

Teoria e simulazione nei plasmi fusionistici

Matteo Valerio Falessi

*Center for Nonlinear Plasma Science and C.R. ENEA Frascati,
C.P. 65, 00044 Frascati, Italy*

Fulvio Zonca

*Center for Nonlinear Plasma Science and C.R. ENEA Frascati,
C.P. 65, 00044 Frascati, Italy
Institute for Fusion Theory and Simulation, School of Physics,
Zhejiang University, Hangzhou, China*

Lo sfruttamento dell'energia da reazioni di fusione termonucleare non è un mero problema ingegneristico e tecnologico, ma pone importanti sfide per comprendere il comportamento dei plasmi magnetizzati come sistemi complessi. Questo lavoro descrive brevemente alcuni dei problemi che si affronteranno nei prossimi anni.

Introduzione

Nei plasmi magnetizzati per lo sfruttamento dell'energia prodotta mediante reazioni di fusione termonucleare, l'energia termica è $\gtrsim 10$ keV (equivalenti a più di 10^8 K) e il plasma stesso è prevalentemente un gas di elettroni, deutoni e tritoni interamente ionizzato, contenuto in una bottiglia magnetica con topologia toroidale, illustrata in Fig. 1 nel caso della configurazione tokamak. Esempi di plasmi confinati in configurazione tokamak sono quelli del Joint European Torus (JET), che nel 2021 ha ottenuto il record di 59 MJ di energia da fusione prodotta [1], e del Experimental Advanced Superconducting Tokamak (EAST), che ha recentemente raggiunto il record di 1056 s di regime di confinamento

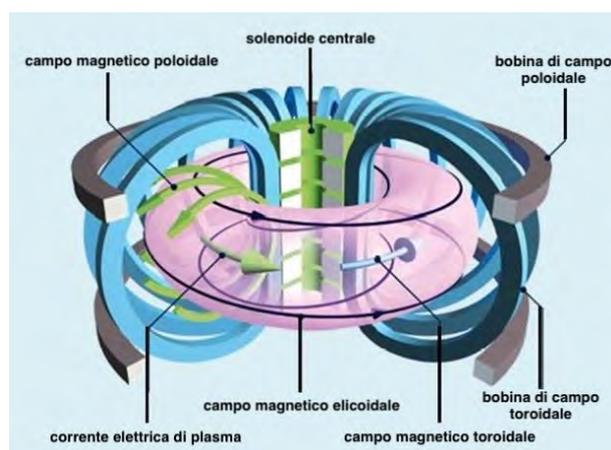


Figura 1: Illustrazione schematica del plasma confinato magneticamente in un tokamak (Immagine adattata dell'originale per cortesia di The Czech Academy of Sciences, Institute of Plasma Physics, con un ringraziamento speciale a UKAEA).

migliorato [2]. Il raggiungimento di questi risultati straordinari nel campo della fusione a confinamento magnetico, che si accompagnano ai risultati altrettanto esaltanti ottenuti nel campo della fusione a confinamento inerziale grazie all'utilizzo di potenti fasci laser con la produzione di 3.15 MJ di energia da fusione nella National Ignition Facility (NIF) [3], apre la strada allo

sfruttamento dell'energia da fusione nel prossimo futuro. In questa prospettiva, rimangono però ancora aperte importanti sfide tecnologiche e di comprensione della ricca fenomenologia alla base dei fenomeni che governano la fisica dei plasmi termonucleari o fusionistici. Il prossimo passo di importanza fondamentale verso lo sfruttamento dell'energia da fusione a confinamento magnetico è costituito dal International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) [4], la cui complessità richiederà una adeguata preparazione della sperimentazione basata sulla simulazione numerica mediante modelli teorici in grado di descriverne i processi fisici fondamentali [5, 6]. Elemento di grande novità ed interesse sarà la caratteristica unica di avere dei plasmi prossimi alla soglia di ignizione ed un bilancio di potenza dominato dalla presenza delle particelle alfa di fusione a 3.5 MeV^1 , fortemente sovratermiche [7]. La teoria e simulazione saranno inoltre ingredienti chiave anche per la fase di disegno concettuale e progettazione del Demonstration Power Plant (DEMO) [8].

