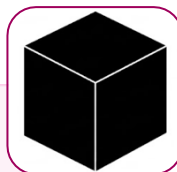


# AI e Digital Twin

Simona Celi – Ing, PhD

Direttrice UOC Bioingegneria – Fondazione Toscana G. Monasterio, Massa/Pisa

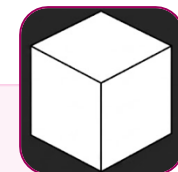


## Modelli Data-Driven (Black-box)

Basati su architetture di Deep Learning/Machine Learning/LLM

Capaci di mappare correlazioni latenti ad altissima dimensionalità all'interno di estesi database clinici

Ottimizzati per il riconoscimento di pattern sub-clinici e l'analisi predittiva

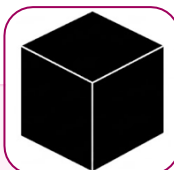


## Modelli Meccanicistici (White-box)

Si fondano su principi fisici, emodinamici e biologici deterministici

Risolvono equazioni differenziali ordinarie e parziali (ODE/PDE) per simulare accuratamente il comportamento della strutturale, emodinamico ed elettrofisiologico

Garantiscono aderenza alle leggi di conservazione fisiche



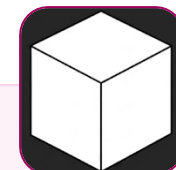
## Modelli Data-Driven (Black-box)

Basati su architetture di Deep Learning/Machine Learning/LLM

Capaci di mappare dati ad altissima dimensionalità alla base clinica

**AI**

Ottimizzati per il riconoscimento di pattern sub-clinici e l'analisi predittiva



## Modelli Meccanicistici (White-box)

Si fondano su principi fisici, emodinamici e biologici deterministici

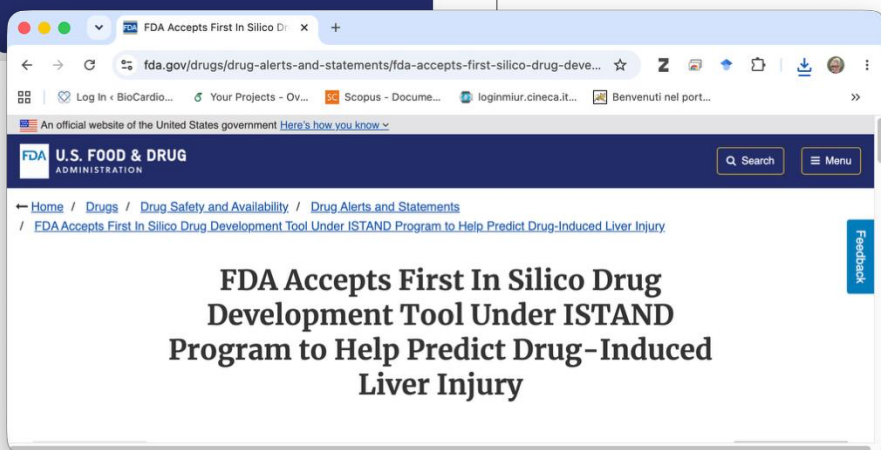
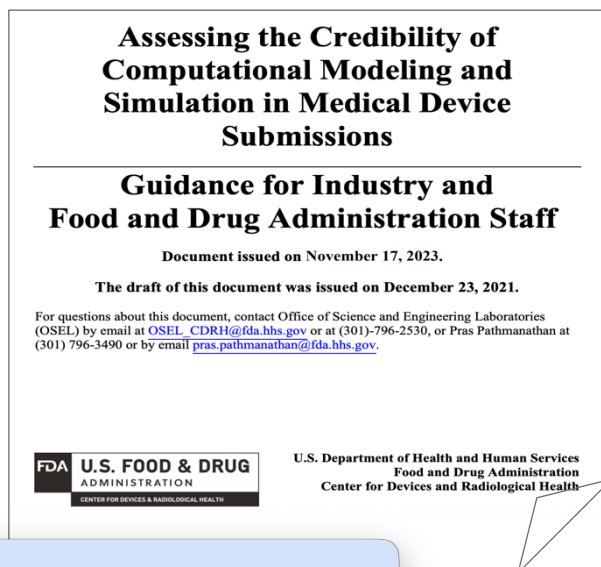
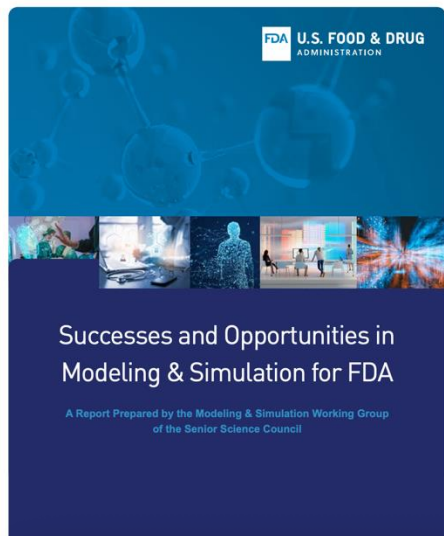
Risolvono equazioni differenziali (ODE/PDE) per simulare la dinamica della strutturale, e il comportamento fisiologico

