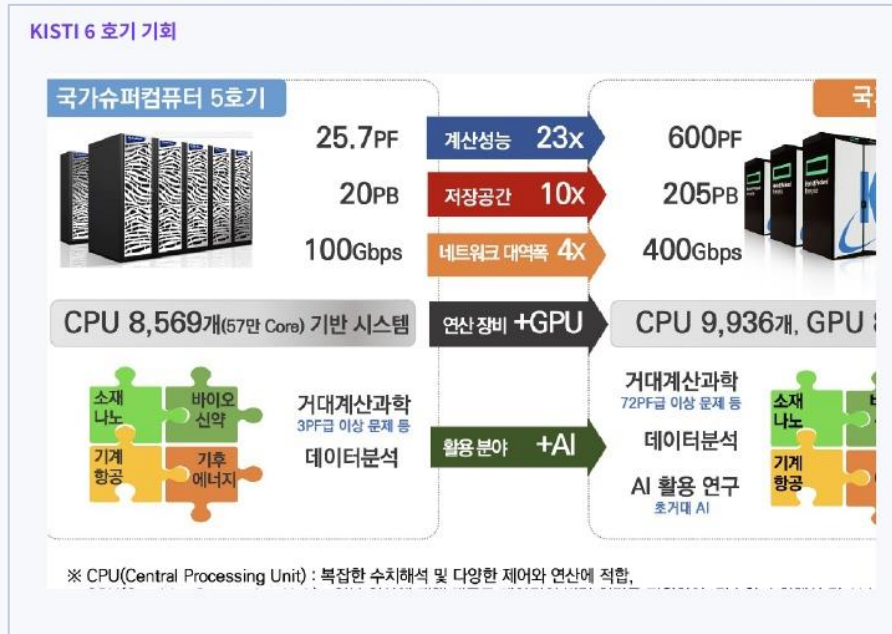


Fig. 5호기 대비 6호기 성능-저장-네트워크 확장 개요.

8,496

NVIDIA GH200 GPUs

600 PF

peak-class performance

205 PB

storage

400 Gbps+

network

23x+

5호기 대비 활용 성능

QPU

IonQ Tempo 연동 목표

한강의 의미는 단순한 “더 큰 컴퓨터”가 아니라, CPU·GPU·QPU·데이터 워크플로우가 함께 움직이는 국가 계산 플랫폼이다.

우리의 출발점: 작지만 실제 양자 하드웨어에서 테스트 시작!





Introduction to Quantum Computer	
<p>D-wave Quantum Annealer</p>  <ul style="list-style-type: none"> → D-wave Advantage 2 (2023) → 7000++ qubit → High applicability and accuracy of quantum measurement → Programming difficulty → Require more qubits 	<p>IBM-Q ION-Q</p>  <ul style="list-style-type: none"> → IBM-Q Ion-Q → 400++ qubit → Large quantum error → Programmable → Require more qubits

Fig. 초기 연구에서 D-Wave annealer와 gate-based quantum computer를 모두 비교했다.

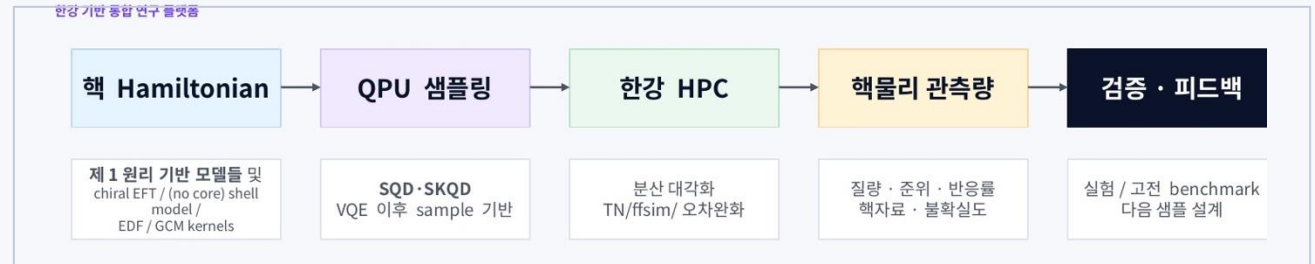


Fig. 장기적으로는 QPU 샘플링과 한강 HPC 후처리를 결합하는 페루프 워크플로우를 목표로 한다.

D-Wave에서 deuteron 바닥상태 에너지 계산결과

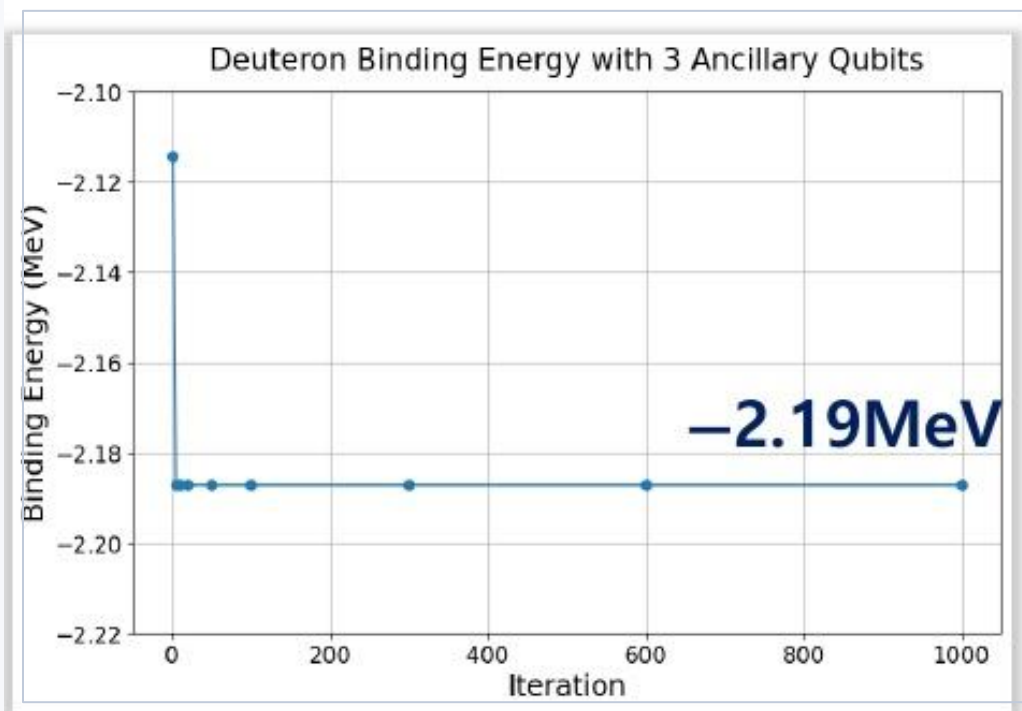


Fig. 3개의 ancillary qubit을 사용한 deuteron binding energy 결과. 계산값은 약 -2.19 MeV.

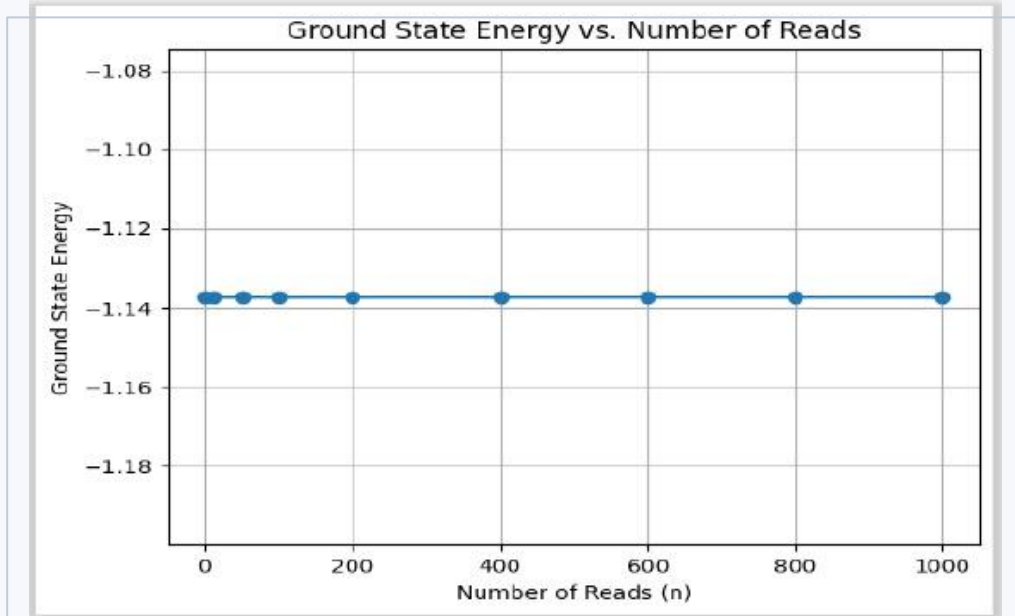
Ancillary Qubits	Binding Energy (MeV)	QPU Access Time (ms)
1	-0.22	79.76
2	-1.69	122.2
3	-2.19	159.5

Fig. ancillary qubit 수에 따른 binding energy 및 QPU access time.

핵심 결과
 $E \approx -2.19$ MeV

- Deuteron은 핵물리 양자계산의 대표 benchmark
- 양자 annealing은 Ising/QUBO 문제 구조에 맞춰 바닥상태 탐색에 강점
- 정밀 핵구조 계산 자체보다 "하드웨어에서 핵 Hamiltonian을 다루는 경험"이 핵심 자산

같은 접근은 분자 benchmark에서도 안정적으로 작동했다



- Quantum Annealing using D wave
: -1.137308 hartree

1 hartree = 27.2114 eV

Fig. D-Wave quantum annealing을 이용한 H₂ ground-state energy. 결과: -1.137308 Hartree.

왜 이 결과를 넣는가?

- 분자와 핵은 모두 Hamiltonian의 저에너지 고유상태 문제를 공유한다.
- 작은 benchmark에서 하드웨어 실행·후처리·검증 절차를 추적했다.
- 핵 many-body로 확장할 때 필요한 mapping과 sampling 감각을 얻었다.

