

EUROfusion

MONITORAGGIO E CONTROLLO DI EVENTI TERMICI A WENDELSTEIN 7-X

Fabio Pisano

fabio.pisano@diee.unica.it

Sommario

WENDELSTEIN 7-X

- Costruzione
- Fase sperimentale

STRUTTURA

- Il divertore

CONFINAMENTO MAGNETICO

TERMOGRAFIA

CALIBRAZIONE SPAZIALE

CONTROLLO





→ **WENDELSTEIN 7-X**
- **Costruzione**
- **Fase sperimentale**

STRUTTURA
- Il divertore

CONFINAMENTO MAGNETICO

TERMOGRAFIA

CALIBRAZIONE SPAZIALE

CONTROLLO

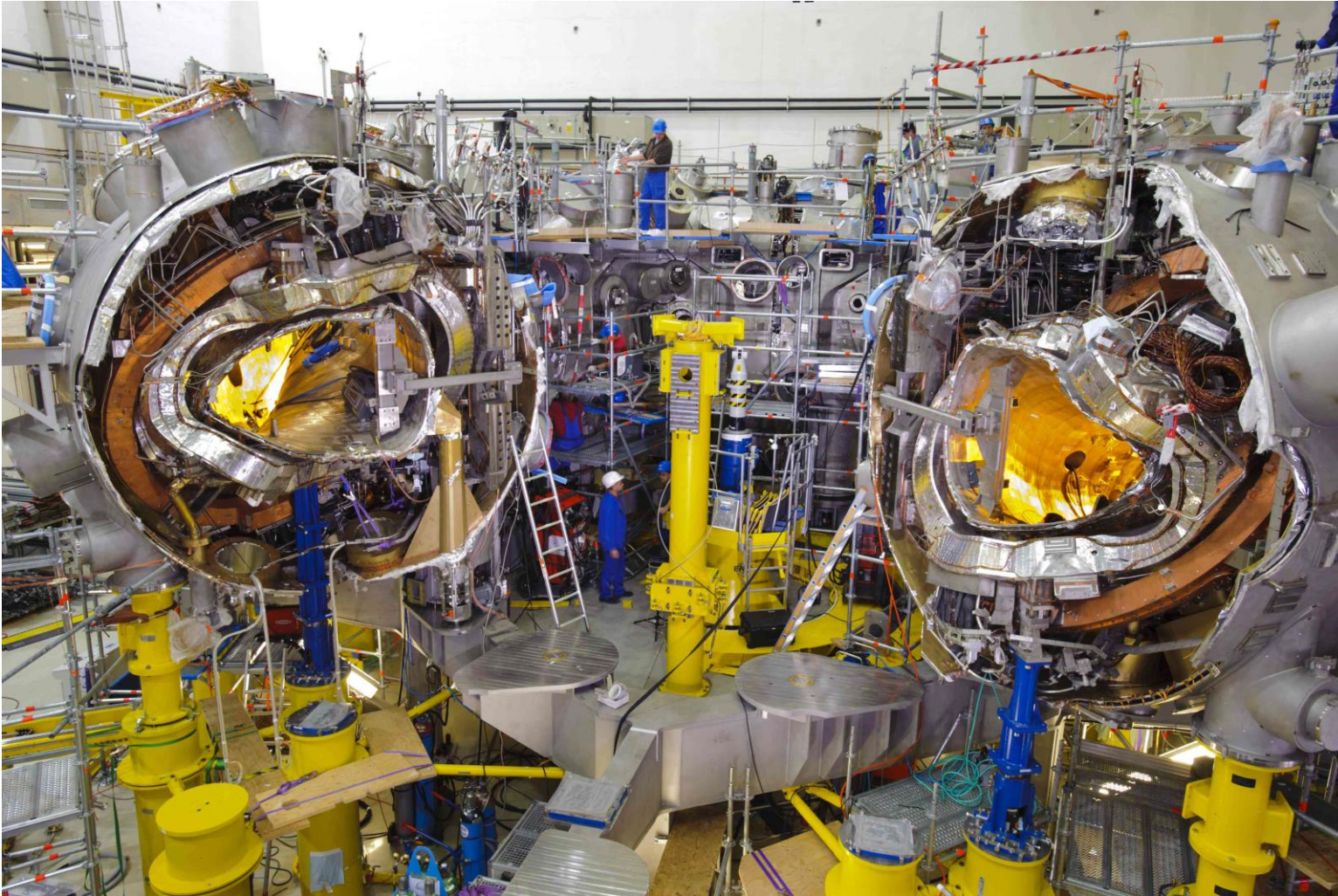
WENDELSTEIN 7-X

Wendelstein 7-X

Wendelstein 7-X (W7-X) è il più grande reattore a fusione di tipo «stellarator» costruito, situato al Max-Planck-Institut für Plasmaphysik di Greifswald, Meclemburgo-Pomerania Anteriore, Germania.

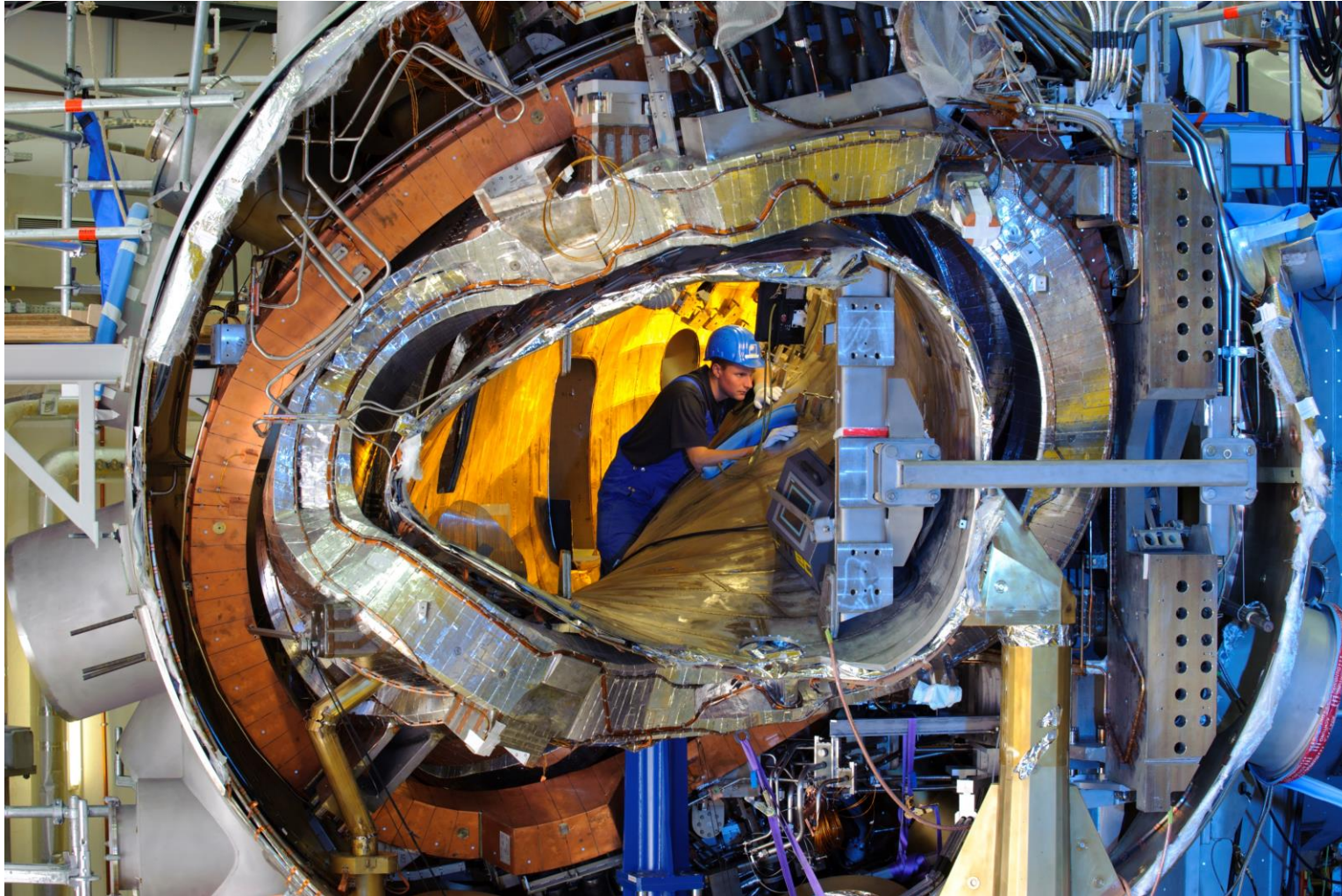


Wendelstein 7-X: Costruzione



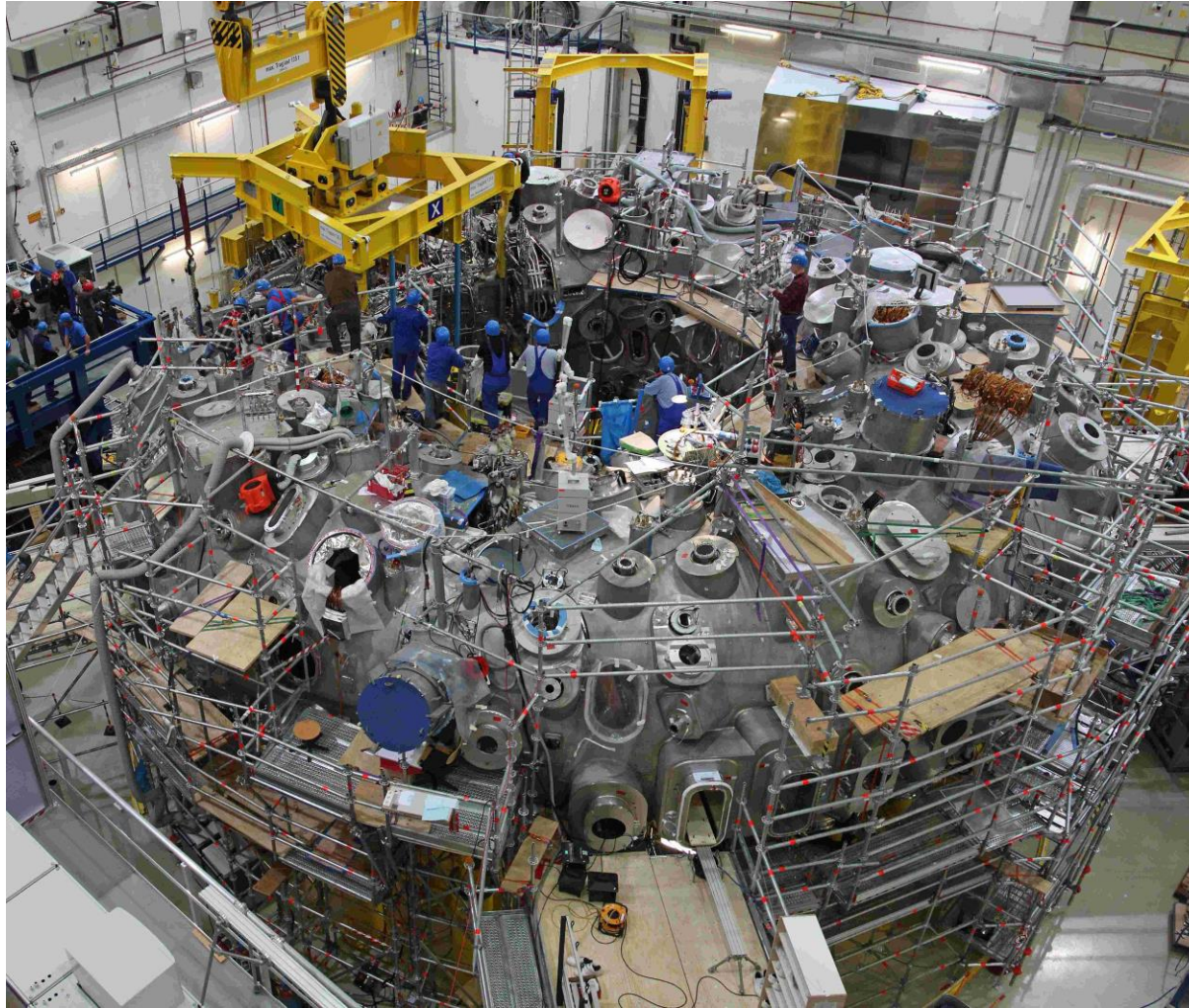
Durata costruzione: 10 anni
(2005 – 2014)

Wendelstein 7-X: Costruzione



Durata costruzione: 10 anni
(2005 – 2014)

Wendelstein 7-X: Costruzione



Durata costruzione: 10 anni
(2005 – 2014)

Wendelstein 7-X: Costruzione

Durata costruzione: 10 anni
(2005 – 2014)

[VIDEO](#)

Wendelstein 7-X: Fase sperimentale



OP1.1: dec 2015 – mar 2016

OP1.2a: aug 2017 – dec 2017

OP1.2b: jul 2018 – oct 2018

OP2: 2020 ...

Wendelstein 7-X: Fase sperimentale



OP1.1: dec 2015 – mar 2016

OP1.2a: aug 2017 – dec 2017

OP1.2b: jul 2018 – oct 2018

OP2: 2020 ...

Wendelstein 7-X: Fase sperimentale



OP1.1: dec 2015 – mar 2016

OP1.2a: aug 2017 – dec 2017

OP1.2b: jul 2018 – oct 2018

OP2: 2020 ...

