DIN

DEPARTMENT OF INDUSTRIAL ENGINEERING

PhD Course in Mechanics and Advanced Engineering Sciences (DIMSAI)

YEARLY PHD STUDENT REPORT - AY *2016/2017*

Curriculum number VI
Cycle XXX

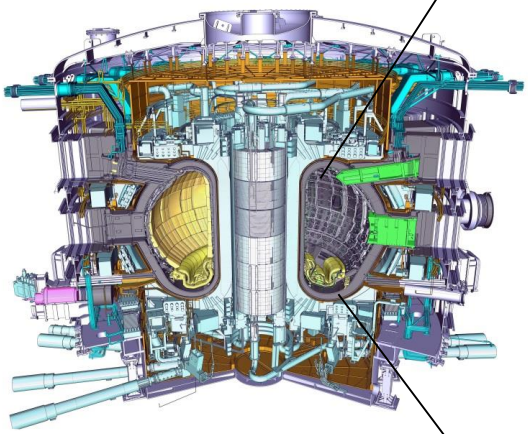
Candidate: *Davide Galassi*
Supervisor: *Prof. Domiziano Mostacci*
Co-Supervisor: *Dr. Eric Serre (University of Aix-Marseille)*

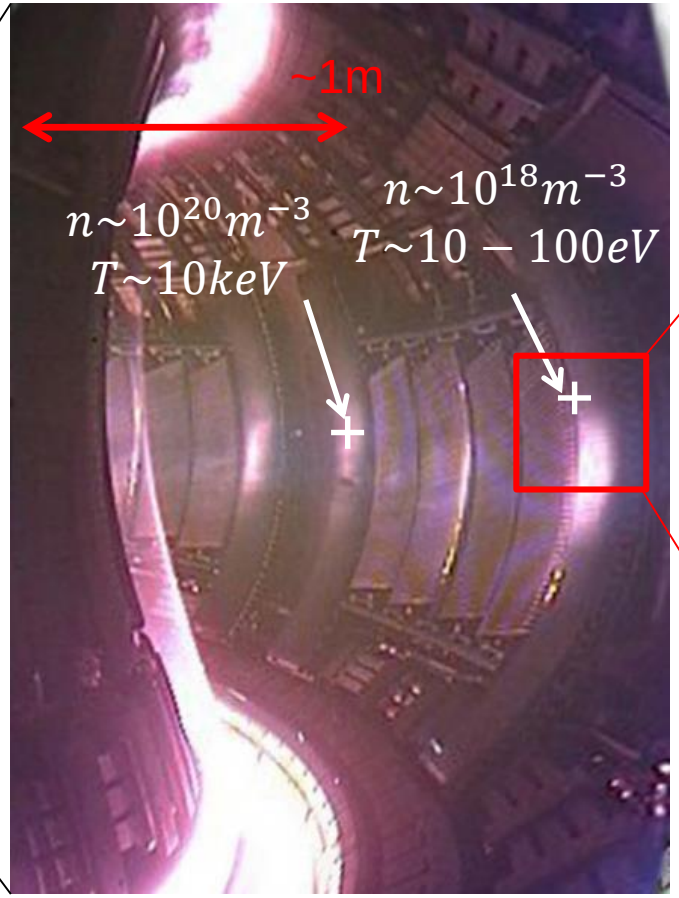
Numerical modelling of transport and turbulence in tokamak edge plasma with X-point magnetic geometry

IL PRESENTE MATERIALE È RISERVATO AL PERSONALE DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA E NON PUÒ ESSERE UTILIZZATO AI TERMINI DI LEGGE DA ALTRE PERSONE O PER FINI NON ISTITUZIONALI

Tokamak edge plasma: a turbulent fluid

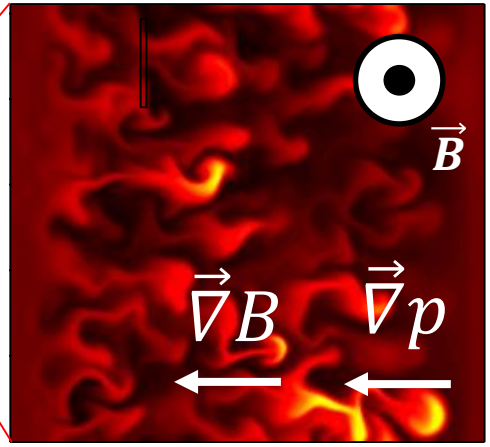
Edge plasma = region of plasma impacted by solid wall and associated boundary condition





Turbulence

(~Rayleigh Bénard)