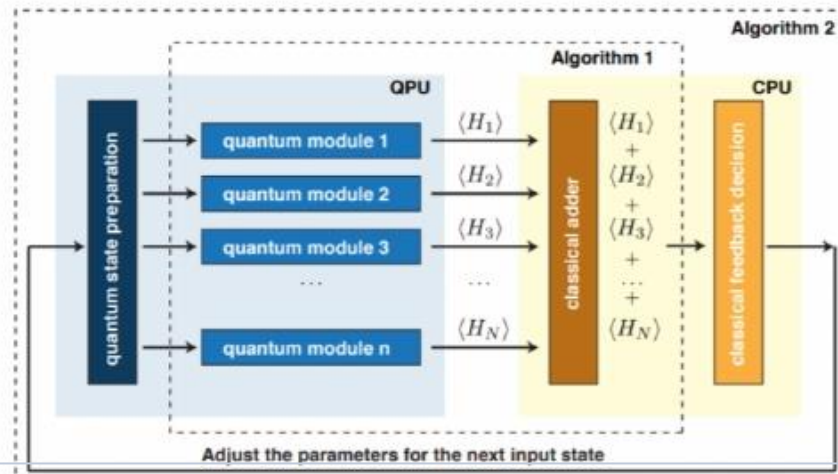
작은 문제라도 실제 하드웨어에서 끝까지 실행해 본 경험은, 6호기 시대의 workflow 설계로 이어진다.

VQE formalism: Pauli words와 expectation value

Variational Quantum Eigensolver

$$\hat{H} = \sum \hat{P}_i \quad \text{Where } \hat{P}_i = \prod \sigma_j^n, n = \{x, y, z\} \text{ \& } j = \text{qubit index}$$

$$E_0 \leq \sum \langle \Psi_i | \hat{P}_i | \Psi_i \rangle \quad \text{Where } \Psi \text{ is wavefunction of the } i\text{th Pauli word}$$

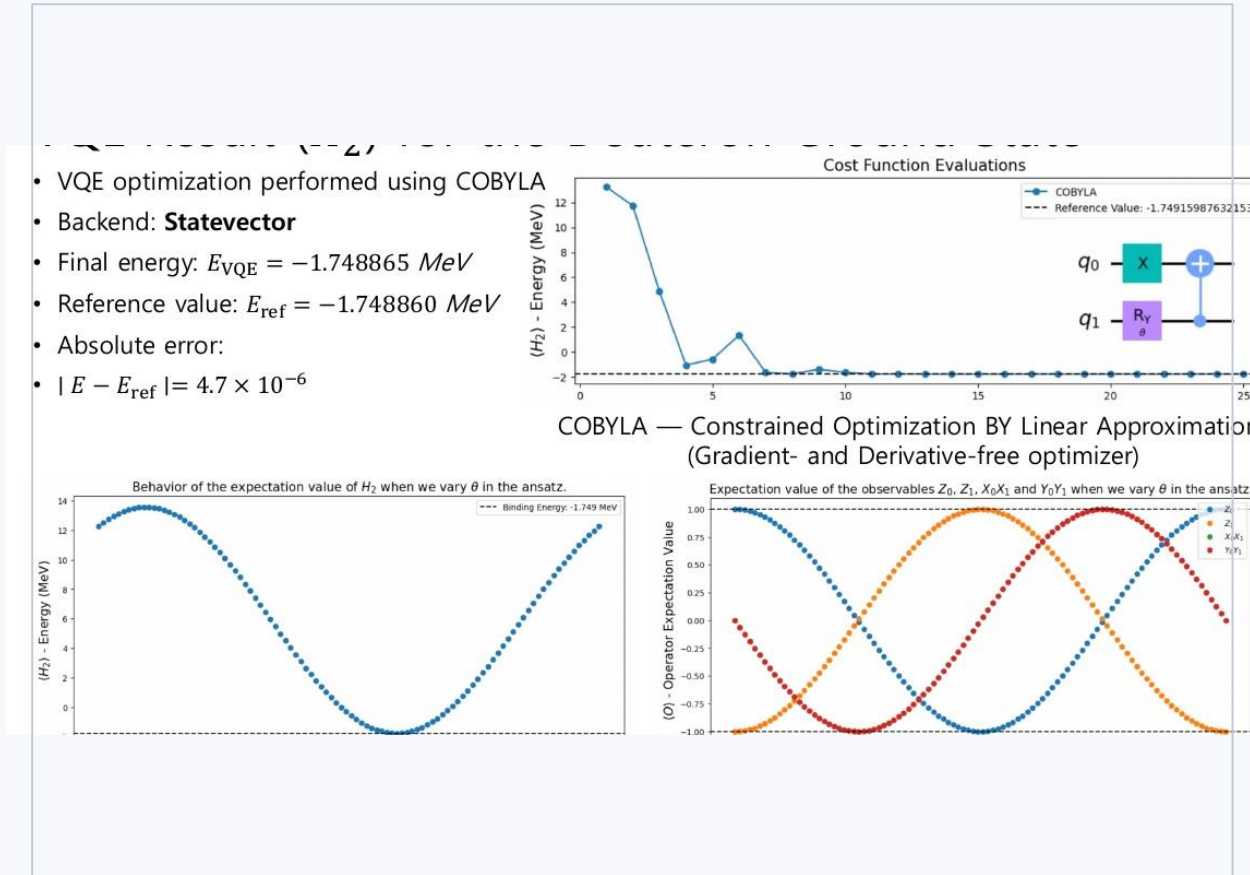


With serial processing, time scales linearly with number of Pauli words

BK transformation generates $O(N^4)$ Pauli words

Fig. VQE는 Pauli word expectation values를 측정하고 classical optimizer가 ansatz parameter를 갱신한다.

Gate-based VQE: 이상적 시뮬레이터에서는 작은 핵 Hamiltonian을 정확히 재현



우리가 확인한 것

- Ansatz와 Pauli decomposition이 잘 맞으면 소형 모델은 재현 가능
- $H_2 / H_3 / H_4$ toy Hamiltonian으로 workflow를 검증
- 하지만 실제 QPU에서는 noise와 calibration drift가 결과 landscape를 바꾼다

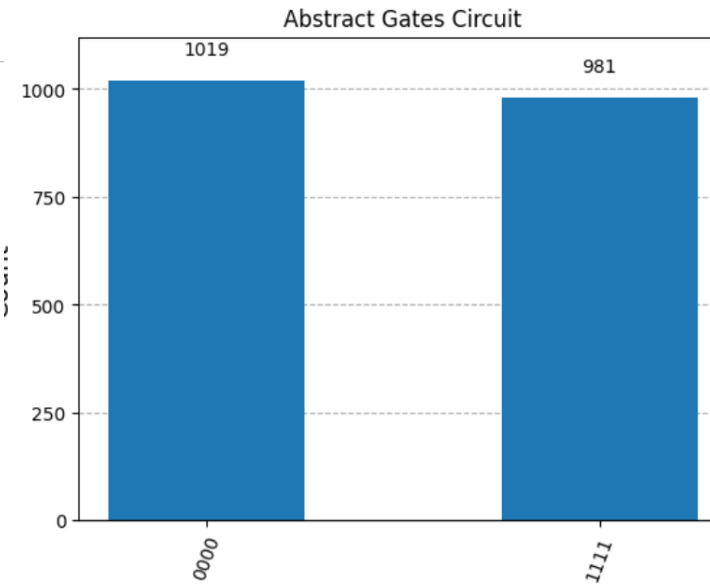
VQE는 “원리 검증”에는 좋지만, 확장성에는 명확한 병목이 있다.

Fig. 2-qubit deuteron Hamiltonian에 대한 statevector 기반 VQE 결과. 에너지 오차는 약 $4.7 \times 10^{-6} \text{ MeV}$ 수준.

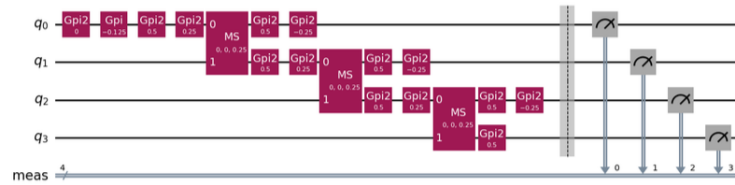
ibm_fez

Details

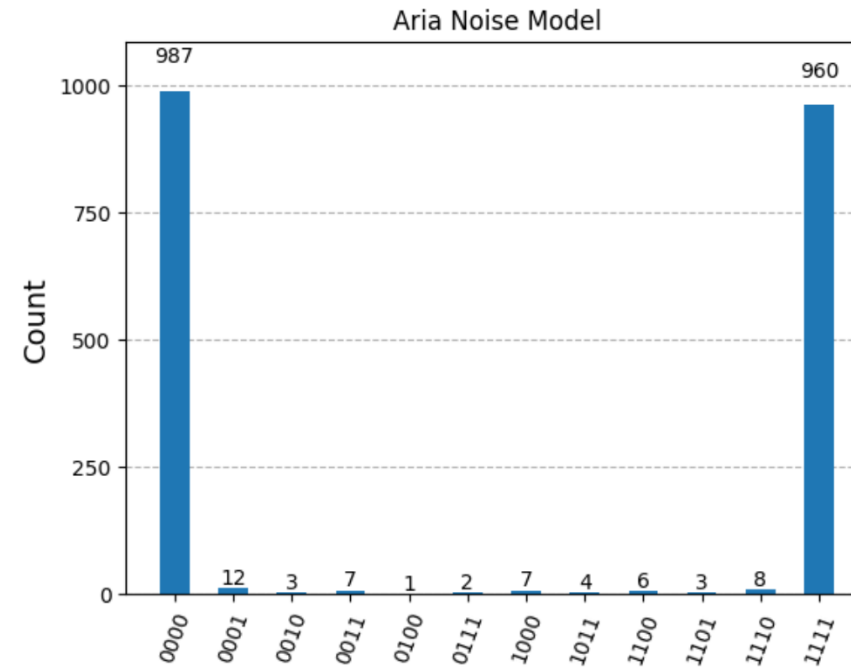
Qubits	2Q error (best)	2Q error (layered)	CLOPS
156	1.49E-3	4.52E-3	220K
Status	Region	QPU version	Processor type
● Online	Washington DC (us-east)	1.3.27	Heron r2
Basis gates	Pending jobs	Median CZ error	Median SX error
cz, id, rx, rz, rzz, sx, x	0	2.643E-3	2.593E-4
Median readout error	Median T1	Median T2	
9.644E-3	142.41 us	98.43 us	



