

# Aljabar Kausal Kuantum untuk Representasi Data Koncemoritasi Czileary

Kerangka Kerja Operator-Teoretis Baru Melampaui Korelasi

Aslan Alwi\*, Munirah, dan Tim Almudaya Research Institute

# Konflik Fondasional dalam Machine Learning

Alat representasi data terbaik kita secara fundamental tidak selaras dengan sifat kausalitas.

KAUSALITAS KLASIK (Sebab-Akibat)



Asimetris (Arah itu penting)

*"Kausalitas klasik... secara intrinsik bersifat terarah dan oleh karena itu asimetris."*



ALJABAR LINEAR (PCA, SVD)

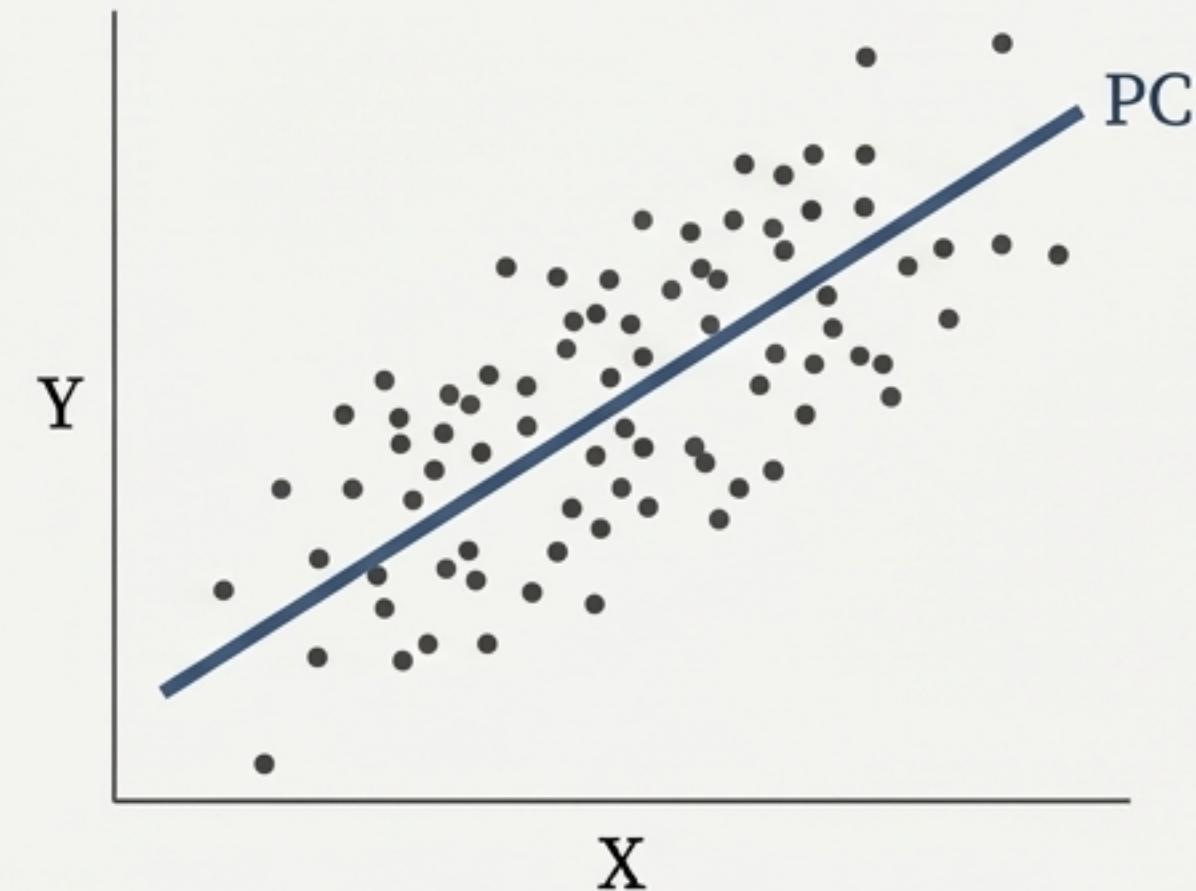
Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue
Light Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue
Light Blue	Light Blue	Dark Blue	Light Blue
Light Blue	Light Blue	Light Blue	Dark Blue