**Digital Twin**

**?**

**Modelli  
numerici**

**In Silico**



## Modelli Meccanicistici (White-box)

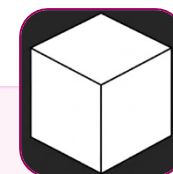
Si fondano su principi fisici, emodinamici e biologici deterministici

Risolvono equazioni differenziali (ODE/PDE) per simulare il comportamento della strutturale, e il comportamento fisiologico

Digital Twin

Modelli numerici

In Silico





## Sappiamo cosa è l'AI



## Ma cosa è il Digital Twin?

- Concetto derivante dall'Industria 4.0
- Rappresentazione DETERMINISTICA di un oggetto o di un sistema fisico lungo tutto il suo ciclo di vita
- Si può avvale di dati in tempo reale e di altre fonti per consentire l'apprendimento, il ragionamento e la ricalibrazione dinamica ai fini
  - del monitoraggio
  - della diagnostica
  - della prognostica

# Cos'è un Cardiovascular Digital Twin?

## Definizione Clinica

Una replica virtuale dinamica del cuore e/o del sistema vascolare di uno specifico paziente, alimentata da dati multidimensionali

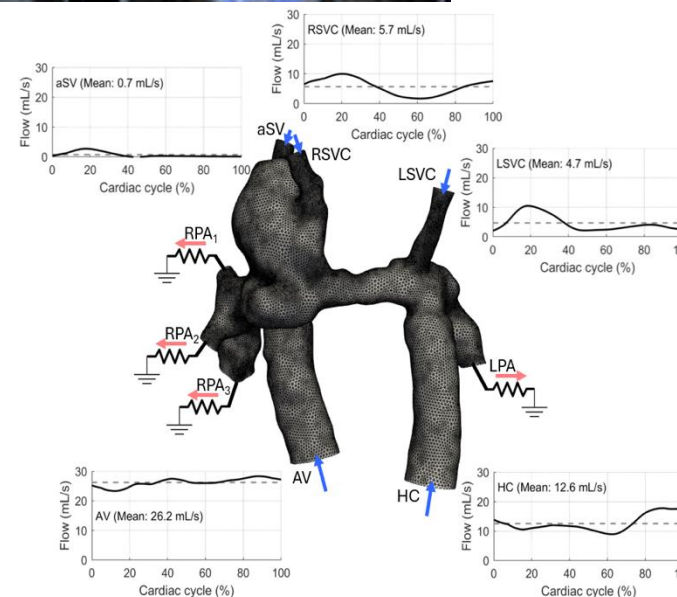
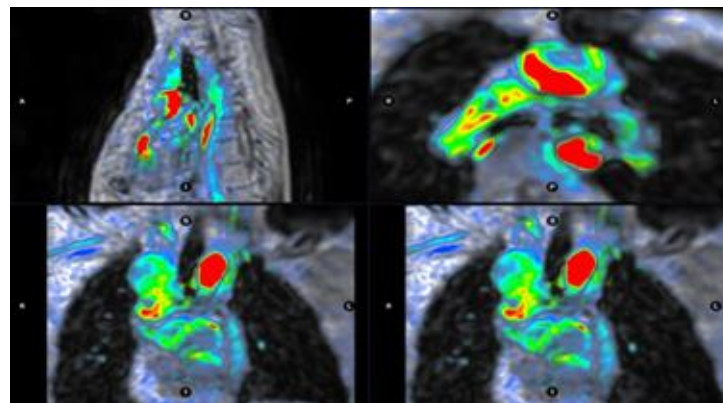
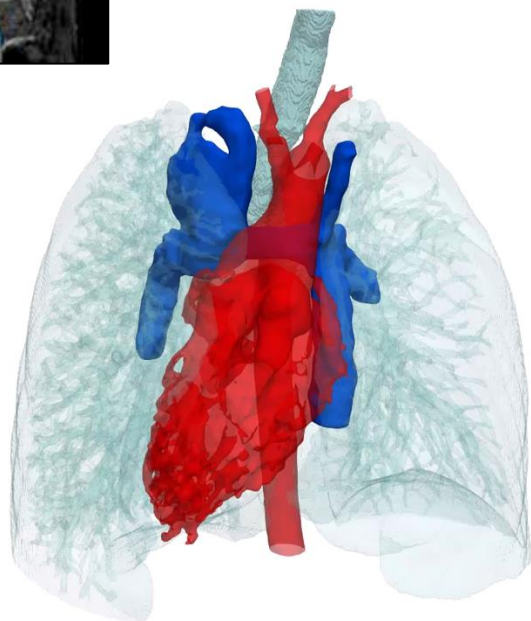
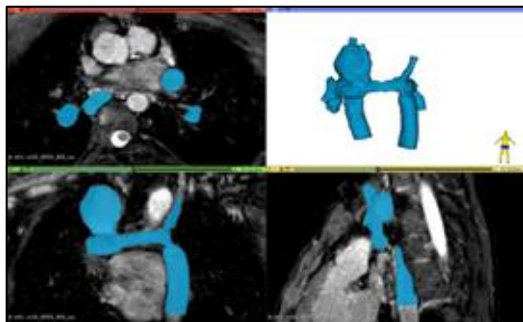
## Componenti Core