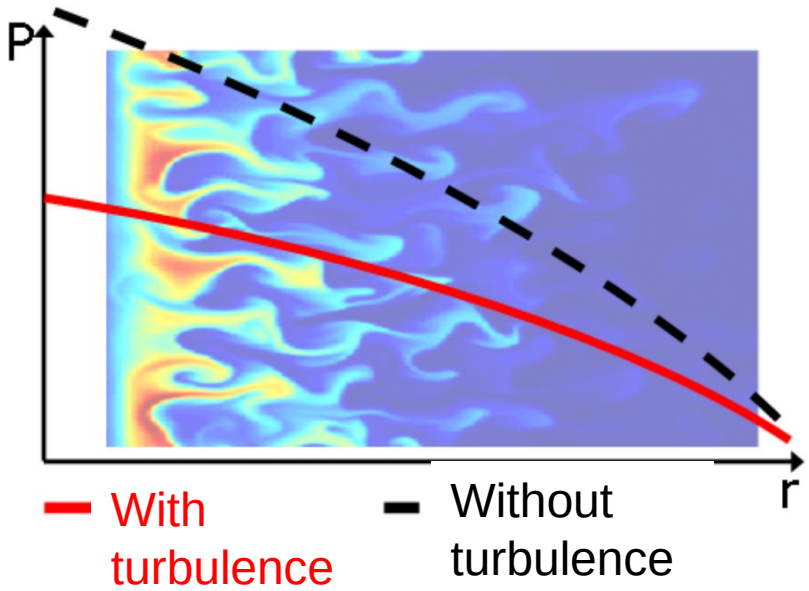
Linear growth rate

$$\gamma \propto \left(\vec{\nabla} B \cdot \vec{\nabla} p\right)^{1/2}$$

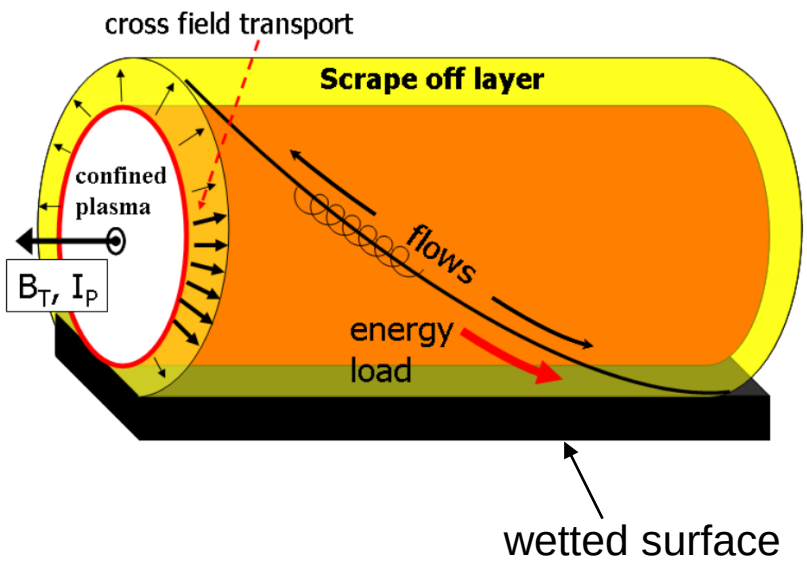
IL PRESENTE MATERIALE È RISERVATO AL PERSONALE DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA E NON PUÒ ESSERE UTILIZZATO AI TERMINI DI LEGGE DA ALTRE PERSONE O PER FINI NON ISTITUZIONALI