WENDELSTEIN 7-X

~Costruzione

~Fase sperimentale

→ **STRUTTURA**

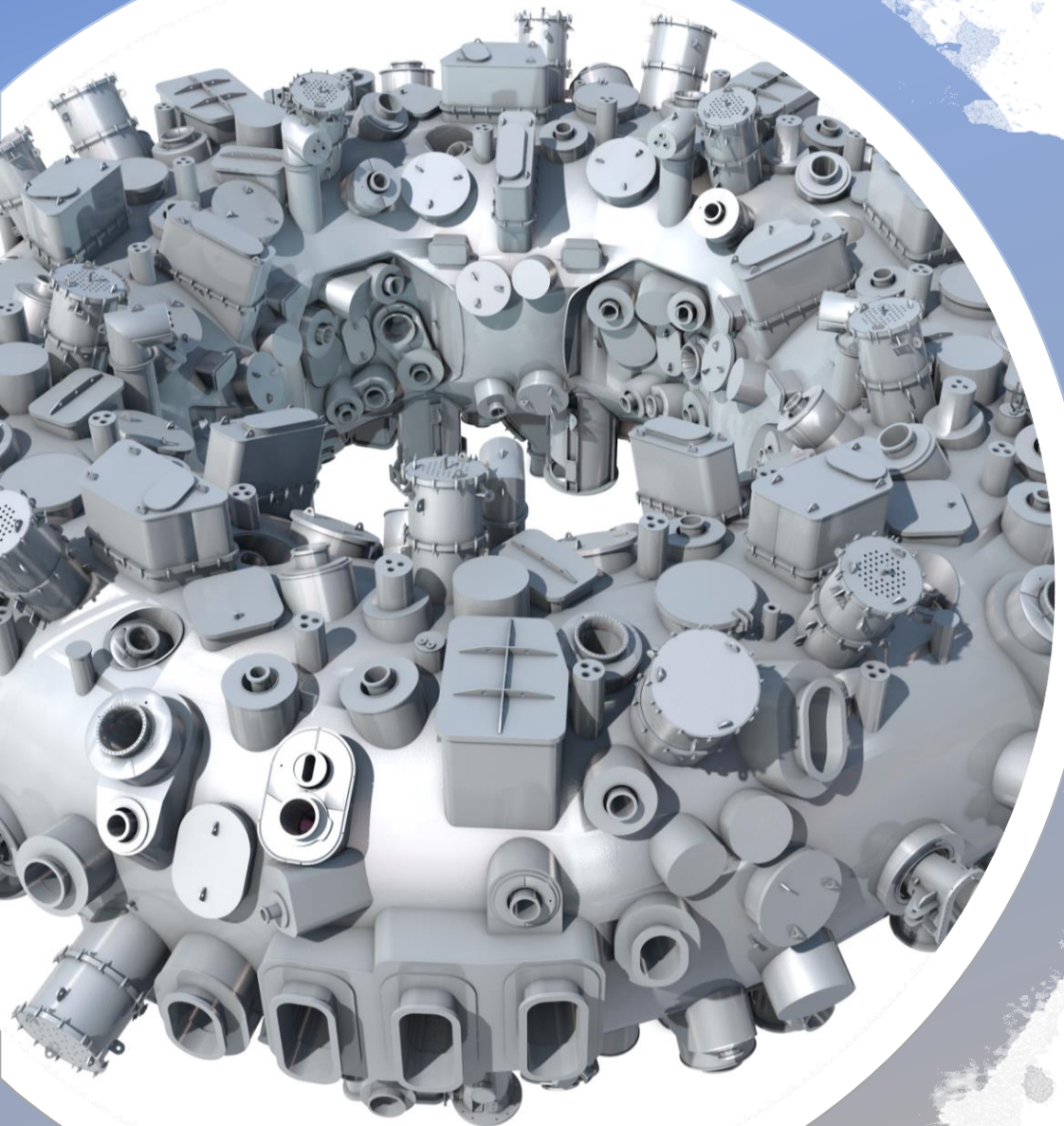
- **Il divertore**

CONFINAMENTO MAGNETICO

TERMOGRAFIA

CALIBRAZIONE SPAZIALE

CONTROLLO



STRUTTURA

Struttura

Raggio maggiore del plasma: **5.5m**

Raggio minore del plasma: **0.53m**

Campo magnetico: **3T**

Durata del plasma: **max. 30 min**

Potenza di riscaldamento: **14MW**

Volume plasma: **30m³**

Massa plasma: **5-30mg**

Composizione plasma: **H, D**

Temperatura plasma: **60-130MK**

Densità plasma: **3x10²⁰m⁻³**



Struttura

Raggio maggiore del plasma: **5.5m**

Raggio minore del plasma: **0.53m**

Campo magnetico: **3T**

Durata del plasma: **max. 30 min**

Potenza di riscaldamento: **14MW**

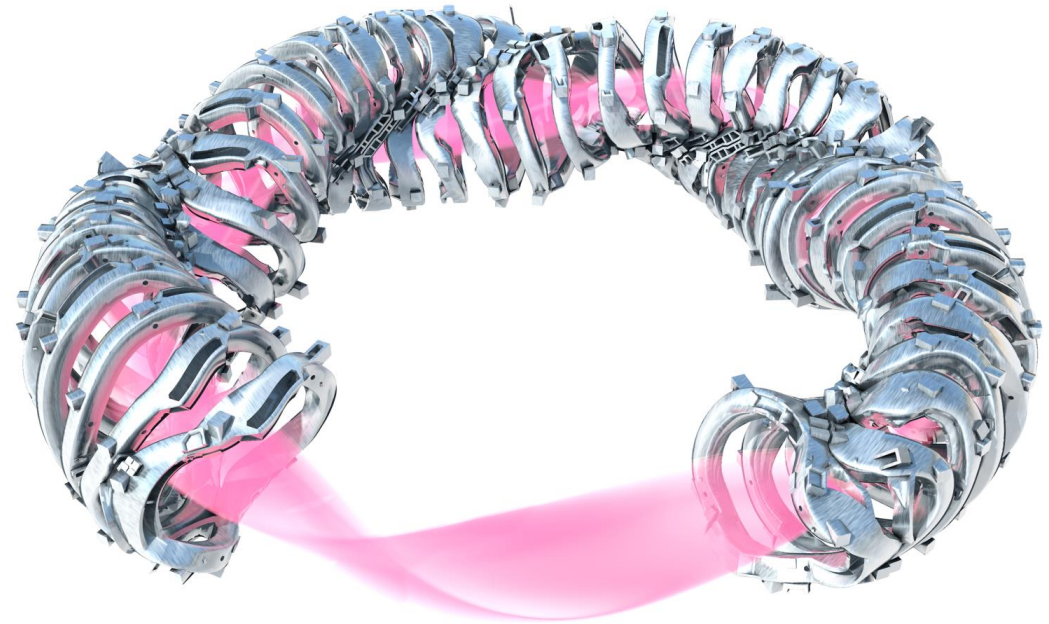
Volume plasma: **30m³**

Massa plasma: **5-30mg**

Composizione plasma: **H, D**

Temperatura plasma: **60-130MK**

Densità plasma: **3x10²⁰m⁻³**



Struttura

Raggio maggiore del plasma: **5.5m**

Raggio minore del plasma: **0.53m**

Campo magnetico: **3T**

Durata del plasma: **max. 30 min**

Potenza di riscaldamento: **14MW**

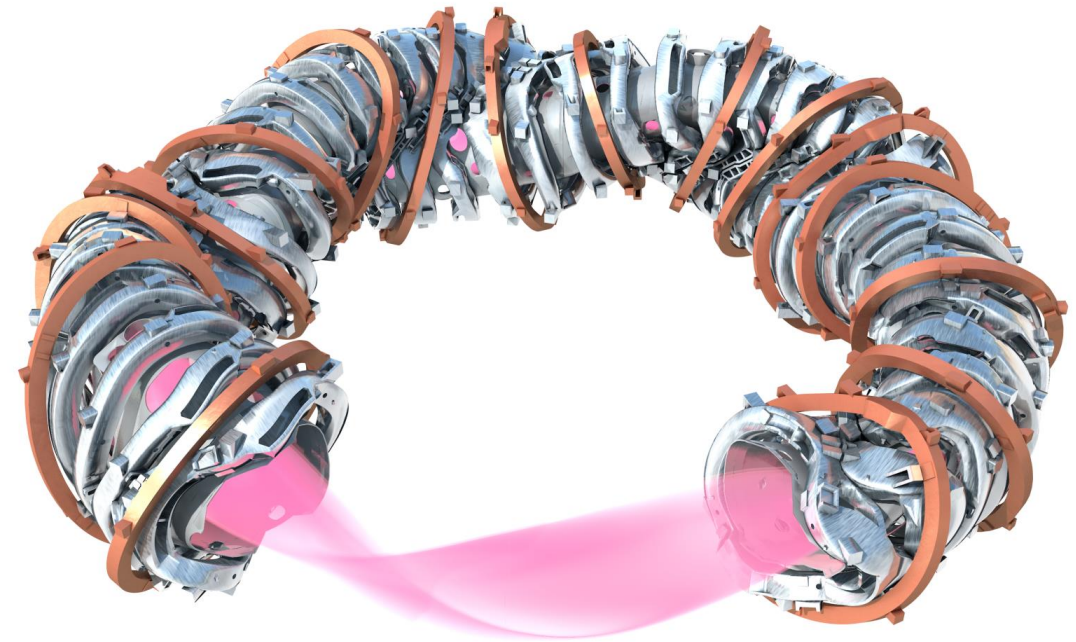
Volume plasma: **30m³**

Massa plasma: **5-30mg**

Composizione plasma: **H, D**

Temperatura plasma: **60-130MK**

Densità plasma: **3x10²⁰m⁻³**



Struttura

Raggio maggiore del plasma: **5.5m**

Raggio minore del plasma: **0.53m**

Campo magnetico: **3T**

Durata del plasma: **max. 30 min**

Potenza di riscaldamento: **14MW**

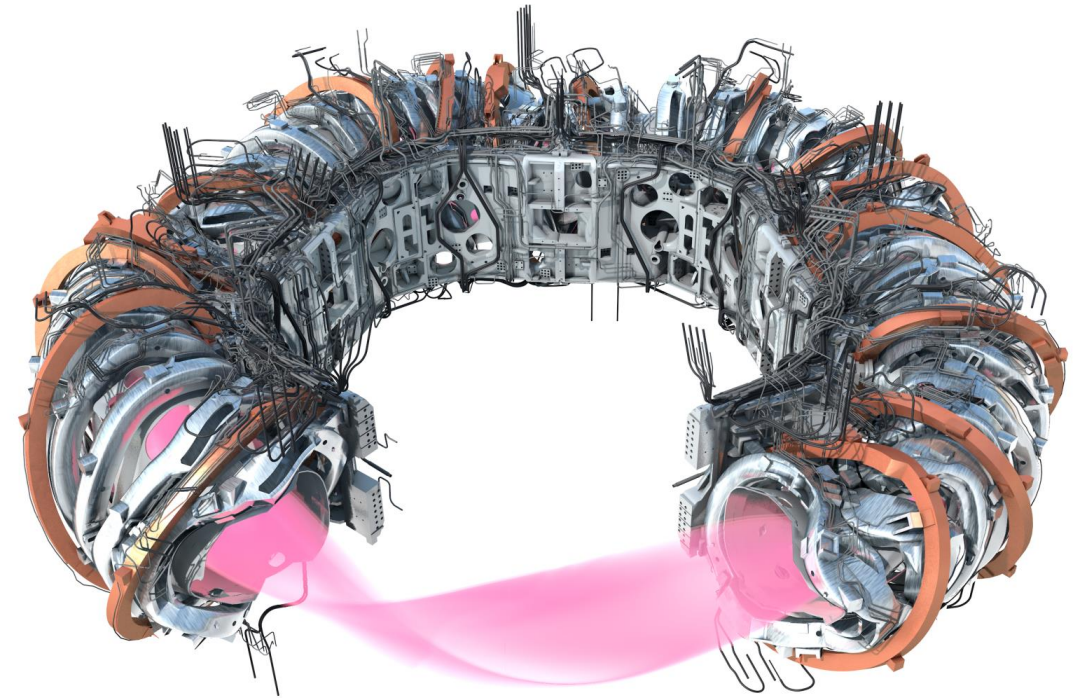
Volume plasma: **30m³**

Massa plasma: **5-30mg**

Composizione plasma: **H, D**

Temperatura plasma: **60-130MK**

Densità plasma: **3x10²⁰m⁻³**



Struttura

Raggio maggiore del plasma: **5.5m**

Raggio minore del plasma: **0.53m**

Campo magnetico: **3T**

Durata del plasma: **max. 30 min**

Potenza di riscaldamento: **14MW**

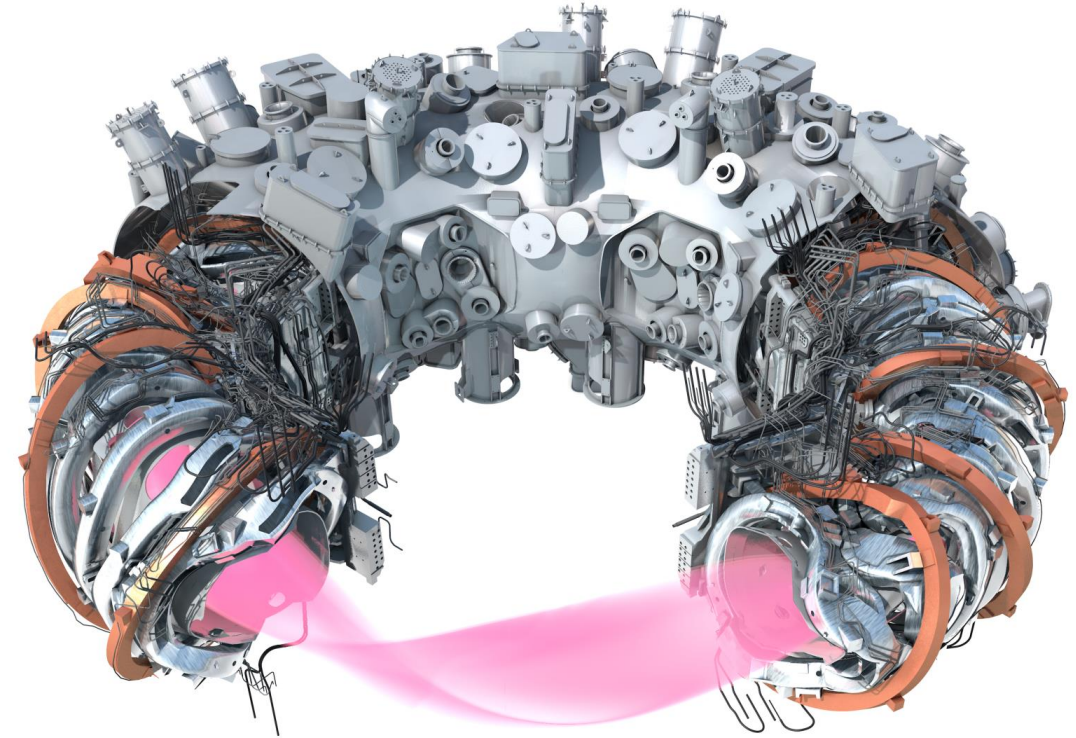
Volume plasma: **30m³**

Massa plasma: **5-30mg**

Composizione plasma: **H, D**

Temperatura plasma: **60-130MK**

Densità plasma: **3x10²⁰m⁻³**



Struttura

Raggio maggiore del plasma: **5.5m**

Raggio minore del plasma: **0.53m**

Campo magnetico: **3T**

Durata del plasma: **max. 30 min**

Potenza di riscaldamento: **14MW**

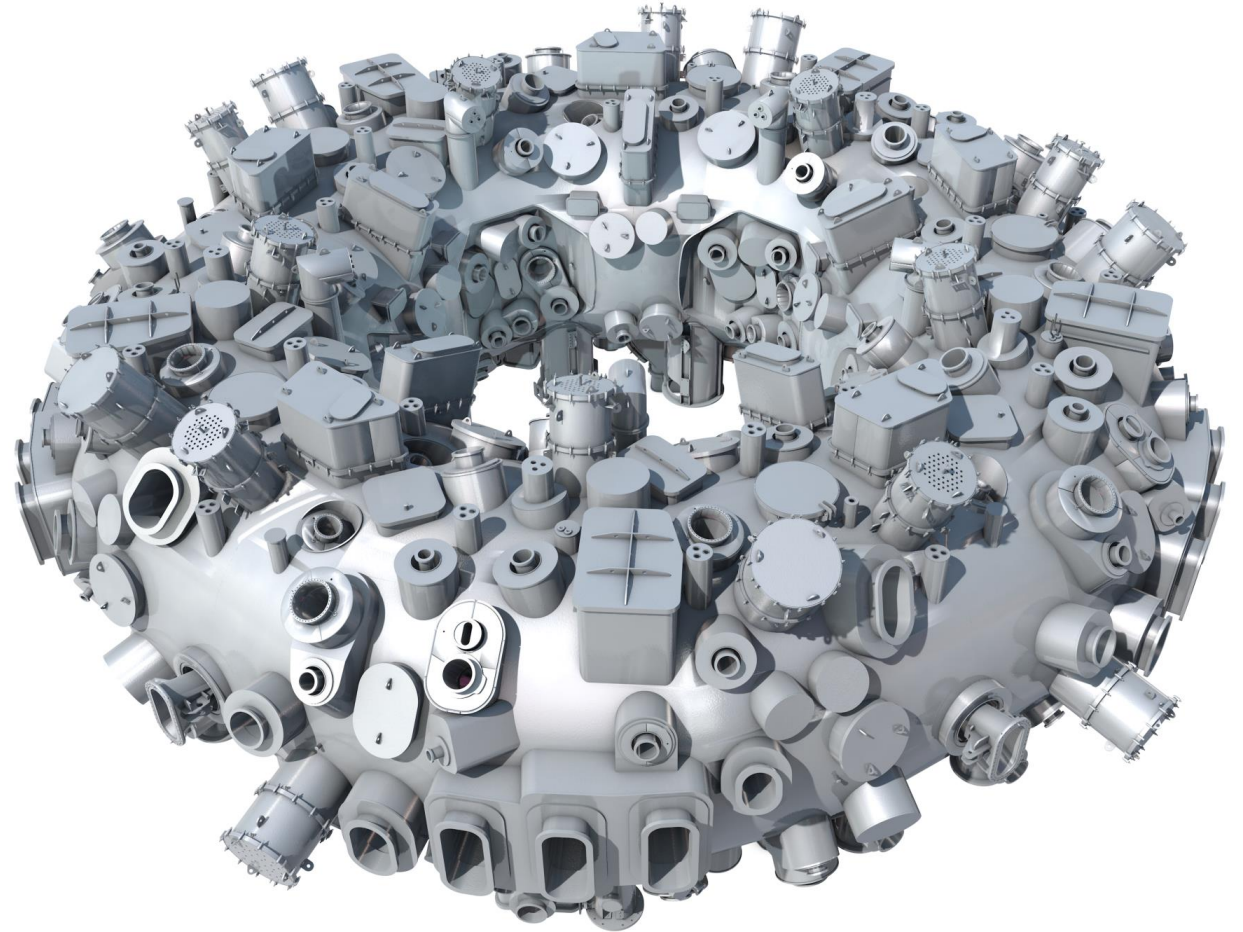
Volume plasma: **30m³**

Massa plasma: **5-30mg**

Composizione plasma: **H, D**

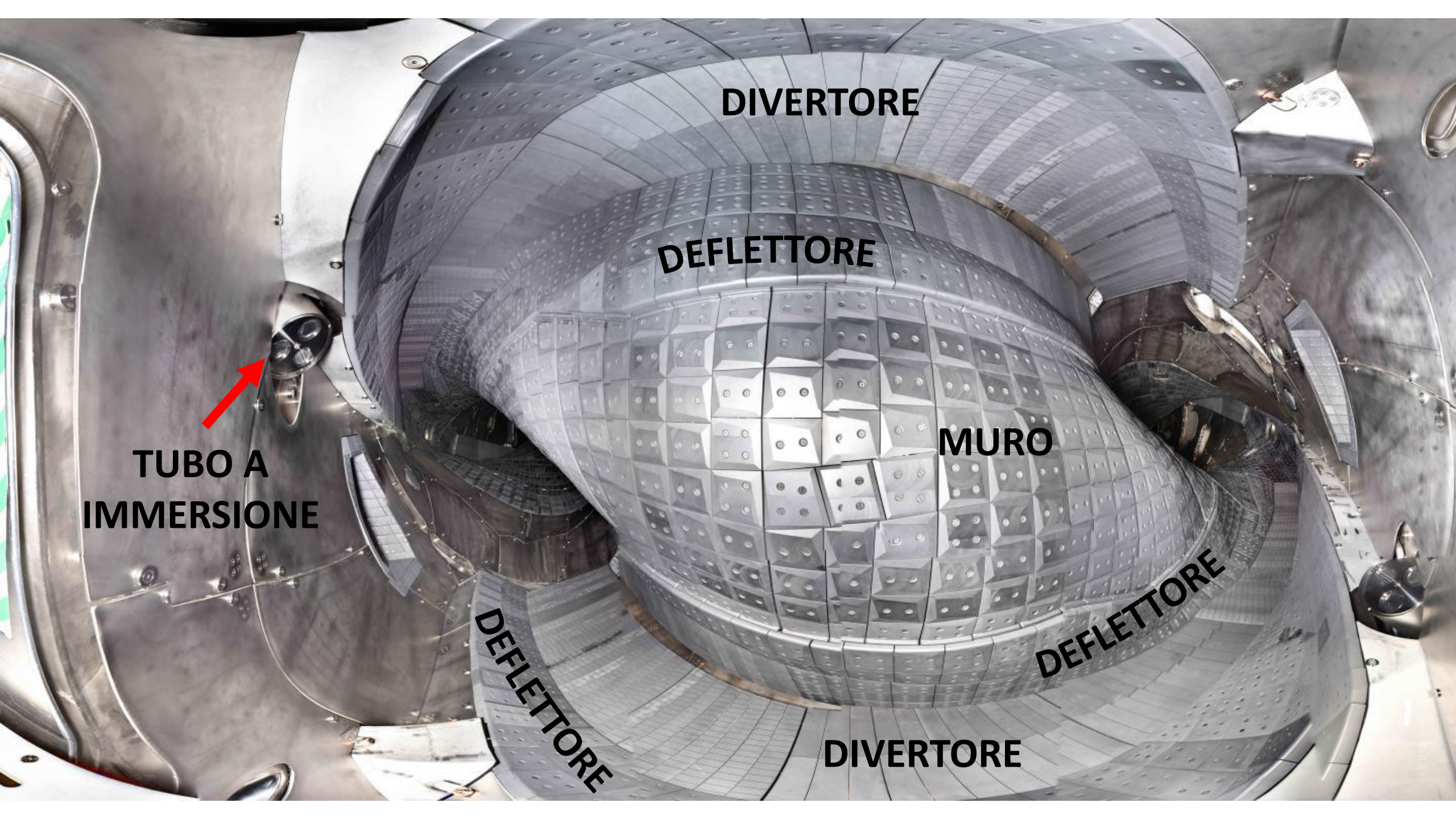
Temperatura plasma: **60-130MK**

Densità plasma: **3x10²⁰m⁻³**



Struttura

VIDEO



DIVERTORE

DEFLETTORE

MURO

DEFLETTORE

DIVERTORE

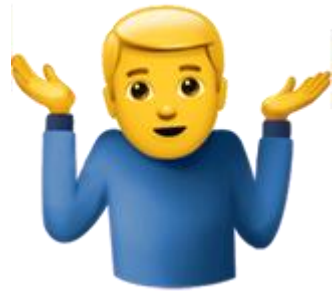
DEFLETTORE

**TUBO A
IMMERSIONE**



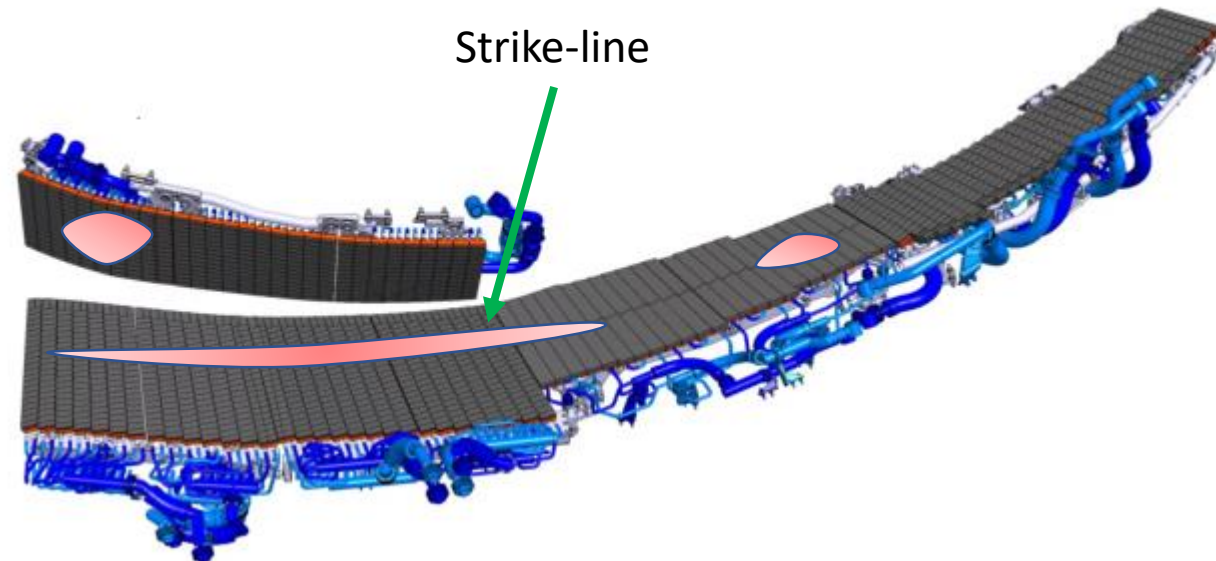
Struttura: il divertore

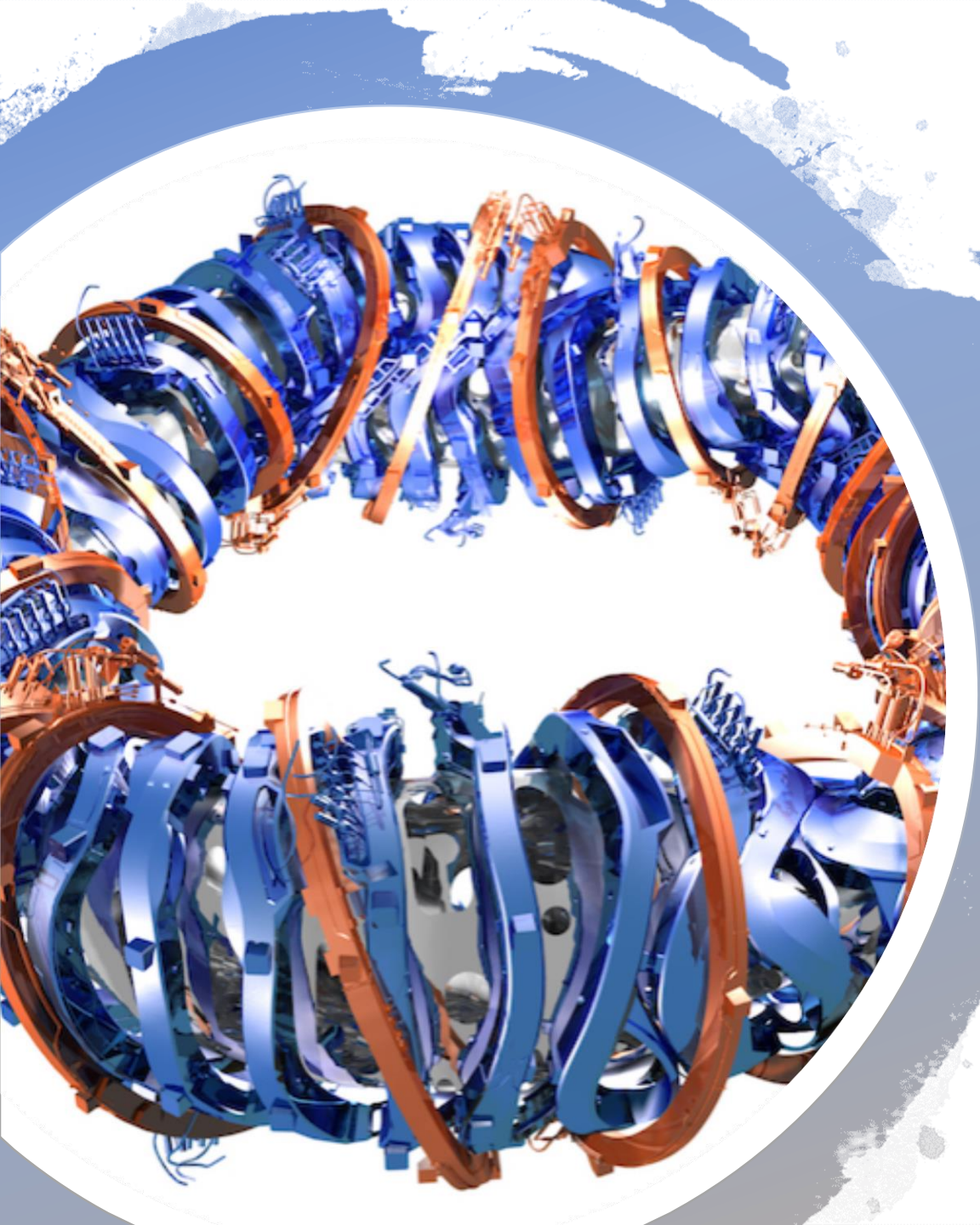
L'interazione plasma-parete è inevitabile!!



È quindi necessario scegliere una regione del muro dedicata all'“accoglienza” e alla gestione delle particelle “esauste”

- Questa regione dovrebbe essere:
 - Lontana dal centro del plasma
 - Sufficientemente raffreddata
 - Di materiale adeguato





WENDELSTEIN 7-X

- Costruzione

- Fase sperimentale

STRUTTURA

- Il divertore

→ **CONFINAMENTO MAGNETICO**

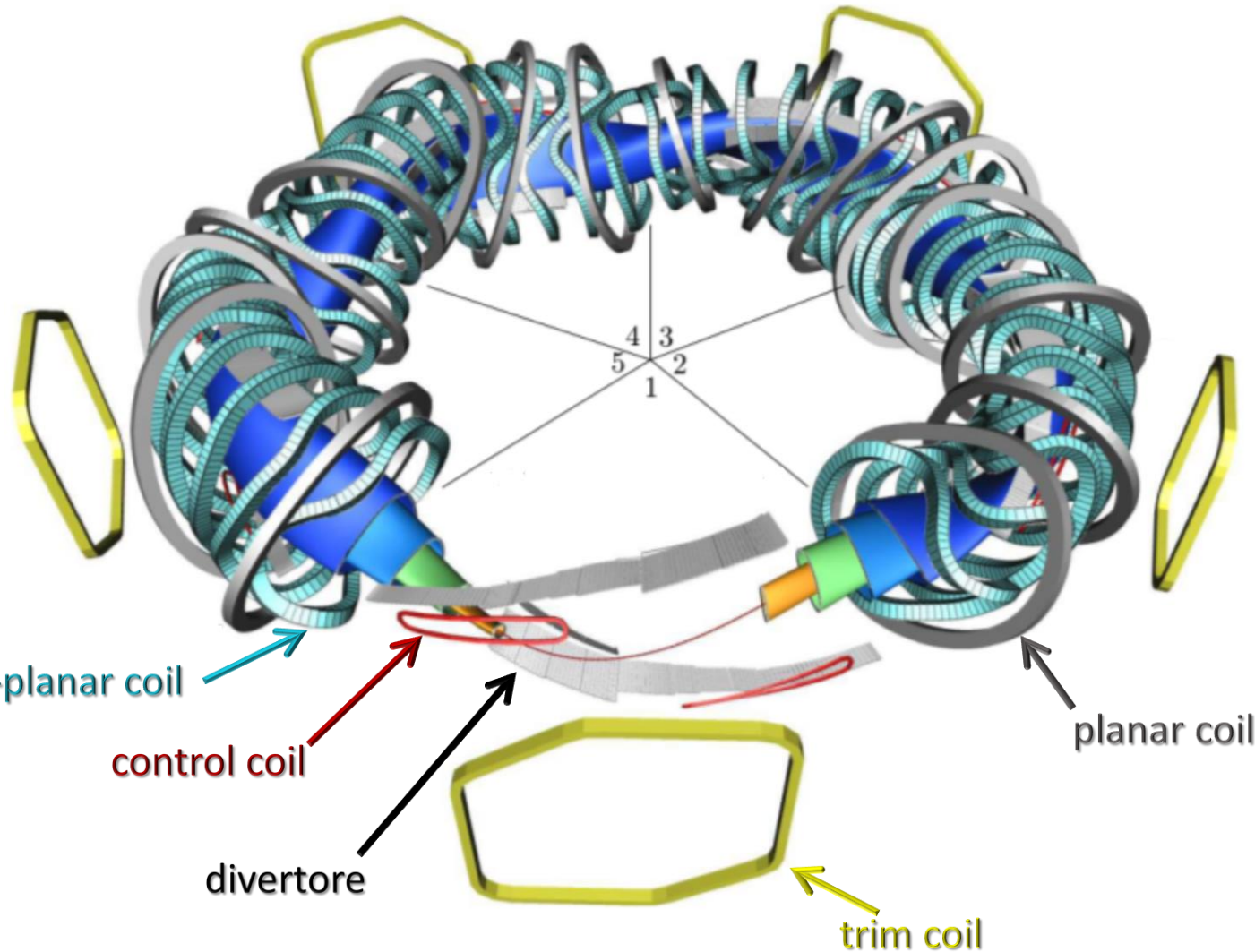
TERMOGRAFIA

CALIBRAZIONE SPAZIALE

CONTROLLO

**CONFINAMENTO
MAGNETICO**

Confinamento magnetico



Struttura modulare:

- 5 moduli identici → campo magnetico simmetrico
- Ogni modulo composto da 2 semi-moduli speculari

Ogni modulo ha:

10 non-planar coils (NPCs)

4 planar coils (PCs)

1 trim coil (TC)

2 control coils (CCs)

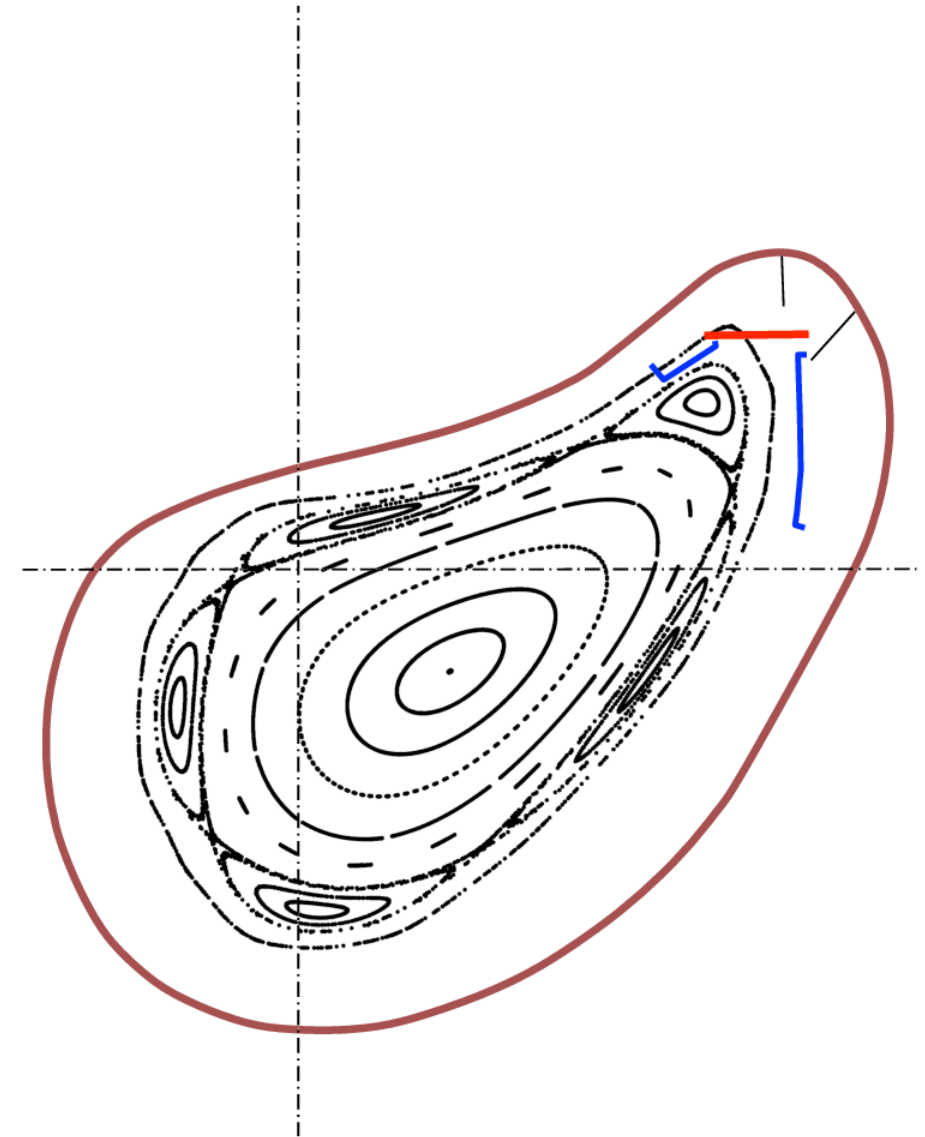
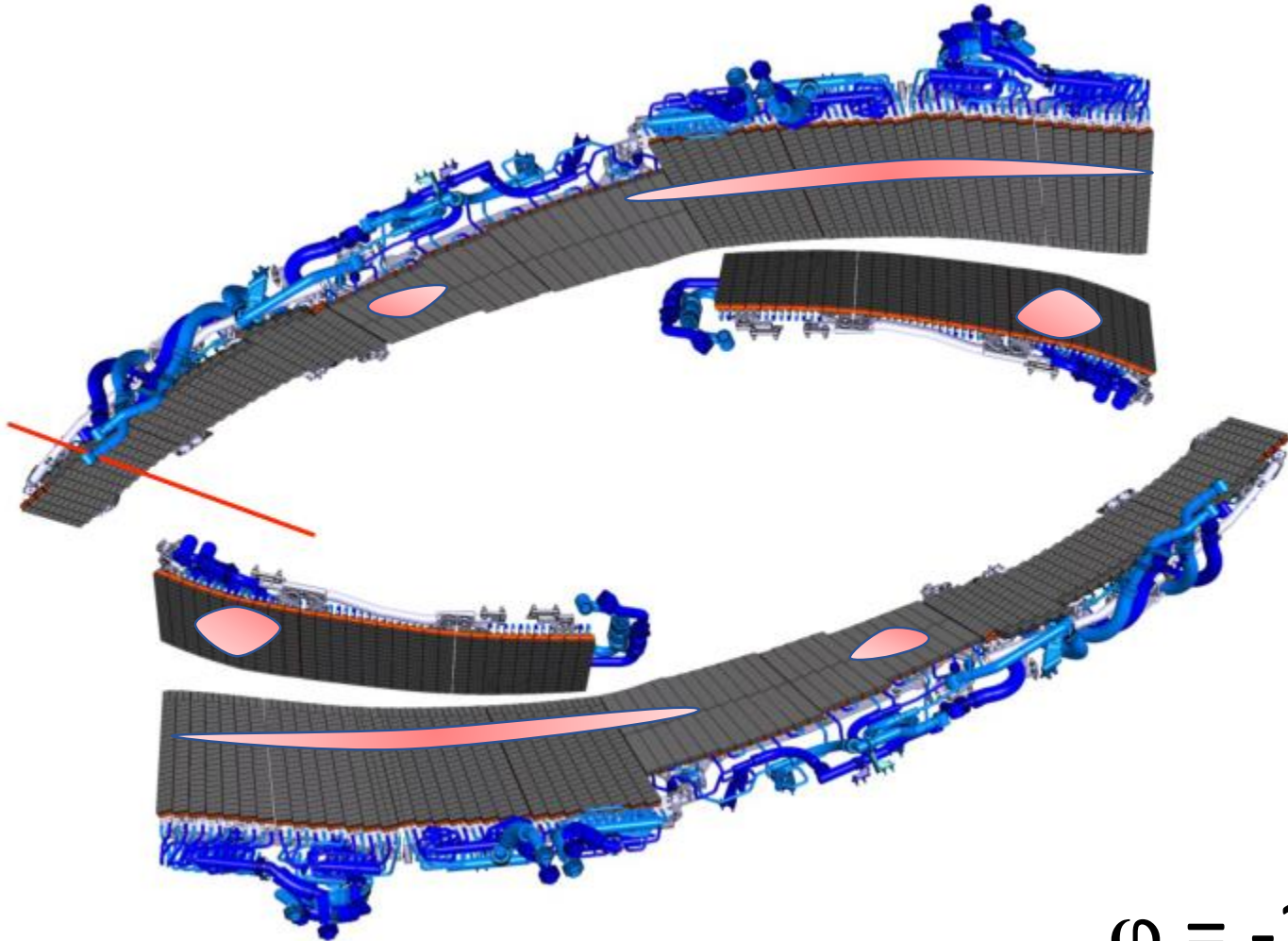
NPCs → campo magnetico principale

PCs → posizione e forma del plasma

TCs → compensazione errori di campo

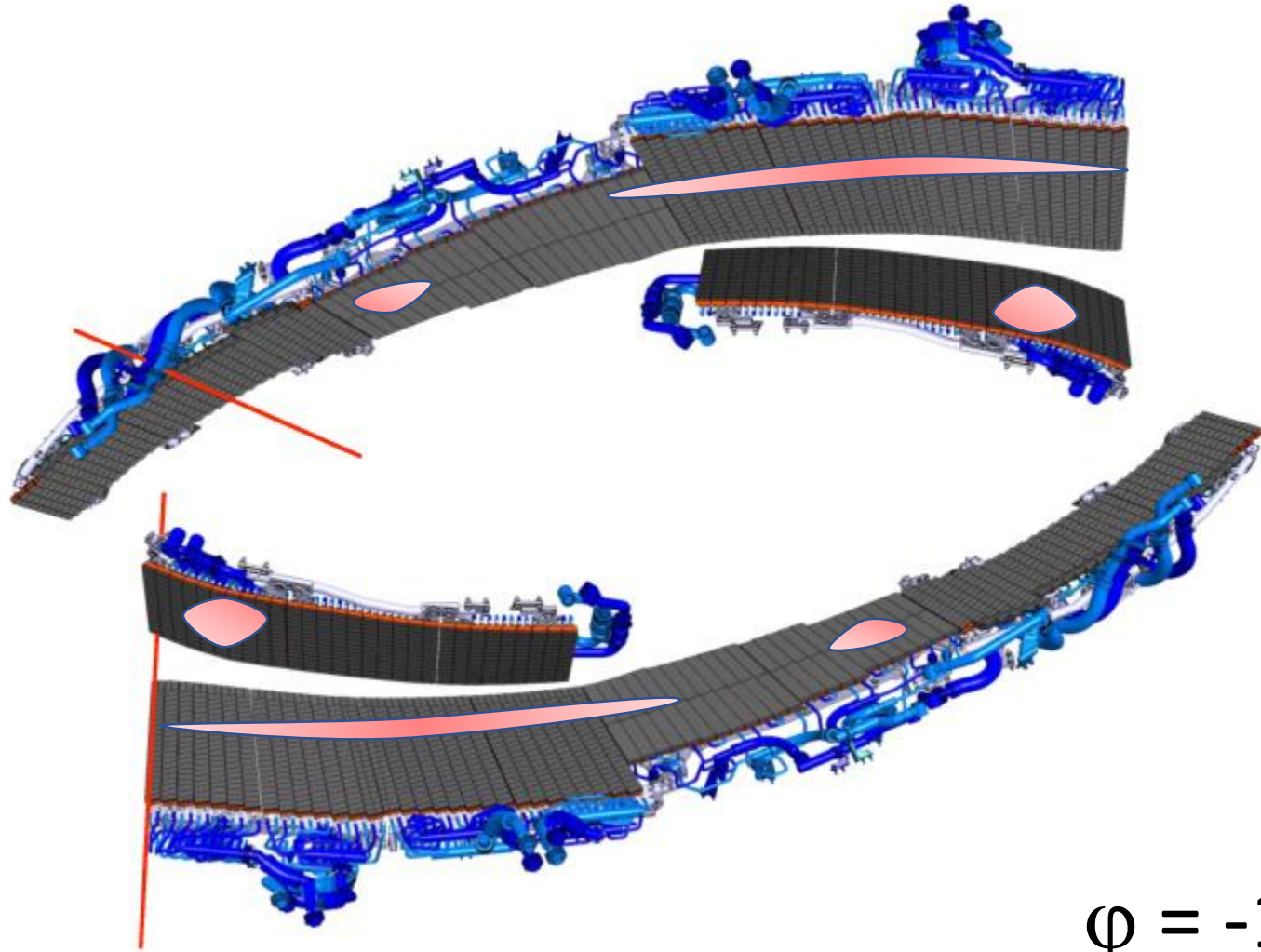
CCs → controllo della posizione delle isole magnetiche

Confinamento magnetico

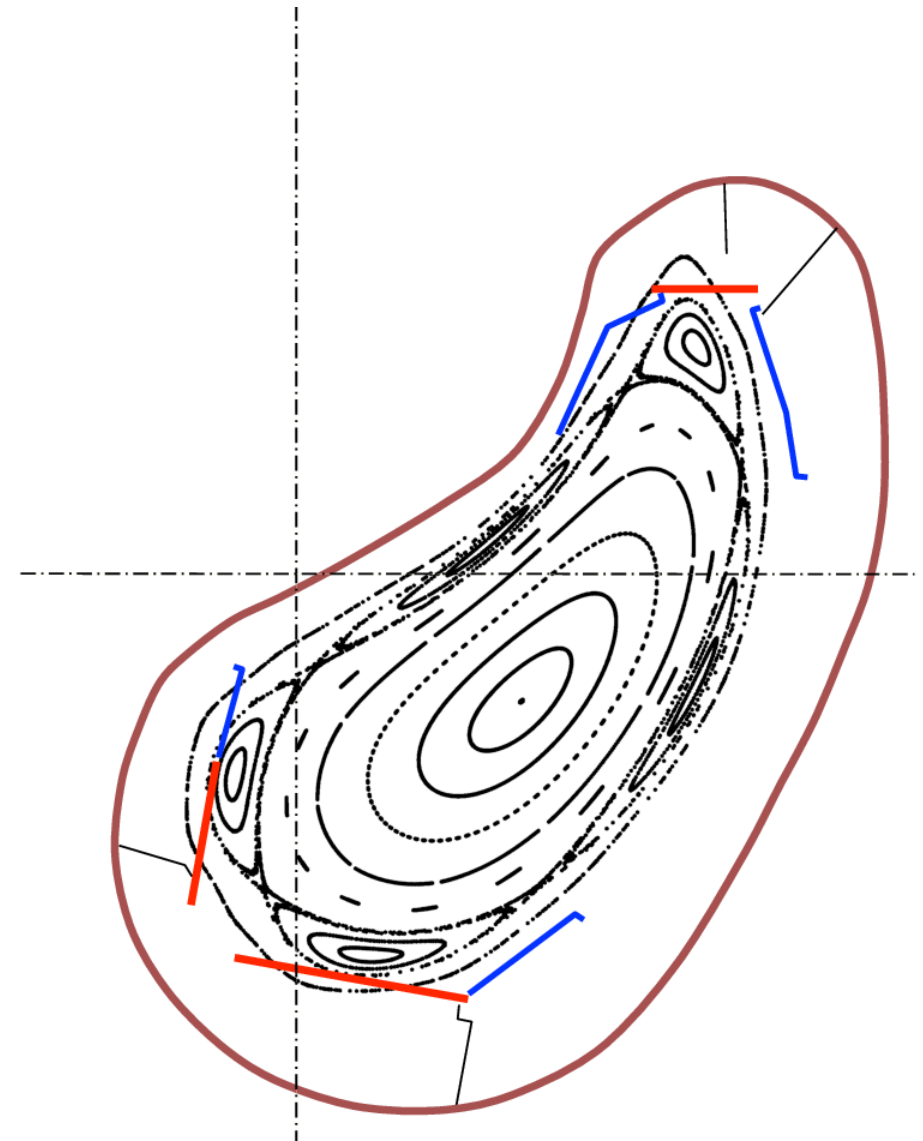


$$\varphi = -24^\circ$$

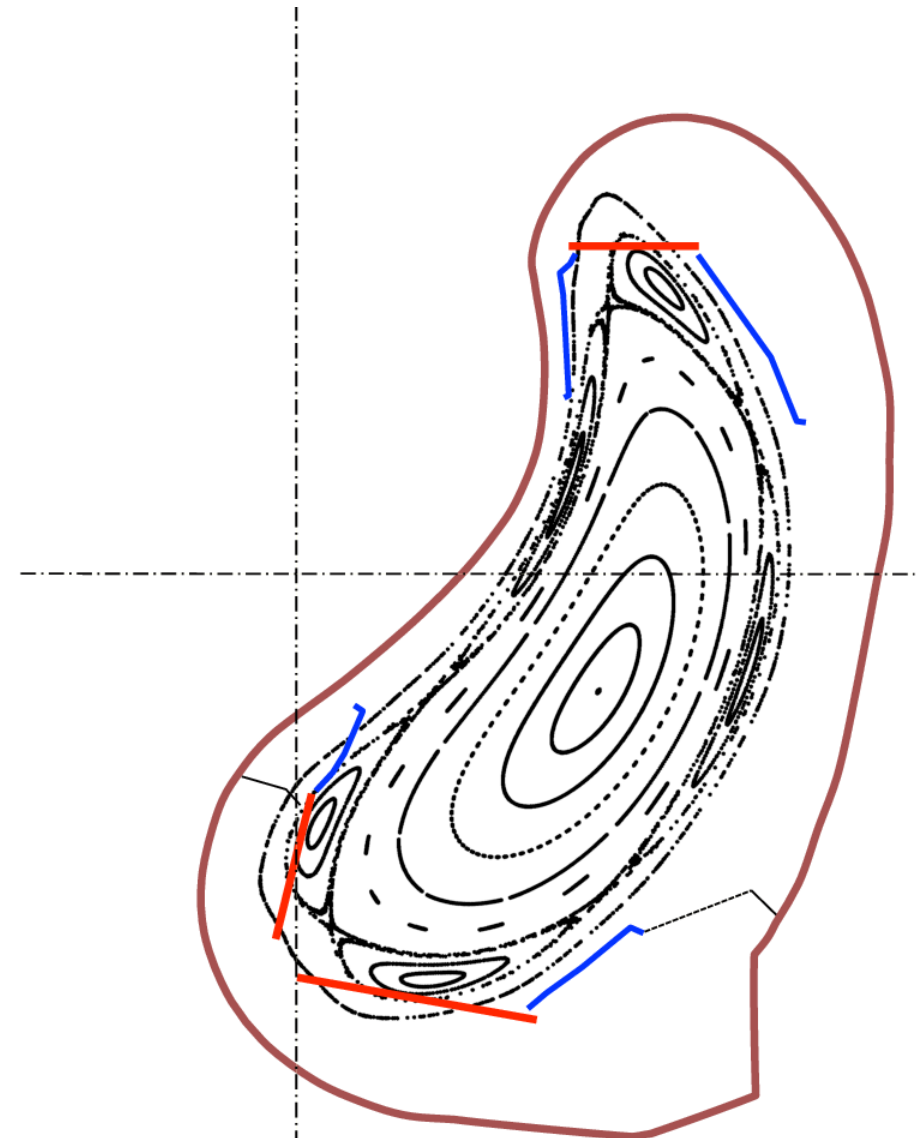
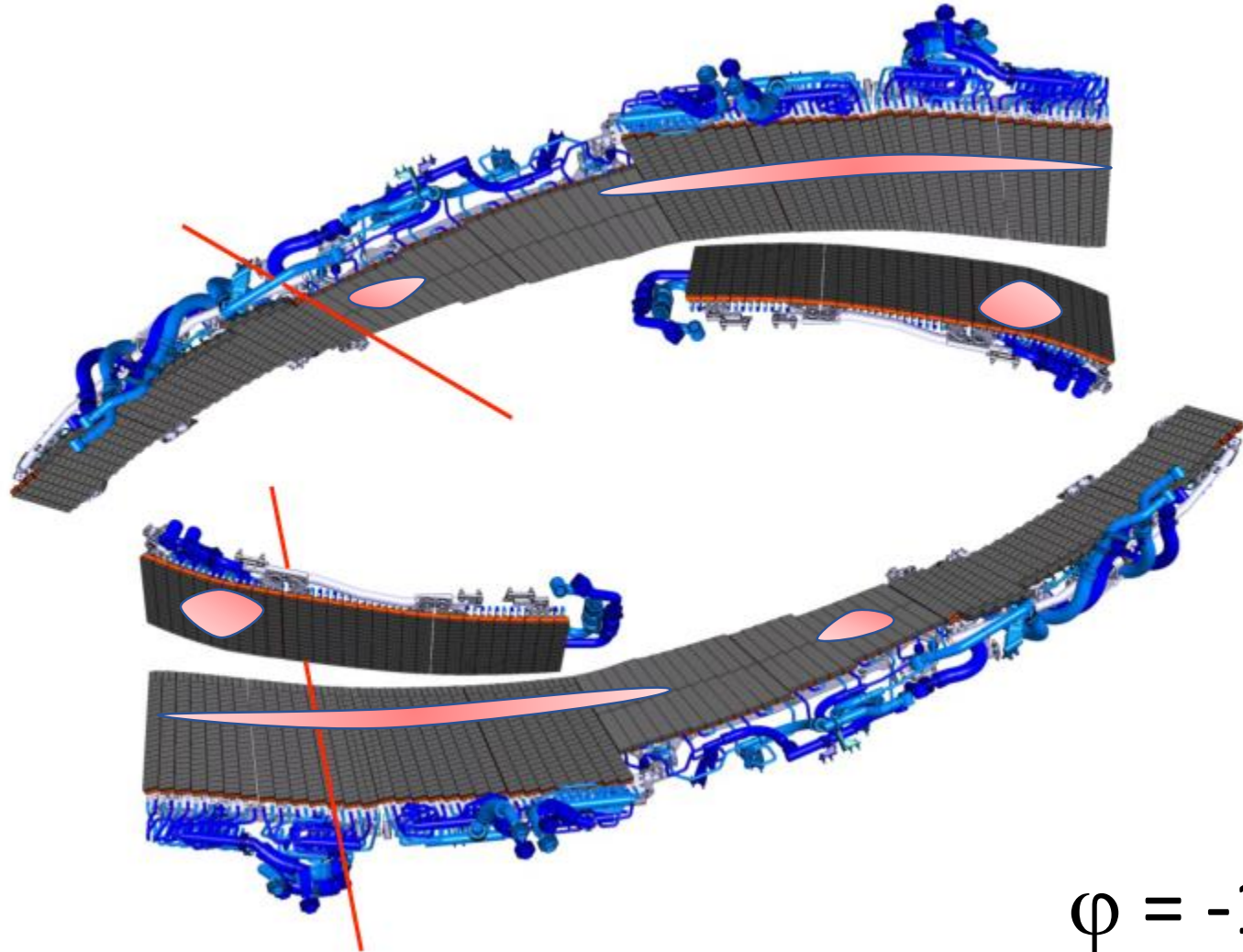
Confinamento magnetico