Integrazione sinergica di imaging avanzato (TC/RM), dati dazienti, e calcolo HPC per eseguire **simulazioni fisiche**

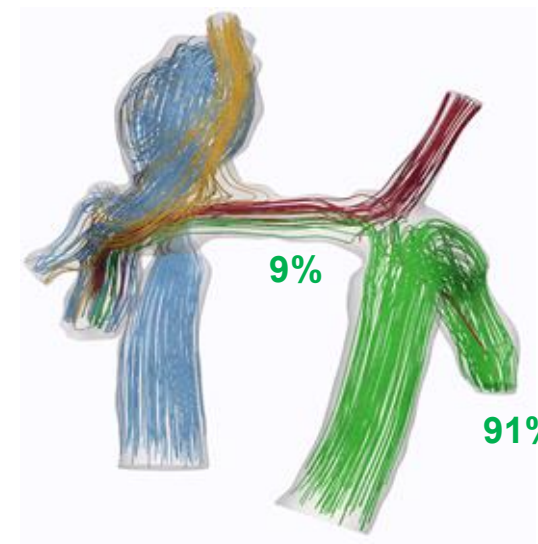
# Perchè un Cardiovascular Digital Twin?

-  **Pianificazione:** Simulazione pre-operatoria per interventi di chirurgia e/o emodinamica (Valvole, VinV, LAAO, TAVI, EVAR, TEVAR, ...)
-  **Risk Mitigation:** Riduzione del tasso di complicanze grazie al "test" virtuale
-  **Customization:** Ottimizzazione di una procedura e della scelta (tipologia e sizing)/posizionamento del device
-  **Tempi Operatori:** Riduzione significativa della durata degli interventi e dell'esposizione radiologica
-  **Comprensione dei fenomeni fisiopatologici**