Simetris (Berdasarkan korelasi)

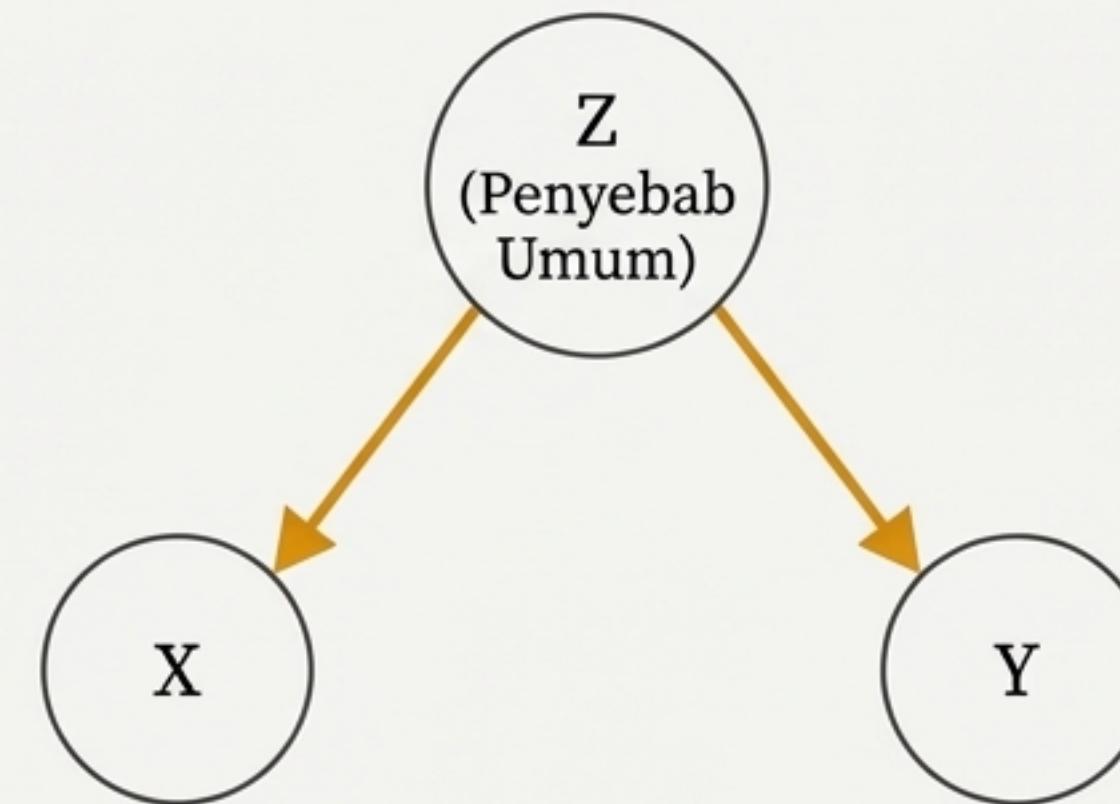
*"Korelasi bertindak sebagai bentuk bilinear simetris, memungkinkan konstruksi operator Hermitian."*

# Keterbatasan PCA: Mengoptimalkan Asosiasi, Bukan Pengaruh

PCA secara efektif menemukan arah varians maksimum tetapi tidak dapat membedakan antara korelasi palsu (*spurious*) dan pengaruh kausal yang sebenarnya.



Apa yang ‘dilihat’ oleh PCA:  
Arah varians terbesar.



Struktur kausal yang mendasarinya:  
Korelasi X dan Y adalah palsu.