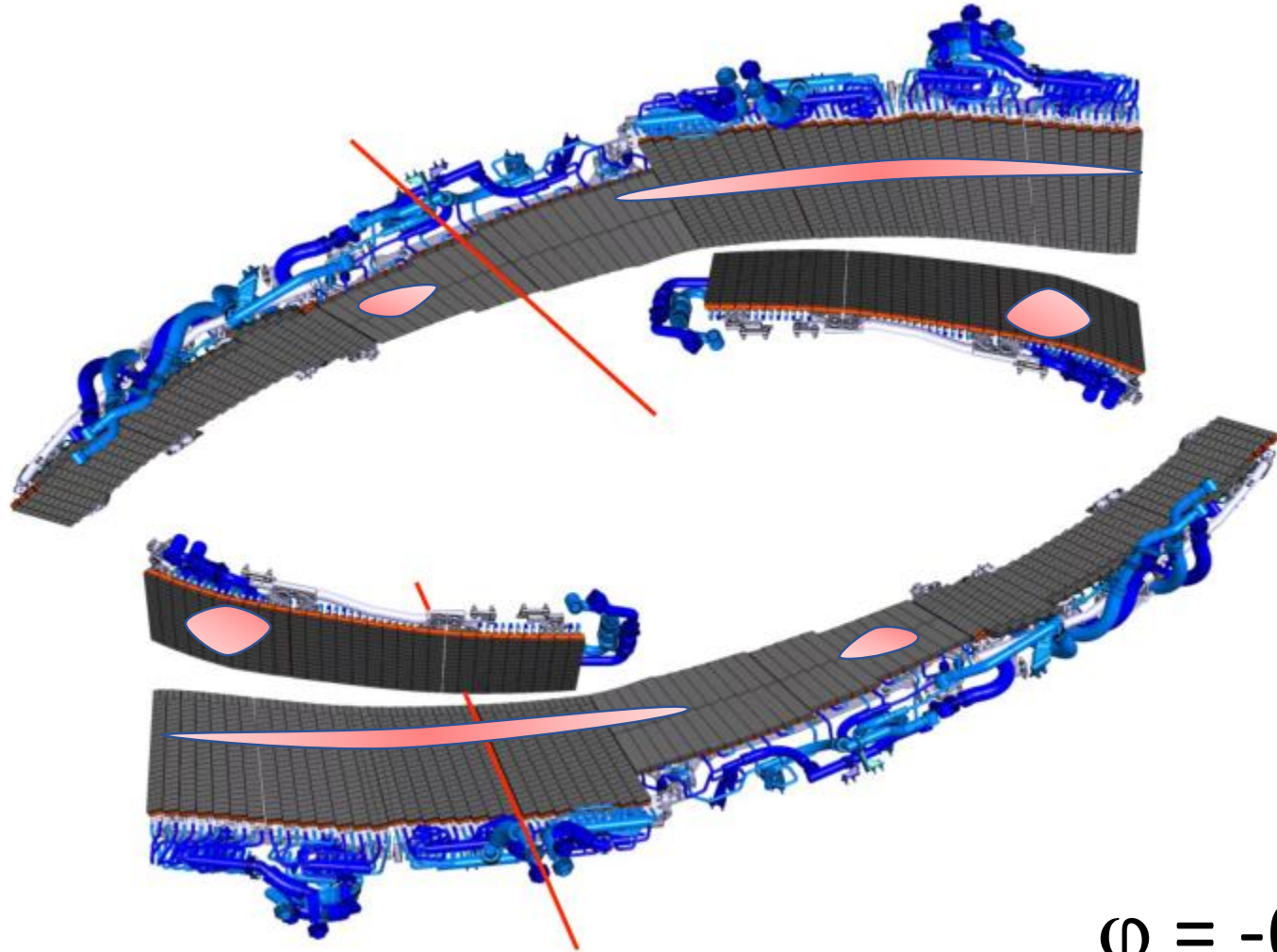
$$\varphi = -18^\circ$$



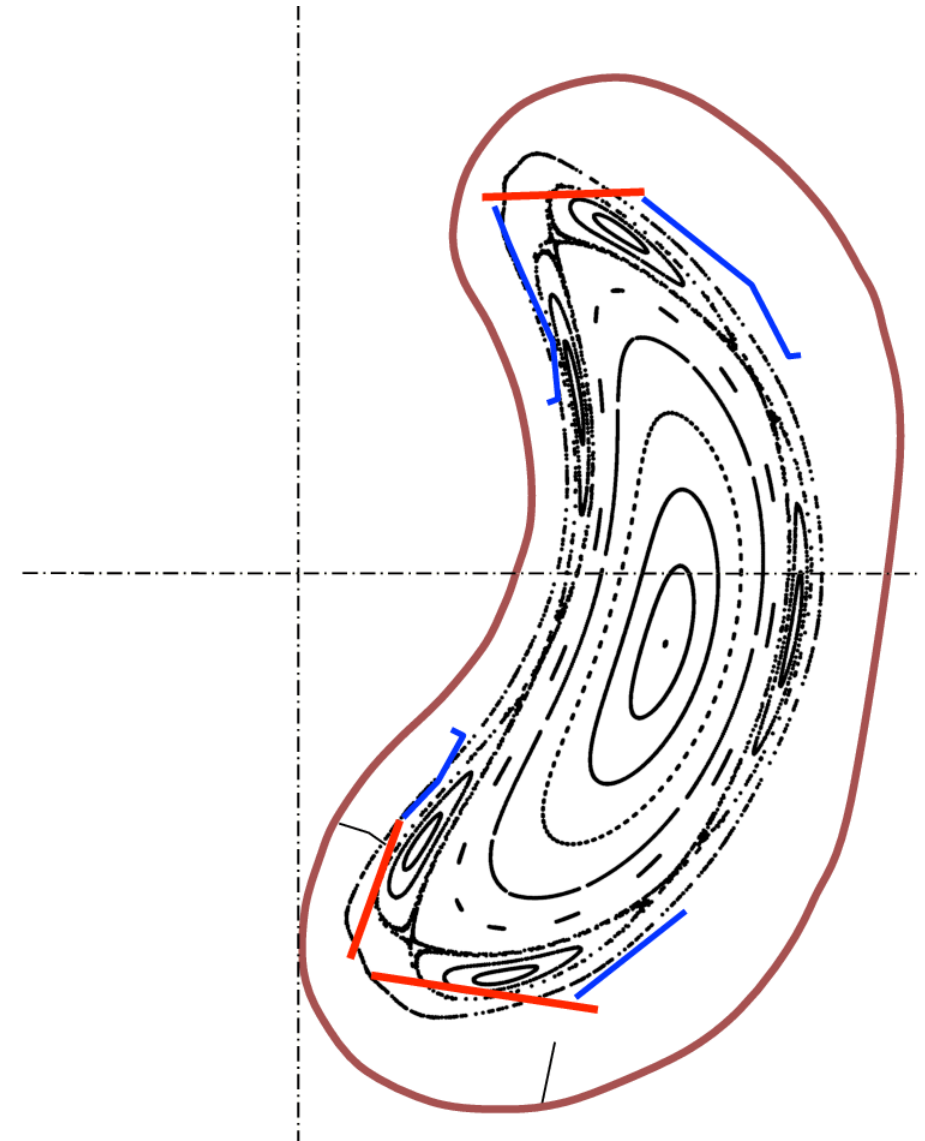
Confinamento magnetico



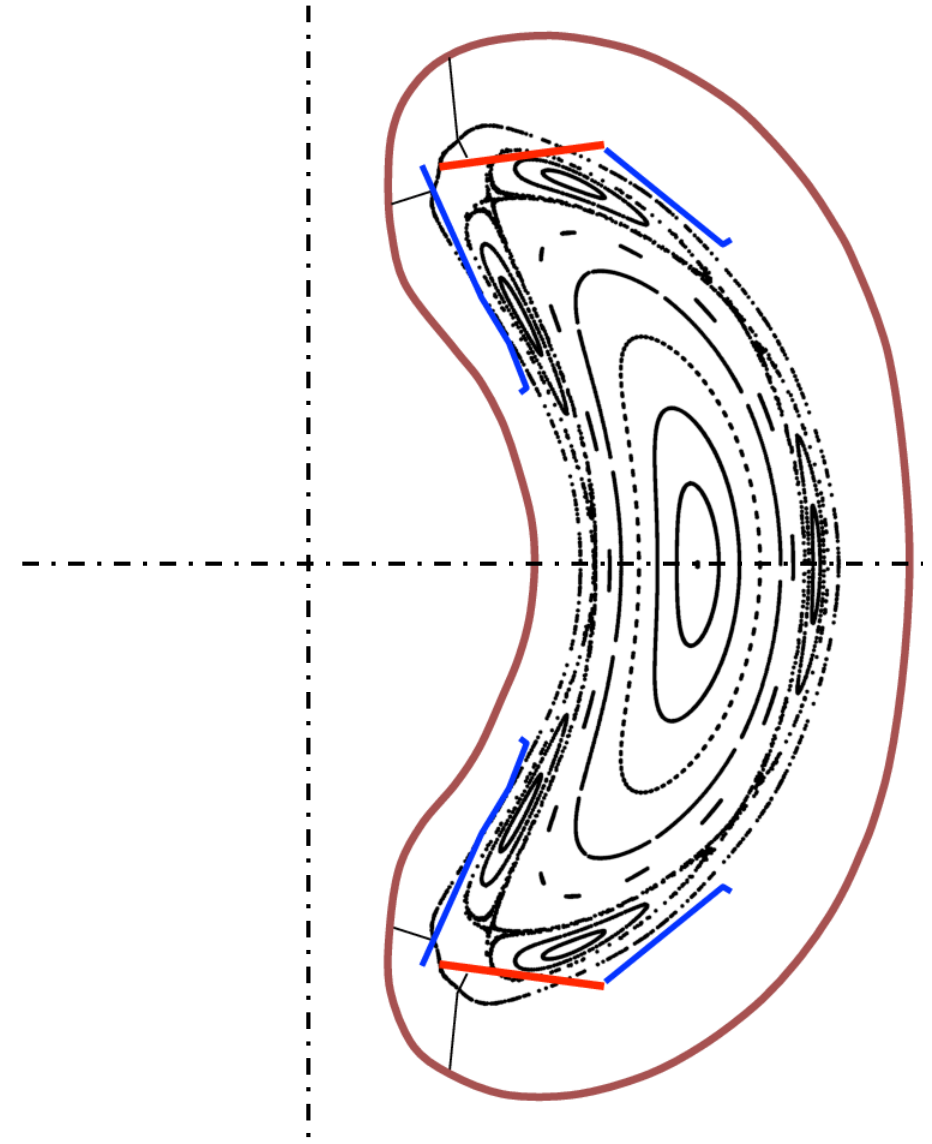
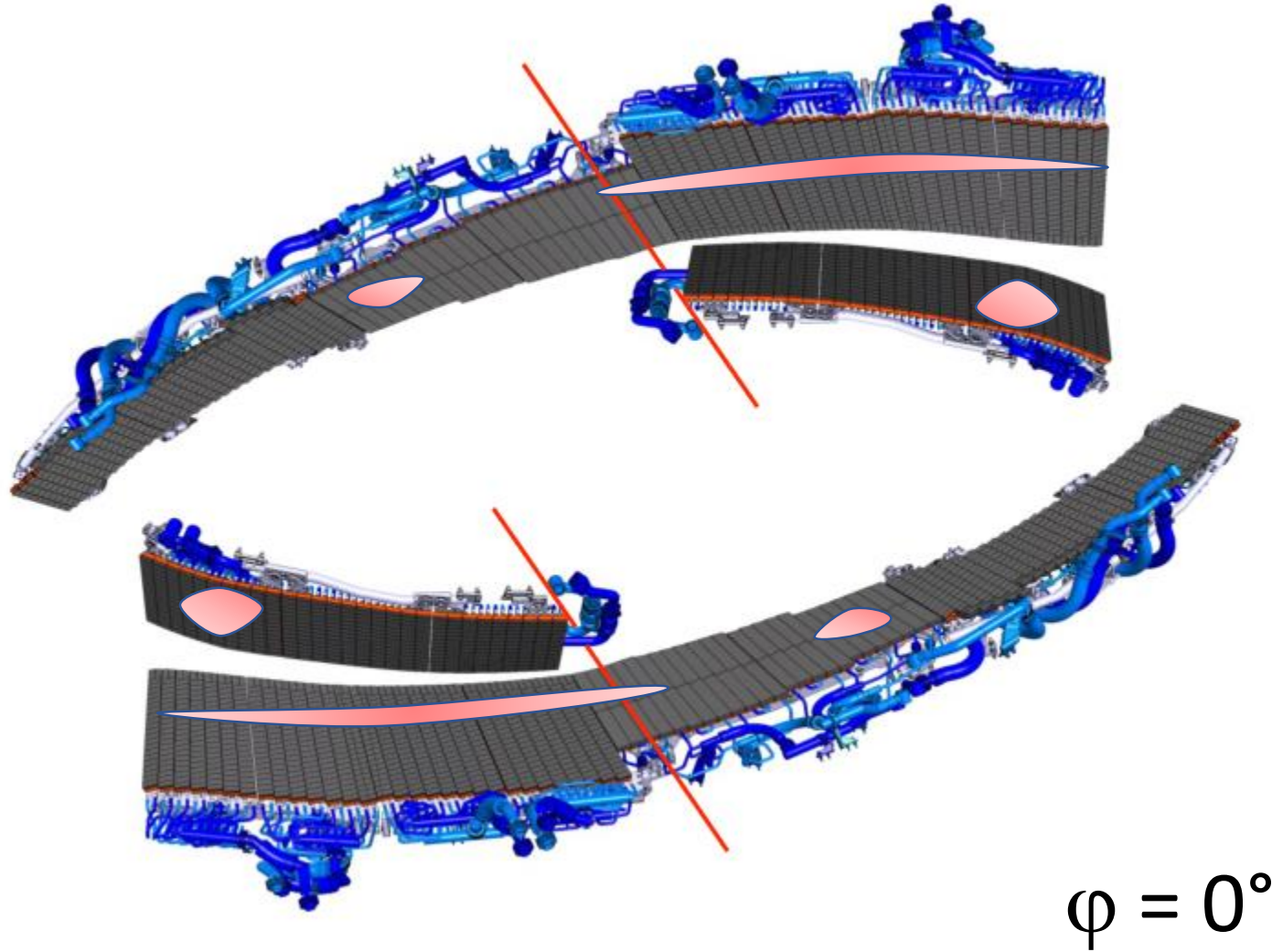
Confinamento magnetico



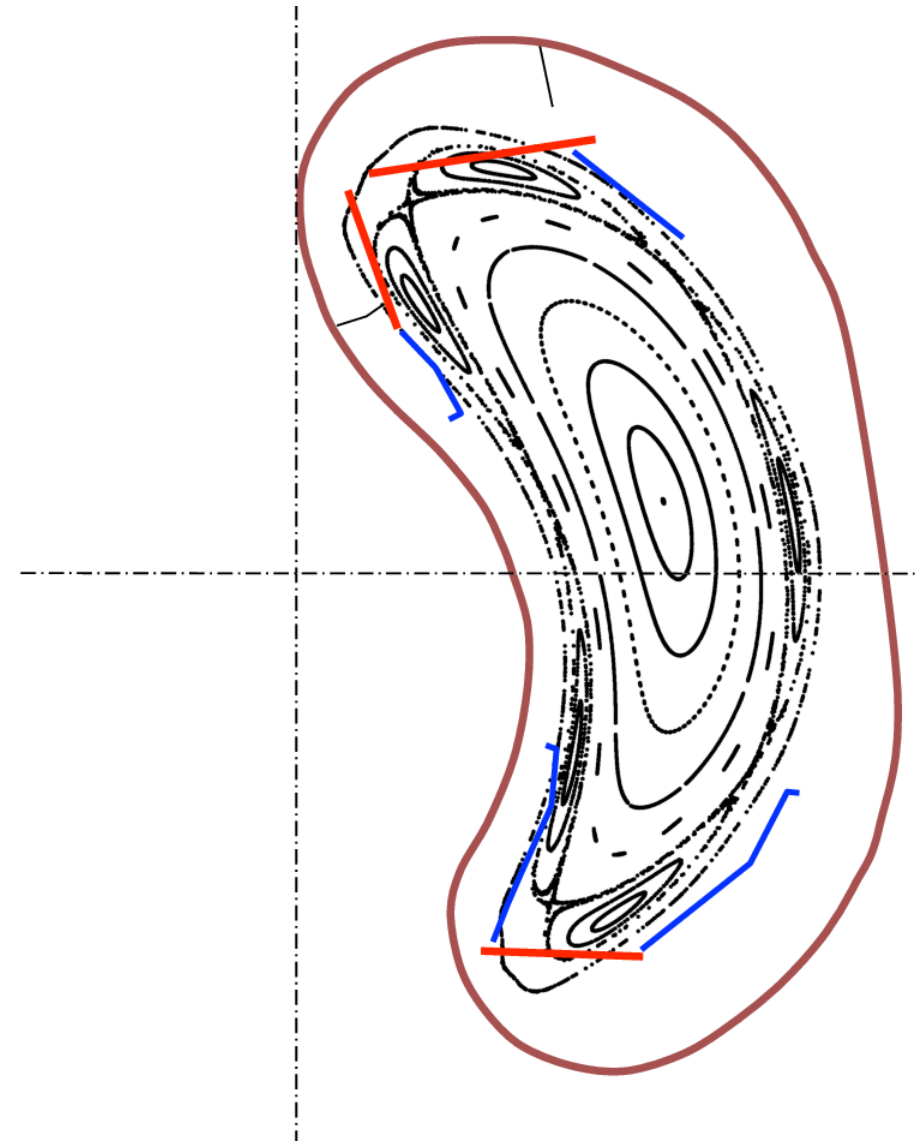
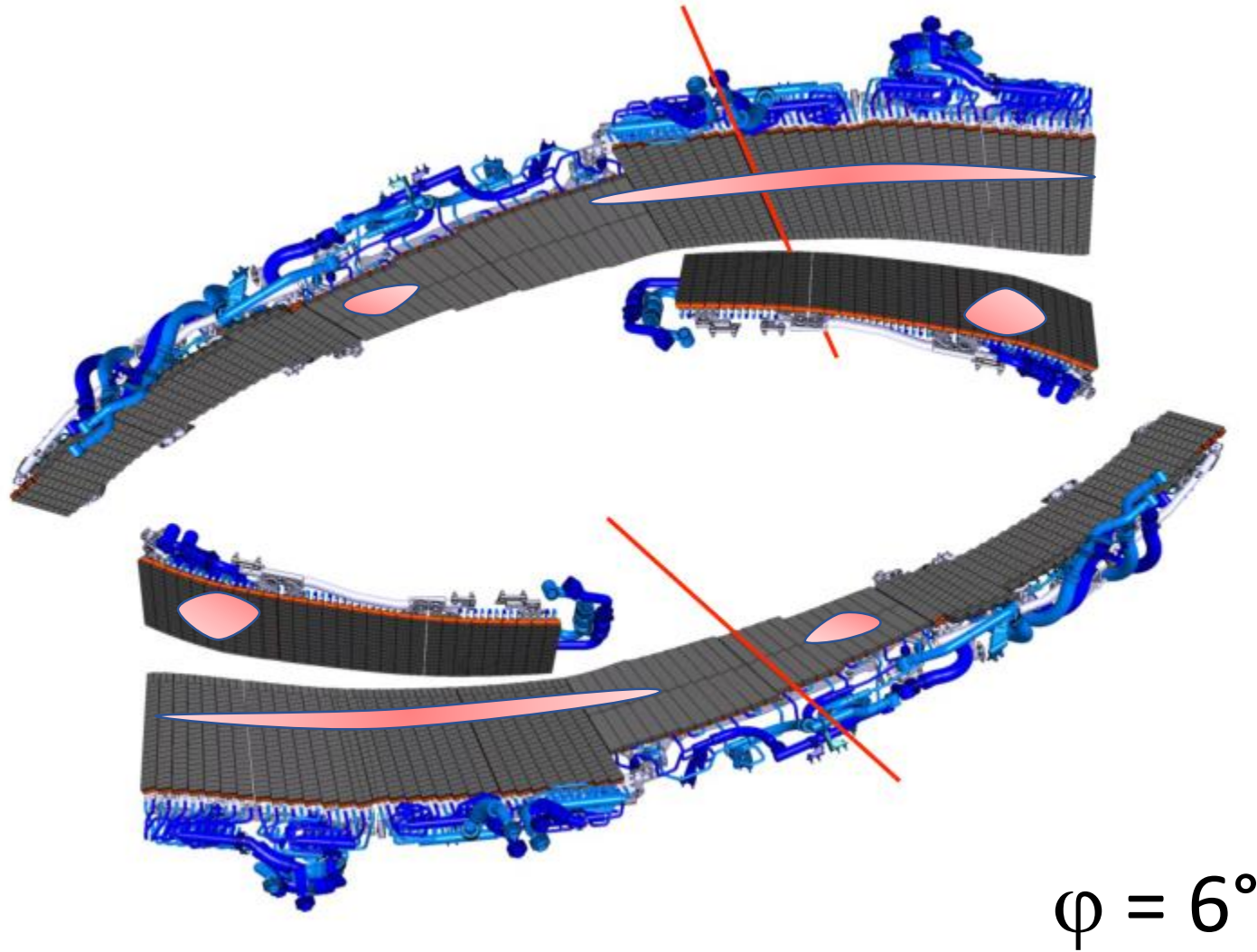
$$\varphi = -6^\circ$$



