



# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

<b>DIPARTIMENTO</b>	Ingegneria
<b>ANNO ACCADEMICO OFFERTA</b>	2024/2025
<b>ANNO ACCADEMICO EROGAZIONE</b>	2025/2026
<b>CORSO DILAUREA MAGISTRALE</b>	INGEGNERIA ENERGETICA E NUCLEARE
<b>INSEGNAMENTO</b>	NUCLEAR FUSION REACTORS
<b>TIPO DI ATTIVITA'</b>	B
<b>AMBITO</b>	50367-Ingegneria energetica e nucleare
<b>CODICE INSEGNAMENTO</b>	23141
<b>SETTORI SCIENTIFICO-DISCIPLINARI</b>	ING-IND/19
<b>DOCENTE RESPONSABILE</b>	DI MAIO PIETRO                      Professore Ordinario                      Univ. di PALERMO ALESSANDRO
<b>ALTRI DOCENTI</b>	
<b>CFU</b>	6
<b>NUMERO DI ORE RISERVATE ALLO STUDIO PERSONALE</b>	96
<b>NUMERO DI ORE RISERVATE ALLA DIDATTICA ASSISTITA</b>	54
<b>PROPEDEUTICITA'</b>	
<b>MUTUAZIONI</b>	
<b>ANNO DI CORSO</b>	2
<b>PERIODO DELLE LEZIONI</b>	1° semestre
<b>MODALITA' DI FREQUENZA</b>	Facoltativa
<b>TIPO DI VALUTAZIONE</b>	Voto in trentesimi
<b>ORARIO DI RICEVIMENTO DEGLI STUDENTI</b>	<b>DI MAIO PIETRO ALESSANDRO</b> Lunedì    10:00    11:00    Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'Informazione e Modelli Matematici - Edificio 6 - I Piano - Stanza 115 Mercoledì    10:00    11:00    Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'Informazione e Modelli Matematici - Edificio 6 - I Piano - Stanza 115 Venerdì    10:00    11:00    Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'Informazione e Modelli Matematici - Edificio 6 - I Piano - Stanza 115

DOCENTE: Prof. PIETRO ALESSANDRO DI MAIO

<b>PREREQUISITI</b>	Conoscenze dei fondamenti di: <ul style="list-style-type: none"><li>- calcolo differenziale ed integrale</li><li>- fisica classica</li><li>- elettromagnetismo</li><li>- teoria cinetica dei gas</li><li>- principi di ingegneria nucleare</li><li>- teoria del trasporto di massa, quantità di moto ed energia</li></ul>
<b>RISULTATI DI APPRENDIMENTO ATTESI</b>	<p><b>CONOSCENZA E CAPACITA' DI COMPrensIONE</b> Lo studente, al termine del corso, avra' maturato un opportuno livello di conoscenza e di capacita' di comprensione sui seguenti argomenti:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Reazioni di fusione nucleare, plasmi, sezioni d'urto, tasso di reazione, parametro di reazione</li><li>- Processi collisionali, effetto Debye, radiazioni di frenamento e di ciclotrone</li><li>- Modelli fisico-matematici per la descrizione della dinamica di un plasma</li><li>- Dinamica particellare ed energetica di un plasma</li><li>- Analisi energetica di un plasma, break-even, ignizione e relativi criteri di Lawson</li><li>- Metodo di confinamento inerziale di un plasma</li><li>- Metodo di confinamento magnetico di un plasma, moto di una particella carica in un campo di induzione magnetica, specchi magnetici, macchine TOKAMAK e Stellarator</li><li>- Dinamica del trizio in un reattore a fusione di potenza</li><li>- Problematiche tecnologiche connesse allo sfruttamento su scala industriale della reazione di fusione nucleare e principali schemi di impianto allo studio</li></ul> <p>La valutazione avverra' tramite prova orale.</p> <p><b>CAPACITA' DI APPLICARE CONOSCENZA E COMPrensIONE</b> Lo studente, al termine del corso, avra' maturato un opportuno livello di conoscenza e di comprensione applicate sui seguenti argomenti:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Studio della dinamica particellare di un plasma D – T tramite un modello a parametri concentrati</li><li>- Studio della dinamica energetica di un plasma D – T tramite un modello a parametri concentrati</li><li>- Analisi delle prestazioni di un sistema di confinamento magnetico aperto</li><li>- Analisi delle prestazioni di un sistema di confinamento magnetico chiuso di tipo TOKAMAK</li><li>- Studio della dinamica del trizio in un reattore a fusione nucleare di potenza</li></ul> <p>La valutazione avverra' tramite prova orale.</p> <p><b>AUTONOMIA DI GIUDIZIO</b> Lo studente, al termine del corso, avra' maturato un opportuno livello di autonomia di giudizio sui seguenti argomenti:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Comprensione di rapporti tecnici pertinenti ad impianti ad alta intensita' energetica</li><li>- Dinamica particellare ed energetica di un plasma D-T</li><li>- Valutazione delle prestazioni di componenti ad alto flusso termico e mantelli triziogeni di reattori a fusione</li><li>- Valutazione di massima dell'inventario di Trizio in un impianto a fusione nucleare di potenza</li></ul> <p>La valutazione avverra' tramite prova orale.</p> <p><b>ABILITA' COMUNICATIVE</b> Lo studente, al termine del corso, avra' maturato un opportuno livello di dimestichezza con il linguaggio tecnico-scientifico impiegato nell'ambito dell'ingegneria degli impianti ad alta intensita' energetica con specifico riferimento a quelli nucleari a fusione.</p> <p>La valutazione avverra' tramite prova orale.</p> <p><b>CAPACITA' D'APPRENDIMENTO</b> Lo studente, al termine del corso, avra' sviluppato la capacita' di apprendere le problematiche scientifico-tecnologiche che caratterizzano lo sviluppo e la progettazione dei piu' rilevanti componenti di reattori nucleari a fusione.</p> <p>La valutazione avverra' tramite prova orale.</p>
<b>VALUTAZIONE DELL'APPRENDIMENTO</b>	<p>L'esame prevede la prova orale, valutata in trentesimi. Il voto minimo per superare la prova e' 18/30.</p> <p>La prova ha una durata di 40-50 minuti e consiste in un colloquio, articolato in almeno tre domande a risposta aperta inerenti l'intero programma del corso. Essa e' finalizzata ad accertare:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- il grado di conoscenza, comprensione e padronanza dei contenuti del corso (50% della valutazione finale);</li><li>- la capacita' di applicare con autonomia di giudizio e rigore metodologico le conoscenze e competenze acquisite all'analisi ed alla soluzione di problematiche tipiche della disciplina (30% della valutazione finale);</li></ul>