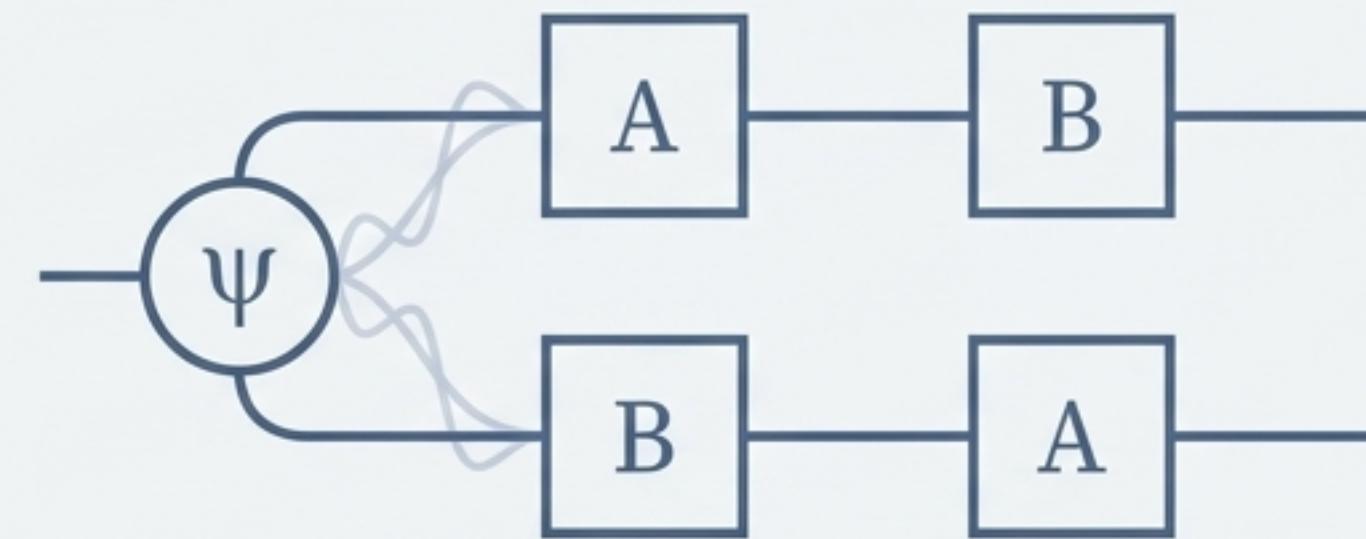
*“Aljabar linear berbasis korelasi tidak dapat membedakan antara asosiasi palsu dan pengaruh kausal sejati.”*

# Solusi dari Dunia Kuantum: Simetri yang Hilang

Teori kuantum memungkinkan kausalitas itu sendiri menjadi simetris melalui superposisi urutan kausal, yang secara langsung menyelesaikan konflik struktural.



Kausalitas Klasik



Quantum Switch

Superposisi  
urutan kausal

**Bisakah pengaruh kausal kuantum menggantikan korelasi sebagai fondasi aljabar untuk representasi data?**

# Memperkenalkan: Matriks Kausal Kuantum (QCM)

QCM adalah operator fundamental baru yang menggeneralisasi matriks korelasi untuk menyandikan pengaruh kausal kuantum yang simetris.

Matriks Korelasi (R)

1.0	0.7	0.4
0.7	1.0	0.5
0.4	0.5	1.0

$$R_{ij} = \text{Corr}(X_i, X_j)$$

Entri adalah skalar simetris.

Matriks Kausal Kuantum (H)

$H_{11}$	$H_{12}^\dagger$	$H_{11}$
$H_{11}^*$	$H_{12}$	$H_{22}^\dagger$
$H_{31}$	$H_{22}^\dagger$	$H_{j1}$

$$H_{ij}$$

Entri adalah operator interaksi kausal.