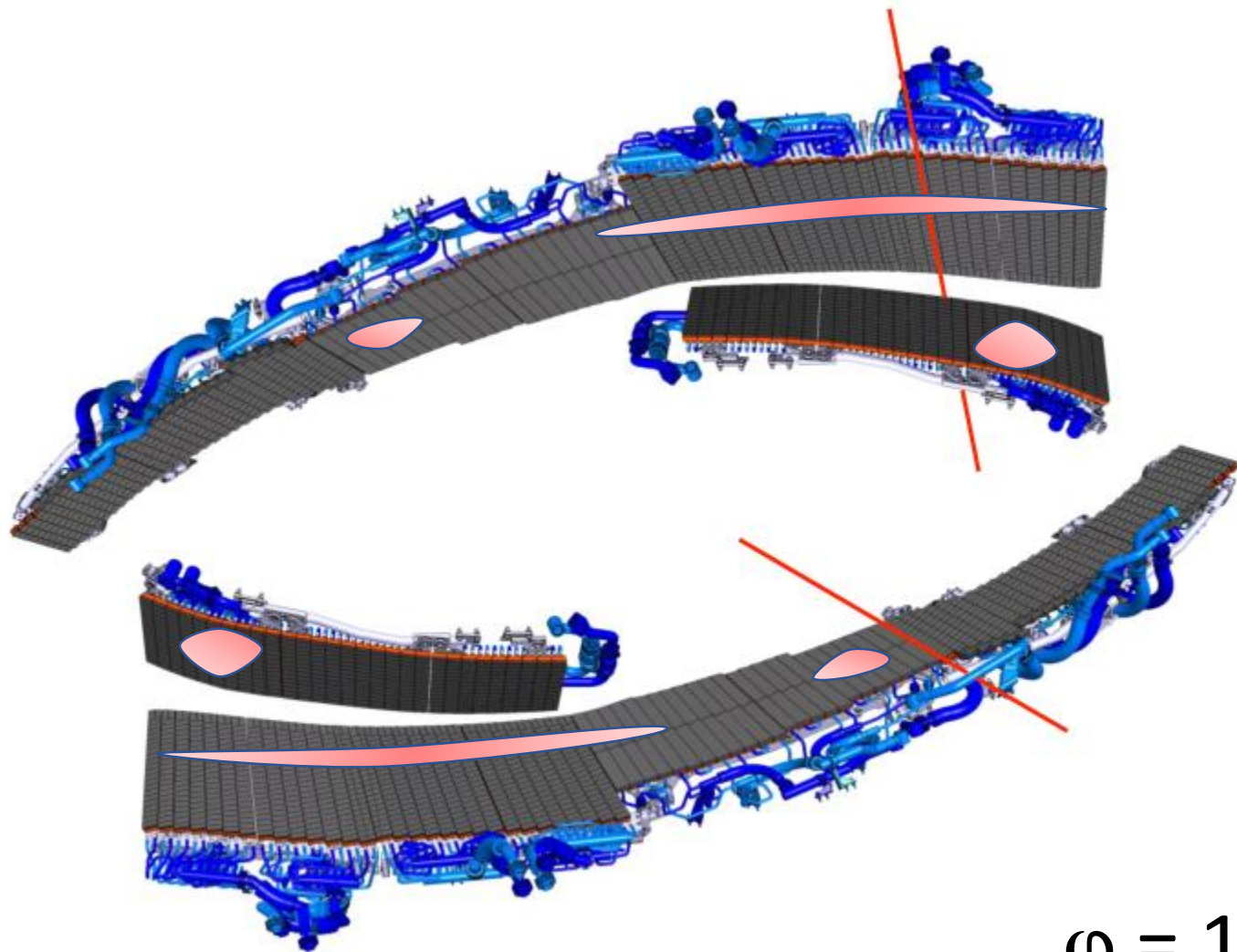
Confinamento magnetico



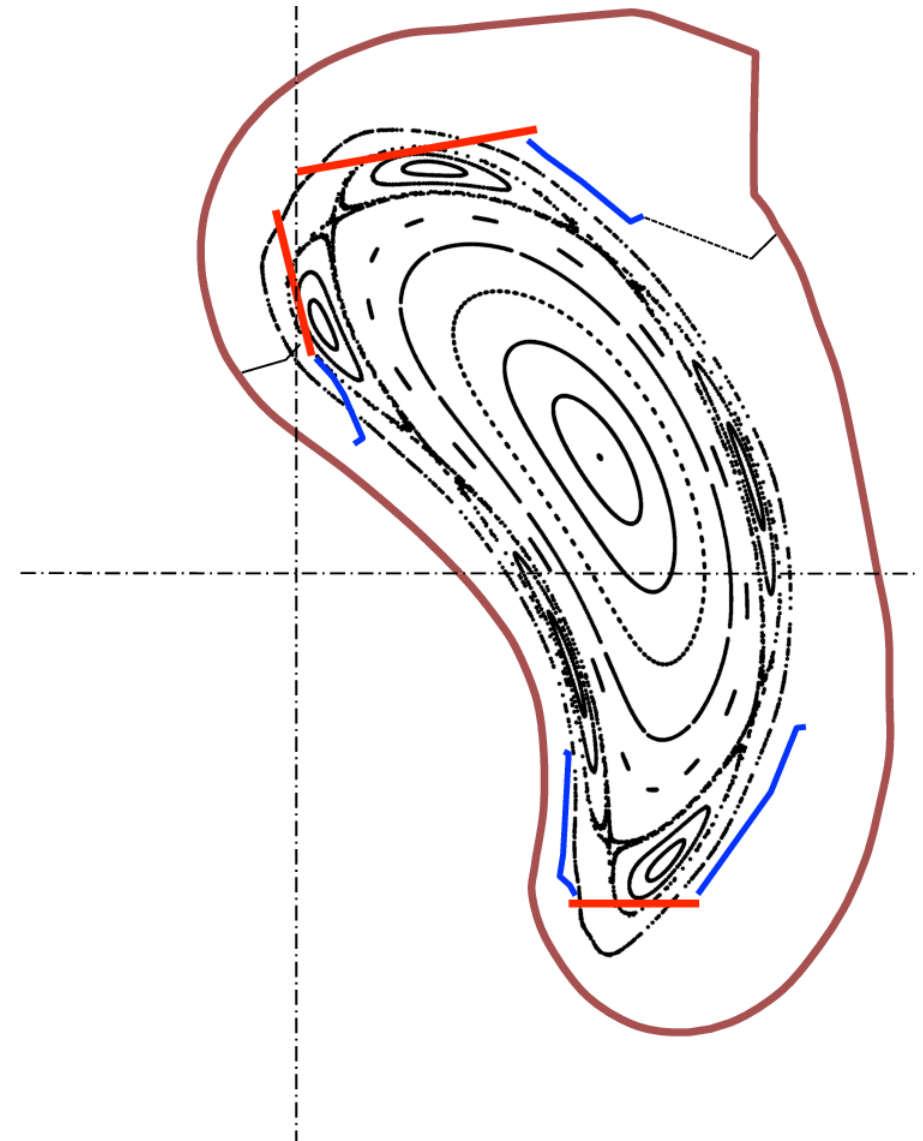
Confinamento magnetico



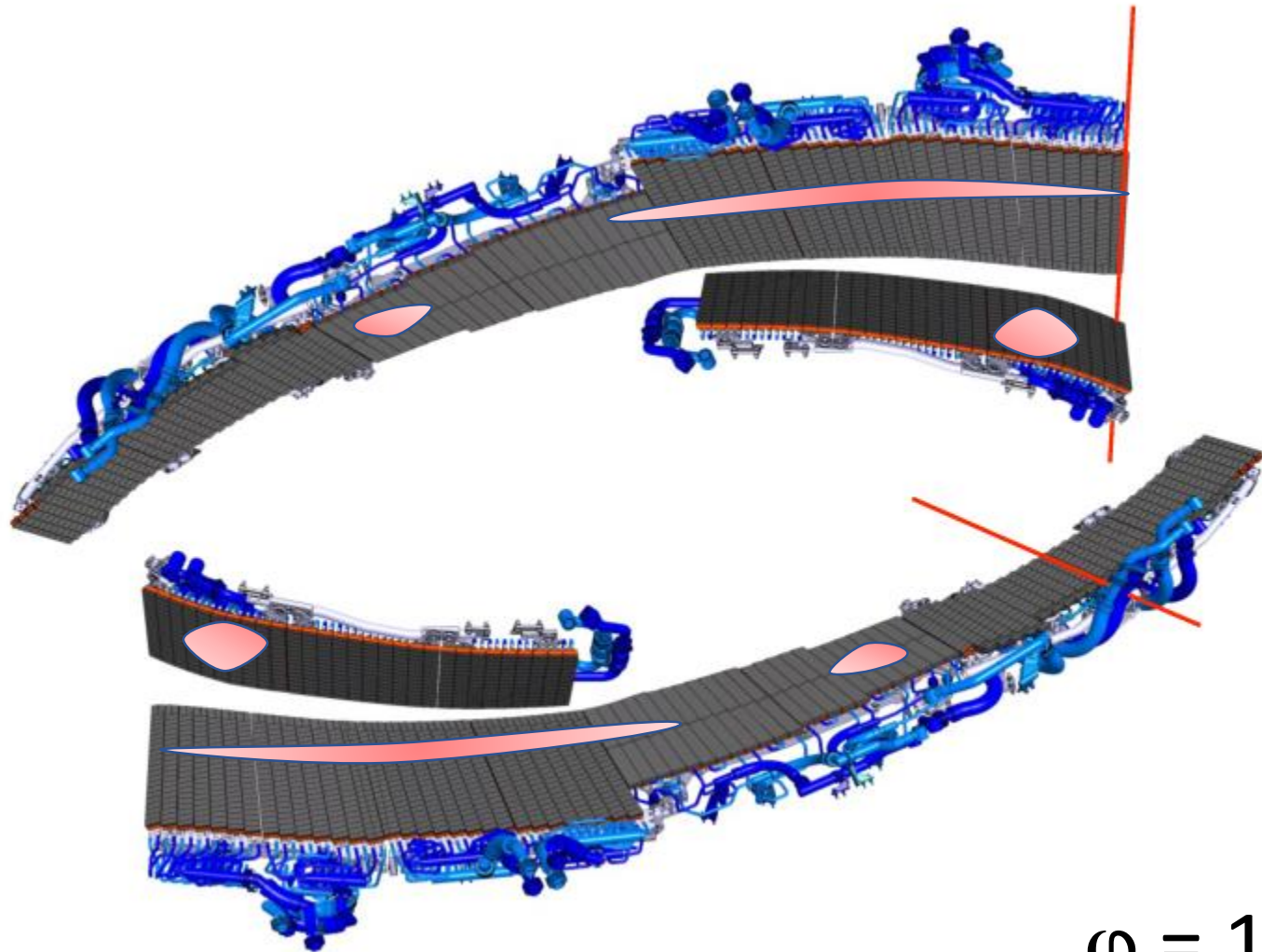
Confinamento magnetico



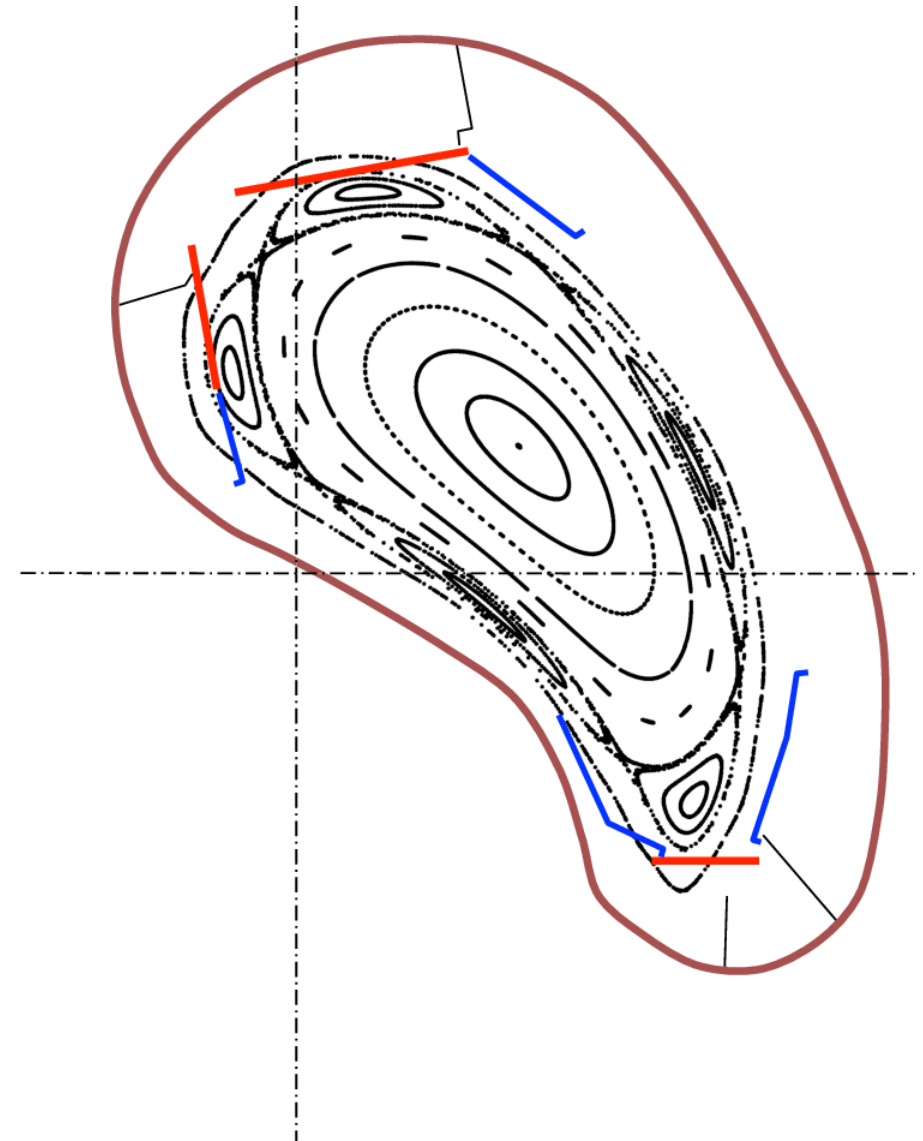
$$\varphi = 12^\circ$$



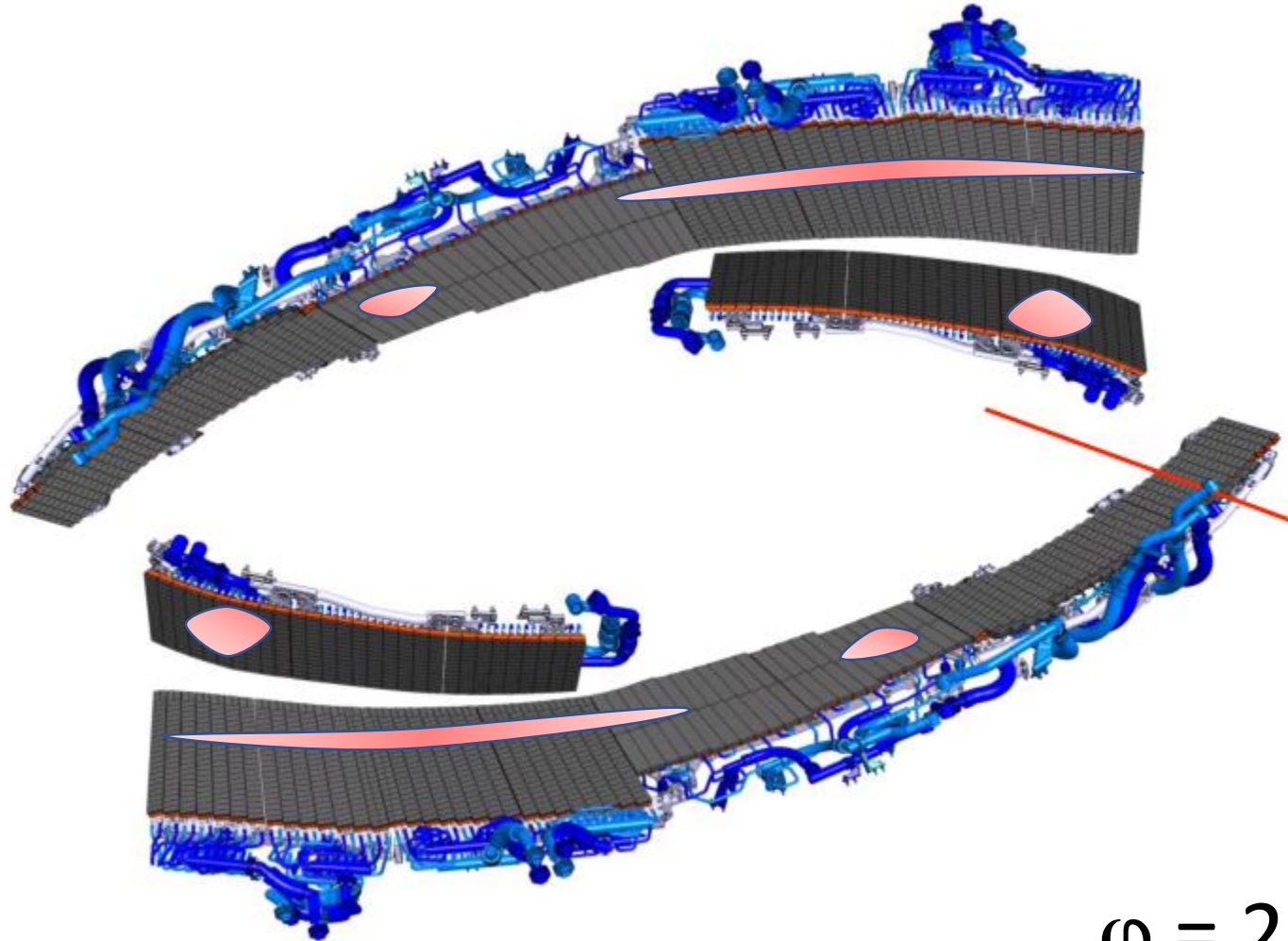
Confinamento magnetico



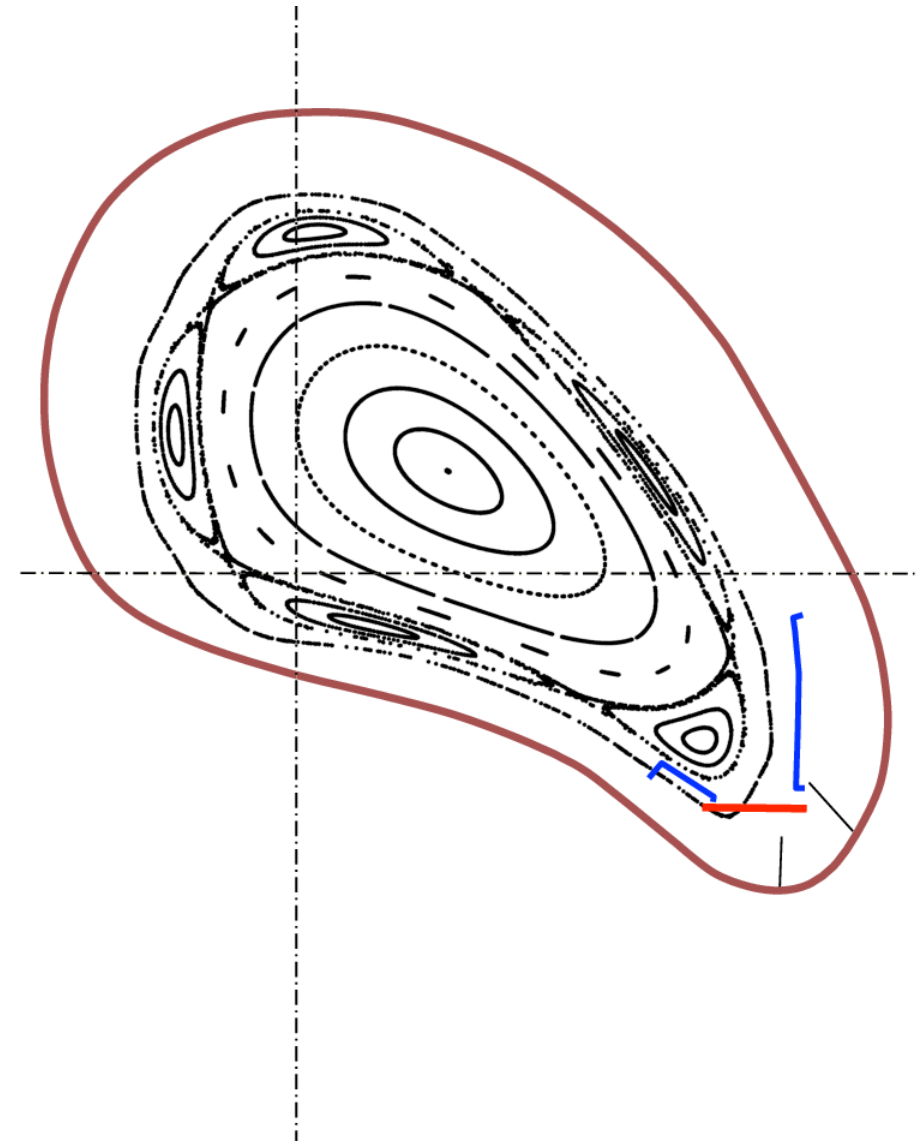
$$\varphi = 18^\circ$$

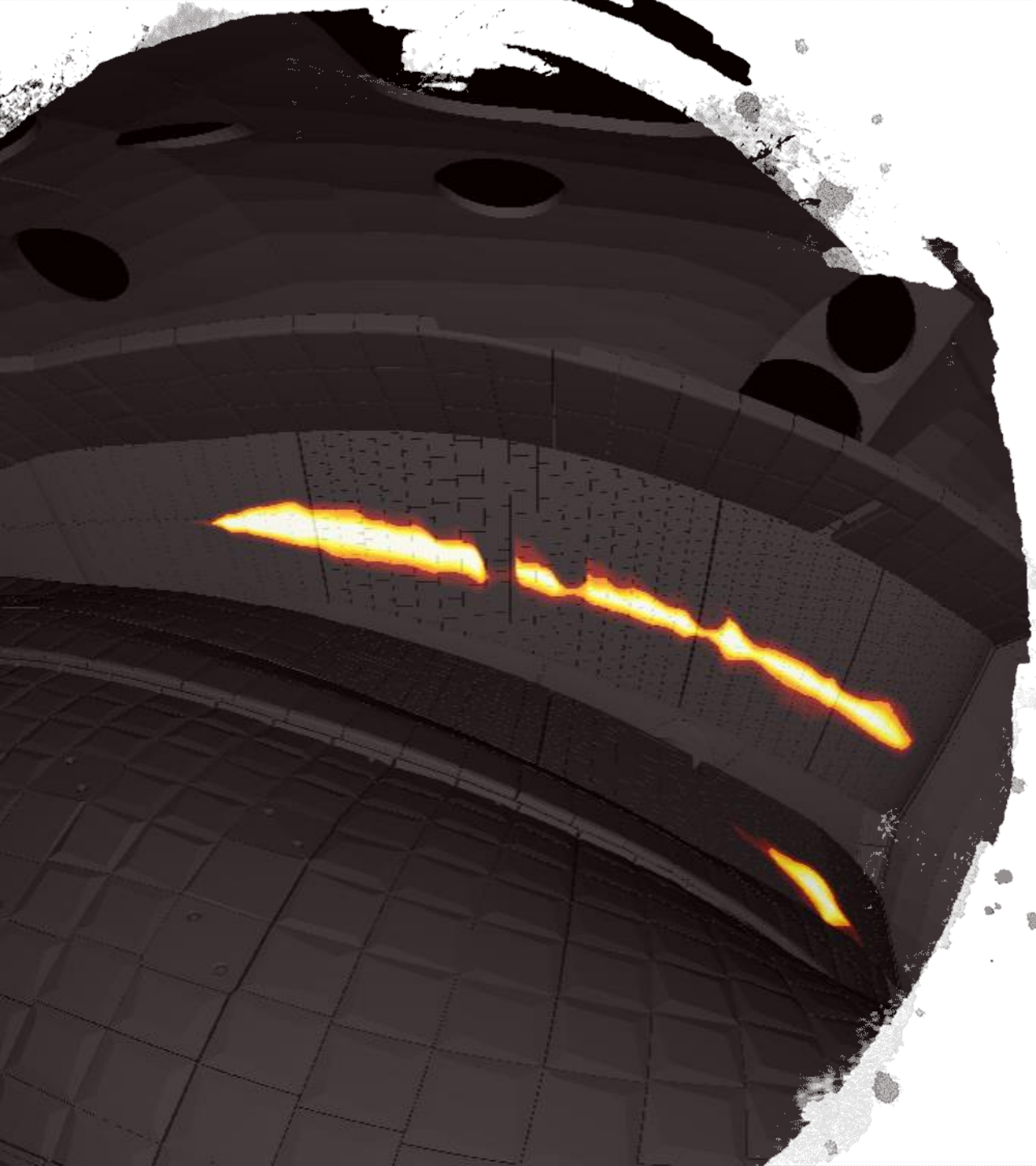


Confinamento magnetico



$$\varphi = 24^\circ$$





WENDELSTEIN 7-X

- Costruzione

- Fase sperimentale

STRUTTURA

- Il divertore

CONFINAMENTO MAGNETICO

→ **TERMOGRAFIA**

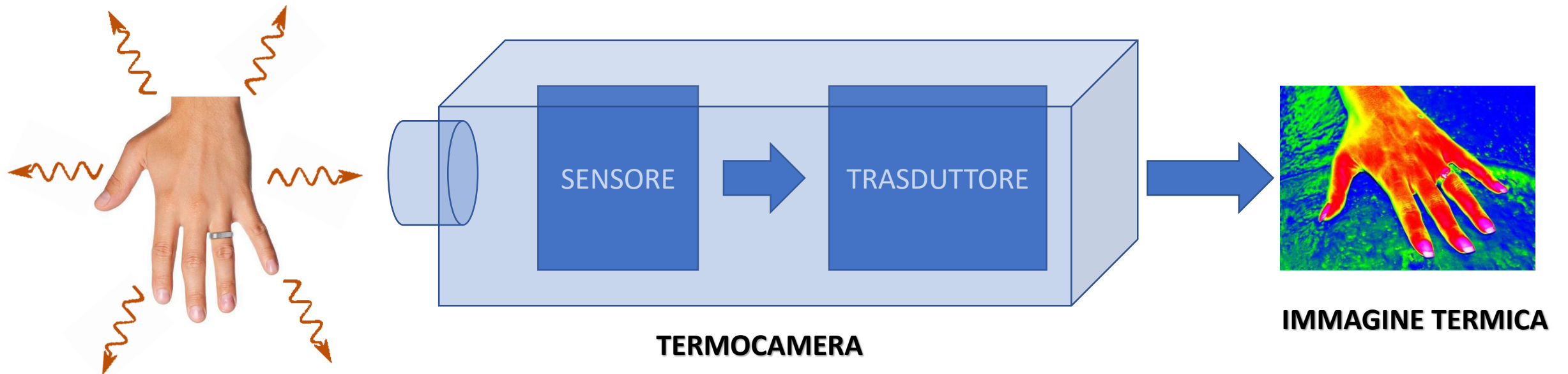
CALIBRAZIONE SPAZIALE

CONTROLLO

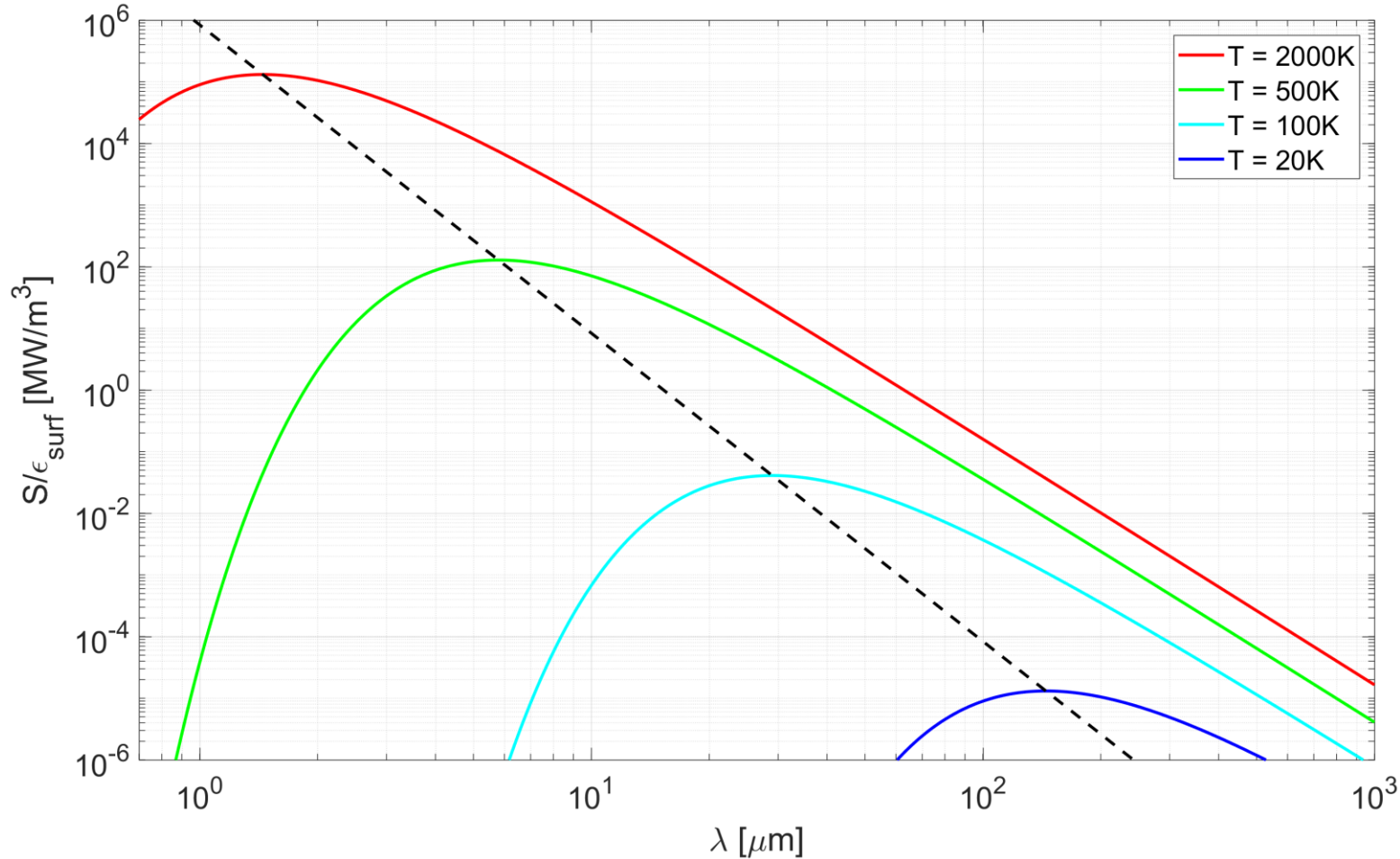
TERMOGRAFIA

Termografia

- Cos'è la termografia?
 - Rilevamento delle radiazioni termiche emesse da un corpo, realizzato tramite sensori che raccolgono la radiazione e la trasformano in segnale elettrico che viene inviato a dispositivi che ricostruiscono l'immagine