Plasmi fusionistici come sistemi complessi

Il regime di confinamento di un plasma termonucleare, ossia quanto bene l'energia termica è contenuta dalla configurazione magnetica di equilibrio, dipende dai profili radiali² di densità e temperatura del plasma, nonché dalle proprietà delle fluttuazioni elettromagnetiche (turbolenza) che sono le principali responsabili del trasporto di particelle ed energia verso l'esterno e, in ultima analisi, della loro perdita. Vi è un ampio consenso sul fatto che i plasmi fusionistici siano sistemi complessi e auto-organizzati, dove lo spettro della turbolenza e le corrugazioni radiali dell'equilibrio magnetico e dei profili del plasma possono essere intesi come equilibri non lineari che evolvono nel tempo [9]. In questi equilibri non lineari, i vari elementi si comportano come interconnessi e cambiare uno di essi implica la

¹Nel caso di reazioni di fusione $D + T \rightarrow ^4\text{He} (3.5 \text{ MeV}) + n (14.1 \text{ MeV})$.

²Per radiale si intende la direzione che incrementa dal centro della colonna di plasma fino al suo bordo, seguendo la direzione di variazione massima del flusso magnetico.

modifica di tutti gli altri. Una descrizione degli scenari di plasma, intesa come evoluzione dinamica del sistema dove tutti gli elementi sono tenuti in considerazione sullo stesso piano, richiede un approccio in cui simulazione numerica e modelli teorici abbiano un ruolo centrale. Centralità che, al tempo stesso, è motivata dal-

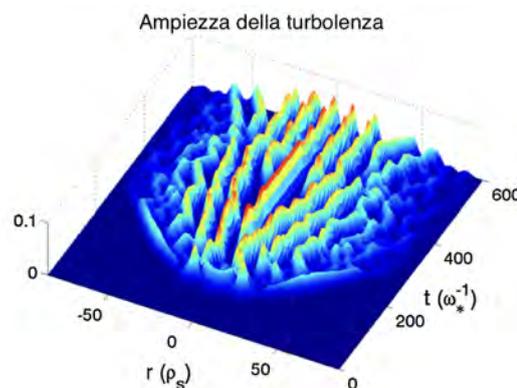


Figura 2: Andamento spazio-temporale dell'ampiezza della turbolenza di deriva. La scostamento nella coordinata radiale r rispetto alla posizione iniziale del pacchetto d'onda è espresso in unità del raggio di Larmor ionico calcolato alla temperatura degli elettroni, ρ_s . Il tempo è espresso in unità dell'inverso della frequenza diamagnetica, ω_*^{-1} . (Immagine adattata dall'originale di Ref. [14]).

l'oggettiva difficoltà nell'operare un impianto nucleare in cui la complessità non è solo quella testé descritta del sistema fisico, ma riguarda anche il sistema ingegneristico, con le sue complicazioni tecniche e tecnologiche. In altre parole, comprendere la complessità dei plasmi fusionistici non può basarsi unicamente sull'esplorazione dello spazio delle operazioni, per quanto metodica. Per queste ragioni, lo sfruttamento dell'energia da fusione non richiede solo la soluzione di un problema unicamente ingegneristico e tecnologico, bensì la comprensione dei suoi processi fisici fondamentali.

Turbolenza e interazione multiscala

Le corrugazioni radiali dell'equilibrio magnetico e dei profili del plasma, o strutture zonali, giocano un ruolo particolarmente importante in quanto diffondono lo spettro delle fluttuazioni verso