Two key issues for ITER: Confinement and Power exhaust

Confinement



Power exhaust



Turbulence increases effective diffusivity

↓

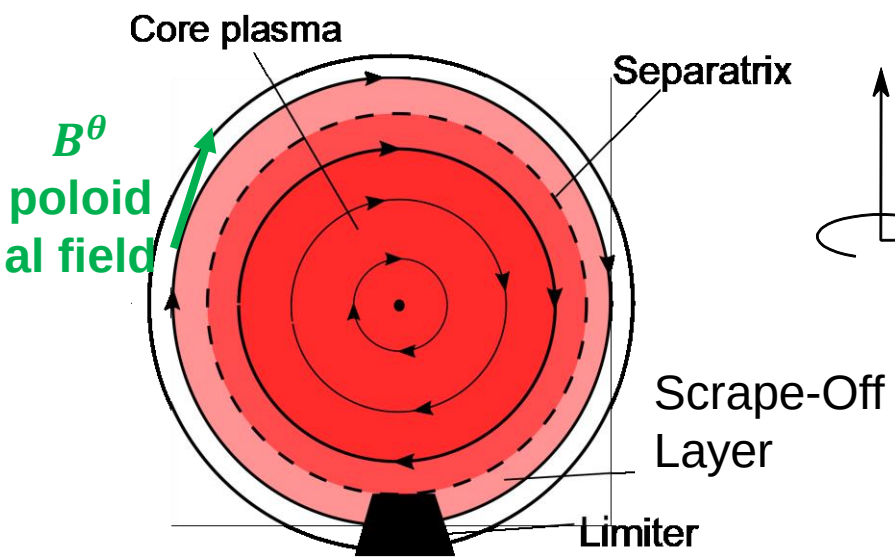
Lower gradients

↙ Degrades confinement

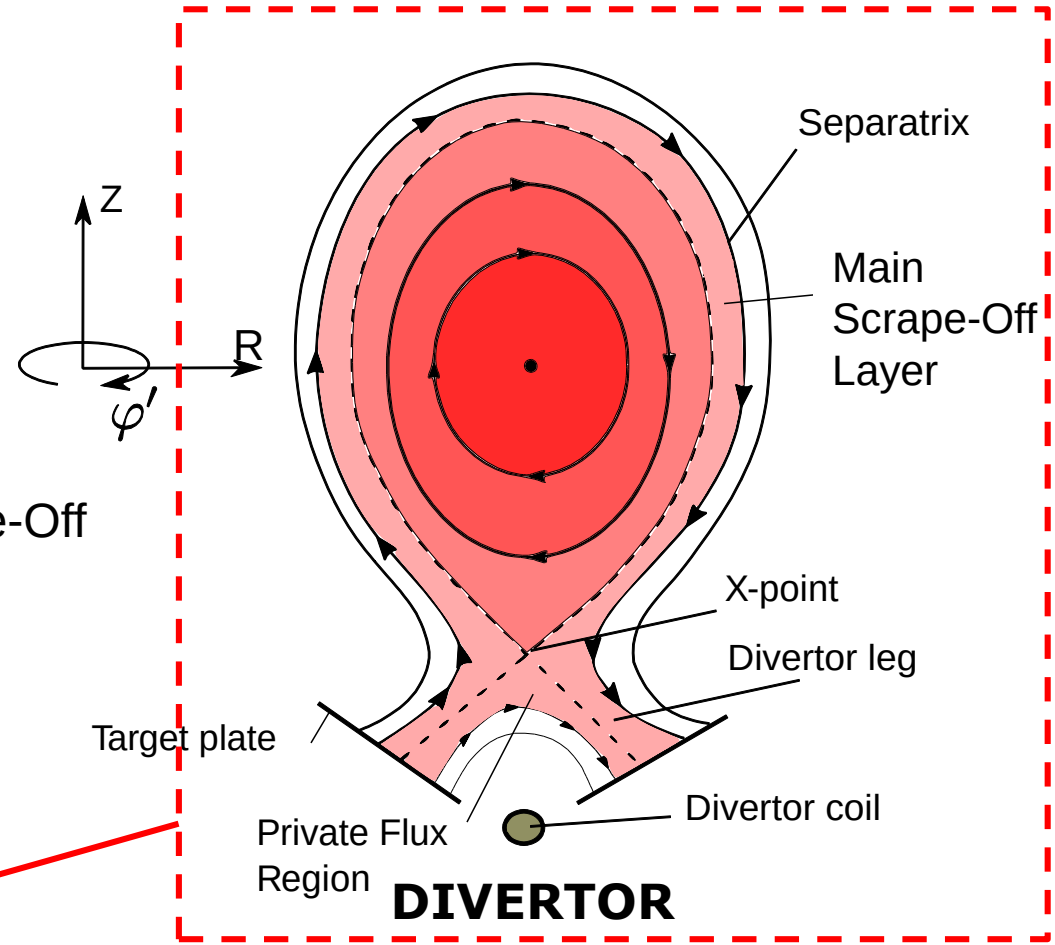
↘ Higher "wetted" surface available for power exhaust

IL PRESENTE MATERIALE È RISERVATO AL PERSONALE DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA E NON PUÒ ESSERE UTILIZZATO AI TERMINI DI LEGGE DA ALTRE PERSONE O PER FINI NON ISTITUZIONALI

Objective of my Ph.D. thesis: understanding how magnetic geometry impacts turbulence



LIMITER



DIVERTOR

Better confinement,
Will be adopted by ITER

↓

Understanding still lacks

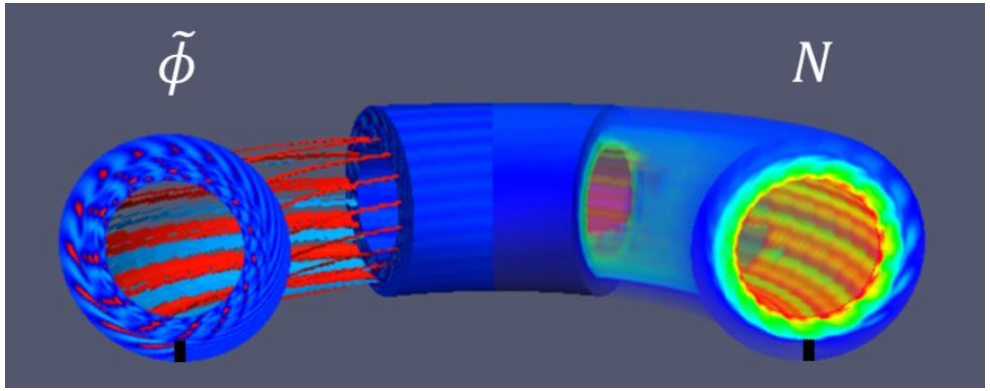
IL PRESENTE MATERIALE È RISERVATO AL PERSONALE DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA E NON PUÒ ESSERE UTILIZZATO AI TERMINI DI LEGGE DA ALTRE PERSONE O PER FINI NON ISTITUZIONALI