## CASO STUDIO 1

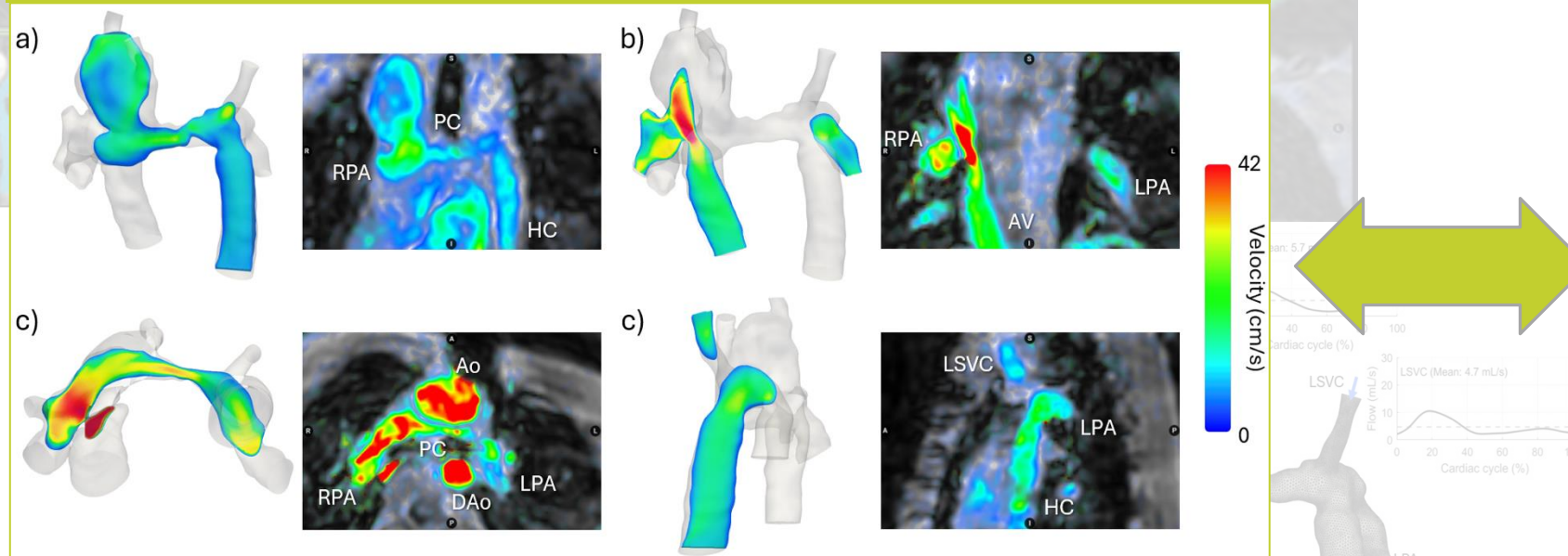


Digital Twin

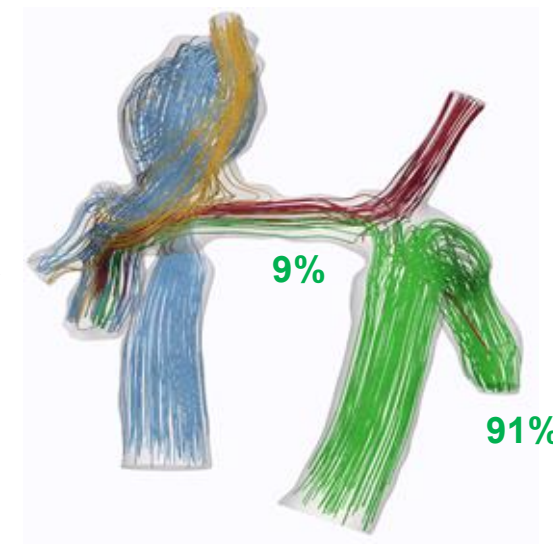


Quantificazione  
deterministica  
flussi e pressioni

## Modello VALIDATO

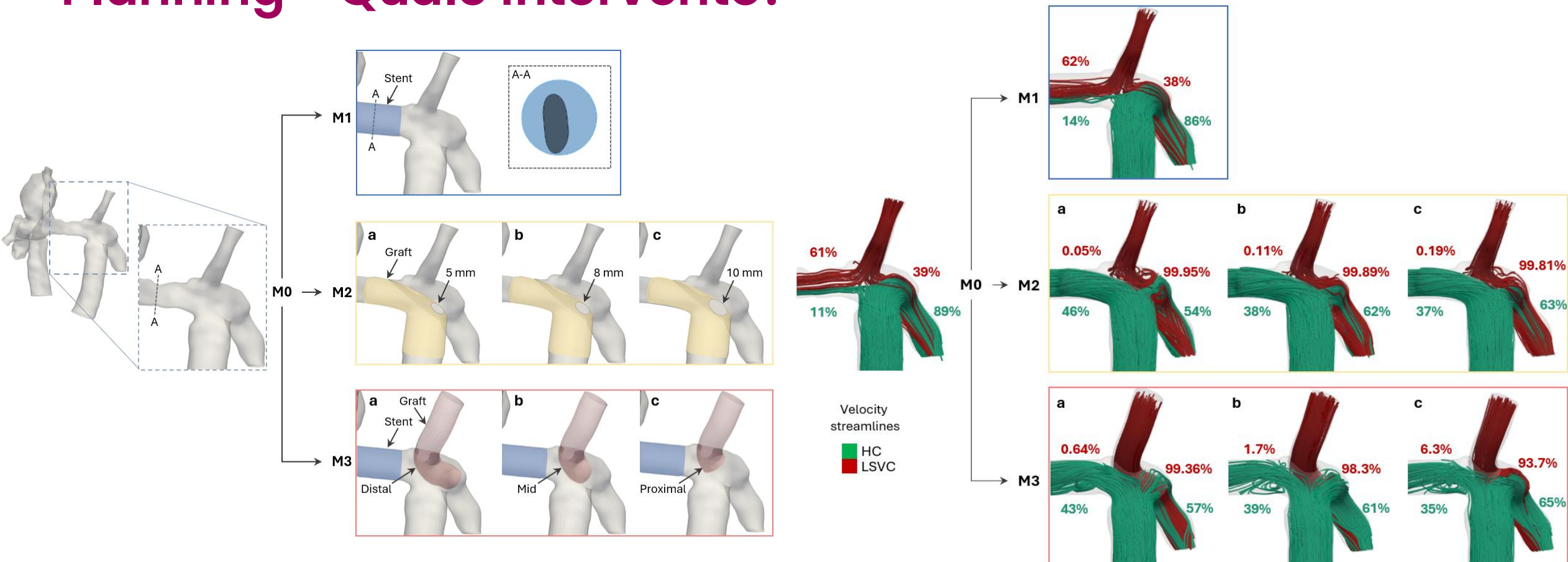


## Digital Twin

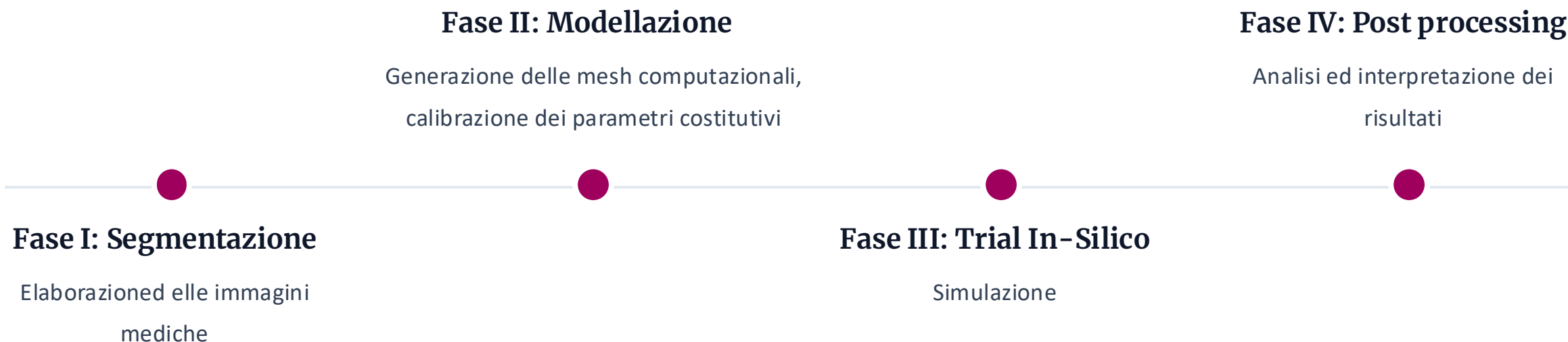


Quantificazione  
deterministica  