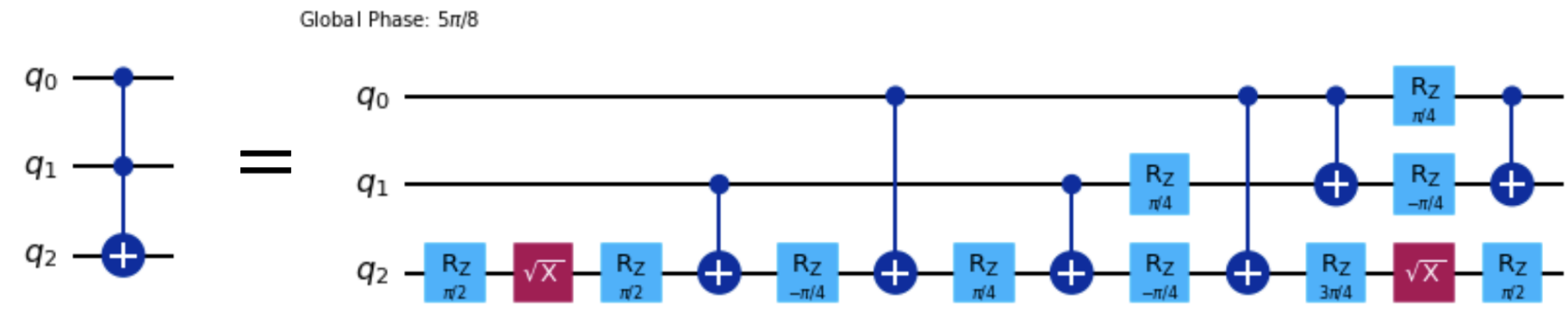
(a) Abstract gates circuit and measurement results



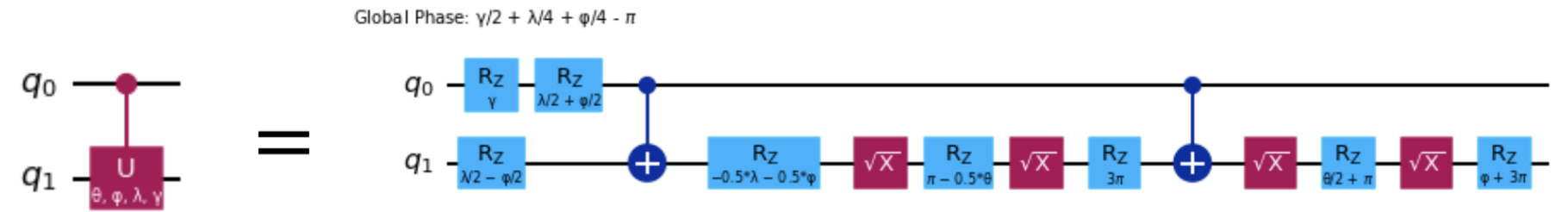
(b) Transpiled gates circuit and



Example: Decomposition of Toffoli/Controlled-U gate



Toffoli gate
(CCX gate)



Controlled U gate
(CU gate)

Unitary Coupled Cluster

Quantum computers cannot directly encode

$$U = \exp(T_1 + T_2 + \dots)$$



Trotterized

$$U \approx \left(\exp\left(\frac{T_1}{M}\right) \exp\left(\frac{T_2}{M}\right) \dots \right)^M \quad M \geq 1$$

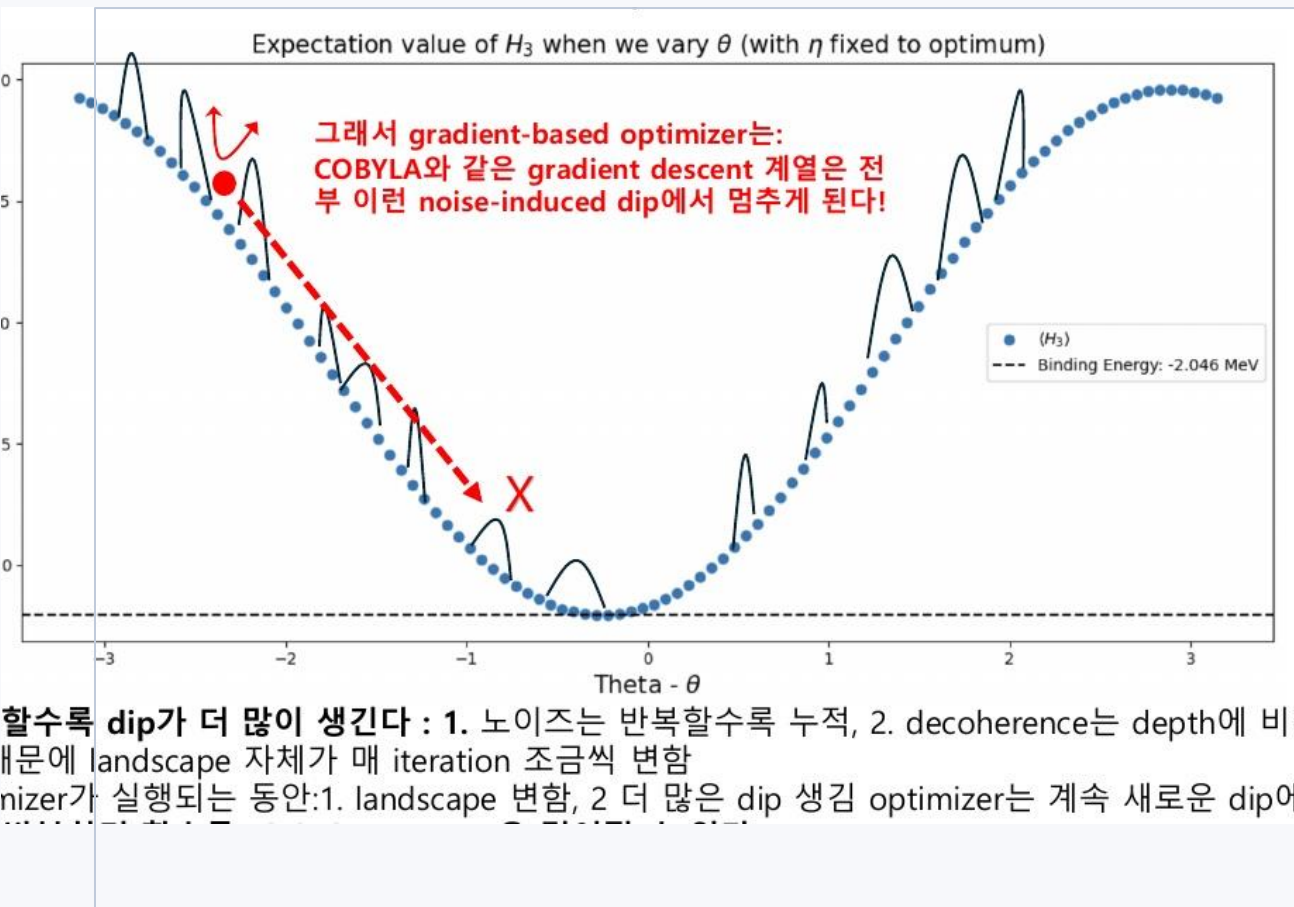
Even simplest fermionic operators are lengthy combination of Pauli terms

$$a_5^\dagger a_4^\dagger a_3 a_2 - a_2^\dagger a_3^\dagger a_4 a_5$$

$$\rightarrow \frac{i}{8} (x_2 y_4 + z_1 x_2 z_3 y_4 - y_2 x_4 - z_1 y_2 z_3 x_4 - y_2 x_4 z_5 - z_1 y_2 z_3 x_4 z_5 + x_2 y_4 z_5 + z_1 x_2 z_3 y_4 z_5)$$

Lengthy combinations of Pauli terms increases quantum circuit depth

왜 VQE 최적화가 어려운가: noise-induced fake minima



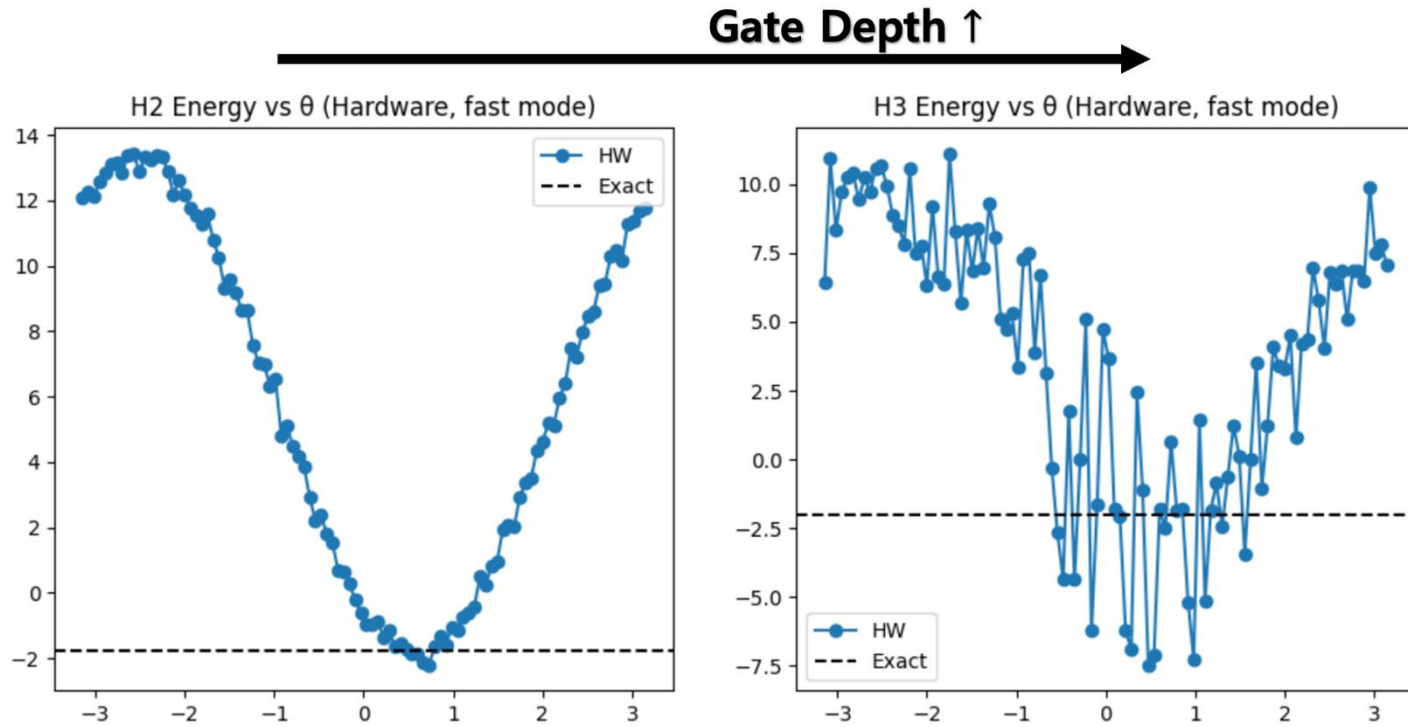
NISQ VQE의 구조적 병목

- 반복 최적화는 매 iteration마다 QPU noise를 다시 만난다.
- 계산 중 calibration drift와 finite-shot noise가 landscape를 바꾼다.
- 큰 Hamiltonian일수록 Pauli 측정과 optimizer loop가 커진다.
- 따라서 "wavefunction을 직접 최적화"하는 대신, 중요한 configuration support를 찾아야 한다.