Termografia

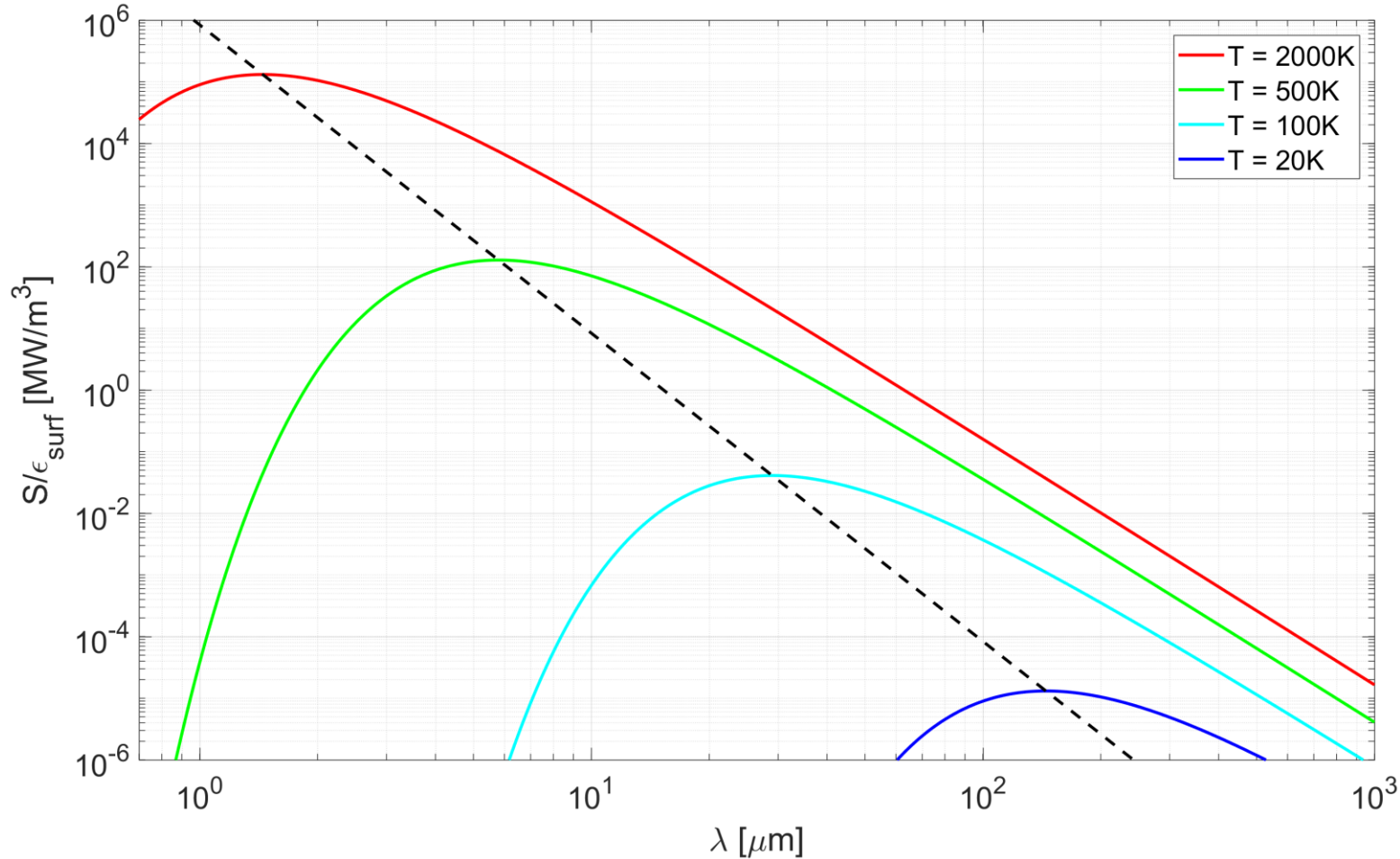


In accordo con la legge di Planck, ogni corpo ad una data temperatura T emette radiazione elettromagnetica, con distribuzione spettrale avente un picco generalmente nella zona dell'infrarosso (IR)

$$700 \text{ nm} < \lambda < 1 \text{ mm}$$

$$S(\lambda, T) = \epsilon_{surf} \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1}$$

Termografia



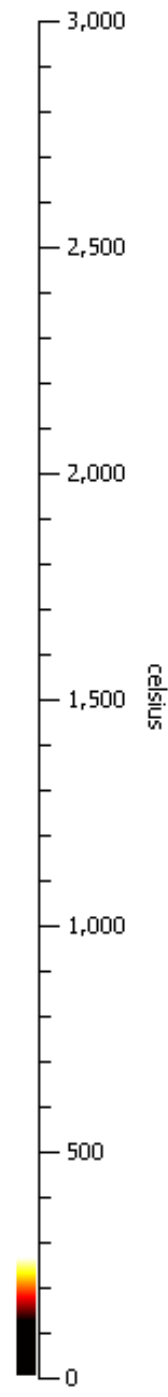
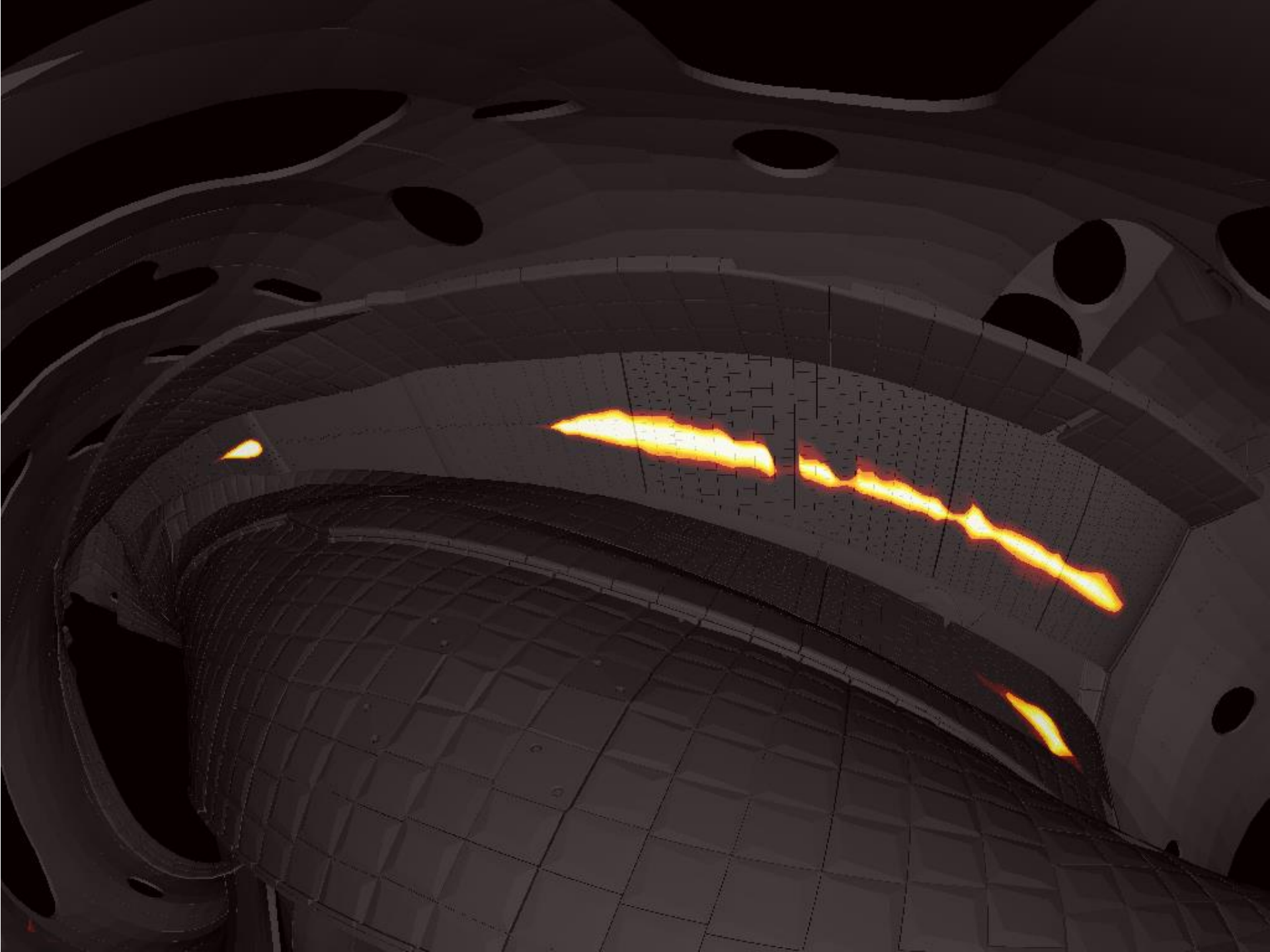
Un sensore a infrarossi avente risposta spettrale in un determinato range $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$ acquisirà un segnale che può essere usato, mediante opportuna calibrazione, per misurare la temperatura del corpo.

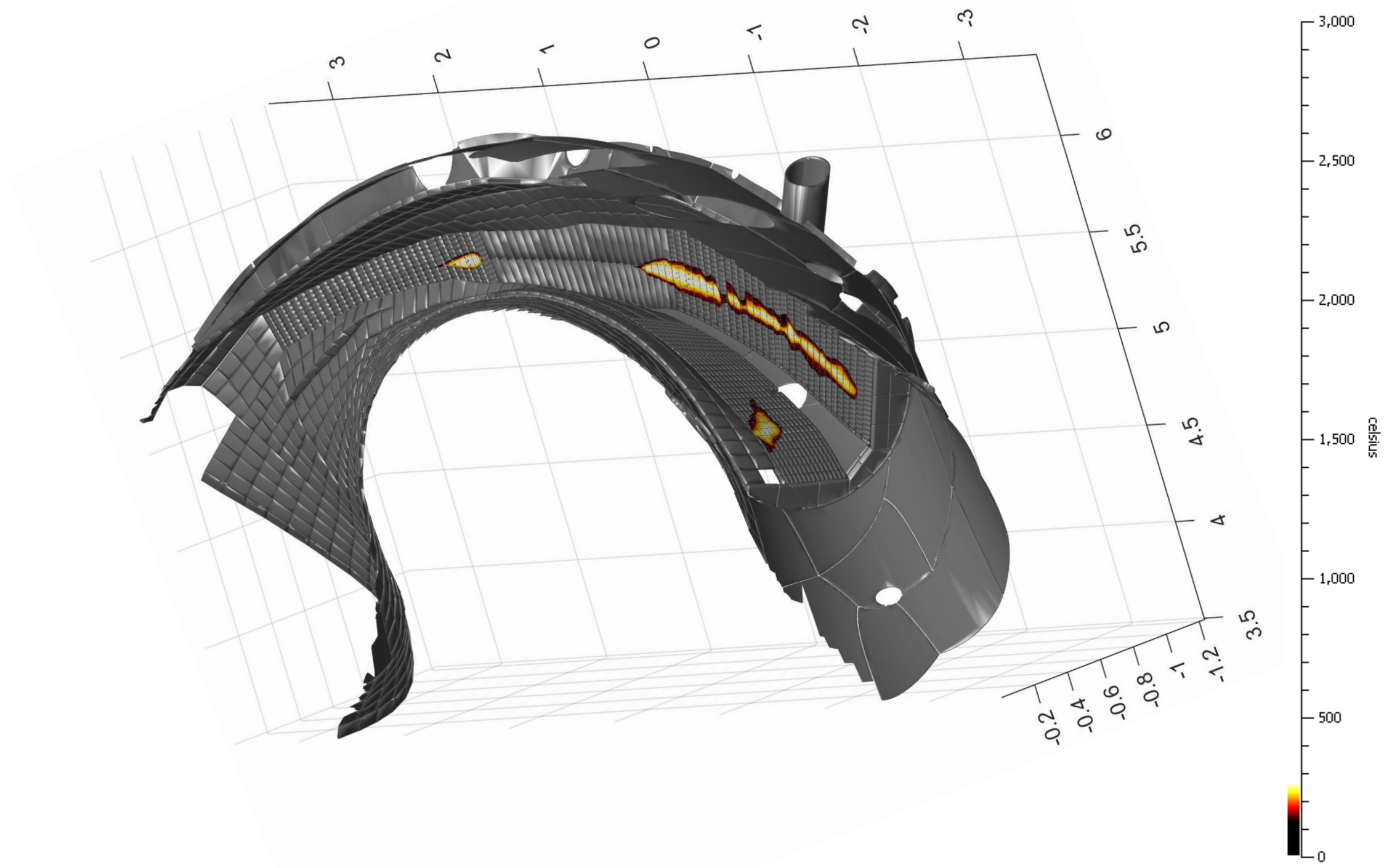
$$S(\lambda, T) = \epsilon_{surf} \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1}$$

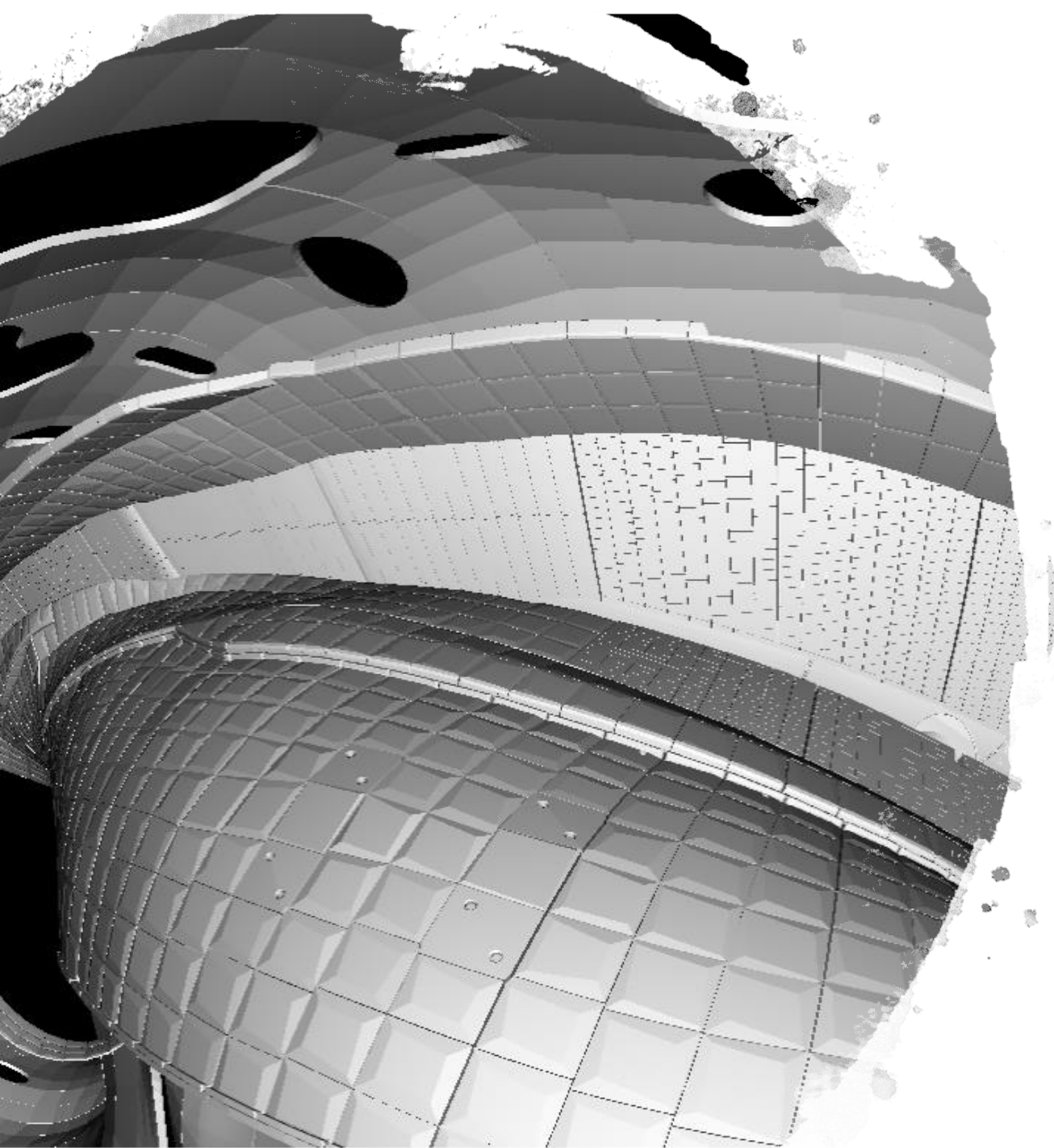
Termografia

- Perché la termografia è importante nel contesto di un reattore a fusione?
 - Le temperature all'interno di un reattore a fusione sono molto elevate
 - Il plasma di W7-X può raggiungere temperature dell'ordine dei 100MK
 - Le temperature nelle pareti interne del reattore possono raggiungere migliaia di gradi, ma ci sono regioni che non possono reggere a lungo carichi termici di questa portata
- Per proteggere e monitorare il reattore è importante sapere **dove** sono i carichi termici e qual è la loro **entità**
 - In questo modo è possibile, in caso di pericolo, effettuare opportune azioni di controllo per limitare i danni









WENDELSTEIN 7-X

- Costruzione

- Fase sperimentale

STRUTTURA

- Il divertore

CONFINAMENTO MAGNETICO

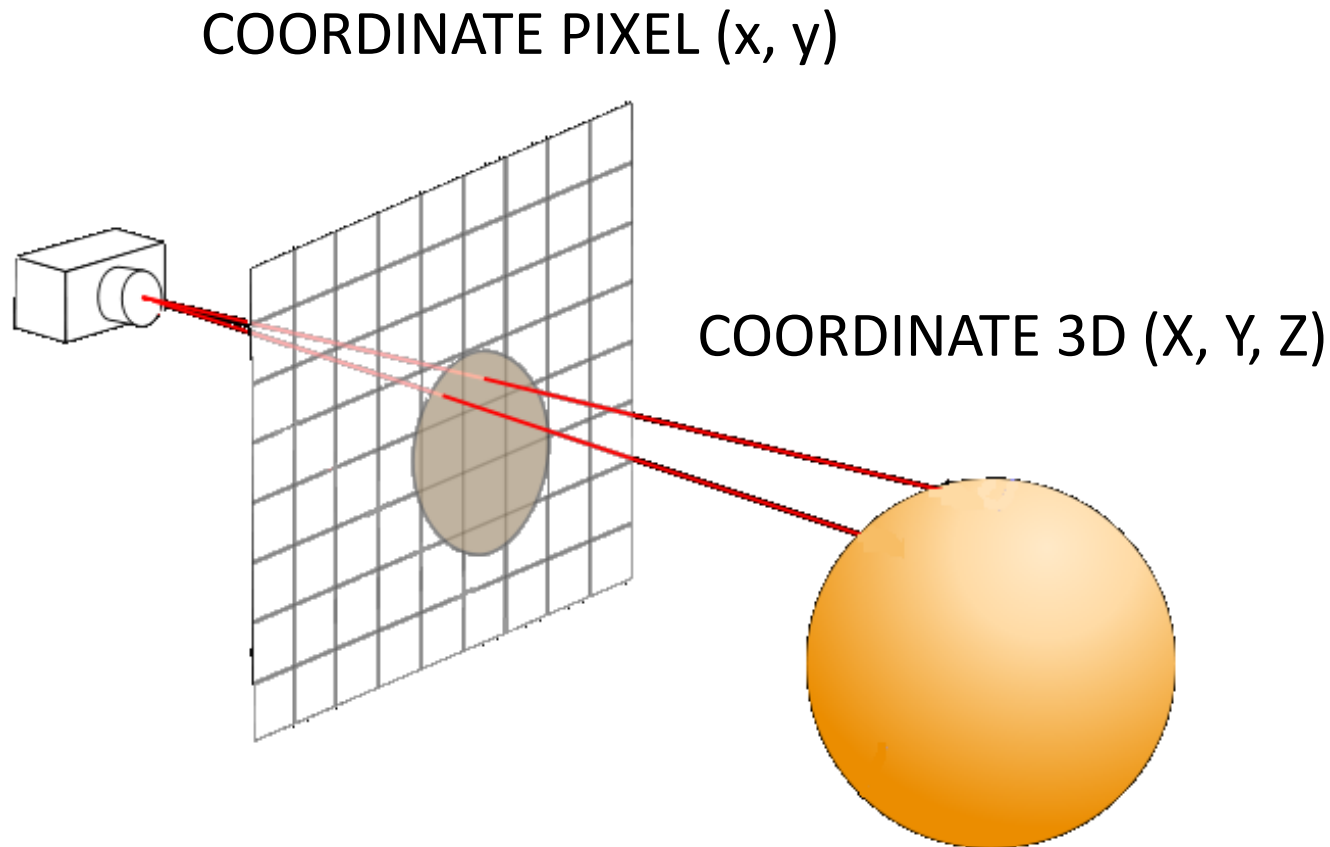
TERMOGRAFIA

→ **CALIBRAZIONE SPAZIALE**

CONTROLLO

CALIBRAZIONE SPAZIALE

Calibrazione Spaziale



PROBLEMA:

Note le coordinate di alcuni punti nello spazio e la loro proiezione sul piano immagine, ricostruire il modello proiettivo della camera

CAMERA:

Proietta dei punti dello spazio in una griglia 2D

GEOMETRIA PROIETTIVA

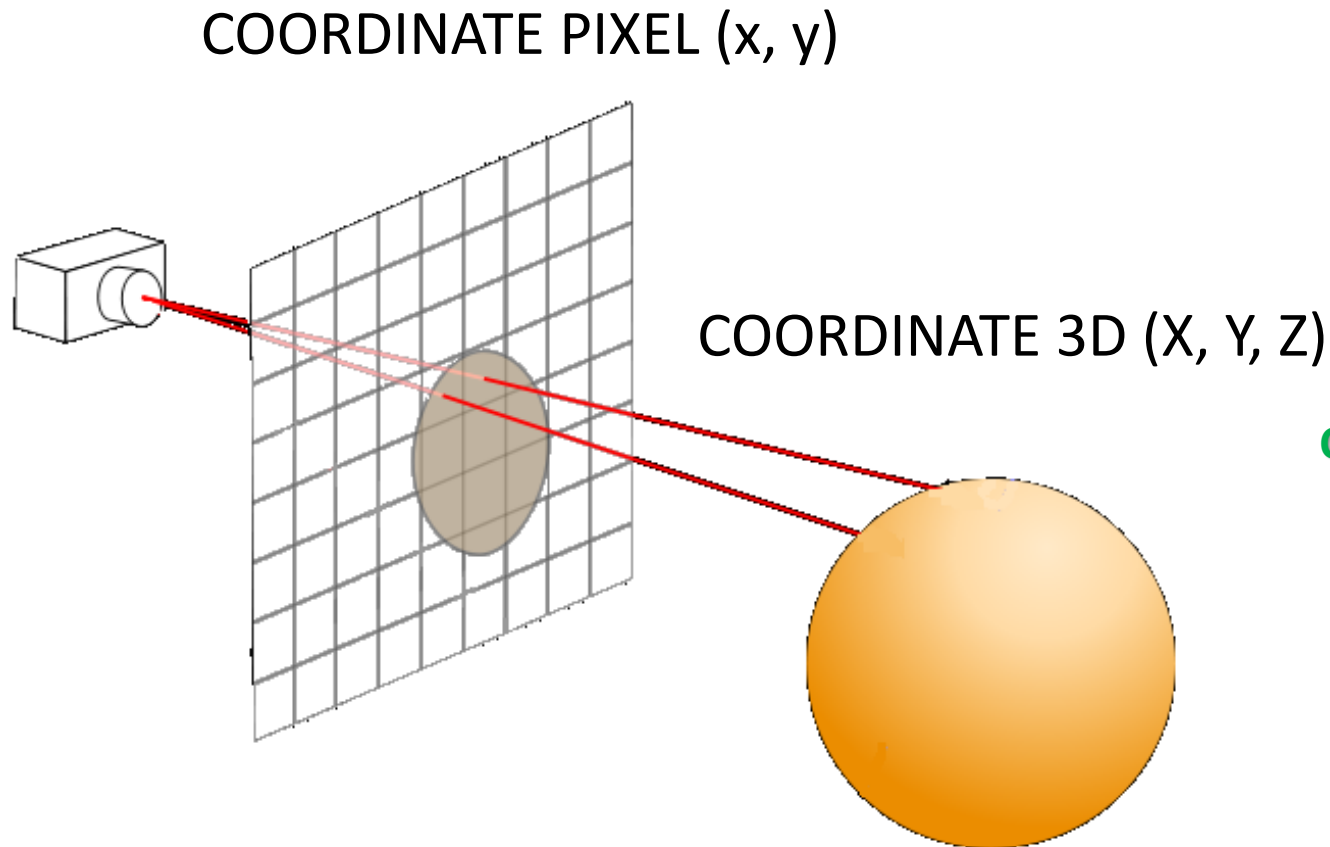
MODELLIZZAZIONE:

Parametri estrinseci: posizione e orientamento della camera

Parametri intrinseci (indipendenti dalla posizione): focale, angolo di vista, dimensione del pixel, punto principale, ecc.

Parametri di distorsione: effetto di distorsione dovuto alla lente

Calibrazione Spaziale



PROBLEMA:

Note le coordinate di alcuni punti nello spazio e la loro proiezione sul piano immagine, ricostruire il modello proiettivo della camera

$$\mathbf{x} = f(\mathbf{X}, \mathbf{p})$$

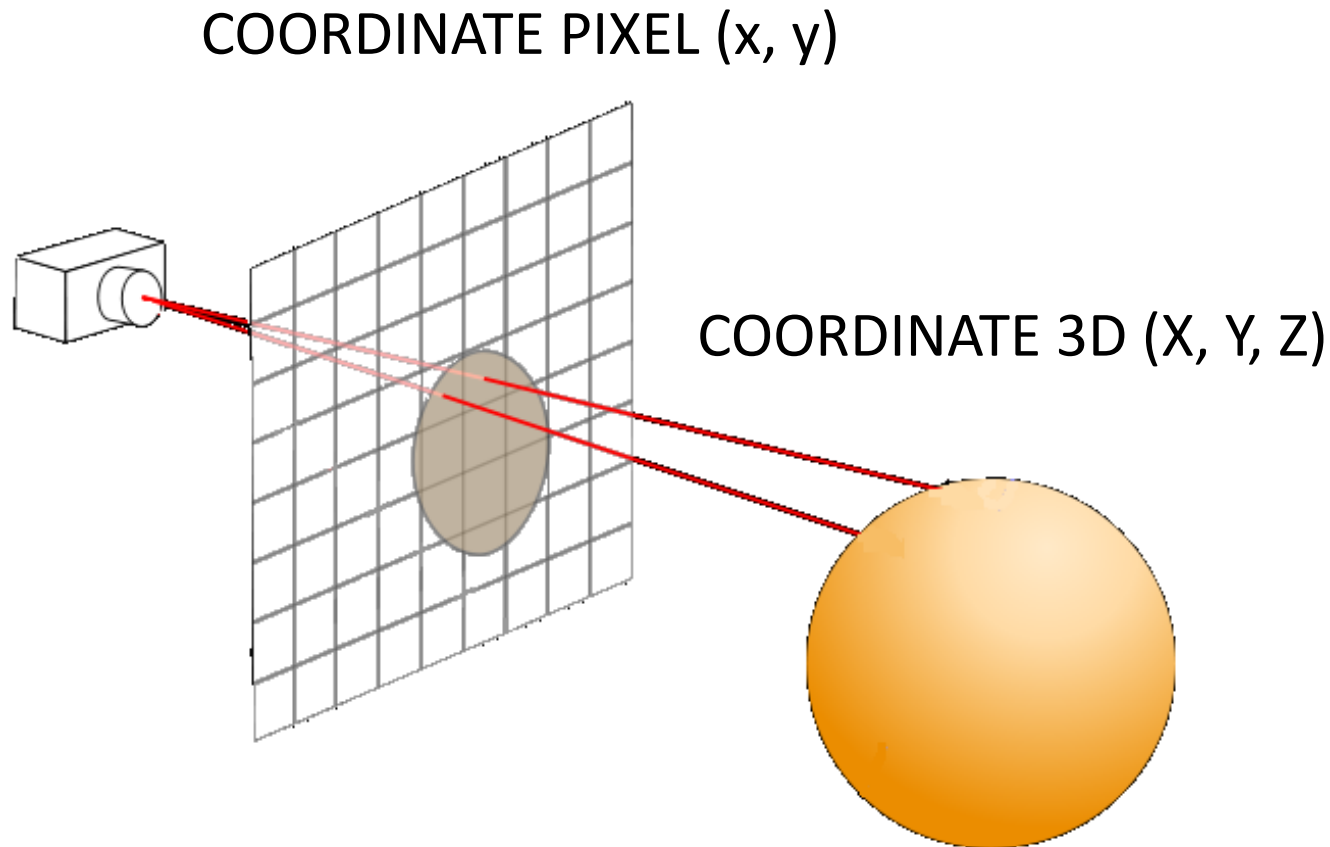
COORDINATE
IN PIXEL

COORDINATE
3D

PARAMETRI
DEL MODELLO
(incogniti)

Regressione non lineare

Calibrazione Spaziale



- Noto un punto qualsiasi nello spazio e noto il modello proiettivo della camera è possibile ricostruire univocamente la posizione del punto nella griglia 2D
- Noto un punto nella griglia 2D e noto il modello proiettivo della camera è possibile ricostruire univocamente la posizione del punto nello spazio, **SOLO SE** si conosce la distanza del punto nello spazio dalla camera. Per poterlo fare è necessaria una terza equazione, che definisca la superficie osservata.

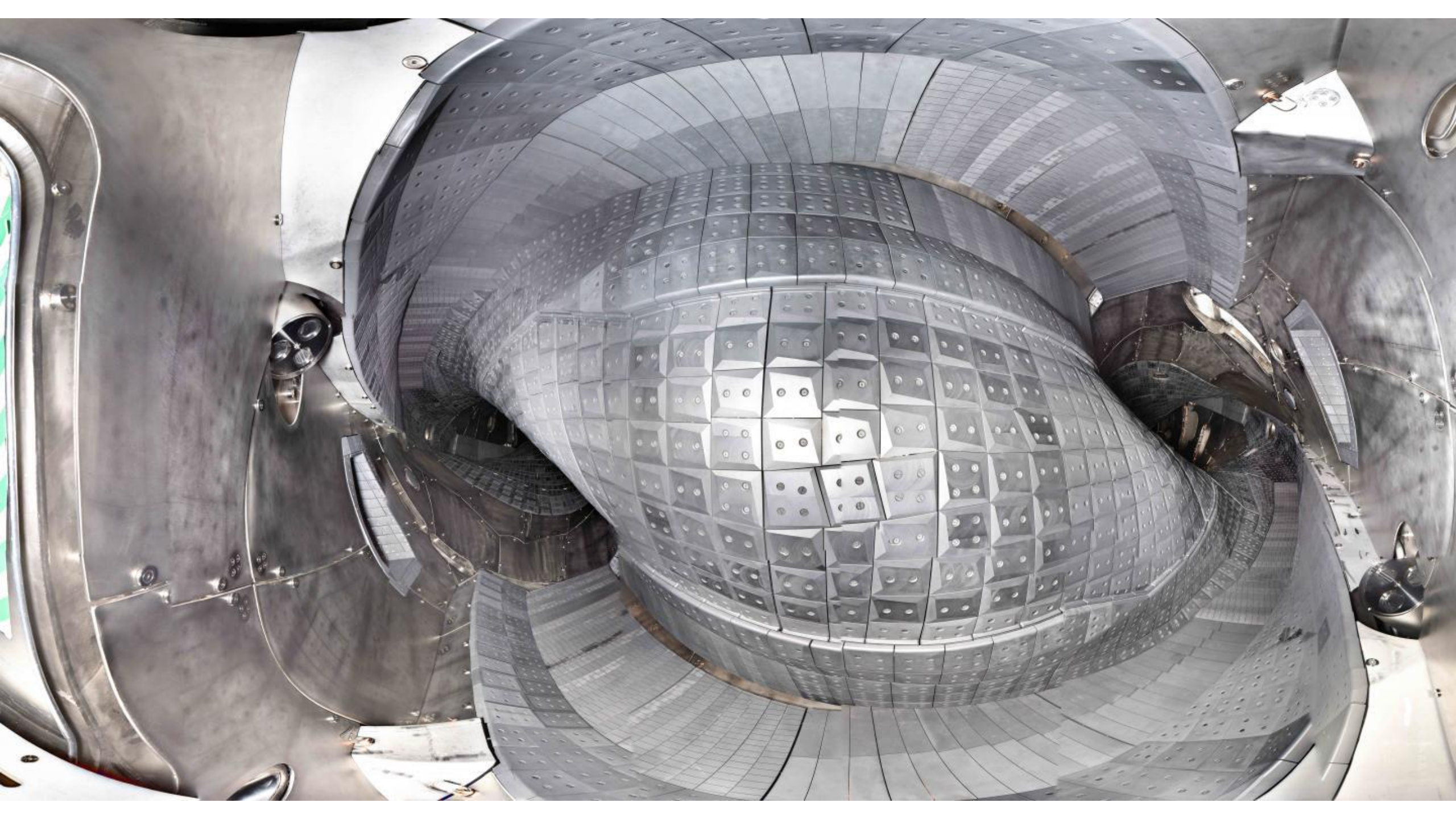


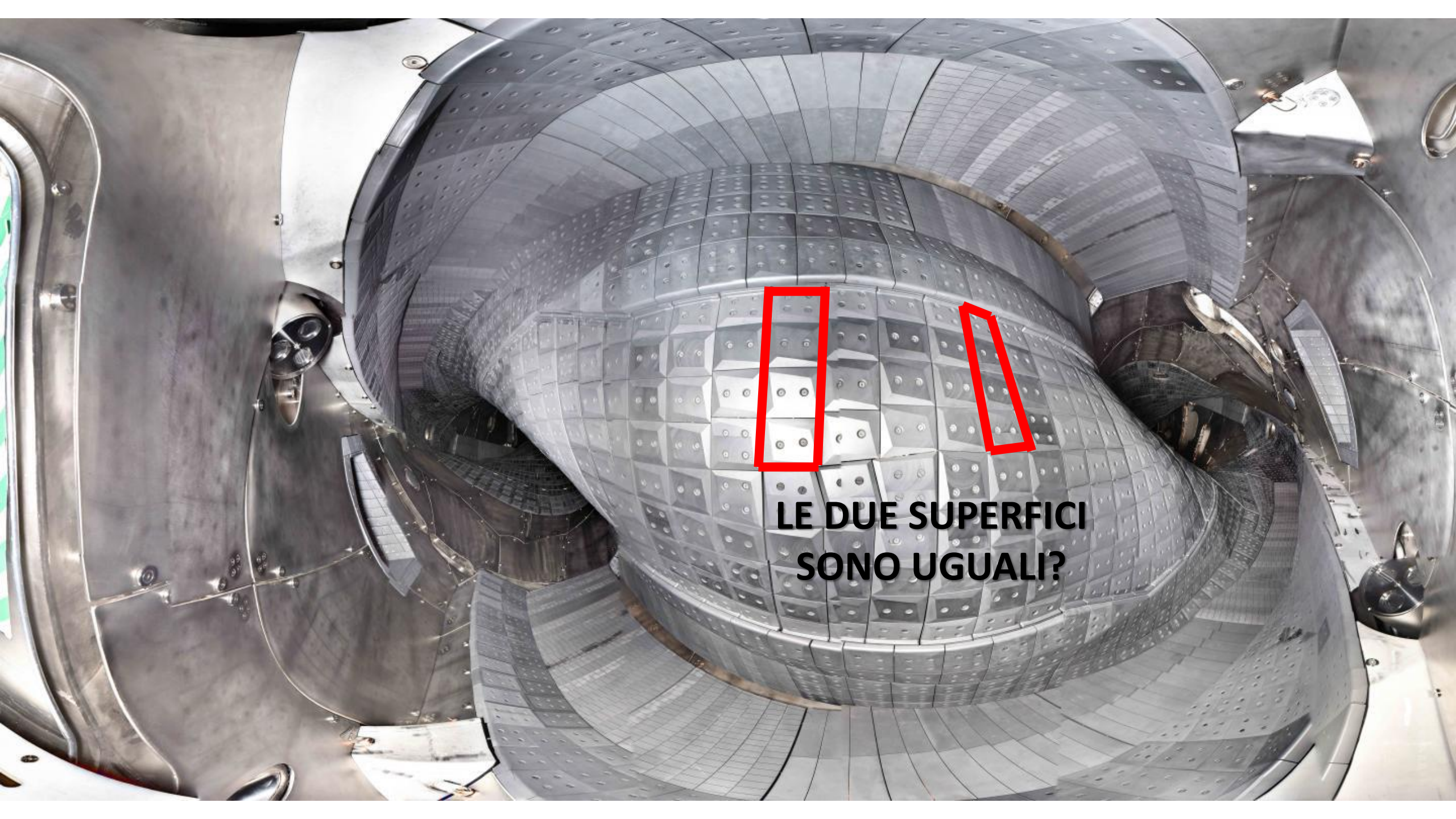


QUALE TRA LE DUE
BIGLIE È PIÙ VICINA
ALLA BIANCA?



CHI È IL PIÙ ALTO TRA I
DUE?





**LE DUE SUPERFICI
SONO UGUALI?**

Calibrazione Spaziale: Esempio

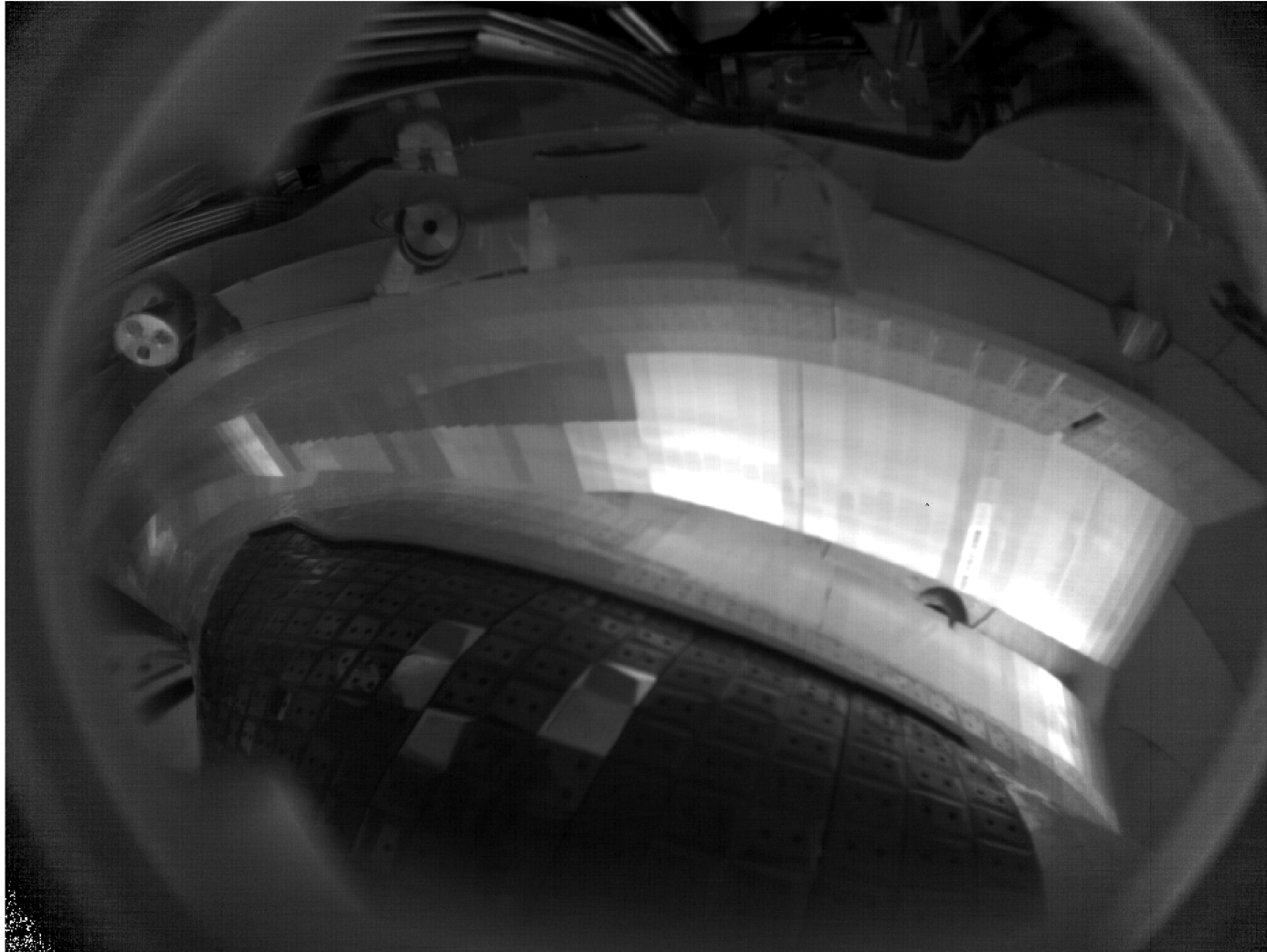
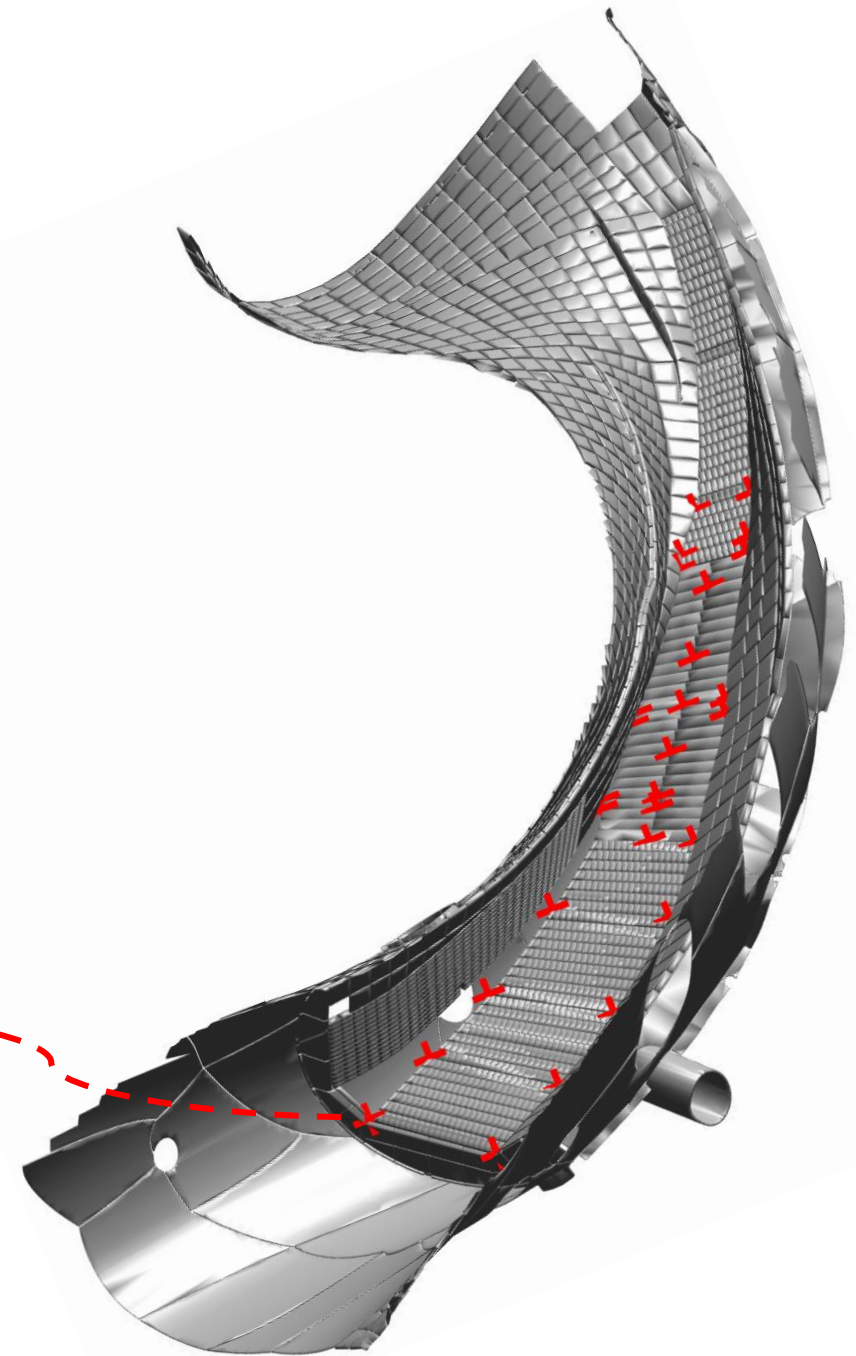
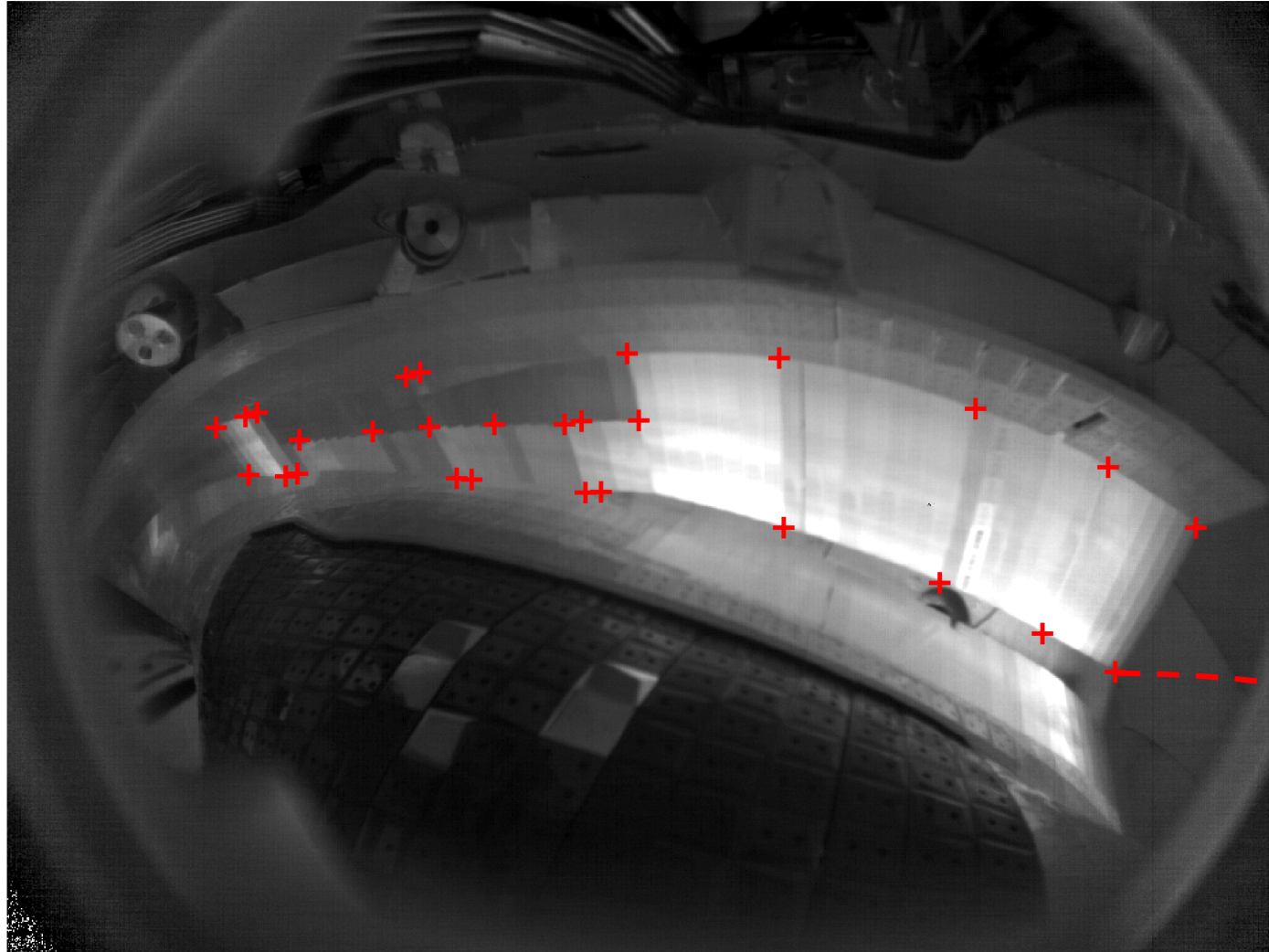