## Definisi Formal

$$H_{ij} = \frac{1}{2} (C_{i \rightarrow j} + C_{j \rightarrow i}^\dagger)$$

Operator interaksi kausal kuantum yang disimetriskan

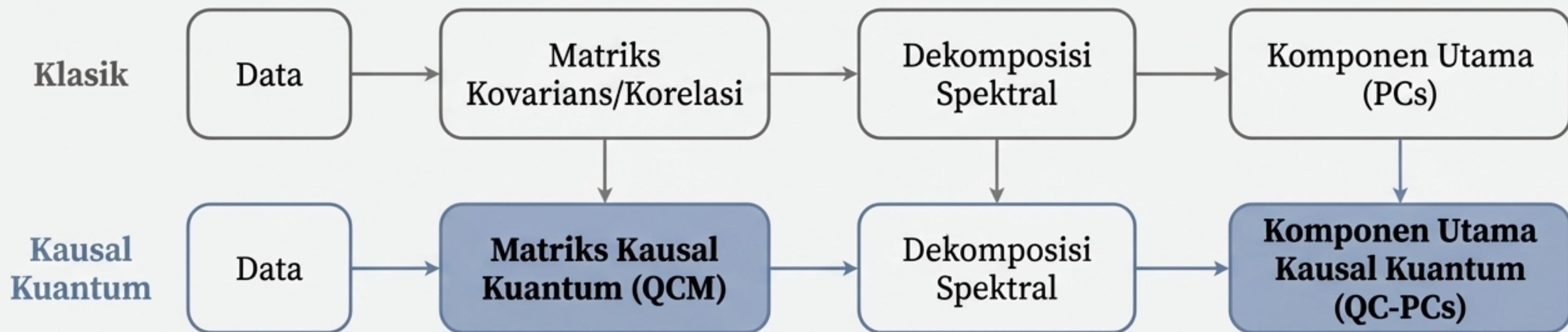
$C_{i \rightarrow j}$ : Pengaruh kausal kuantum dari fitur  $i$  ke  $j$ , diturunkan dari matriks proses  $W_{ij}$ .

## Properti Kunci

**Hermitian:**  $\text{QCM}^\dagger = \text{QCM}$ . Menjamin eigenvalue riil & eigenvektor ortonormal, yang diperlukan untuk dekomposisi spektral.

# Evolusi PCA: Dari Korelasi ke Pengaruh Kausal

Dengan QCM sebagai fondasi, kita dapat secara alami menggeneralisasi PCA untuk menemukan arah utama dari pengaruh kausal kuantum, bukan hanya varians statistik.



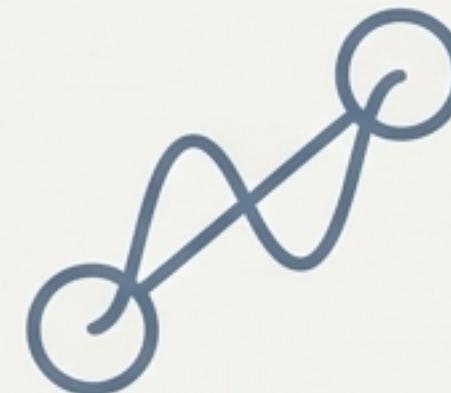
**Bergeser dari varians maksimum ke pengaruh kausal maksimum.**

Dasar Matematis: Dekomposisi spektral QCM:  $QCM = U\Lambda U^\dagger$ , di mana U berisi arah kausal utama.

Dasar Matematis: Dekomposisi spektral QCM:  $QCM = U\Lambda U^\dagger$ , di mana U berisi arah kausal utama.

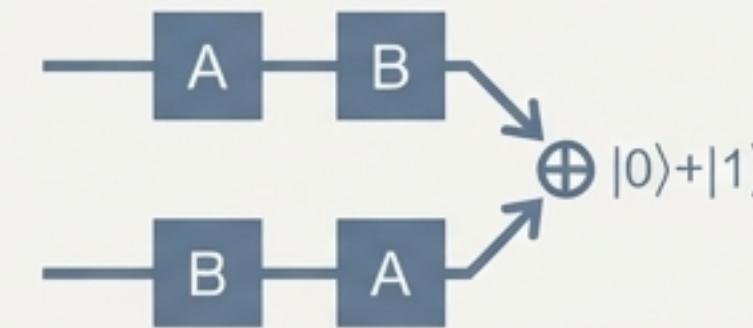
# Keunggulan QC-PCA: Menangkap Hubungan Non-Klasik

QC-PCA dapat merepresentasikan fenomena yang tidak dapat diwakili oleh PCA klasik.



## Korelasi Non-Klasik

Mampu menyandikan keterikatan kuantum (entanglement) dan dependensi yang melanggar pertidaksamaan Bell.