이 지점에서 SQD/SKQD가 등장한다.

Fig. 노이즈가 들어오면 smooth한 에너지 landscape에 작은 우물(fake minima)이 생겨 optimizer가 갇힐 수 있다.

하지만, 실제 QPU에서는 gate depth가 커질수록 결과가 빠르게 흔들린다

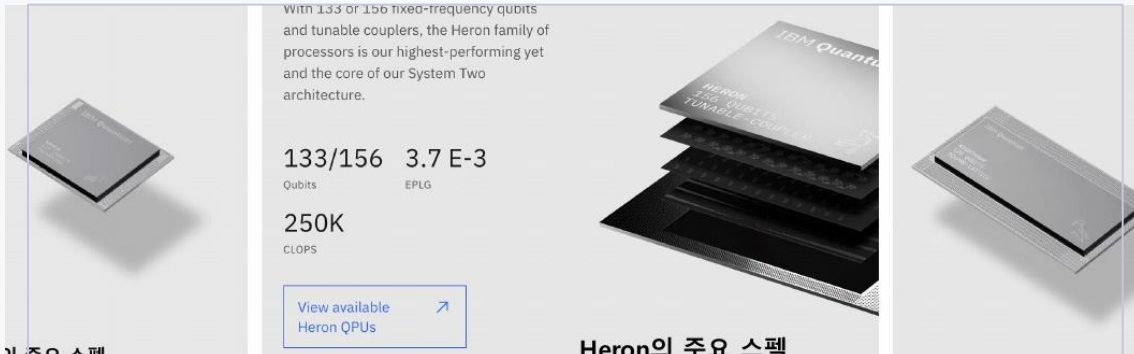


결론: “작은 모델은 가능하다”와 “확장 가능하다”는 다른 말이다.

- H₂ 수준에서는 최저점 주변 구조가 비교적 보인다.
- H₃ 이상에서는 gate depth와 entanglement 때문에 산포가 커진다.
- NISQ에서는 wavefunction 전체를 VQE로 직접 맞추기보다, 샘플 기반 부분공간 전략이 더 현실적이다.

Fig. 실제 IBM QPU에서 얻은 H₂/H₃ energy landscape. H₃처럼 depth가 커지면 noise fluctuation이 커진다.

IBM 하드웨어는 크게 좋아졌지만, VQE 문제는 남아 있다



With 133 or 156 fixed-frequency qubits and tunable couplers, the Heron family of processors is our highest-performing yet and the core of our System Two architecture.

133/156 Qubits 3.7 E-3 EPLG

250K CLOPS

[View available Heron QPUs](#)

Heron의 주요 스펙
 < Tunable Couplers(조정 가능한 커플러) 탑재 >
 • 133 또는 156 qubits
 • Fixed-frequency qubits + tunable couplers
 • EPLG = 3.7×10^{-3}

이 주요 스펙
 ubits
 frequency transmon qubits (고정 주파수 큐비트)
 없음, 즉 직접 capacitive coupling 구조
 보다 이전 세대의 아키텍처

좋아진 점

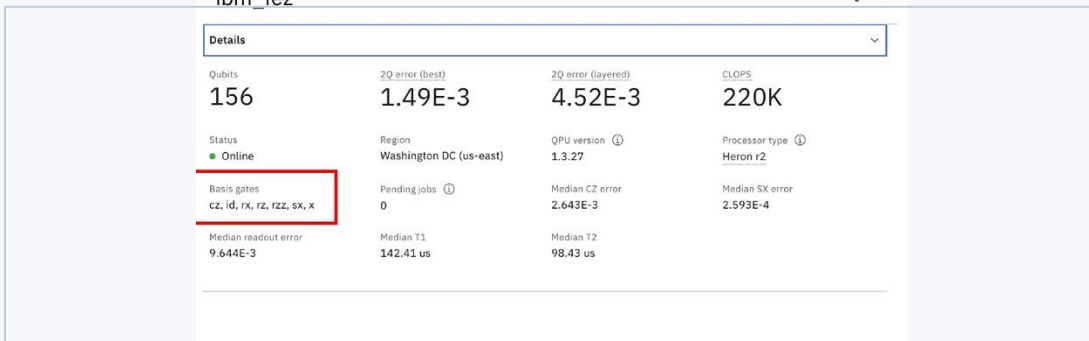
- T_1/T_2 , readout error, 2-qubit gate fidelity가 개선
- shallow circuit의 안정성이 증가
- 대형 시스템을 위한 아키텍처가 발전

T_1 : energy relaxation time — $|1\rangle$ 상태가 $|0\rangle$ 로 decay하는 시간 척도.
 T_2 : dephasing time — $\alpha|0\rangle + \beta e^{i\phi}|1\rangle$ 중첩상태의 상대위상 ϕ 가 유지되는 시간 척도.

Fig. Eagle → Heron → Nighthawk 세대 변화. Heron은 tunable coupler를 통해 cross-talk와 ZZ 상호작용을 줄인다.

그래도 남은 문제

- VQE는 반복 최적화 중 landscape 자체가 noise로 흔들림
- 측정 overhead와 optimizer sensitivity가 active space 확장에 취약
- “좋은 하드웨어”만으로는 큰 핵 Hamiltonian을 바로 풀기 어렵다



Details			
Qubits	2Q error (best)	2Q error (layered)	CLOPS
156	1.49E-3	4.52E-3	220K
Status	Region	QPU version	Processor type
● Online	Washington DC (us-east)	1.3.27	Heron r2
Basis gates	Pending jobs	Median CZ error	Median SX error
cz, id, rx, rz, rzz, sx, x	0	2.643E-3	2.593E-4
Median readout error	Median T1	Median T2	
9.644E-3	142.41 us	98.43 us	

Fig. 실제 IBM backend 사용 화면 예. 큐비트 수, gate error, readout error 등 calibration 정보를 확인하며 실행한다.

IBM Nighthawk와 scalable chip architecture

IBM Quantum Nighthawk chip (Credit: IBM)

IBM Quantum Nighthawk's qubit plane includes 120 qubits arranged in a square lattice.



Nighthawk (2024–2025 라인업)

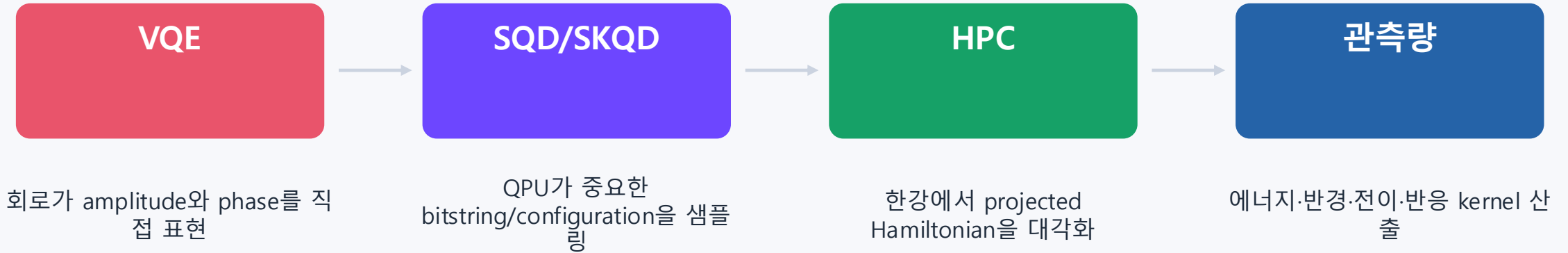
✓ 특징

- “Square lattice”라는 구조적 키워드만 제시
- Heron과 같은 tunable-coupler 기반 아키텍처
- 단, 대규모 시스템에서 타일(tile) 형태로 잘 확장되도록 설계한 lattice
- IBM의 모듈형 시스템(System Two)에서 중요한 역할