lunghezze d'onda più corte [10, 11], in generale linearmente stabili, regolando quindi l'intensità della turbolenza e del trasporto che ne consegue [12] che è proporzionale all'intensità della turbolenza [13]. Ciononostante, è proprio l'esistenza delle strutture zonali che causa la non località del trasporto turbolento, perché l'intensità della turbolenza risulta dipendere dalla proprietà del plasma in posizioni ed a tempi diversi. In Fig. 2, ad esempio, si può apprezzare l'andamento spazio-temporale della turbolenza di deriva nel piano (r, t) , dove lo scostamento nella coordinata radiale r rispetto alla posizione iniziale del pacchetto d'onda è espresso in unità del raggio di Larmor ionico calcolato alla temperatura degli elettroni, ρ_s , ed il tempo è espresso in unità dell'inverso della frequenza diamagnetica, ω_*^{-1} [14]. Lo sparpagliamento della turbolenza è evidenziato dalla comparsa di strutture solitoniche che si propagano in direzione radiale, mentre le strutture zonali sono caratterizzate da un analogo comportamento con picchi localizzati tra le creste della turbolenza di deriva. Questo grafico è ottenuto risolvendo le equazioni di Maxwell-Boltzmann nel limite di bassa frequenza rispetto alla frequenza ciclotronica ionica [15], ovvero usando la cosiddetta teoria girocinetica, alla base del moderno approccio alla teoria e simulazione numerica dei plasmi confinati magneticamente.

La grande sfida della ricerca sulla fusione a confinamento magnetico è lo sviluppo di un metodo predittivo per l'evoluzione dei profili di plasma macroscopici su scale temporali lunghe, confrontabili con il tempo di confinamento dell'energia. Su queste scale temporali, è ragionevole aspettarsi che il trasporto del plasma indotto dalle fluttuazioni giochi un ruolo importante e entri sullo stesso piano dei processi dovuti alle collisioni binarie Coulombiane tra particelle, nonché delle sorgenti e pozzi di particelle e di energia come, ad esempio, il riscaldamento e/o la guida non induttiva di corrente mediante onde a radiofrequenza o l'iniezione di fasci sovratermici di particelle. Nell'ottica di indagare questi fenomeni e di sviluppare una capacità di modellizzazione predittiva dell'intero sistema, l'approccio generalmente adottato è quello di estendere a scale temporali lunghe le simulazioni girocinetiche [5, 6, 16]. Questo approccio rimane tuttavia troppo impegnativo per la potenza di calcolo de-

gli odierni computer al peta-flop e rappresenta una sfida anche per la nuova classe di sistemi informatici ad alte prestazioni previsti, ad esempio, dall'Exascale Computing Project [17] e dall'EuroHPC Joint Undertaking [18]. Diventa quindi di fondamentale importanza la formulazione di approcci ridotti, con livelli di fedeltà diversi, per descrivere le complesse fenomenologie dei plasmi termonucleari confinati magneticamente in modo accurato e al tempo stesso con risorse di calcolo accettabili sia per costi che per prestazioni richieste. Esistono teorie che adottano una descrizione girocinetica multiscale del trasporto del plasma, accoppiata con equazioni evolutive per lo spettro delle fluttuazioni [19]. Si basano su una separazione sistematica delle instabilità su microscala, che sono alla base della turbolenza, dall'evoluzione dei profili del plasma sulle macroscale. I plasmi di interesse reattoristico, tuttavia, sono caratterizzati dal ruolo unico e peculiare dei prodotti di fusione carichi (le particelle alfa nel caso delle reazioni D-T), e più in generale delle particelle energetiche o sovratermiche, che giocano un ruolo dominante nel bilancio di potenza. Per questo, le particelle energetiche possono eccitare fluttuazioni caratterizzate da lunghezze d'onda macroscopiche. Al tempo stesso, le fluttuazioni elettromagnetiche così generate su grande scala, caratterizzate da uno spettro continuo in frequenza come le onde Alfvéniche di taglio (o *shear Alfvén waves*) in equilibri non uniformi [20], possono perturbare il plasma su scale sempre più piccole fino a quelle del raggio di Larmor degli ioni del plasma termico [21], ossia le microscale. Infine, le particelle energetiche sono in grado di eccitare instabilità su scale dell'ordine del loro raggio di Larmor, quindi su scale intermedie (le mesoscale) tra le macroscale dei profili di plasma e le microscale della turbolenza. In altre parole, attraverso le strutture zonali che queste fluttuazioni multiscale possono indurre nonlinearmente, le particelle energetiche si comportano come *mediatrici* nell'interazione tra scale diverse nei plasmi fusionistici [7, 22].