## Superposisi Urutan Kausal

Komponen utama dapat merepresentasikan campuran koheren dari jalur kausal ' $i < j$ ' dan ' $j < i$ '.

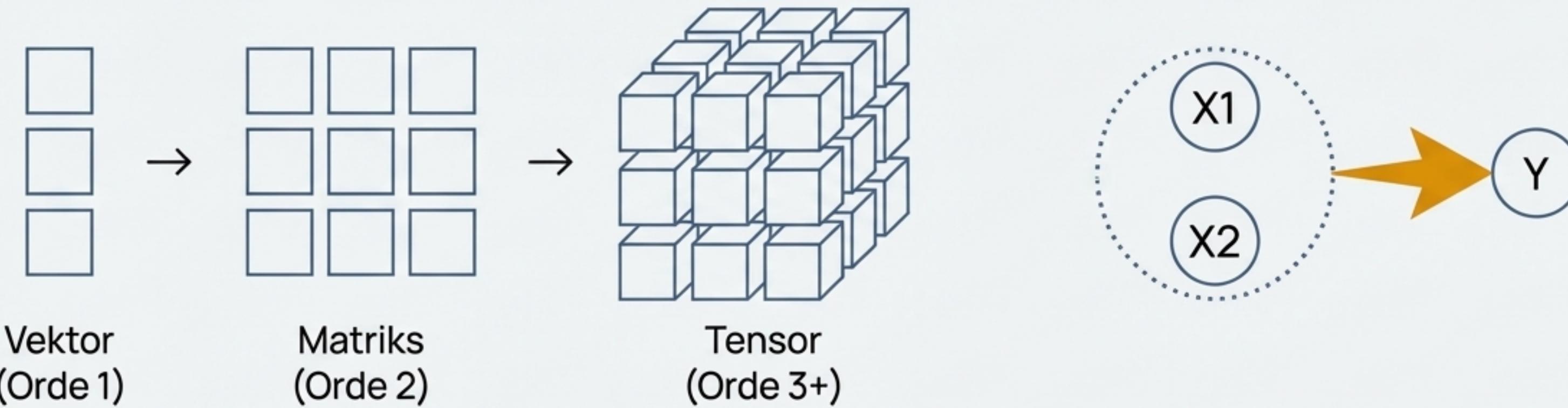


## Pengaruh Tanpa Urutan Waktu yang Pasti

Menangkap pengaruh kausal yang tidak memiliki tatanan temporal yang tetap.

# Melampaui Interaksi Pasangan: Tensor Kausal Kuantum (QCT)

Banyak sistem nyata melibatkan interaksi kausal sinergis atau termediasi yang melibatkan lebih dari dua variabel. QCT dibangun untuk menangani kompleksitas ini.