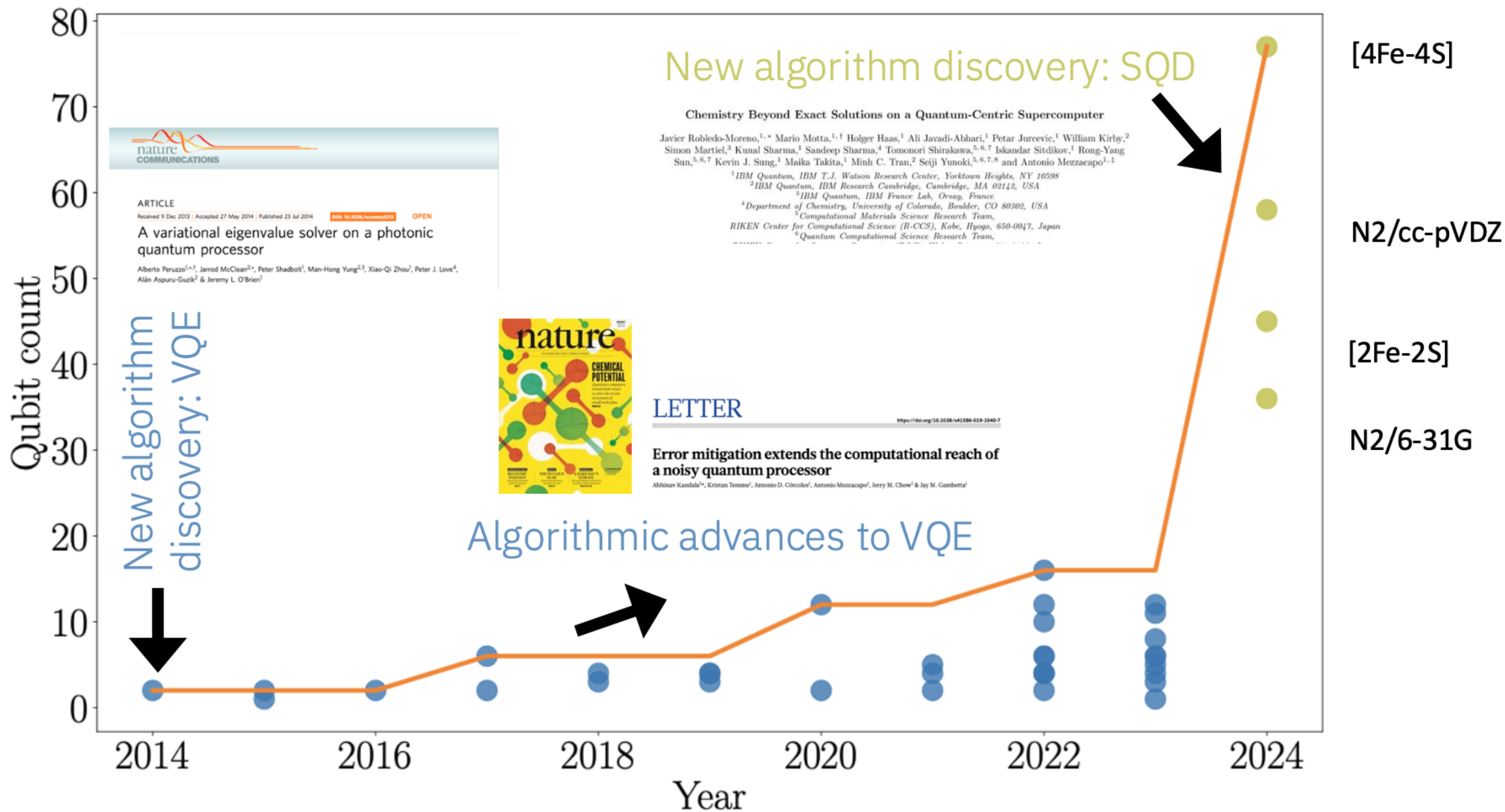
✓ 목적

- “대규모 큐비트 칩을 여러 장 연결하여 초대형 양자 시스템 구축”
- 즉 Heron이 단일 칩 성능을 최대화한 칩이라면, Nighthawk는 ‘확장성(scalability)’에 최적화된 세대

전략 전환: 파동함수 전체 최적화에서 “좋은 샘플 + 부분공간 대각화”로



SQD의 관점: 양자컴은 큰 Hilbert 공간에서 “어디를 봐야 하는지” 알려주고, 고전 HPC가 그 부분공간에서 정밀 계산을 수행한다.



SQD 직관: Hamiltonian이 강조하는 support를 샘플로 찾는다

Hamiltonian 만 알고 있을 때, ground-state support 를 어떻게 찾는가?

$$H = -\frac{1}{2}(\partial_x^2 + \partial_y^2) + \frac{1}{2}(x^2 + y^2)$$

2D Simple Harmonic Oscillator

Imaginary time

energy gap → amplitude damping

Real time / Krylov

phase difference → interference filtering

핵심 : SQD/SKQD 는 양자회로가 정확한 계수를 바로 만들게 하기보다, H 가 강조하는 중요한 configuration support 를 sample 로 찾고, 그 안에서 H 를 다시 대각화한다.

SQD의 핵심은 계수보다 support

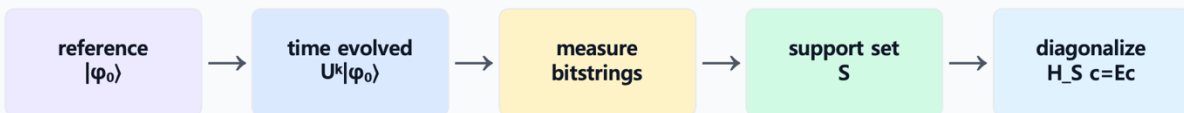
- QPU 샘플은 완벽한 파동함수를 주지 않는다.
- 하지만 반복적으로 나타나는 bitstring은 중요한 configuration일 수 있다.
- 그 configuration 집합 S 안에서 H_S를 다시 대각화하면 계수는 고전적으로 복원된다.
- 노이즈가 있더라도 recovery와 filtering을 통해 신호를 회복할 수 있다.

QPU: support discovery
HPC: coefficient recovery

Fig. SHO toy example: imaginary-time filtering과 real-time/Krylov filtering은 low-energy support를 강조한다.

SKQD/Krylov: 시간전개 상태를 모아 작은 부분공간을 만든다

$$\mathcal{K}_m = \text{span}\{|\phi_0\rangle, U|\phi_0\rangle, U^2|\phi_0\rangle, \dots, U^{m-1}|\phi_0\rangle\} \quad U = e^{-i\Delta t H}$$



- **Imaginary time**
 - 에너지 gap에 따라 excited components를 직접 damping
- **Real time / Krylov**
 - 상대 phase를 이용해 excited components를 간섭으로 상쇄
- **Nuclear target**
 - ground state뿐 아니라 상관함수·동역학·반응 입력량으로 확장 가능

$$S = \{|\alpha_1\rangle, |\alpha_2\rangle, \dots, |\alpha_M\rangle\} \quad H_S = P_S H P_S$$

Fig. reference state → time-evolved states → measurements → support set → projected diagonalization.

Imaginary time

$$e^{-\tau H} : e^{-\tau(E_n - E_0)} \text{ damping}$$

energy gap이 클수록 excited state가 더 빨리 사라집니다. 개별 상태 자체가 ground state로 수렴합니다.

Real time / Krylov

$$e^{-itH} : e^{-itE_n} \text{ phase rotation}$$

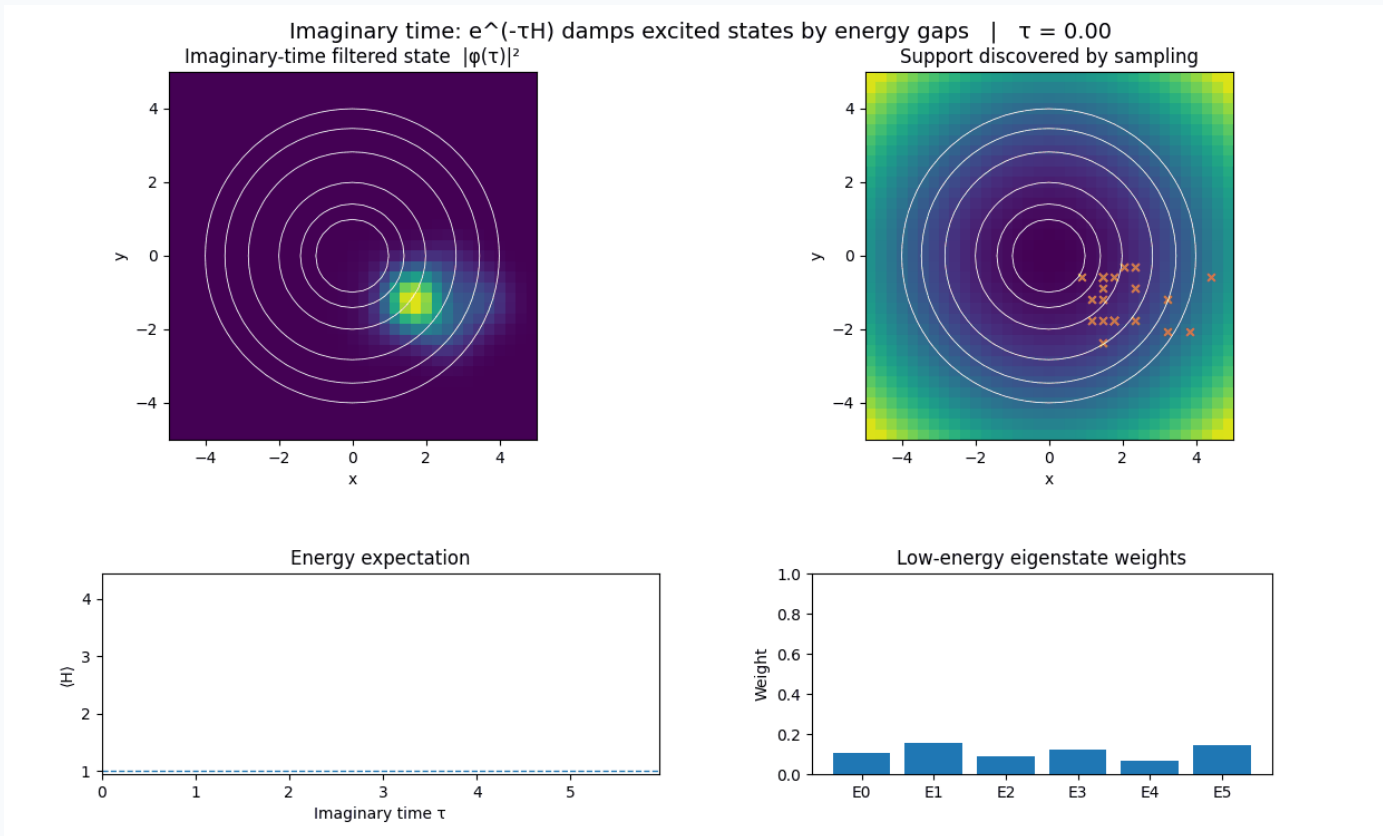
한 상태는 damping되지 않습니다. 여러 시간의 상태를 선형결합할 때 phase interference가 excited components를 상쇄합니다.

Fig. imaginary-time과 real-time/Krylov filtering은 서로 다르지만, 모두 low-energy support를 강조한다.

SQD/SKQD = support discovery by H + classical diagonalization

Imaginary-time SHO GIF: density가 중심으로 수축하고 sample support가 모임

왼쪽 위: filtered density, 오른쪽 위: sampled support, 아래: energy와 low-energy weights.