flussi e pressioni

# Planning - Quale intervento?

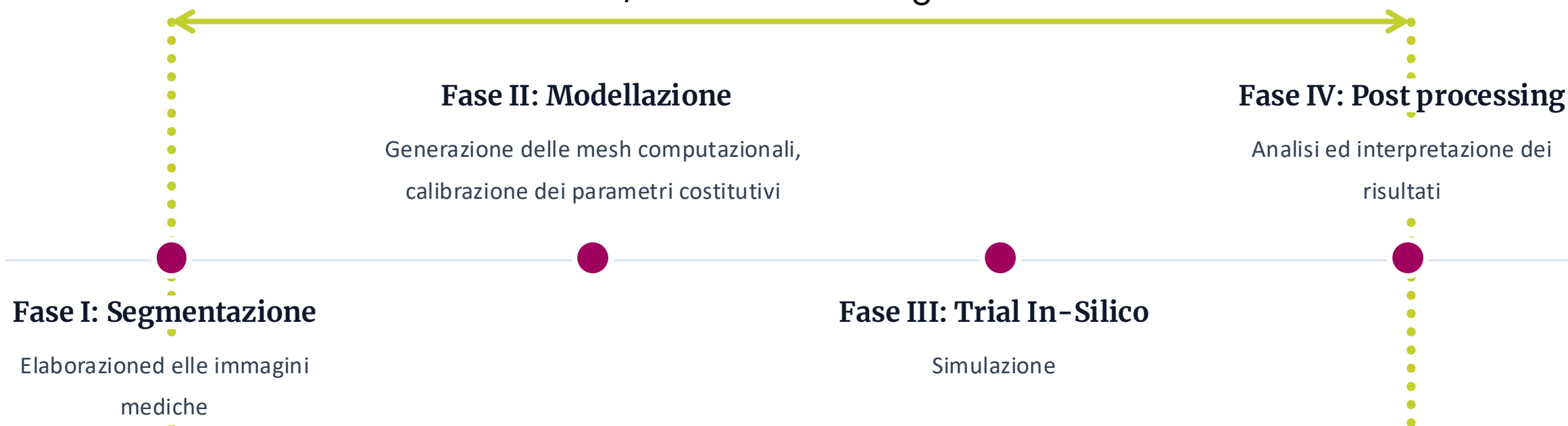


# Come funziona un Digital Twin?



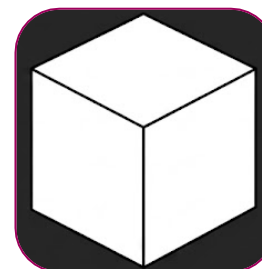
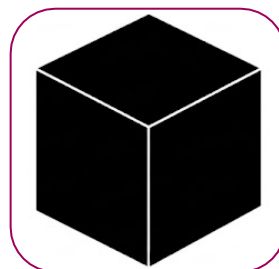
# Il problema del Digital Twin

Giorni / Settimane x 1 singolo caso

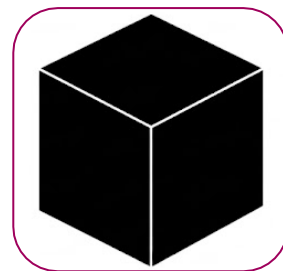
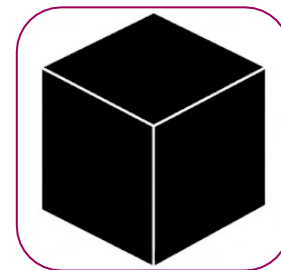