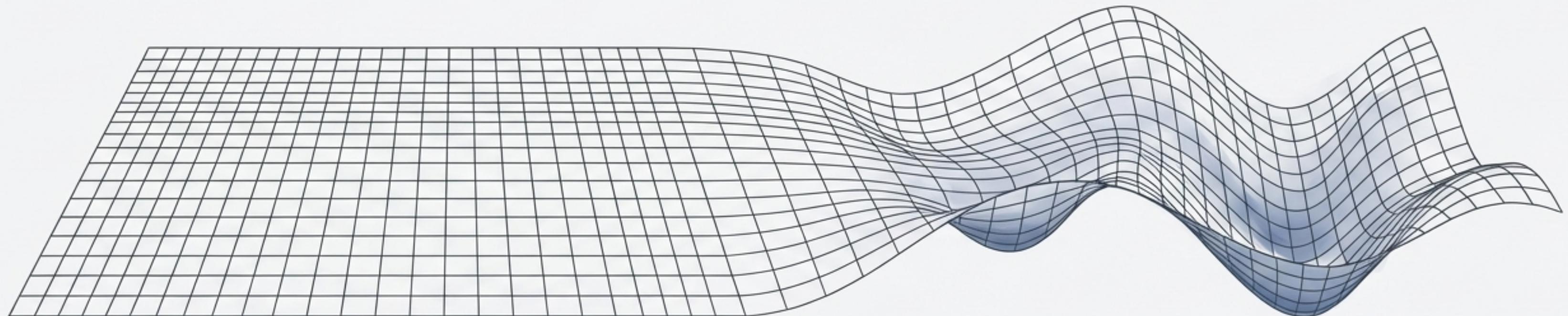


---

Definisi	QCT mengukur pengaruh kausal kuantum gabungan di antara variabel $\{i_1, i_2, \dots, i_k\}$ dan menangkap korelasi yang tidak dapat diuraikan menjadi komponen-komponen berpasangan.
Penerapan	QCT menggeneralisasi tensor kovarians yang digunakan dalam PCA multilinear.

# Geometri Baru untuk Ruang Fitur

Kerangka kerja ini mendefinisikan kembali geometri ruang fitur itu sendiri, di mana ‘jarak’ diukur oleh pengaruh kausal, bukan korelasi.



Geometri Berbasis Korelasi

Geometri Informasi Kausal Kuantum

---

## Mathematical Foundation

Inner product klasik:  $\langle X_i, X_j \rangle$

Bentuk bilinear kausal kuantum:  $\langle \phi_i, \phi_j \rangle_{QCM} = \langle \phi_i | H_{ij} | \phi_j \rangle$

*“QCT menginduksi manifold kausal kuantum multipartit.”*

# Peta Jalan Algoritmik: Dari Data ke Representasi Kausal

Teori ini didasarkan pada **alur kerja algoritmik yang jelas**.

## 1. PENYANDIAN (Encode)

Sematkan setiap atribut ' $X_i$ ' ke dalam keadaan kuantum ' $\rho_i$ '.



## 2. ESTIMASI (Estimate)

Estimasi matriks proses ' $W_{ij}$ ' melalui tomografi proses kuantum atau inferensi berbasis model.



## 3. KONSTRUKSI (Construct)

Hitung operator ' $C_{i \rightarrow j}$ ' dan simetriskan untuk mendapatkan ' $H_{ij}$ ', lalu rakit QCM.



## 4. DEKOMPOSISSI (Decompose)

Lakukan dekomposisi spektral (QC-PCA) pada QCM atau dekomposisi tensor pada QCT.



## 5. REDUKSI (Reduce)

Ekstrak representasi berdimensi rendah menggunakan komponen utama kausal.

# Jalur Praktis Menuju Implementasi

Meskipun implementasi kuantum penuh bersifat futuristik, kerangka kerja ini dapat dieksplorasi hari ini menggunakan metode klasik dan hibrida.

---

## 1. Surrogat Klasik

Menggunakan ukuran teori informasi seperti *Transfer Entropy* untuk mendekati bobot kausal.

$c_{i \rightarrow j} \approx TE(X_i \rightarrow X_j)$ . Kemudian disimetriskan untuk membentuk proksi QCM.