TOKAM3X: a 3D code for fluid turbulence simulation in edge plasma with versatile geometry

High collisionality in edge plasma

$$\nu^* \propto nT^{-3/2}$$

allows fluid approach in numerical modelling



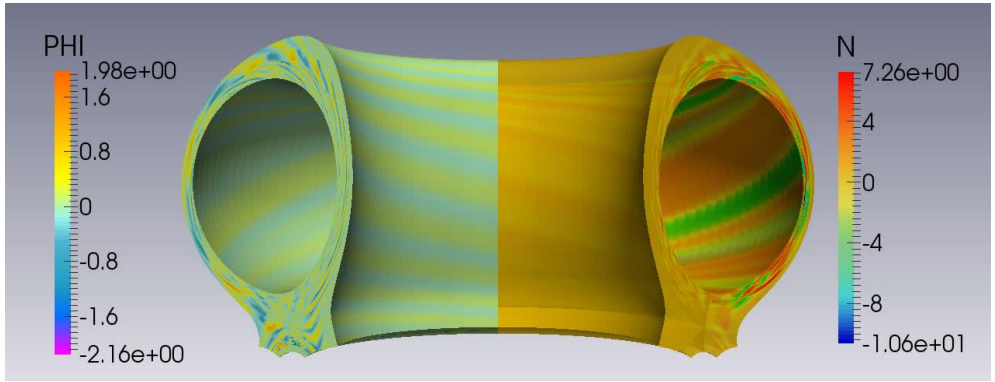
TOKAM3X model

Mass conservation

Momentum conservation

Maxwell equations (electrostatic)

Ions + Electrons



No scale separation!

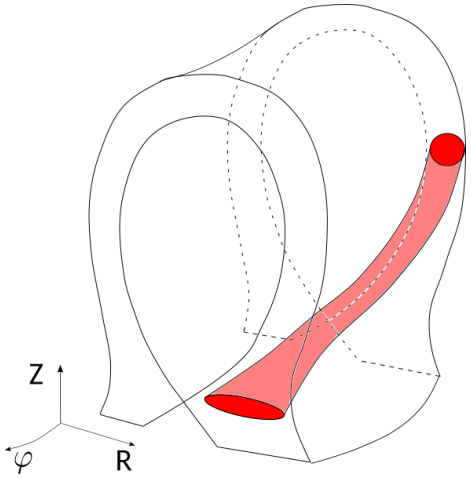
IL PRESENTE MATERIALE È RISERVATO AL PERSONALE DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA E NON PUÒ ESSERE UTILIZZATO AI TERMINI DI LEGGE DA ALTRE PERSONE O PER FINI NON ISTITUZIONALI

The shape of turbulent structures follows magnetic geometry

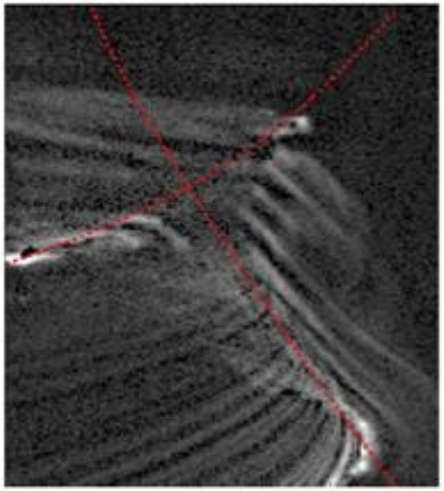
Plasma strongly anisotropic $\rightarrow$ $v_{\parallel} \gg v_{\perp}$

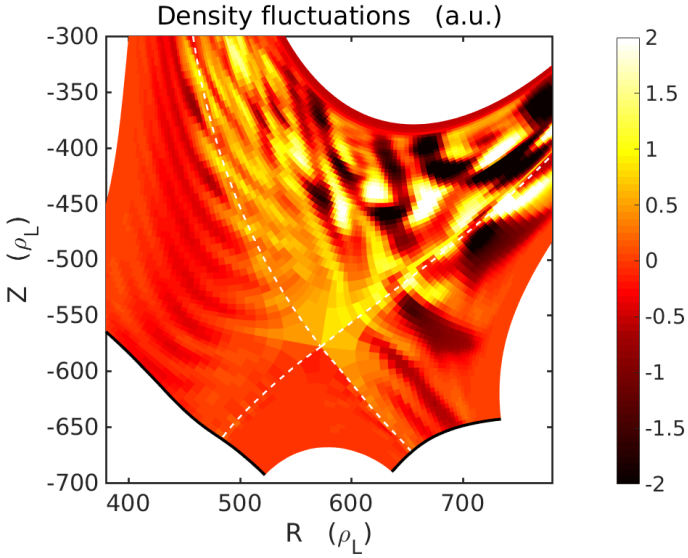
Turbulent structures **quasi-aligned on magnetic flux-tubes** $\vec{B} \cdot d\vec{S} = const$