Trasporto nello spazio delle fasi nei plasmi fusionistici

La caratteristica peculiare delle particelle energetiche di dominare il bilancio di potenza di un reattore termonucleare, e quindi di agire come mediatrici nell'interazione tra scale diverse, non è la sola che rende unico il loro ruolo. Infatti, essendo caratterizzate da alte energie rispetto alla componente termica, sono soggette a deboli collisioni Coulombiane³ e, conseguentemente, la loro funzione di distribuzione può deviare in modo apprezzabile dall'equilibrio termodinamico locale. Il fenomeno descritto si verifica, in particolare, a causa dell'interazione risonante onda-particella con le fluttuazioni elettromagnetiche presenti nel plasma. Questo processo è rappresentato in Fig. 3 attraverso la tecnica delle Lagrangian Coherent Structures [23], che permette di apprezzare la forte deviazione delle traiettorie vicine alla condizione di risonanza. La

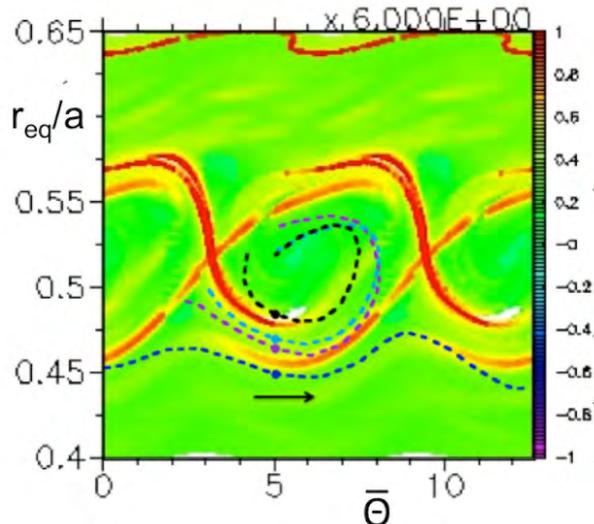


Figura 3: Interazione risonante onda-particella descritta attraverso il codice girocinetico HM-GC. Sono rappresentate diverse traiettorie di particelle nello spazio delle fasi individuato dalla coordinata radiale (normalizzata al raggio del plasma a) e dalla fase onda-particella $\bar{\theta}$. Le traiettorie sono sovrapposte alla struttura risonante prodotta dalle fluttuazioni elettromagnetiche mostrata come curve di livello dei "Finite time Lyapunov exponents" del sistema. Figura riprodotta con permesso da Ref. [24].

³Questa caratteristica discende dalla dipendenza della sezione d'urto di Rutherford dall'inverso dell'energia al quadrato.

descrizione della funzione di distribuzione risulta quindi di fondamentale importanza ed è resa possibile dall'introduzione delle cosiddette strutture zonali nello spazio delle fasi [25]. In analogia con le strutture zonali introdotte in precedenza, le strutture zonali nello spazio delle fasi non sono soggette a rapidi processi di decadimento non collisionale e possono, pertanto, essere descritte in uno spazio delle fasi ridotto descritto dagli invarianti che caratterizzano il moto di ogni particella. Per questa loro proprietà, esse sono influenzate solo dagli effetti dissipativi collisionali, dai termini di sorgente nello spazio delle fasi (sia positivi che negativi) e dai processi nonlineari. Costituiscono dunque la descrizione fisica naturale dei processi di trasporto nello spazio delle fasi nonché la loro manifestazione come modifica dei profili di plasma macroscopici [26]. Le strutture zonali nello spazio delle fasi, insieme con le strutture zonali, definiscono in ogni istante di tempo un equilibrio nonlineare, chiamato stato zonale, determinato in maniera autoconsistente con il livello di fluttuazioni elettromagnetiche presenti nel sistema. Attraverso la teoria girocinetica è possibile descrivere l'evoluzione dello stato zonale [26]. In particolare, è possibile derivare un'equazione di Schrödinger per l'intensità delle fluttuazioni elettromagnetiche, accoppiata con un'equazione di Dyson che permette di descrivere la funzione di distribuzione rinormalizzata a causa delle fluttuazioni stesse [27]. Quest'ultima equazione può essere espressa come equazione di continuità nello spazio delle fasi ridotto che caratterizza le strutture zonali nello spazio delle fasi. In Fig. 4, a titolo esemplificativo, è rappresentato il flusso associato a questa equazione di continuità simulato per un particolare tipo di fluttuazione Alfvénica nel Divertor Tokamak Test (DTT) [28, 29], un importante esperimento in costruzione presso i laboratori ENEA di Frascati. Questo approccio consente di ridurre la dimensionalità e quindi la complessità del problema considerato e descrivere in maniera efficace i processi di trasporto in plasmi fusionistici su tempi lunghi. Grazie alla continua evoluzione delle capacità di calcolo numerico, con questo approccio sarà possibile descrivere la fenomenologia osservata nelle moderne macchine tokamak non solo per quanto riguarda le particelle energetiche ma anche per