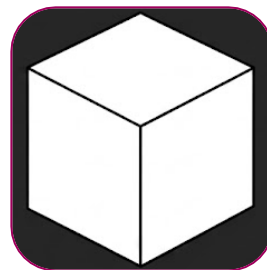
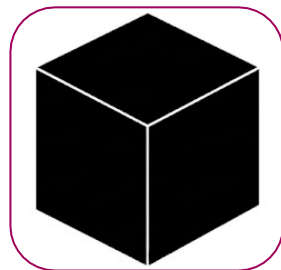


# AI e Digital Twin

## Nuove Frontiere nel Settore Cardiovascolare

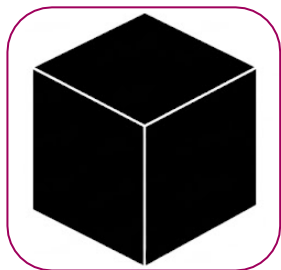


## Il ruolo dell'AI nell'era dei Digital Twin

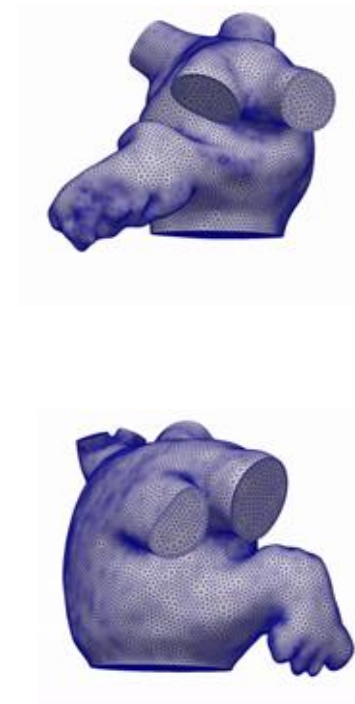
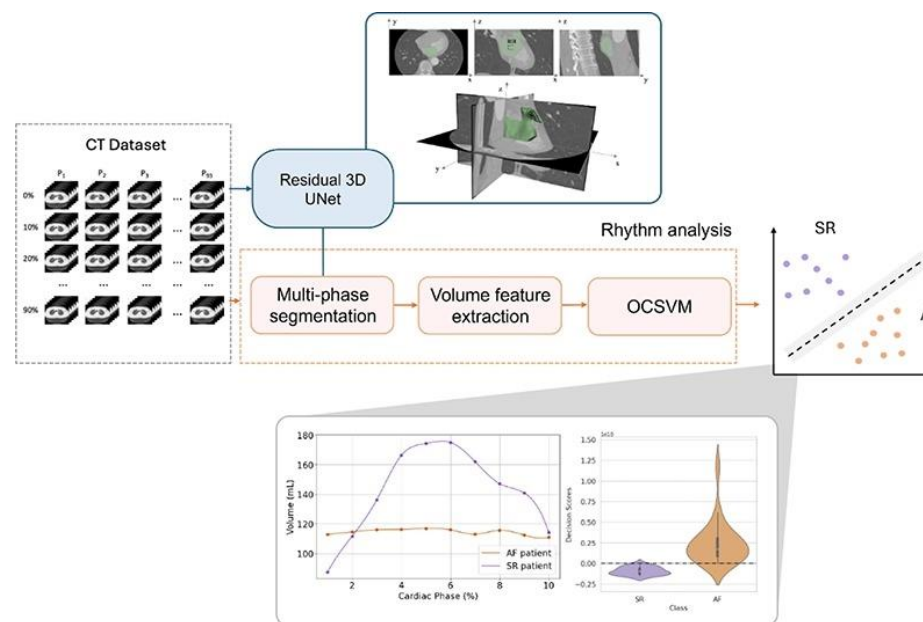