$\rightarrow$ structures **radially stretched** where poloidal field B^{θ} is low, near X-point



Experiments



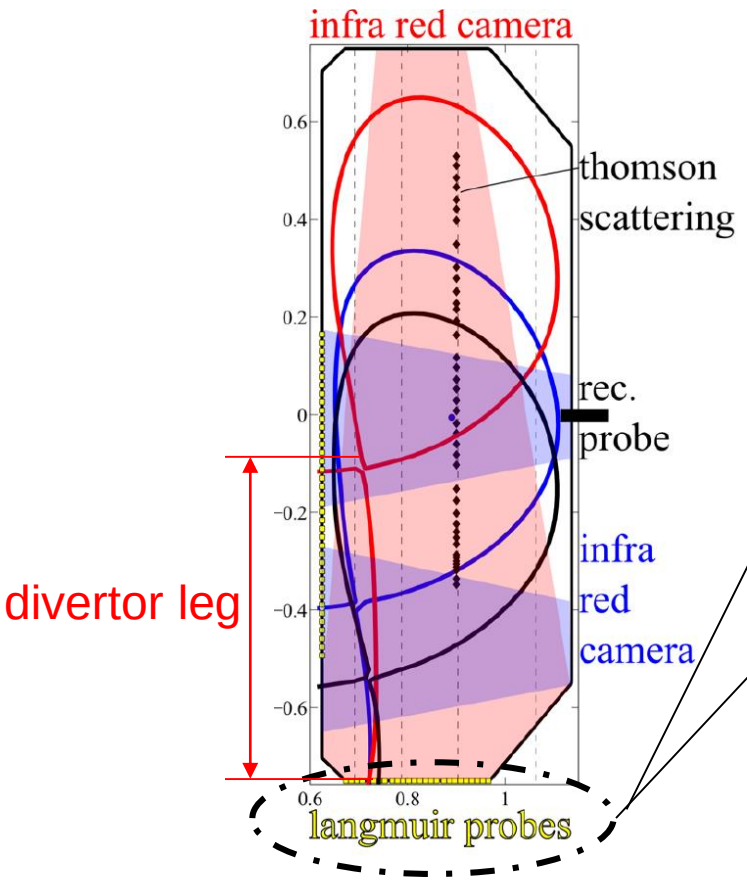


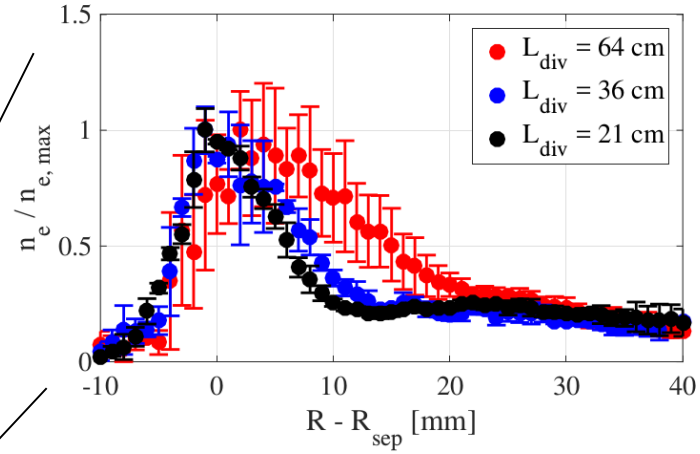
TOKAM3X simulation

IL PRESENTE MATERIALE È RISERVATO AL PERSONALE DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA E NON PUÒ ESSERE UTILIZZATO AI TERMINI DI LEGGE DA ALTRE PERSONE O PER FINI NON ISTITUZIONALI

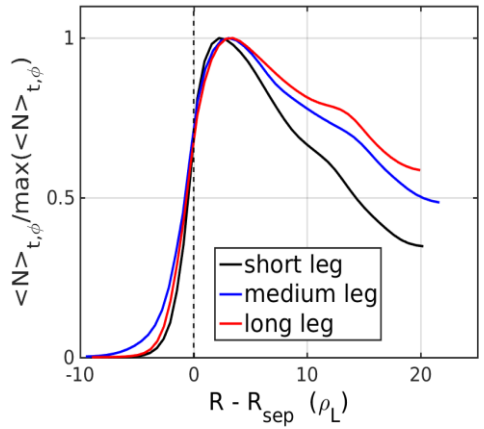
Turbulence in the divertor helps spreading the heat flux

Experimental result: heat flux profile flattens increasing the “divertor leg length”





Exp.