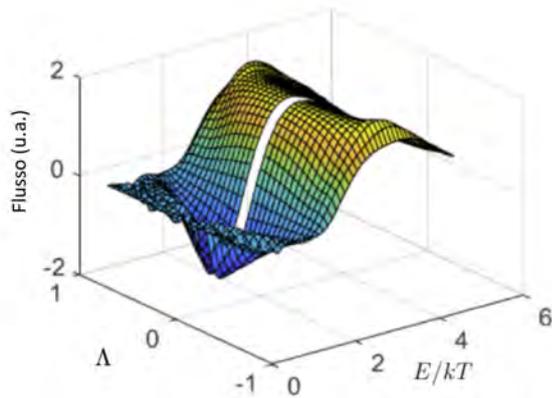


Figura 4: Flusso di particelle (in unità arbitrarie) nello spazio delle fasi ridotto utilizzato per descrivere le strutture zonali nello spazio delle fasi. Le coordinate rappresentano due degli integrali primi che caratterizzano il moto di singola particella nell'equilibrio magnetico. Figura riprodotta con permesso da Ref. [30].

il plasma termico.

Controllo della potenza di fusione e interazione tra plasma e componenti materiali

Uno dei problemi nodali di un reattore a fusione sarà l'estrazione della potenza. Da un lato, la potenza dei neutroni a 14.1 MeV prodotti dalle reazioni di fusione D-T sarà raccolta da un mantello, che, oltre a fungere da mezzo per assorbirla e quindi convertirla in potenza elettrica, agirà anche da componente attiva atta a rigenerare il trizio e a chiudere il ciclo del combustibile⁴. Dall'altro, la potenza delle particelle alfa a 3.5 MeV, adeguatamente confinate, garantirà il riscaldamento necessario per il funzionamento del reattore in condizioni pressoché stazionarie. Questa potenza andrà successivamente recuperata dal sistema, una volta che le particelle alfa saranno termalizzate e trasformate in ceneri di elio, che a loro volta andranno estratte dal sistema e sostituite da nuovo combustibile da iniettare nel reattore. La rimozione della potenza e delle particelle in eccesso (Power and Particle Exhaust, o PPEX) è quindi un aspetto di vitale importanza per il funzionamento di un reattore a fusione.

⁴Questo passaggio riveste un ruolo di fondamentale importanza nel funzionamento del reattore a fusione, ma esula dal tema di questa breve analisi.

I problemi di PPEX in un reattore tokamak sono controllati mediante il divertore (Fig. 5) ossia la struttura materiale su cui vengono fatte confluire in modo controllato le superfici di flusso magnetico aperte, divise da una separatrice (visibile in figura dalla presenza di un *punto a X*) dalle superfici di flusso magnetico chiuse che contengono il plasma ben confinato. La presenza