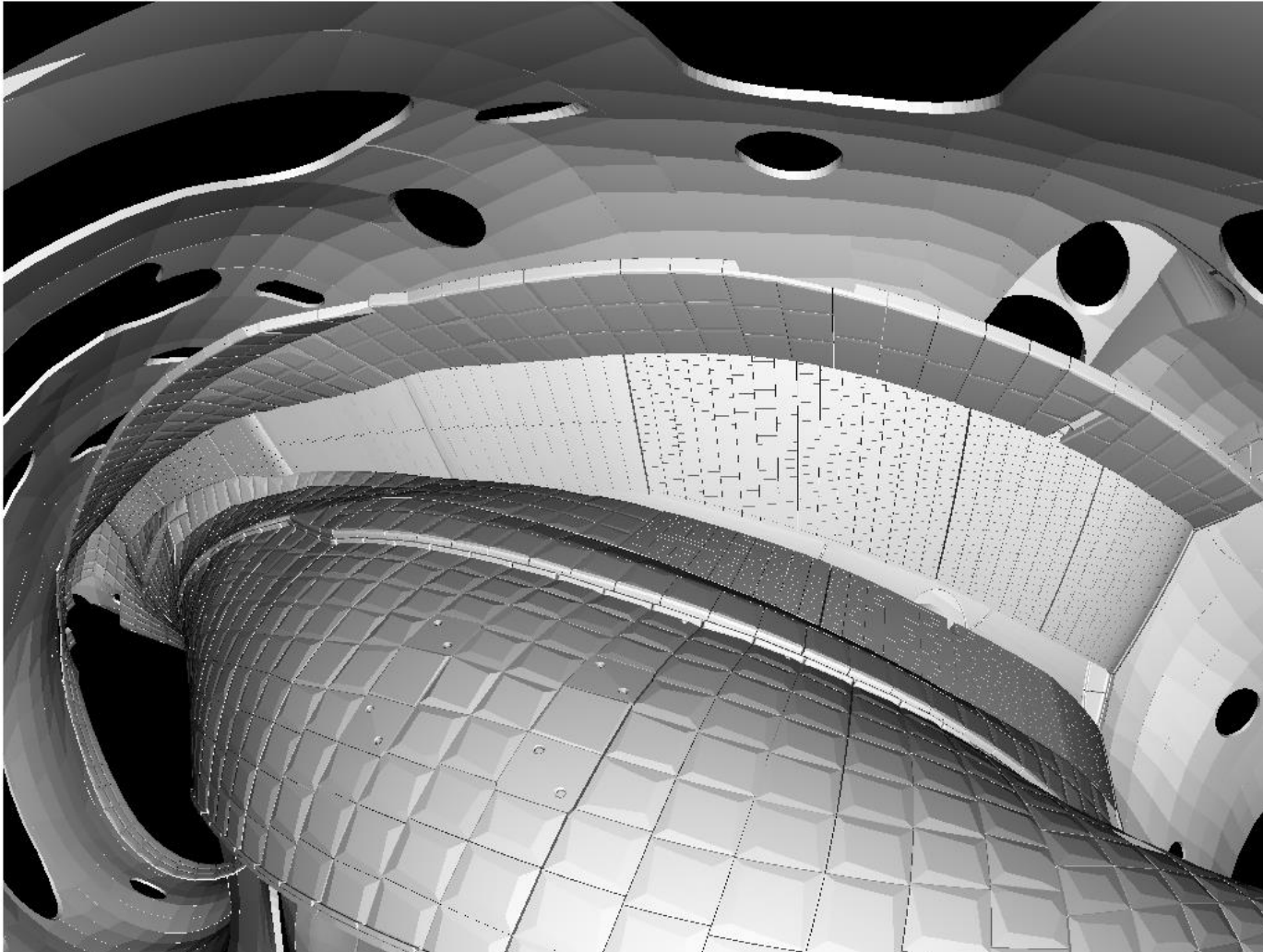
Immagine di una termocamera che osserva un divertore del reattore

- L'uniformità delle temperature lungo il divertore, in questa immagine, permette di individuare chiaramente le diverse componenti e i punti di calibrazione
- I relativi punti possono essere individuati nella superficie del divertore (si usa un modello CAD), e utilizzati per calibrare il modello proiettivo della termocamera

Calibrazione Spaziale: Esempio



Modello della scena



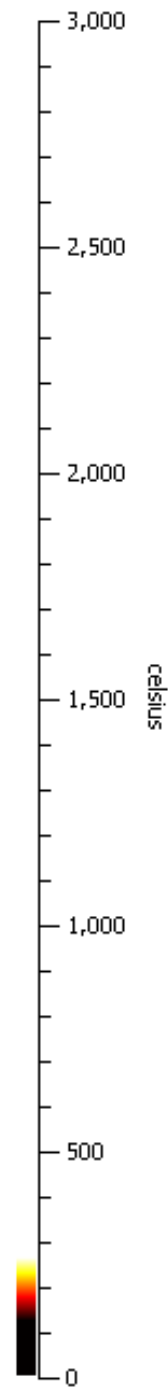
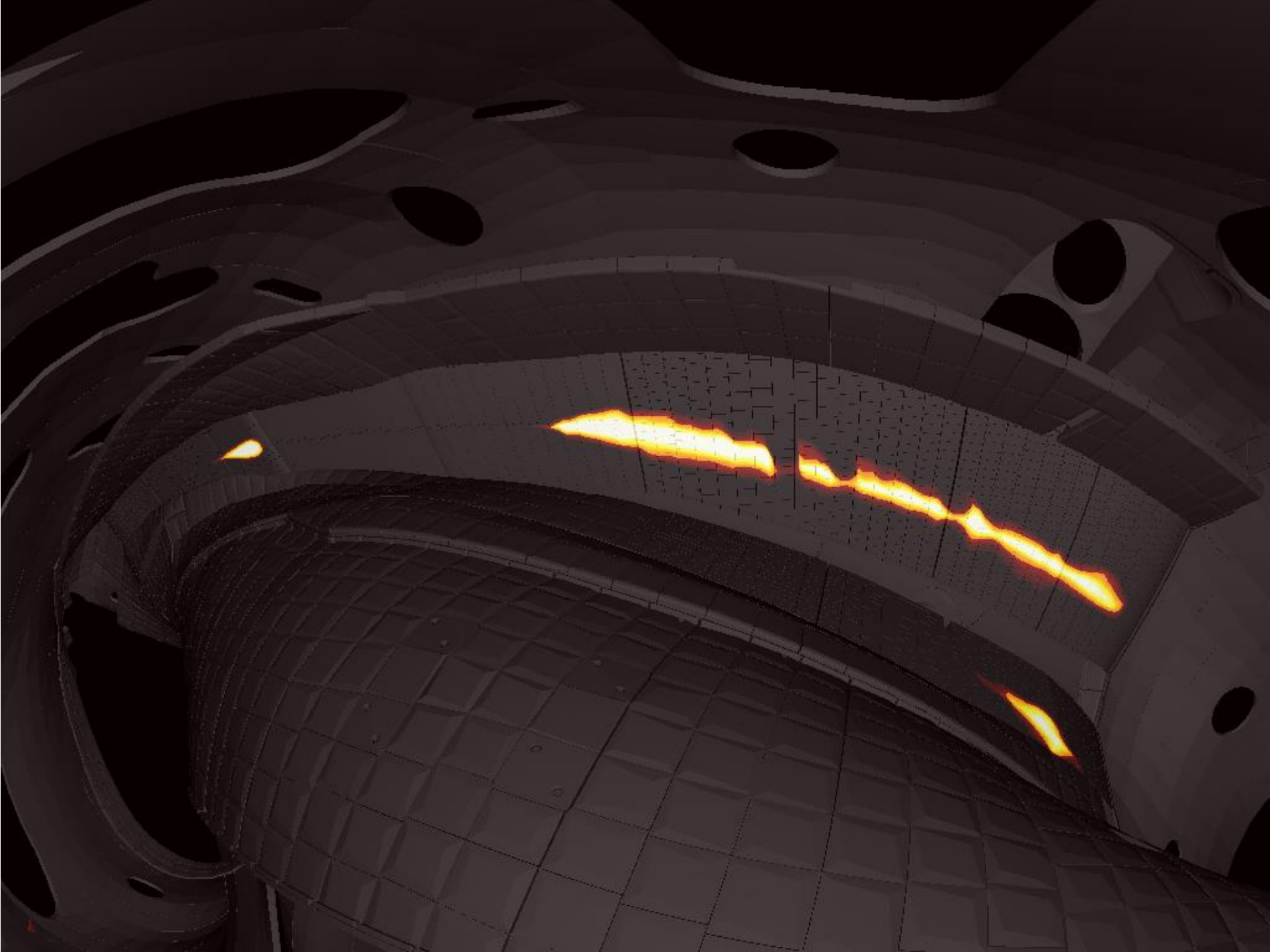
Per ogni pixel:

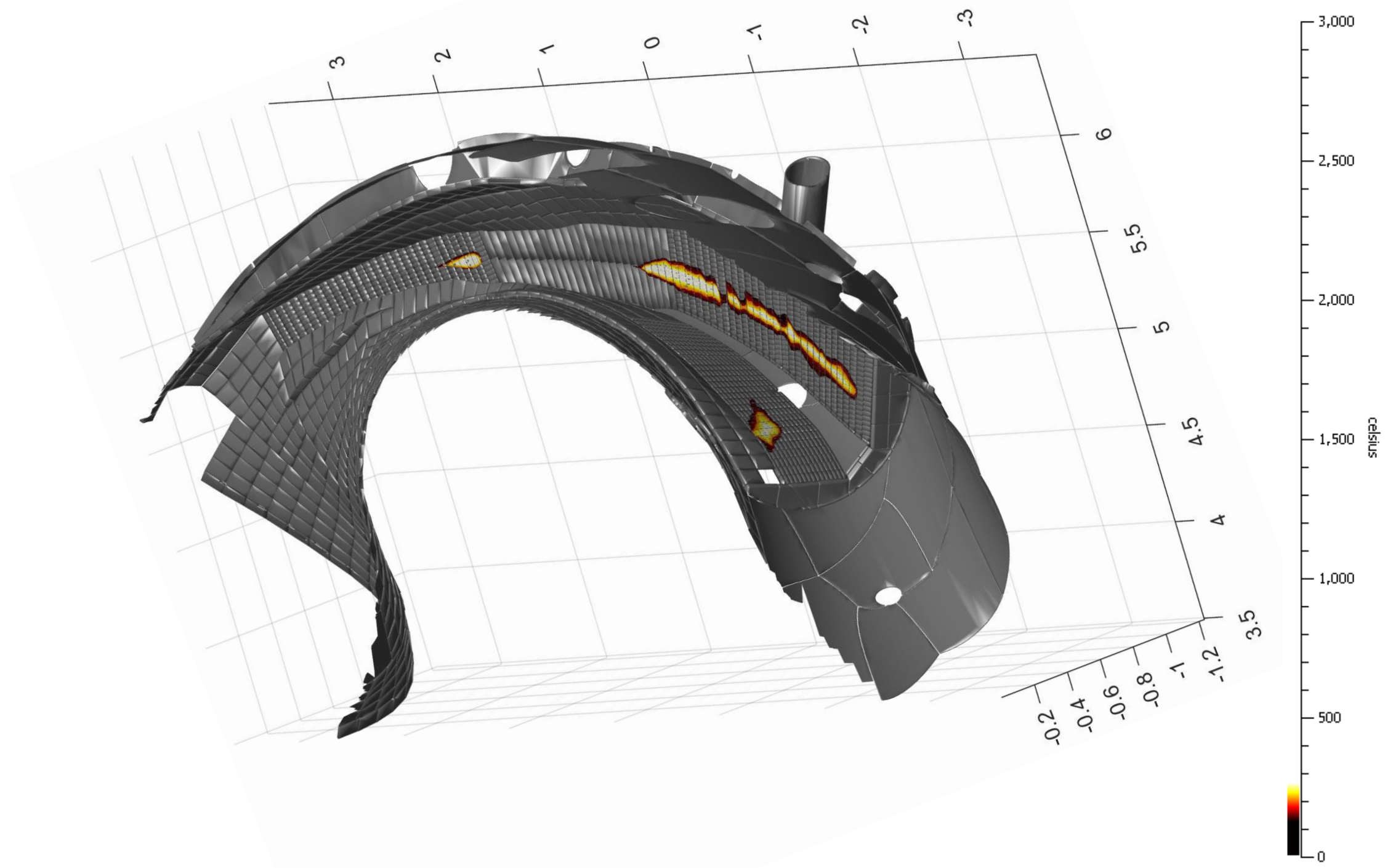
- Coordinate 3D
- Componente
- Proprietà del materiale
- Angolo di vista e distanza dalla camera



- Interpretazione temperature
- Studio del carico termico sulla superficie







WENDELSTEIN 7-X

- Costruzione

- Fase sperimentale

STRUTTURA

- Il divertore

CONFINAMENTO MAGNETICO

TERMOGRAFIA

CALIBRAZIONE SPAZIALE

→ **CONTROLLO**



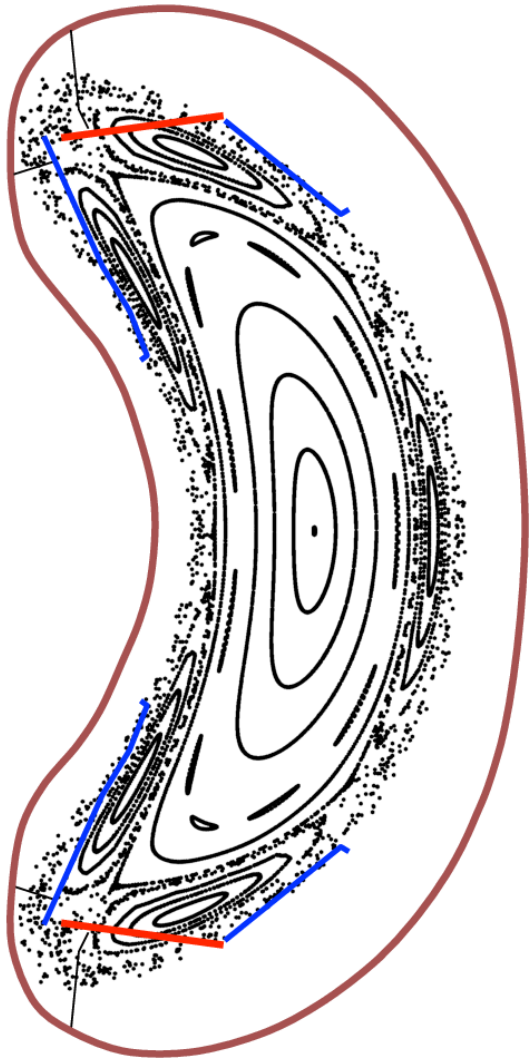
CONTROLLO

Control coils



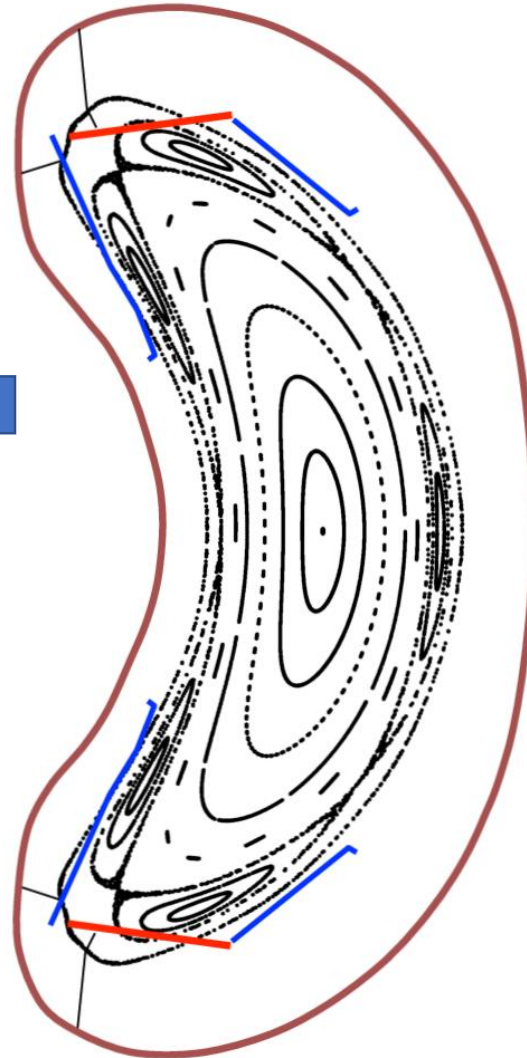
- Si trovano sotto i deflettori
- Hanno effetto sulle isole magnetiche sul bordo del plasma
- Sono alimentate indipendentemente

Control coils



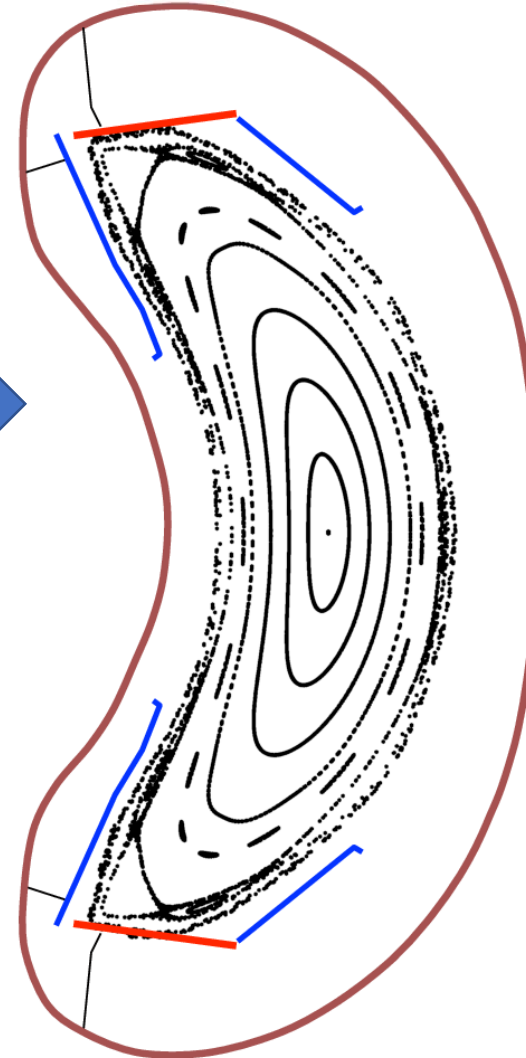
← -2.5kA

Le isole si allargano, e la strike-line si allarga di conseguenza



+2.5kA →

Le isole si restringono e si allontanano dal divertore



Control coils

VIDEO

A circular corkboard with a textured brown surface. A bright yellow pushpin is pinned to the top edge of a rectangular, light yellow sticky note. The sticky note has the words "THANK YOU" written in a bold, black, sans-serif font, arranged in two lines. The corkboard is set against a white background with some faint, light brown smudges or splatters around its edge.

**THANK
YOU**

**GRAZIE PER
L'ATTENZIONE!**