	<p>- la proprieta' di linguaggio e la chiarezza espositiva (10% della valutazione finale);</p> <p>- le capacita' di rielaborare criticamente i concetti acquisiti, collocandoli nella opportuna connessione logica con le varie tematiche affrontate nel corso ed in quelli ad esso affini (10% della valutazione finale).</p> <p>Per gli studenti con disabilità e neurodiversità saranno garantiti gli strumenti compensativi e le misure dispensative individuate, dal CeNDis - Centro di Ateneo per la disabilità e la neurodiversità, in base alle specifiche esigenze e in attuazione della normativa vigente.</p> <p><b>METRICA DI VALUTAZIONE</b></p> <p>- 30 - 30 e lode (ottimo): ottima conoscenza e padronanza dei contenuti del corso illustrata con piena proprieta' di linguaggio e chiarezza espositiva, spiccata attitudine ad applicare con autonomia di giudizio e rigore metodologico le competenze acquisite rielaborandole criticamente.</p> <p>- 27 - 29 (distinto): piena conoscenza dei contenuti del corso illustrata con proprieta' di linguaggio e chiarezza espositiva, capacita' di applicare con buona autonomia di giudizio e rigore metodologico le competenze acquisite.-</p> <p>24 - 26 (buono): buona conoscenza dei contenuti del corso illustrata con proprieta' di linguaggio, modesta capacita' di applicare con una discreta autonomia le competenze acquisite.</p> <p>- 22 - 24 (soddisfacente): soddisfacente conoscenza dei principali contenuti del corso illustrata con linguaggio tecnico accettabile, scarsa autonomia nell'applicazione delle competenze acquisite.</p> <p>- 18 - 21 (sufficiente): conoscenza minimale dei contenuti essenziali del corso e del pertinente linguaggio tecnico, scarsa o nulla autonomia di applicazione delle competenze acquisite.</p>
<b>OBIETTIVI FORMATIVI</b>	<p>Il corso mira a fornire una panoramica delle principali problematiche ingegneristiche connesse al funzionamento ed allo sviluppo di reattori a fusione nucleare, analizzandone i principali componenti e le pertinenti funzioni e condizioni di sollecitazione.</p> <p>L'attenzione sara' focalizzata sulle principali reazioni di fusione nucleare ipotizzate per lo sviluppo di reattori su scala industriale e sulle relative caratteristiche energetiche. Si introdurrà il concetto di plasma quale quarto stato di aggregazione della materia e se ne definiranno le principali grandezze fisicomatematiche che ne consentono la caratterizzazione del comportamento, quali la funzione di distribuzione delle specie particellari, la temperatura assoluta nonche' il tasso ed il parametro di reazione. Si esamineranno i principali processi collisionali tra particelle cariche di un plasma, introducendo il concetto di lunghezza di Debye e si appuntera' l'attenzione sull'emissione di radiazioni di bremsstrahlung e di ciclotrone. Si procedera' allo sviluppo dei modelli cinetici e dei modelli fluidi di un plasma, appuntando l'attenzione su un modello semplificato a parametri concentrati di un plasma omogeneo ed uniforme, che verra' applicato al caso di un plasma D-T, consentendo di studiarne la dinamica particellare ed energetica. Infine, si introdurranno i concetti di break-even ed ignizione e se ne deriveranno i pertinenti criteri di Lawson.</p> <p>Successivamente, l'attenzione sara' focalizzata sul confinamento del plasma e sulle relative metodologie, con particolare riferimento al confinamento magnetico, nel qual caso si studiera' il moto di una particella carica in un campo elettromagnetico in presenza di campi esterni, evidenziandone i moti di deriva e gli invarianti del moto. Si analizzeranno le caratteristiche e la stabilita' dei sistemi di confinamento magnetico aperti e chiusi, con particolare attenzione agli specchi magnetici ed alle macchine TOKAMAK. Successivamente si studieranno i principali componenti di un reattore TOKAMAK, quali i magneti, il blanket ed i componenti ad alto flusso, e si studieranno le interazioni plasma-parete e la dinamica del trizio in un reattore di tal tipo.</p>
<b>ORGANIZZAZIONE DELLA DIDATTICA</b>	L'attivita' didattica e' organizzata in lezioni frontali ed esercitazioni di tipo computazionale, prevalentemente svolte con il supporto di software di calcolo matematico.
<b>TESTI CONSIGLIATI</b>	<p>- T. Dolan, Fusion Research – Vol. I-III, Pergamon Press, 1982, ISBN-10: 0080255655</p> <p>- Harms et alii, Principles of Fusion Energy, World Scientific, 2000, ISBN: 9812380337</p> <p>- F. Chen, Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion, Plenum Press, 2015, ISBN: 9783319223087</p>