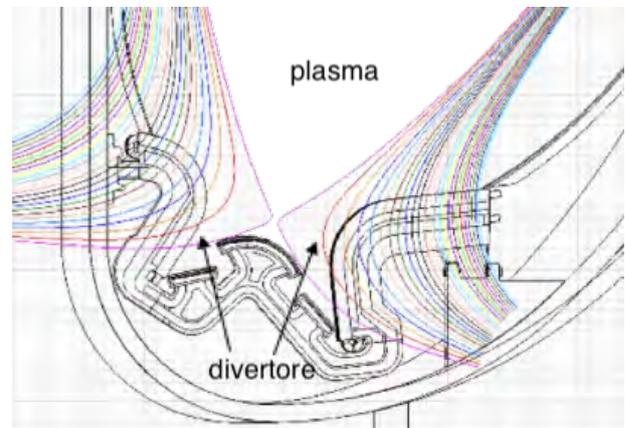


Figura 5: Illustrazione schematica del divertore nel Divertor Tokamak Test (DTT) [28, 29] (riproduzione da originale in Ref. [28]). Le superfici di flusso magnetico aperte sono rappresentate dalle linee colorate che confluiscono sulla struttura materiale del divertore. La regione di plasma è caratterizzata da superfici di flusso magnetico chiuse non indicate in figura.

del divertore consente di agire mediante il controllo del trasporto perpendicolare e parallelo alle superfici di flusso magnetico.

A causa della presenza di particelle neutre, impurezze e plasma relativamente freddo nella zona del divertore, una descrizione accurata dei processi fisici rilevanti, che vanno dalla fisica del plasma alla fisica atomica e all'interazione delle varie specie di particelle (ionizzate e non) con le pareti materiali, è estremamente complessa. I modelli ridotti generalmente usati per descrivere la dinamica dei processi di plasma si basano su una gerarchia di equazioni ottenuta dai momenti (integrali nello spazio delle velocità) dell'equazione di Boltzmann, dove la relazione di chiusura, ossia la relazione tra il momento di ordine più alto con i momenti di ordine inferiore, è data da un modello in cui il ruolo delle collisioni è considerato dominante [31, 32]. La dinamica delle particelle neutre è invece trattata obbligatoriamente con un approccio cinetico per tenere

conto della molteplicità dei processi fisici coinvolti e menzionati in precedenza. Lo stato dell'arte dei modelli di simulazione per ITER e DEMO [33] rimane comunque non sufficientemente predittivo per descrivere le peculiarità della regione esterna dei plasmi di rilevanza reattoristica, caratterizzata da alta densità e bassa collisionalità, che non sono riproducibili sperimentalmente nei tokamak esistenti.

A questo si aggiunge il fatto che, in un reattore, le particelle energetiche influenzano in modo importante non solo il trasporto turbolento tra parte interna e bordo del plasma, ma possono avere un effetto diretto sul divertore nell'eventualità siano trasportate nella regione di bordo senza aver ceduto adeguatamente la loro energia termalizzando. Oltre ad avere un impatto evidente sull'efficienza del processo di autosostentamento delle reazioni termonucleari, questa condizione può influire in modo significativo sulla modalità di operazione del divertore a causa di una popolazione non trascurabile di particelle alfa ancora sovratermiche. La descrizione accurata di questi processi richiede l'utilizzo di modelli di plasma avanzati, che possono essere comunque basati sulla ben nota gerarchia di equazioni ottenibili da momenti dell'equazione di Boltzmann, purché completati da relazioni di chiusura cinetiche come, ad esempio, proposto in Ref. [34]. Come nel caso dell'analisi del trasporto turbolento nella regione interna e ben confinata del plasma, l'interazione multiscale è un ingrediente essenziale del trasporto nella regione del bordo e del divertore. Inoltre, a causa della transizione tra superfici di flusso magnetico chiuse e aperte attraverso la separatrice, i profili radiali del plasma possono variare su lunghezze scala corte nella regione di bordo, inficiando la separazione tra macro- e micro-scale. L'analisi di questi processi è tra gli argomenti su cui la comunità dei ricercatori è più attiva, sia per l'importanza pratica che per l'interesse scientifico del problema. Per questo motivo, è in costruzione presso il Centro Ricerche dell'ENEA di Frascati il DTT [28, 29], un tokamak che si propone di studiare il problema del PPEX in condizioni che si avvicineranno a quelle di un reattore termonucleare come in nessun altro tokamak attualmente esistente.