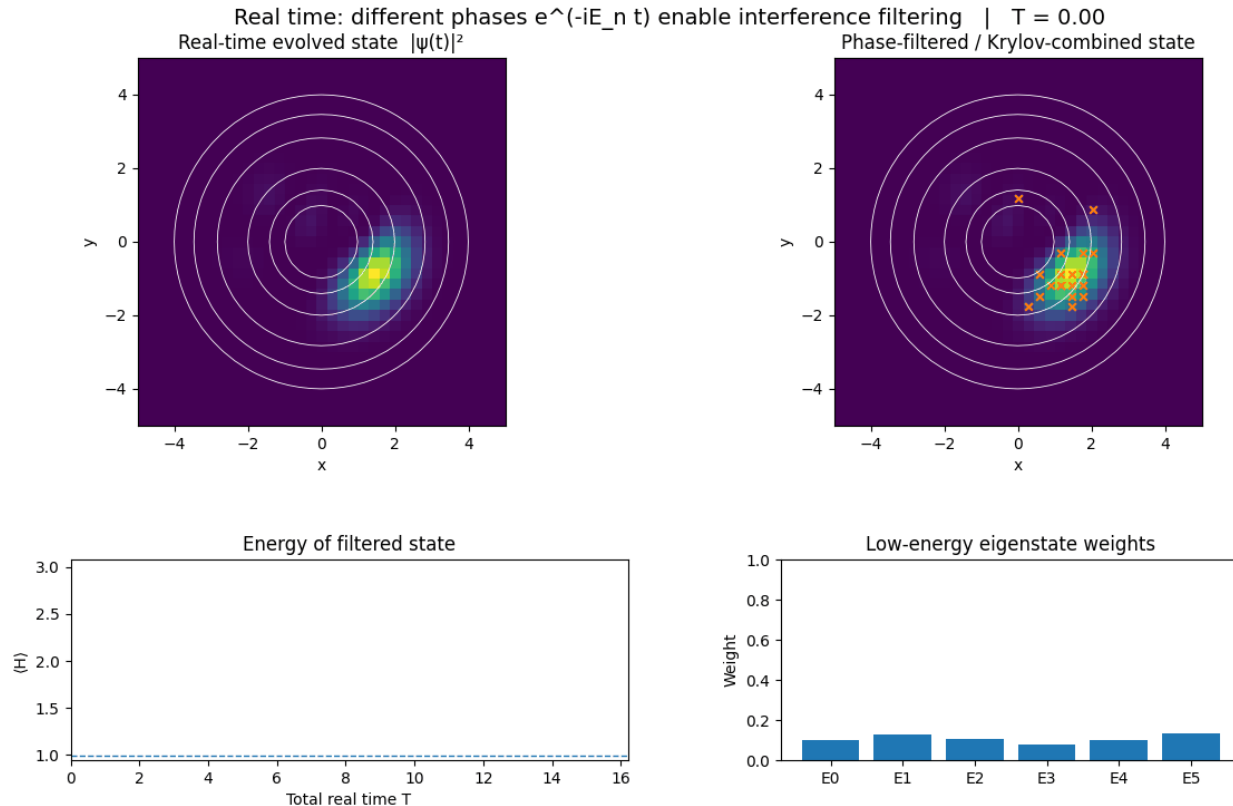
이 장면에서 볼 것

초기 wavepacket은 ground state와 다르다.
 $e^{-\tau H}$ 가 high-energy components를 지수적으로 suppression한다.
density가 SHO 중심부로 모인다.
그 상태를 측정하면 ground-state support 근처가 반복적으로 샘플된다.

energy gap \Rightarrow amplitude damping \Rightarrow support sampling

Real-time SHO GIF: phase interference로 ground-state-like 조합을 만듦

왼쪽: real-time state 자체, 오른쪽: 여러 시간 상태를 합친 phase-filtered/Krylov-combined state.

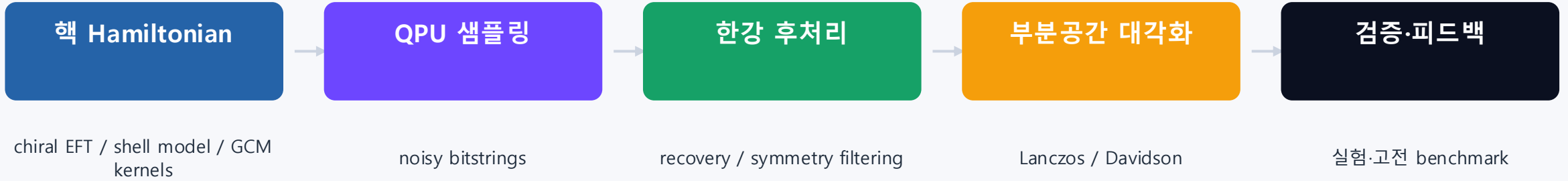


이 장면에서 볼 것

real-time state 자체는 damping되지 않는다.
하지만 각 eigencomponent의 phase가 E_n 에 따라 다르게 돈다.
여러 시간의 상태를 조합하면 excited components가 destructive interference로 줄어들는다.
phase-filtered state에서 sample하면 중심 support가 강조된다.

phase differences \Rightarrow interference \Rightarrow support sampling

핵 Hamiltonian SQD 워크플로우: 샘플링-복원-부분공간-검증 루프



Lanczos / Davidson:

대규모 희소 Hamiltonian을 직접 대각화하지 않고, $H|\psi\rangle$ 반복 연산으로 작은 부분공간을 만들어 저에너지 고유상태를 효율적으로 찾는 표준 반복 대각화 방법. SQD/SKQD, shell-model, GCM 계산의 핵심 후처리 도구로 활용된다.

핵물리 특화 요소: 입자수, parity, 각운동량, isospin 등 대칭성 보존과 center-of-mass 제거가 중요하다.

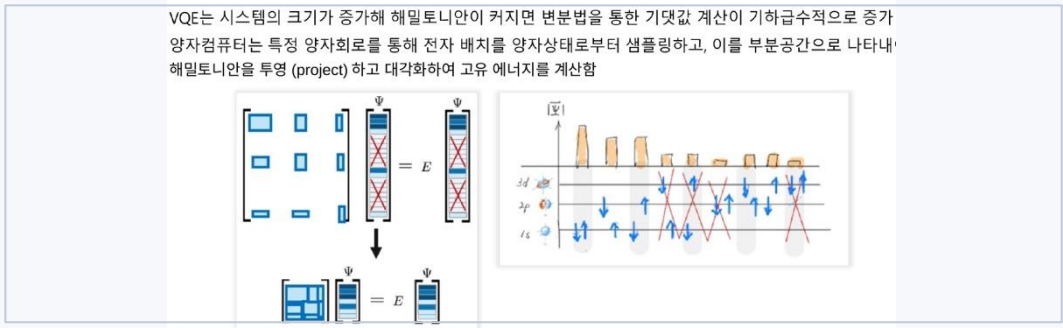
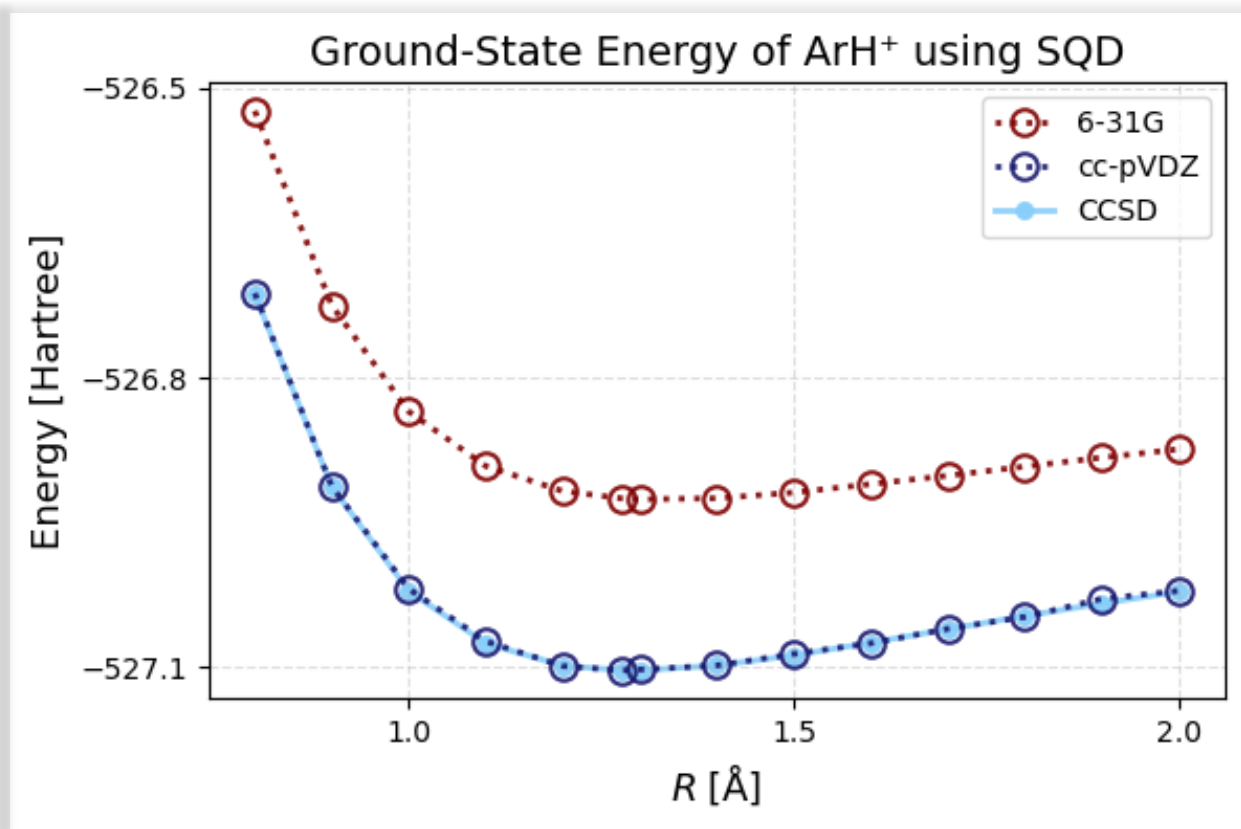
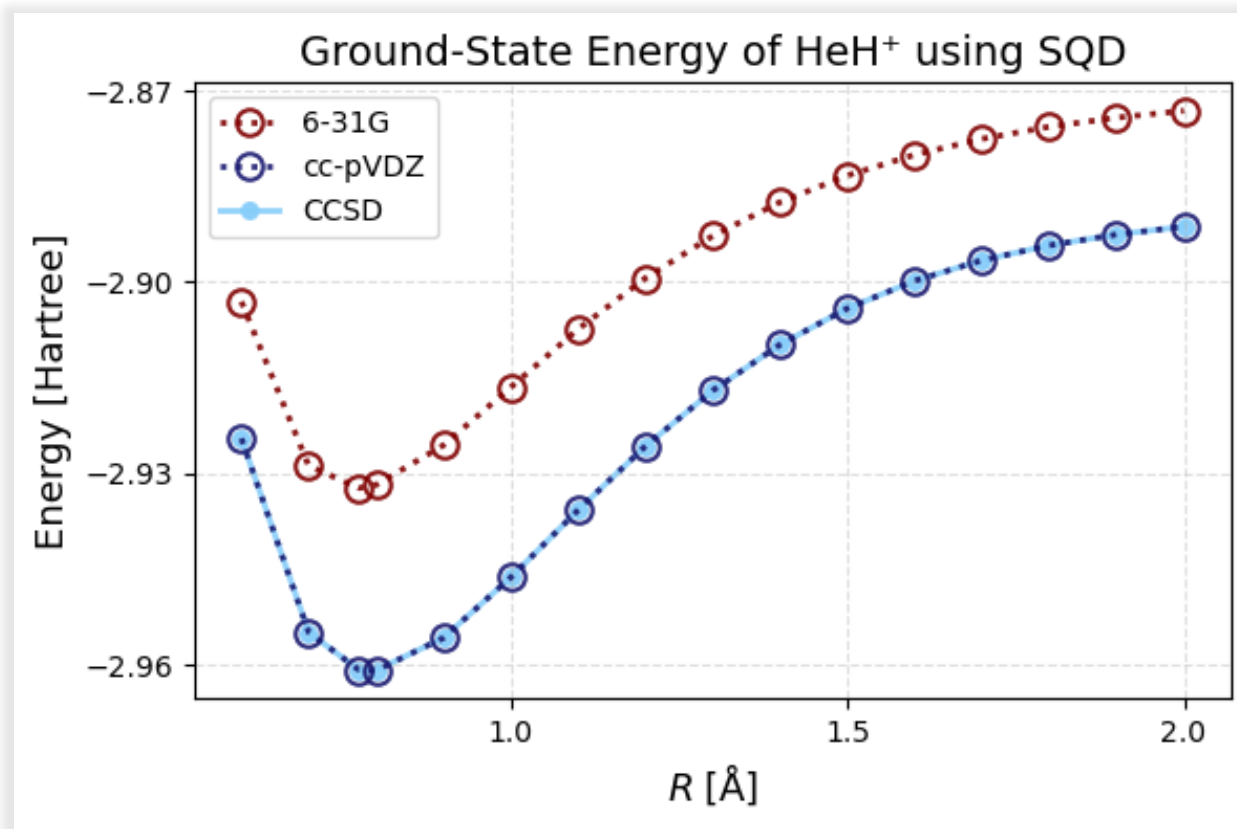
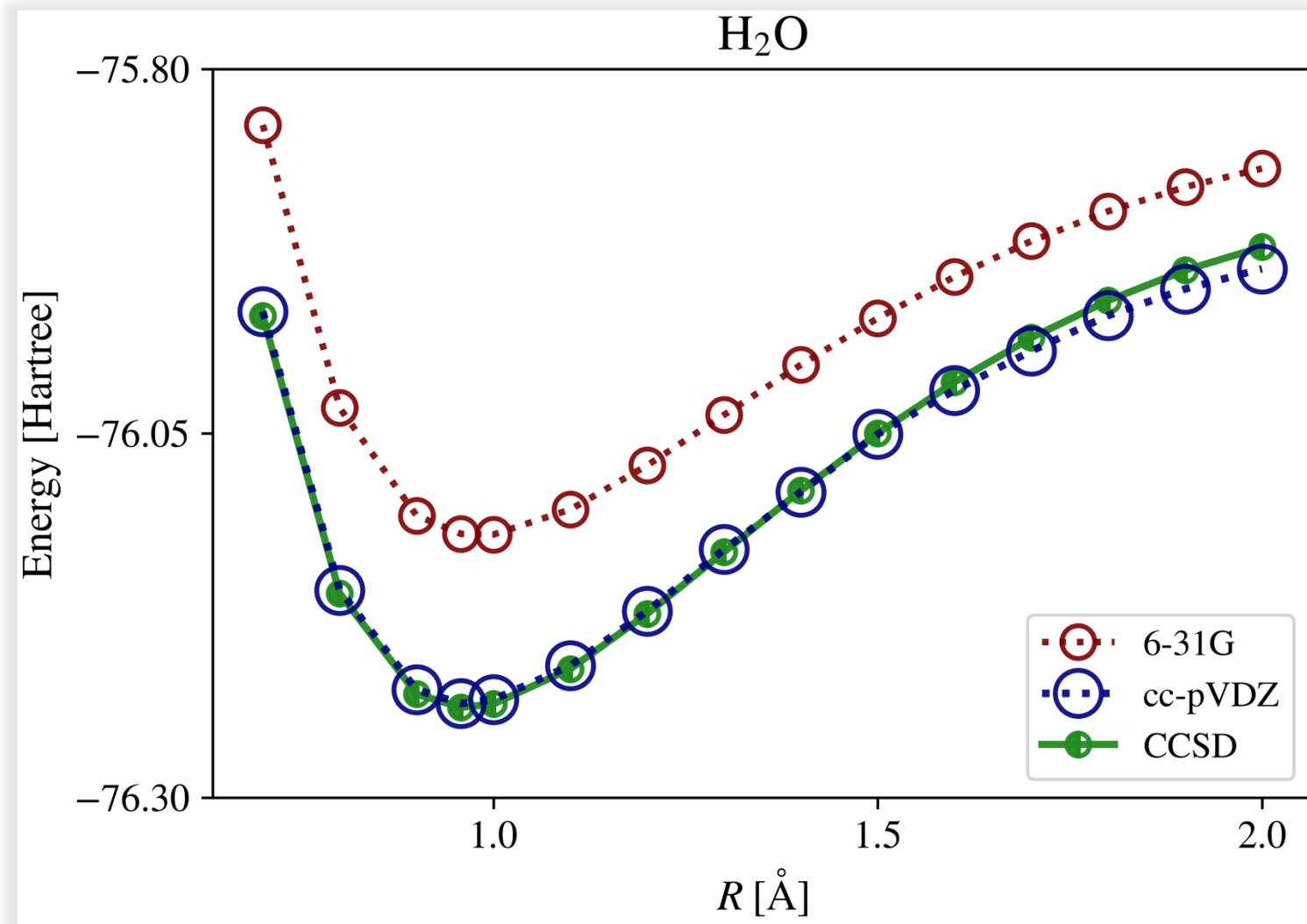


