

**Guide ai corsi di laurea**

**Politecnico di Torino 1993/94**



**Ingegneria nucleare**

Le Guide sono predisposte sulla base dei testi forniti dai Consigli di corso di laurea.

*Corso di laurea*

Ingegneria civile  
Ingegneria edile  
Ingegneria aeronautica  
Ingegneria chimica  
Ingegneria dei materiali  
Ingegneria elettrica  
Ingegneria meccanica  
Ingegneria nucleare  
Ingegneria delle telecomunicazioni  
Ingegneria elettronica  
Ingegneria informatica  
Ingegneria gestionale  
Ingegneria per l'ambiente e il territorio

*Presidente – Coordinatore*

Prof. Cesare Castiglia  
Prof. Gian Paolo Scarzella  
Prof. Giuseppe Bussi  
Prof. Vito Specchia  
Prof. Aurelio Burdese  
Prof. Mario Lazzari  
Prof. Gustavo Belforte  
Prof. Evasio Lavagno  
Prof. Mario Pent  
Prof. Carlo Naldi  
Prof. Paolo Prinetto  
Prof. Sergio Rossetto  
Prof. Sebastiano Pelizza

Edito a cura del CIDEM  
Centro Interdipartimentale di  
Documentazione e Museo del  
Politecnico di Torino

Corso Duca degli Abruzzi 24 – 10129 Torino  
Tel. 011.564'6601 – Fax 011.564'6609

Stampato nel mese di luglio 1993 dalla Tipolitografia AGAT  
Via San G.B. Cottolengo 19 – 10152 Torino

## Indice

- 5 Presentazione
- 13 Programmi degli insegnamenti
- 57 Indice alfabetico degli insegnamenti
- 59 Indice alfabetico dei docenti

**Le Guide ai corsi di laurea in ingegneria.** Scopo fondamentale dei presenti opuscoli è quello di orientare gli studenti nella scelta dei piani di studio. In un momento particolarmente arduo di riforma e di scelte di sviluppo dell'assetto universitario, gli studenti devono poter decidere con il massimo della chiarezza, per potersi adeguare alle innovazioni, ed eventualmente anno per anno farsi ragione e modificare le scelte a seguito delle più specifiche verifiche attitudinali.

Nel 1993/94 sono attivati a Torino tredici *corsi di laurea*, in ingegneria

civile (D)	edile (G)	
chimica (C)	dei materiali (E)	nucleare (Q)
aeronautica (B)	meccanica (P)	elettrica (H)
elettronica (L)	informatica (N)	delle telecomunicazioni (F)
gestionale (M)	per l'ambiente e il territorio (R)	

Per permettere l'approfondimento di competenze metodologiche e di tecniche progettuali realizzative e di gestione in particolari campi, i corsi di laurea possono essere articolati in indirizzi ed orientamenti. Dell'*indirizzo* eventualmente seguito viene fatta menzione nel certificato di laurea, mentre gli *orientamenti* corrispondono a differenziazioni culturali, di cui invece non si fa menzione nel certificato di laurea; gli orientamenti vengono definiti annualmente dai competenti *Consigli dei corsi di laurea*, e ne viene data informazione ufficiale mediante il *Manifesto degli studi*. Nelle pagine di queste *Guide*, di ciascun corso di laurea viene data una breve descrizione, e viene illustrato il programma di attuazione degli orientamenti previsti per ogni indirizzo.

**Gli insegnamenti.** Il nuovo ordinamento didattico<sup>1</sup> prevede diversi tipi di insegnamenti, distinti in monodisciplinari, monodisciplinari a durata ridotta (nel seguito indicati come corsi ridotti), e integrati. Un *insegnamento monodisciplinare* è costituito da 80-120 ore di attività didattiche (lezioni, esercitazioni, laboratori, seminari ecc.) e corrisponde ad una unità didattica o annualità. Un *corso ridotto* è costituito da 40-50 ore di attività didattiche e corrisponde a mezza annualità. Un *corso integrato* è costituito da 80-120 ore di attività didattiche e corrisponde ad una annualità; esso è svolto - in moduli coordinati di almeno 20 ore ciascuno - da due o, al massimo, tre professori che fanno tutti parte della commissione d'esame.

<sup>1</sup> Decreto rettorale 1096 del 1989-10-31, pubblicato sulla *Gazzetta ufficiale* n. 45 del 1990-02-23.