Conclusioni

La produzione di energia da reazioni di fusione in plasma confinato magneticamente pone enormi sfide tecniche e tecnologiche ma, al tempo stesso, richiede lo sviluppo di teorie per la comprensione dei fenomeni complessi che caratterizzano i plasmi termonucleari e di modelli per la simulazione numerica in grado di prevederne in modo affidabile l'evoluzione dinamica su scale di tempo lunghe. I problemi di teoria e simulazione nei plasmi fusionistici e gli strumenti adottati per studiarli hanno notevoli punti in comune con altri campi della fisica, come la fisica dei laser a elettroni liberi [25], la fisica dello spazio [35], e la fisica del plasma nonlineare [7]. In prospettiva, questo rende attraente questo settore di ricerca non solo per le implicazioni pratiche ma anche per l'interesse scientifico che può avere.



- [1] E. Gibney: *Nuclear-fusion reactor smashes energy record*, Nature, 602 (2022) 371.
- [2] Y. Song et al.: *Realization of thousand-second improved confinement plasma with Super I-mode in tokamak EAST*, Science Advances, 9 (2023) eabq5273.
- [3] D. Clery: *Explosion marks laser fusion breakthrough*, Science, 378 (6625) (2022) 1154.
- [4] K. Tomabechi et al.: *ITER conceptual design*, Nuclear Fusion, 31 (1991) 1135.
- [5] D. A. Batchelor et al.: *Simulation of Fusion Plasmas: Current Status and Future Direction*, Plasma Science and Technology, 9 (2007) 312.
- [6] Ph. Lauber: *Super-thermal particles in hot plasmas - Kinetic models, numerical solution strategies, and comparison to tokamak experiments*, Physics Reports, 533 (2013) 33.
- [7] L. Chen e F. Zonca: *Physics of Alfvén waves and energetic particles in burning plasmas*, Reviews of Modern Physics, 88 (2016) 015008.
- [8] I. T. Chapman et al.: *Analysis of high β regimes for DEMO*, Fusion Engineering and Design, 86 (2011) 141.
- [9] L. Chen e F. Zonca: *Nonlinear equilibria, stability and generation of zonal structures in toroidal plasmas*, Nuclear Fusion, 47 (2007) 886.
- [10] L. Chen et al.: *Excitation of zonal flow by drift waves in toroidal plasmas*, Physics of Plasmas, 7 (2000) 3129.
- [11] L. Chen et al.: *Non-linear zonal dynamics of drift and drift-Alfvén turbulence in tokamak plasmas*, Nuclear Fusion, 41 (2001) 747.