Fig. SQD 예제 workflow: sampling → configuration recovery → projected Hamiltonian diagonalization.

SQD 방법을 이용한 간단한 양자다체계 계산 결과들



SQD 방법을 이용한 간단한 양자다체계 계산 결과들



분자 benchmark에서 SQD는 이미 정량적 재현력을 보여준다

SQD(6-31G) / SQD(cc-pVDZ) / CCSD(cc-pVDZ) / reference

Molecule	R [Å]	SQD 6-31G	SQD cc-pVDZ	CCSD cc-pVDZ	Reference
HeH ⁺	0.7743	-2.9323	-2.9608	-2.9608	-2.9787
ArH ⁺	1.2767	-526.9249	-527.1055	-527.1029	-527.1827
H ₂ O	0.95782	-76.11896	-76.2353	-76.2380	-76.2417

같은 basis 에서 SQD(cc-pVDZ) 는 CCSD(cc-pVDZ) 를 매우 가깝게 재현

| SQD(cc-pVDZ) - CCSD(cc-pVDZ) |

HeH⁺ 0.0 mHa

ArH⁺ 2.6 mHa

H₂O 2.7 mHa

HeH⁺ 와 ArH⁺ 가 astrophysical benchmark 로서 충분히 의미 있고, SQD 는 작은 / 중간 규모 분자에서 이미 정량적 재현력을 보여준다.

- HeH⁺와 ArH⁺는 astrophysical molecular ion으로 실제 관측·분광 맥락을 가진다.
- SQD는 deep VQE 대신 좋은 sampling과 classical subspace diagonalization을 결합한다.
- 핵 many-body Hamiltonian도 “큰 configuration space에서 저에너지 상태를 찾는 문제”라는 점에서 구조가 같다.

분자에서 검증한 것은 “알고리즘의 성격”이다. 다음 단계는 핵 Hamiltonian에 맞는 basis와 symmetry를 설계하는 것이다.

Fig. HeH⁺, ArH⁺, H₂O benchmark: SQD(cc-pVDZ)는 CCSD(cc-pVDZ)를 mHa 수준으로 재현.

분자에서 핵 many-body Hamiltonian으로: 같은 구조, 다른 물리 제약



Fig. 분자 determinants와 핵 shell-model configurations는 SQD 관점에서 공통적인 "important-state selection" 문제로 볼 수 있다.

핵물리로 가져올 때 추가되는 것

- 핵력과 chiral EFT / effective Hamiltonian
- 입자수·각운동량·parity·isospin 대칭성
- 센터-오브-매스 제거와 model-space truncation
- 반응 kernel과 동역학 관측량으로의 확장

같은 알고리즘을 그대로 복사하는 것이 아니라, 핵물리의 보존량과 관측량에 맞게 재설계한다.

비전: K-Quantum Nuclear Foundry

한강 기반 통합 연구 플랫폼



Fig. 핵 Hamiltonian → QPU 샘플링 → 한강 HPC → 핵물리 관측량 → 검증·피드백으로 이어지는 페루프 플랫폼.

한강은 “양자컴을 위한 보조 컴퓨터”가 아니라, 핵물리 문제를 QPU와 함께 풀기 위한 주 계산 플랫폼이다.

1순위: Nuclear SQD/SKQD benchmark suite

What are these problems?

Modeling molecules, atoms, electrons, and quarks with **unprecedented accuracy**

[4Fe-4S] using an active space of 54 electrons in 36 orbitals from the TZP-DKH basis set

$$H\Psi = E\Psi$$

Classical exact method	63 PiB of memory ¹
Classical approximate method (DMRG)	8 hours ^{2,3}
Quantum method (QCSC)	12 min using 77 qubits + 1.5 hours supercomputer time ¹

We are already using quantum (Heron, 77 qubits) and HPC (Supercomputer Fugaku) to achieve results comparable with the best classical approximate methods (DMRG) in accuracy and timing

1. Science Advances vol. 11, no. 25 (2025)
2. J. Chem. Theory Comp. 20 (2024): 773-790
3. J. Chem. Phys. 159, 234801 (2023)

Fig. chemistry QCSC proof-of-concept: 양자 샘플과 초대형 고전 부분공간 계산이 결합된 선례.

Quantum-centric supercomputing

IBM Quantum

HERON 77 QUBITS TRIAZOLINE-COMPLEX

77 qubits
10570 quantum gates
3590 two-qubit gates

Fugaku

6400 nodes @
32 GB
1024 GB/s
48 cores

Quantum-centric Supercomputing Cluster

Middleware

Quantum System

Runtime Node

Controller

Workload Management

Classical Node

Classical Node

Classical Node

Chemistry Application

Map

Optimize

Execute

Configuration Recovery

Subsample

Eigenstate Solver

Eigenstate Solver

Eigenstate Solver

Collect and Average

Chemistry Application

In typical applications, the data transfer between quantum and classical is limited to expectation values and circuit parameters.