CASO STUDIO 2

# Il ruolo dell'AI nell'era dei Digital Twin

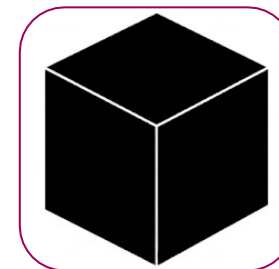
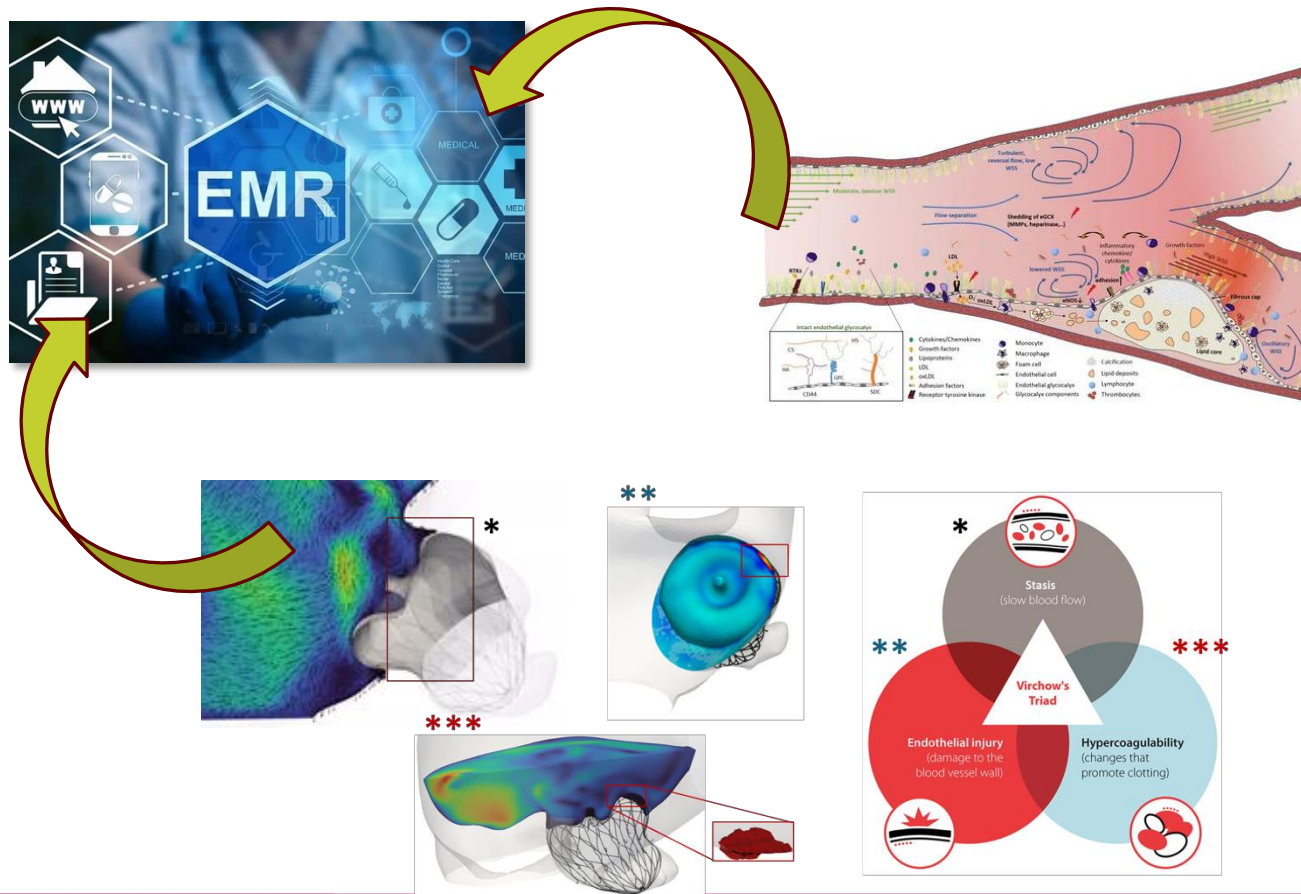