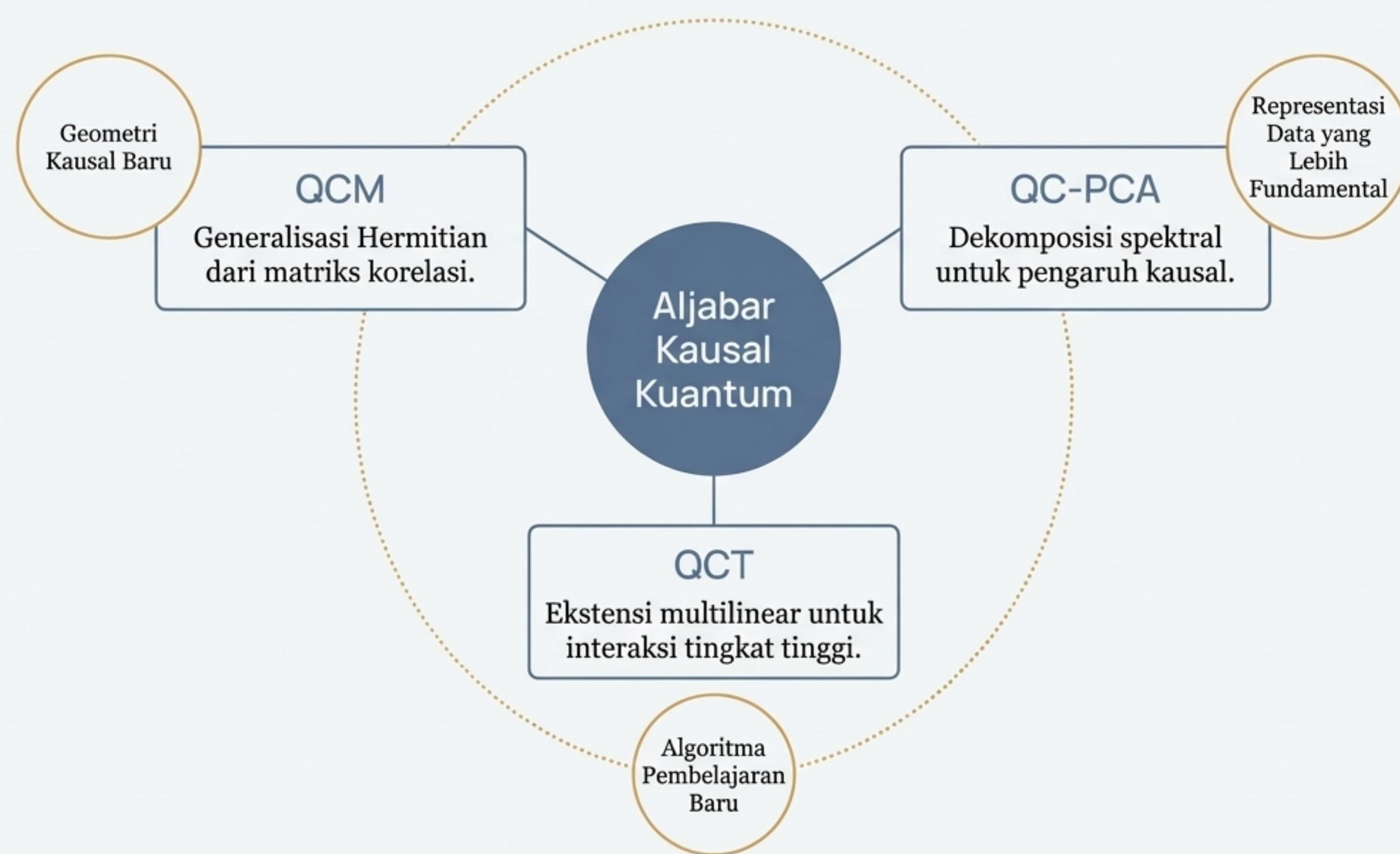
## 2. Estimasi Berbasis Model

Mengasumsikan matriks proses berasal dari keluarga parametrik (mis., peta CP peringkat rendah) untuk mengurangi kompleksitas estimasi secara drastis.

## 3. Metode Hibrida Kuantum-Klasik

Menggunakan sirkuit kuantum berparameter (PQC) untuk merepresentasikan penyematan fitur dan mengoptimalkannya secara variasional, mirip dengan VQE.

# Kerangka Kerja Aljabar Kausal Kuantum dalam Sekilas



# Gambaran Besar: Sebuah Pergeseran Fondasional

Ini bukan sekadar algoritma baru; ini adalah proposal untuk membangun kembali pembelajaran representasi di atas prinsip yang lebih fundamental daripada asosiasi statistik.



---

*Bergerak dari ‘apa’ yang saling terkait, menuju ‘bagaimana’ sesuatu menyebabkan pengaruh.*

# Referensi & Diskusi Lebih Lanjut

Makalah ini didasarkan pada:

"Quantum Causal Algebra for Data Representation: A New Operator-Theoretic Framework Beyond Correlation."

Aslan Alwi\*, Munirah, Tim Almudaya Research Institute.

Email: [aslan.alwi@umpo.ac.id](mailto:aslan.alwi@umpo.ac.id),  
[munirah@umpo.ac.id](mailto:munirah@umpo.ac.id)



Pindai untuk mengakses makalah.

# Terima Kasih