★ In contrast, here we use the largest possible data transfer and send all bitstrings sampled from the quantum device.

Information from all the samples is used to obtain accurate, noise-resilient estimates.

Fig. QPU와 supercomputer를 연결하는 closed-loop quantum-centric workflow.

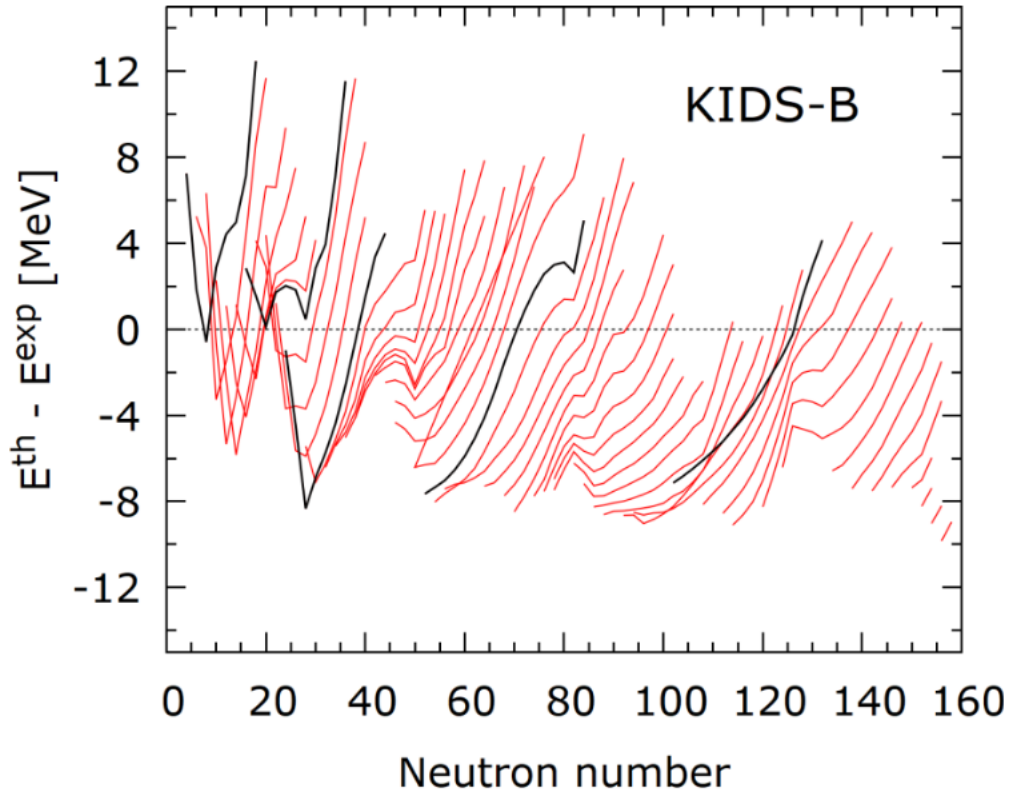
핵물리 적용 목표

light nuclei · shell-model active spaces · nuclear lattice model · GCM reaction kernels

검증: exact diagonalization, DMRG/CI/CC, 실험 자료, variational upper bound

2순위: KIDS EDF global mass table과 국내 독자 핵구조 데이터

PHYSICAL REVIEW C **108**, 044316 (2023)



왜 6호기 자원이 필요한가?

- 전 핵종 HFB 계산: 핵종 × 변형좌표 × pairing × 파라미터 scan
- 수천-수만 개의 독립 계산으로 CPU 병렬성이 크다.
- UQ/covariance를 포함해야 핵자료로 사용할 수 있다.
- 희귀동위원소, 중성자별 EoS, 핵융합 활성화/차폐 입력자료로 연결된다.

산출물: KIDS EDF mass table v1.0 · charge radii · drip-line map · covariance · benchmark report

Black lines denote the results for O, Ca, Ni, Sn, and Pb isotopes, respectively.

Fig. KIDS EDF 기반 global mass table은 전 핵종 질량·반경·drip line·EoS 예측의 기반이 된다.

3순위: GCM/TDGCM으로 핵구조에서 실제 반응·핵자료로

국가 전략 연계



Fig. KSTAR/ITER/DEMO와 연계되는 핵융합 핵자료는 계산핵물리의 중요한 응용 영역이다.

- 1 **집단좌표 생성**
 β_2, β_3 , pairing, neck, distance
- 2 **커널 계산**
norm / Hamiltonian kernels
- 3 **동역학**
TDGCM / GOA / SCIM
- 4 **반응 관측량**
fission yield, transfer, reaction probability

GCM/TDGCM은 구조 계산과 반응 계산 사이의 다리다.
6호기에서는 커널 생산과 불확실도 전파를 “워크플로우”로 만들어야 한다.

한강에서 필요한 기술 스택: CPU·GPU·QPU·Data layer를 역할별로 묶는다

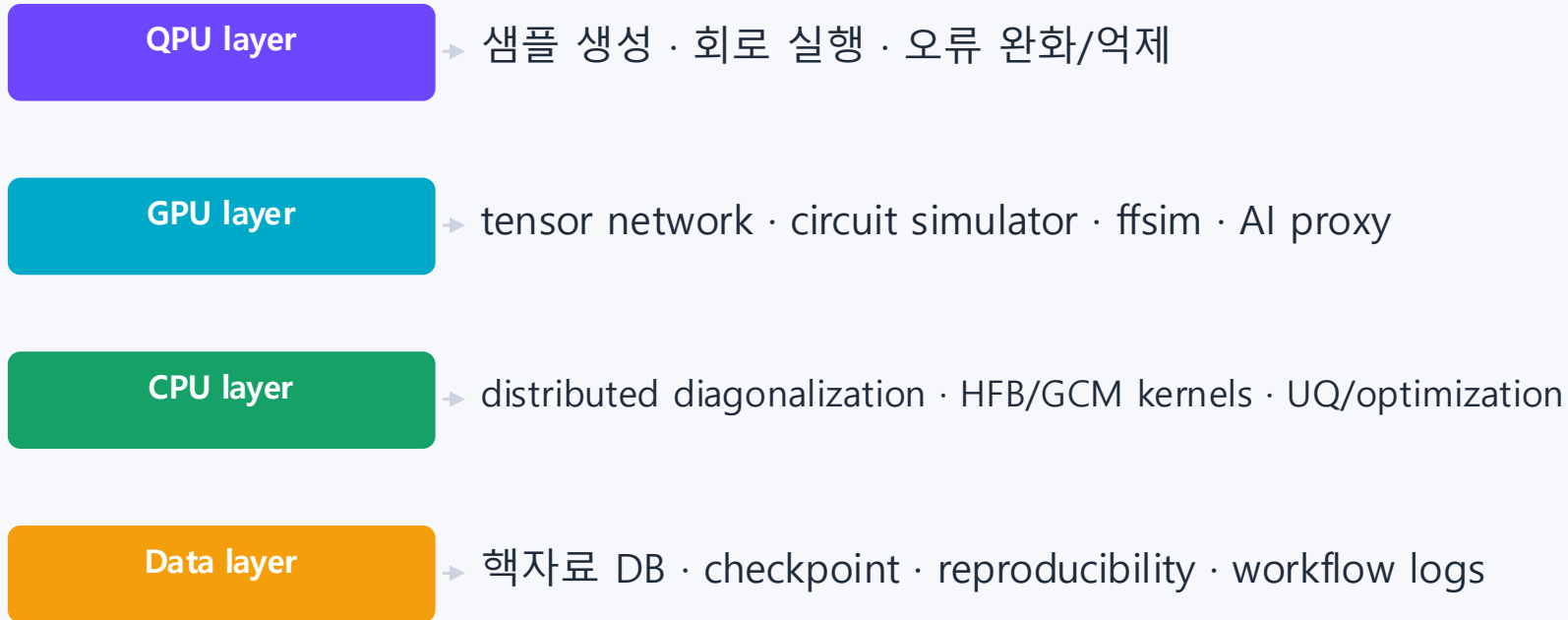


Fig. 한강은 QPU 샘플 후처리와 대규모 핵자료 생산을 동시에 지원해야 한다.

자원 산정 원칙
① 소규모 QPU/HPC loop 검증
② active space 확장
③ KIDS/GCM production 및 fusion-relevant nuclear data 산출

Take-home messages

01 핵물리는 양자컴퓨팅의 자연스러운 기초과학 응용이다.

Hamiltonian, 강상관, 검증 가능한 관측량이 모두 있다.

02 실제 하드웨어에서 핵·분자 benchmark를 실행했고, 의미있는 결과를 얻었다.

D-Wave deuteron, IBM-Q VQE, Heron 경험이 다음 단계의 기반이다.

03 VQE만으로는 확장성이 부족하다.

NISQ noise와 optimizer 병목 때문에 SQD/SKQD가 현실적 post-VQE 경로다.

04 KISTI 6호기 한강은 핵물리 양자-HPC 대표 응용을 만들 기회다.

SQD/SKQD + KIDS EDF + GCM/TDGCM + 핵자료 플랫폼으로 연결한다.

실제 연구 경험에서 출발해, 6호기 시대의 핵이론 계산 플랫폼으로 간다.

Toward an Open Quantum Nuclear Many-Body Community

Nuclear Quantum Computing & Hybrid Calculations Study Group

An open working group for quantum computing, quantum annealing, and Quantum-HPC hybrid methods in nuclear theory.

현재 참여자

- 천명기 교수님 · 송실대학교
- 하은자 교수님 · 한양대학교
- 조기현 교수님 · KISTI
- 현창호 교수님 · 대구대학교
- 문명환 박사 · 경북대학교 고에너지물리연구소
- 박주빈 박사 · 송실대학교 우주물질연구소
- 윤채현 · 한국퀀텀컴퓨팅(주)
- 이민규 · 송실대학교

※ 연구회는 공식 저자 표기가 아니라, 관심 있는 연구자들이 함께 논의하는 열린 모임입니다.

함께 논의하고 싶은 방향

- nuclear many-body theory
- quantum algorithms · SQD/SKQD
- hybrid quantum-HPC workflows
- KIDS EDF · GCM/TDGCM · nuclear data
- fusion applications · AI for Science

새로운 참여를 환영합니다

양자컴퓨터를 활용한 핵물리 양자 다체계 연구에 관심 있는 연구자와 학생은 편하게 연락 주세요.

박주빈, honolov@ssu.ac.kr, 010-5476-2742