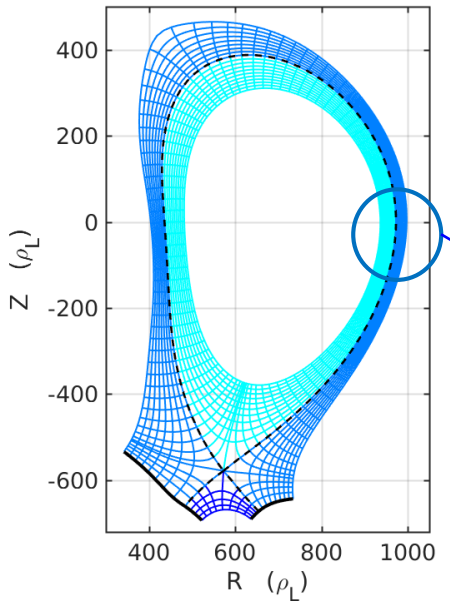


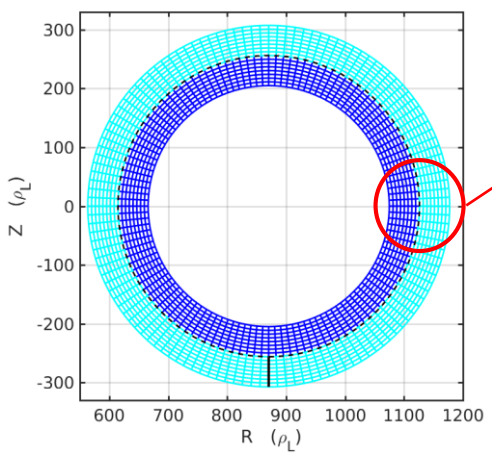
TOKAM3X simulation

Interpretation following simulations: **turbulence in the divertor** is responsible!

IL PRESENTE MATERIALE È RISERVATO AL PERSONALE DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA E NON PUÒ ESSERE UTILIZZATO AI TERMINI DI LEGGE DA ALTRE PERSONE O PER FINI NON ISTITUZIONALI

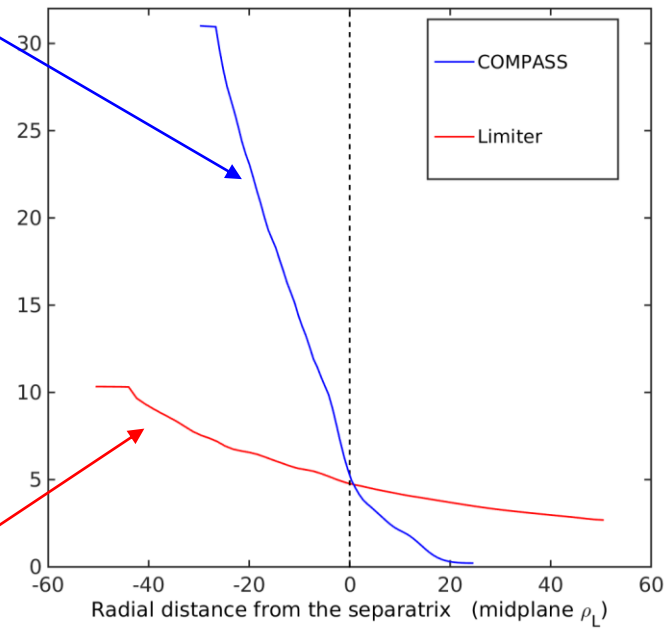
Divertor geometry increases the stability of the system





Two simulations driven with the **same particle source, but different geometry**

Average density radial profiles (a.u.)



In divertor simulations, steeper density gradient

→ higher stability

Two causes identified:

- Globally lower drive for instability
  $$\vec{\nabla} B \cdot \vec{\nabla} p$$
- Higher magnetic shear (radial change in field line inclination)

  → stabilizing

IL PRESENTE MATERIALE È RISERVATO AL PERSONALE DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA E NON PUÒ ESSERE UTILIZZATO AI TERMINI DI LEGGE DA ALTRE PERSONE O PER FINI NON ISTITUZIONALI

CONCLUSIONS

- First simulations of turbulence in the tokamak edge plasma with X-point geometry have been run with TOKAM3X, a 3D fluid turbulence code
- Turbulent structures are quasi-aligned to magnetic field, leading to radially elongated structures near the X-point, similarly to experiments
- Turbulence can help the spreading of the density profile (related to the heat flux one) at the targets
- The geometry of magnetic field lines in X-point configuration stabilizes turbulence, leading to an increased confinement

References

D. Galassi et al., Nucl. Fusion, **57**(3):036029, 2017.
D. Galassi et al., Nucl. Mat. and Energy, 2017.

IL PRESENTE MATERIALE È RISERVATO AL PERSONALE DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA E NON PUÒ ESSERE UTILIZZATO AI TERMINI DI LEGGE DA ALTRE PERSONE O PER FINI NON ISTITUZIONALI

Back-up slides

IL PRESENTE MATERIALE È RISERVATO AL PERSONALE DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA E NON PUÒ ESSERE UTILIZZATO AI TERMINI DI LEGGE DA ALTRE PERSONE O PER FINI NON ISTITUZIONALI