- [12] P. H. Diamond et al.: *Zonal flows in plasma—a review*, Plasma Physics and Controlled Fusion, 47 (2005) R35.
- [13] Z. Lin and T. S. Hahm: *Turbulence spreading and transport scaling in global gyrokinetic particle simulations*, Physics of Plasmas, 11 (2004) 1099.
- [14] Z. Guo et al.: *Radial Spreading of Drift-Wave–Zonal-Flow Turbulence via Soliton Formation*, Physical Review Letters, 103 (2009) 055002.
- [15] E. A. Frieman and L. Chen: *Nonlinear gyrokinetic equations for low-frequency electromagnetic waves in general plasma equilibria*, Physics of Fluids, 25 (1982) 502.
- [16] D. Zarzoso et al.: *Nonlinear interaction between energetic particles and turbulence in gyro-kinetic simulations and impact on turbulence properties*, Nuclear Fusion, 57 (2017) 072011.
- [17] The U.S. Department of Energy: *The Exascale Computing Project* <https://www.exascaleproject.org/exascale-computing-project/>
- [18] The European Commission: *Shaping Europe’s digital future* <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en>
- [19] I. G. Abel et al.: *Multiscale gyrokinetics for rotating tokamak plasmas: fluctuations, transport and energy flows*, Reports on Progress in Physics, 76 (2013) 116201.
- [20] H. Grad: *Plasmas*, Physics Today, 22 (12) (1969) 34.
- [21] A. Hasegawa and L. Chen: *Kinetic processes in plasma heating by resonant mode conversion of Alfvén wave*, Physics of Fluids, 19 (1976) 1924.
- [22] F. Zonca et al.: *Energetic particles and multi-scale dynamics in fusion plasmas*, Plasma Physics and Controlled Fusion, 57 (2015) 014024.
- [23] M.V. Falessi, F. Pegoraro, and T.J. Schep: *Lagrangian coherent structures and plasma transport processes*, Journal of Plasma Physics, 81 (2015) 1469-7807.
- [24] X. Wang, S. Briguglio, C. Di Troia, M. V. Falessi, G. Fogaccia, V. Fusco, G. Vlad, and F. Zonca: *Analysis of the nonlinear dynamics of a chirping-frequency Alfvén mode in a tokamak equilibrium*, Physics of Plasmas, 29 (2022) 032512.
- [25] F. Zonca et al.: *Nonlinear dynamics of phase-space zonal structures and energetic particle physics in fusion plasmas*, New Journal of Physics, 17 (2015) 013052.
- [26] M. V. Falessi and F. Zonca: *Transport theory of phase space zonal structures*, Physics of Plasmas, 26 (2019) 022305.
- [27] F. Zonca, L. Chen, M. V. Falessi, and Z. Qiu: *Nonlinear radial envelope evolution equations and energetic particle transport in tokamak plasmas*, Journal of Physics: Conference Series, 1785 (2021) 012005.
- [28] F. Crisanti et al.: *The Divertor tokamak Test facility proposal: Physical requirements and reference design*, Nuclear Materials and Energy, 12 (2017) 1330.
- [29] R. Albanese et al.: *Design review for the Italian Divertor tokamak Test facility*, Fusion Engineering and Design, 146 (2019) 194.
- [30] Y. Li, M.V. Falessi, P. Lauber, Y. Li, Z. Qiu, G. Wei, and F. Zonca: *Physics of drift Alfvén instabilities and energetic particles in fusion plasmas*, Plasma Physics and Controlled Fusion, submitted (2022).
- [31] S. I. Braginskii: *Transport Phenomena in a Completely Ionized Two-Temperature Plasma*, Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics, 6 (1958) 358.
- [32] S. I. Braginskii: *Transport Processes in a Plasma*, Reviews of Plasma Physics, 1 (1965) 205.
- [33] X. Bonnin et al.: *Presentation of the New SOLPS-ITER Code Package for tokamak Plasma Edge Modelling*, Plasma and Fusion Research, 11 (2016) 1403102.
- [34] L. Chen et al.: *A Gyrokinetic simulation model for low frequency electromagnetic fluctuations in magnetized plasmas*, SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy, 64 (2021) 245211.
- [35] F. Zonca, X. Tao and L. Chen: *A Theoretical Framework of Chorus Wave Excitation*, Journal of Geophysical Research: Space Physics, 127 (2022) e2021JA029760.

Matteo Valerio Falessi: è ricercatore presso il Centro di Ricerca ENEA di Frascati ed esperto di teoria girocinetica e dinamica non lineare che applica allo studio della fisica delle particelle energetiche nei plasmi fusionistici. Ha pubblicato diversi articoli sulla teoria girocinetica e sulla fisica delle particelle energetiche tra cui *Transport theory of phase space zonal structures* (Physics of Plasmas 26, 022305, 2019) con il Dr. F. Zonca. È inoltre coinvolto in varie collaborazioni internazionali, tra cui l’Enabling Research Project ATEP (EUROfusion) e la collaborazione ENEA-IFTS-NFRI. Ha ricevuto l’EPS Physics division PhD Prize nel 2018.

Fulvio Zonca: è Dirigente di Ricerca e Coordinatore del *Center for Nonlinear Plasma Science* presso il Centro Ricerche ENEA di Frascati dove lavora dal 1988, e Professore Aggiunto dal 2009 presso l’Institute for Fusion Theory and Simulation, Zhejiang University, Hangzhou, in Cina, presso la quale è Qíushì Chair Professor dal 2020. È autore di più di 190 articoli su riviste internazionali, tra cui *Physics of Alfvén waves and energetic particles in burning plasmas* (Review of Modern Physics 88, 015008, 2016) col Prof. Liu Chen e *Nonlinear dynamics and phase space transport by chorus emission* (Reviews of Modern Plasma Physics 5, 8, 2021) con il Prof. Xin Tao e il Prof. Liu Chen.