### PROGRAMMA

ORE	Lezioni
2	Reazione di fusione nucleare - Note sulla dinamica di una reazione di fusione nucleare - Energia di soglia - Sezione d'urto

## PROGRAMMA

ORE	Lezioni
5	Il plasma - Funzione di distribuzione e densita' volumetrica di una specie particellare - Funzioni di distribuzione fattorizzabili e Maxwelliane - Valori medi delle grandezze caratteristiche di un plasma e temperatura cinetica - Funzione tasso di reazione di una data interazione tra specie particellari di un plasma - Parametro di reazione: definizione generale, significato fisico e confronto con la sezione d'urto
6	Processi collisionali di particelle cariche - Sezione d'urto di scattering elastico - Effetto Debye - Radiazioni di bremsstrahlung e di ciclotrone
2	Modello cinetico di un plasma - Campo di validita' e limiti di applicazioni - Equazione del trasporto di Boltzmann per una generica specie particellare di un plasma - Discussione delle forme particolari di Fokker-Planck e di Vlasov per un plasma non-collisionale - Accoppiamento con le equazioni di Maxwell e con le equazioni di chiusura
3	Modello fluidodinamico di un plasma - Campo di validita' e limiti di applicazioni - Equazioni di continuita', della quantita' di moto e dell'energia per una generica specie particellare del plasma - Accoppiamento con le equazioni di Maxwell e le equazioni di stato
3	Modello dinamico di un plasma omogeneo, uniforme ed isotropo - Derivazione delle equazioni di continuita' e dell'energia per una generica specie particellare del plasma - Tempo di confinamento delle particelle e dell'energia
2	Analisi energetica di un plasma - Metodi di riscaldamento del plasma - Processi di raffreddamento del plasma - Fattore di amplificazione dell'energia - Condizioni di ignizione e break-even e relativi criteri
1	Confinamento del plasma - Confinamento gravitazionale, inerziale e magnetico
4	Confinamento magnetico - Moto di una particella carica in un campo di forze di Lorentz - Raggio di Larmor e frequenza di ciclotrone - Moti di deriva di una particella carica sottoposta ad un campo di forze di Lorentz, variabile in modulo e/o in direzione, ed ad un campo di forze esterne - Invarianti del moto di una particella carica
3	Sistemi di confinamento magnetico aperti: principio di funzionamento, cono di perdita, efficienza di confinamento - Fenomeni di instabilita' - Sistemi theta e zeta "magnetic pinch" e relativi fenomeni di instabilita' di tipo "sausage" e "kink"
3	Sistemi di confinamento magnetico chiusi: principio di funzionamento - Trasformata rotazionale e criterio di stabilita' di Kruskal-Shafranov - Macchina TOKAMAK: principio e modalita' di funzionamento, efficienza di confinamento e fenomeni di instabilita' - Macchina Stellarator: principio e modalita' di funzionamento
3	Principali componenti di un reattore di tipo TOKAMAK: magneti, blanket e componenti ad alto flusso - Interazioni plasma-parete ed effetto delle impurita'
1	Processi di conversione e breeding del Trizio in un reattore a fusione nucleare - Modelli per la dinamica del trizio - Tritium breeding
1	Programma internazionale di R&D sulla fusione nucleare - Reattori JET, ITER e DEMO - Macchina IFMIF
ORE	Esercitazioni
3	Funzioni di distribuzione delle specie particellari di un plasma - Temperatura cinetica - Tasso di reazione - Parametro di reazione
3	Modello dinamico di un plasma omogeneo, uniforme ed isotropo: applicazione allo studio della dinamica particellare ed energetica di un plasma D-T isoterma
3	Analisi del moto di ioni ed elettroni in un campo di forze di Lorentz
3	Valutazione dell'efficienza di confinamento di sistemi di confinamento magnetico aperti e chiusi
3	Stima della produzione endogena di trizio di un reattore a fusione nucleare di potenza