TOKAM3X model

Mass conservation

$$\partial_t N + \vec{\nabla}.\left((\Gamma - J_\parallel)\vec{b}\right) + \vec{\nabla}.\left(N(\vec{u}_E + \vec{u}^e_{\nabla \mathrm{B}})\right) = S_N + D_N \nabla_\perp^2 N$$

Parallel momentum conservation

$$\partial_t \Gamma + \vec{\nabla}.\left(\frac{\Gamma^2}{N}\vec{b}\right) + \vec{\nabla}.\left(\Gamma(\vec{u}_E + \vec{u}^i_{\nabla \mathrm{B}})\right) = -2\nabla_\parallel N + D_\Gamma \nabla_\perp^2 \Gamma$$

Vorticity conservation

$$\partial_t W + \vec{\nabla}.\left(W\frac{\Gamma}{N}\vec{b}\right) + \vec{\nabla}.(W\vec{u}_E) = \vec{\nabla}.\left(N\vec{u}^i_{\nabla B} - N\vec{u}^e_{\nabla \mathrm{B}}\right) + \vec{\nabla}.\left(J_\parallel \vec{b}\right) + D_W \nabla_\perp^2 W$$

Ohm's law

$$\eta_\parallel N J_\parallel = \nabla_\parallel N - N\nabla_\parallel \Phi$$

Vorticity definition

$$W = \vec{\nabla}.\left(\frac{1}{B^2}\left(\vec{\nabla}_\perp \Phi + \frac{\vec{\nabla}_\perp N}{N}\right)\right)$$

Drifts

$$\vec{u}_E = \frac{\vec{B} \times \vec{\nabla}\Phi}{B^2} \qquad \vec{u}^{i/e}_{\nabla \mathrm{B}} = \pm 2T_{i/e}\frac{\vec{B} \times \vec{\nabla}B}{B^3}$$

Interchange (RBM)

Drift Waves

Kelvin Helmholtz

$k_\perp \ll 1/\rho_L$

$\delta \simeq \pi/2$

Here isothermal version, no neutrals

Boundary conditions

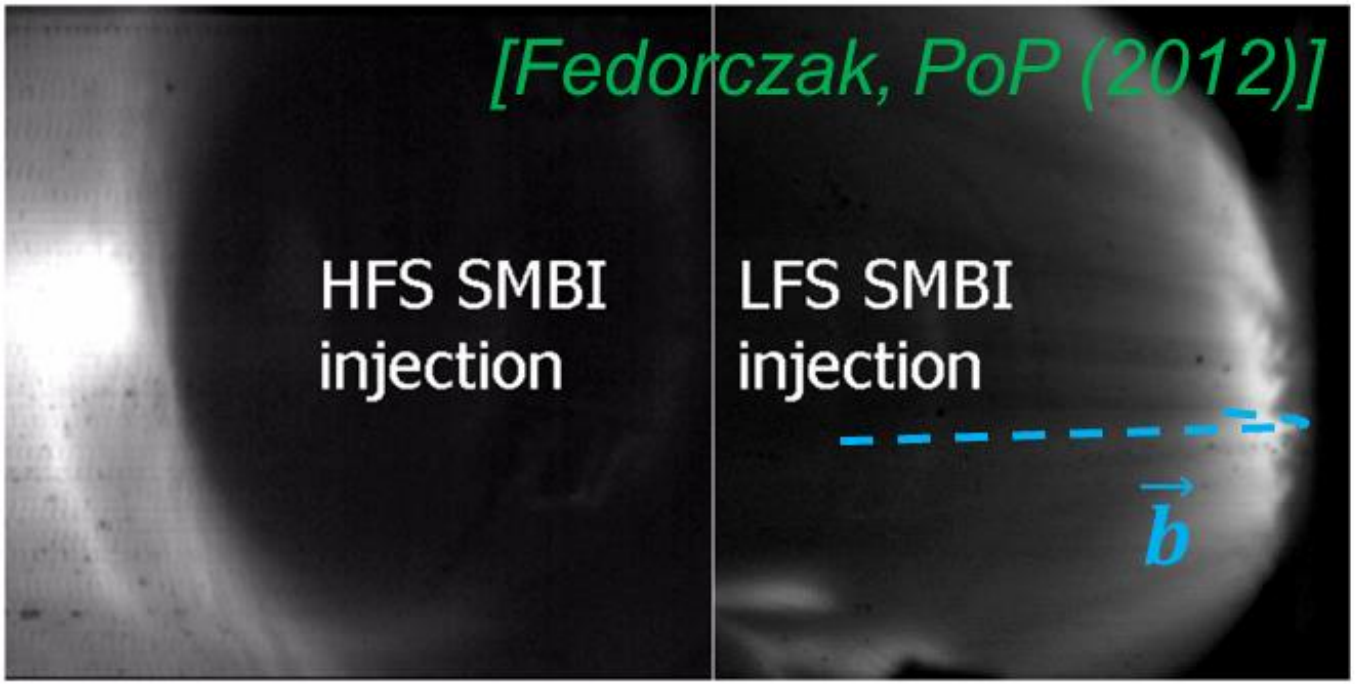
- Bohm conditions in $\parallel$ direction in the SOL
- $\Gamma^\psi = 0$ at radial inner boundary
- Periodic in φ
- Periodic in θ for closed field lines