- Image processing
- Feature detection
- Creazione dei modelli



## CASO STUDIO 2

# Il ruolo dell'AI nell'era dei Digital Twin



- Data post-processing
- Data Analysis
- In deep correlation

# Abbiamo risolto il problema?



# Il ruolo dell'AI nell'era dei Digital Twin

AI e Digital Twin

## Nuove Frontiere nel Settore Cardiovascolare

Cauchy momentum equation (conservation form)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{g}$$

where  $\otimes$  is the outer product:

$$\mathbf{u} \otimes \mathbf{v} = \mathbf{uv}^T.$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

(1) Gauss' law

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

(2) Magnetic monopoles

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

(3) Faraday's law

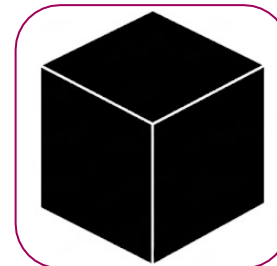
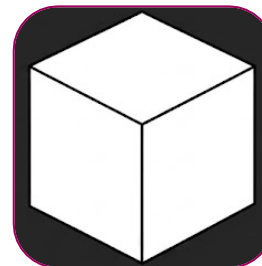
Navier-Stokes Equations

(4) Ampere-Maxwell law

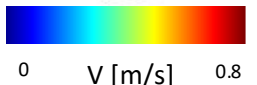
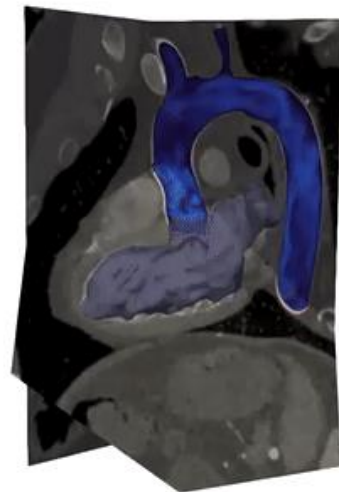
$$\frac{\rho Du}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \text{div}(\vec{V}) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + S_{Mx}$$

$$\frac{\rho Dv}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda \text{div}(\vec{V}) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + S_{My}$$

$$\frac{\rho Dw}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + \lambda \text{div}(\vec{V}) \right] + S_{Mz}$$



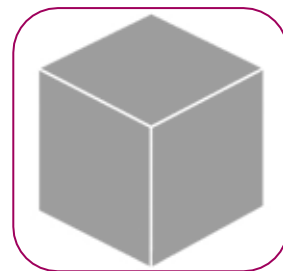
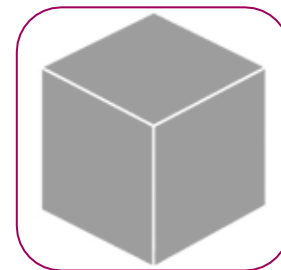
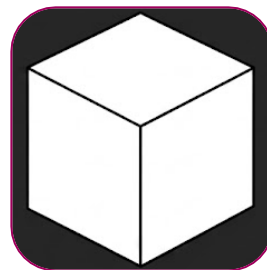
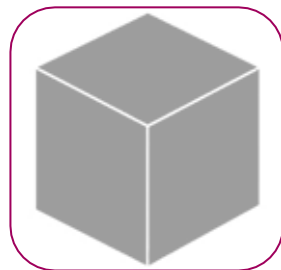
AI che ci resolve la  
fisica del problema



# Abbiamo risolto il problema



# Abbiamo risolto il problema



Trustworthiness

[s.celi@ftgm.it](mailto:s.celi@ftgm.it)

Direttrice UOC Bioingegneria Fondazione Toscana G. Monasterio Massa, Pisa