Improved, in order to avoid artificial asymmetries

(P. Tamain JCP 2016)

IL PRESENTE MATERIALE È RISERVATO AL PERSONALE DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA E NON PUÒ ESSERE UTILIZZATO AI TERMINI DI LEGGE DA ALTRE PERSONE O PER FINI NON ISTITUZIONALI

Turbulence evidence at Low Field Side of Tore Supra



IL PRESENTE MATERIALE È RISERVATO AL PERSONALE DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA E NON PUÒ ESSERE UTILIZZATO AI TERMINI DI LEGGE DA ALTRE PERSONE O PER FINI NON ISTITUZIONALI

Flux expansion impacts turbulent ExB fluxes

Flux expansion

$$f_x(\theta,\psi) = \frac{\vec{\nabla}\psi(\theta,\psi)_{mp}}{\vec{\nabla}\psi(\theta,\psi)}$$

$$\boldsymbol{\nabla\psi \propto \frac{1}{B^{\theta}}}$$

Macroscopic consequence on ***ExB*** **fluxes proportional to flux expansion**[1]

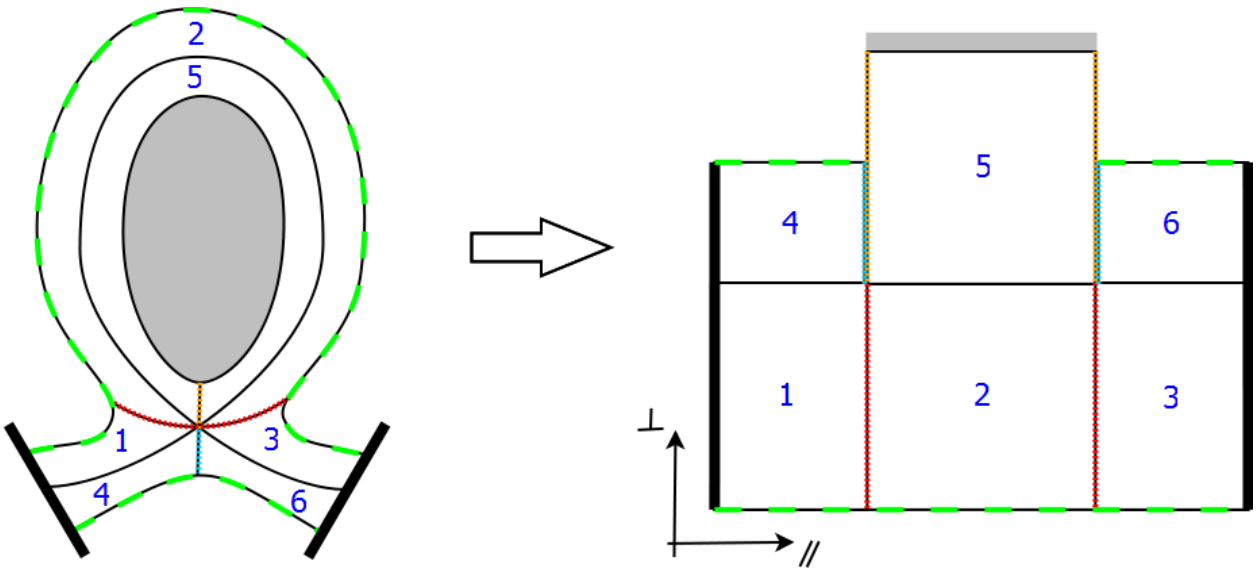
$$k_\theta \propto \frac{1}{\delta\theta} \propto f_x/R$$

$$u_E^{\psi} \simeq -\frac{1}{B}\partial_\theta\Phi \sim Rk_\theta\Phi \sim \boldsymbol{f_x} u_{E\,|mp}^{\psi}$$

IL PRESENTE MATERIALE È RISERVATO AL PERSONALE DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA E NON PUÒ ESSERE UTILIZZATO AI TERMINI DI LEGGE DA ALTRE PERSONE O PER FINI NON ISTITUZIONALI

X-point topology

Multi-domain decomposition → Flexibility to simulate any magnetic configuration (Limiter, Single-null, Double-null, Snowflake)



Example: Divertor single-null domain decomposition

Subdomains are solved in parallel ➔ Improving code performances

IL PRESENTE MATERIALE È RISERVATO AL PERSONALE DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA E NON PUÒ ESSERE UTILIZZATO AI TERMINI DI LEGGE DA ALTRE PERSONE O PER FINI NON ISTITUZIONALI