Ogni corso di laurea corrisponde a 29 annualità complessive, ripartite, in ognuno dei cinque anni di corso, su due *periodi didattici* (detti anche impropriamente semestri); ogni periodo didattico è di durata pari ad almeno 13 settimane effettive di attività. Un'altra novità introdotta dal DPR 20 maggio 1989<sup>1</sup> è costituita dal fatto che non sono prescritti specifici insegnamenti (almeno a livello nazionale) per il conseguimento della laurea in un determinato corso di laurea in Ingegneria, ma sono prescritti i numeri minimi di unità didattiche da scegliere in determinati raggruppamenti disciplinari consistenti in *gruppi*<sup>2</sup> di discipline affini. Lo stesso nuovo Statuto stabilisce l'articolazione dei vari corsi di laurea in termini di *gruppi* e di *unità didattiche*, cosicché ogni Consiglio di corso di laurea può più facilmente adeguare annualmente il piano degli studi alle nuove esigenze richieste dal rapido evolversi delle conoscenze e degli sviluppi tecnologici. Perciò ogni anno i vari Consigli dei corsi di laurea stabiliscono gli insegnamenti ufficiali, obbligatori e non obbligatori, che costituiscono le singole annualità, e le norme per l'inserimento degli insegnamenti non obbligatori, eventualmente organizzati in orientamenti.

Tutte queste informazioni e norme vengono pubblicate ogni anno nel Manifesto degli Studi (v. *Guida dello studente*, pubblicata a cura della Segreteria studenti).

**Finalità e organizzazione didattica dei vari corsi di laurea.** Le pagine di queste *Guide* illustrano per ognuno dei corsi di laurea attivati – ed eventualmente per ognuno dei rispettivi indirizzi attivati – le professionalità acquisibili dai laureati, nonché il concetto ispiratore dell'organizzazione didattica, fornendo tracce schematiche di articolazione delle discipline obbligatorie ed esemplificazioni relative ai corsi facoltativi, organicamente inquadrabili nei vari curricula accademici.

Ogni corso di laurea (tranne rarissime eccezioni) ha previsto in prima attuazione l'organizzazione di tutti i corsi in periodi didattici. Per quanto concerne l'organizzazione didattica e l'attribuzione dei docenti agli insegnamenti, si segnala ancora che:

- alcuni corsi di laurea introducono già al terzo anno una scelta di corsi di indirizzo o di orientamento, che richiedono la formulazione di un'opzione fra le scelte segnalate: tali opzioni vanno esercitate all'atto dell'iscrizione;
- in relazione a talune difficoltà, che possono verificarsi all'atto dell'accorpamento di taluni CL per le discipline di carattere propedeutico (del primo e secondo anno), non è assicurata che la corrispondenza dei docenti indicati con gli effettivi titolari di dette discipline. In alcuni casi, non essendo noto al momento della stampa delle *Guide*, il nome del docente è stato lasciato indeterminato ("Docente da nominare").

<sup>1</sup> Pubblicato sulla *Gazzetta ufficiale* n. 186 del 1989-08-10.

<sup>2</sup> Questi *gruppi* coincidono con quelli dei raggruppamenti concorsuali per i professori universitari.

Corso di laurea in

# Ingegneria nucleare

## 1. Profilo professionale

La laurea in ingegneria nucleare fa riferimento a tutte le applicazioni pacifiche dei processi nucleari, in particolare alla produzione di energia ottenuta con reazioni nucleari di fissione o di fusione. Si tratta di fenomeni fisici complessi che richiedono sistemi adeguati per essere sfruttati in modo sicuro ed economicamente competitivo. Pertanto la formazione dell'ingegnere nucleare richiede l'approfondita conoscenza di numerose discipline, dalla matematica, dalla fisica e dalla scienza dei materiali, alla neutronica, alla termoidraulica e termomeccanica e alla progettazione di componenti e impianti.

Il corso di laurea in Ingegneria nucleare si caratterizza quindi, nell'ambito del settore industriale a cui appartiene, per una spiccata interdisciplinarietà e per l'enfasi posta su metodologie e tecniche sofisticate. L'area culturale dell'ingegneria nucleare è inoltre in profonda trasformazione e contraddistinta da continue innovazioni tecnologiche: si pensi alla fusione nucleare o ai reattori nucleari a maggiore sicurezza. Si richiede quindi all'ingegnere nucleare anche una buona propensione alla ricerca e allo sviluppo di soluzioni nuove o che non siano state esplorate sotto tutti gli aspetti.

Nel bagaglio culturale e tecnico dell'ingegnere nucleare devono rientrare metodologie e strumenti forniti dalla fisica nucleare, dei reattori nucleari, e dei plasmi, dalla termofluidodinamica monofase e bifase, dall'impiantistica e dalle tecnologie nucleari. Sono inoltre trattate le problematiche connesse con la valutazione dell'impatto ambientale dei sistemi di produzione di energia. Data l'importanza dell'affidabilità e della sicurezza nelle applicazioni nucleari, particolare rilevanza viene data alle tecniche di analisi affidabilistica e di valutazione del rischio, che trovano impiego, in generale, in tutte le tecnologie caratterizzate da rischi rilevanti.

Il profilo professionale dell'ingegnere nucleare è pertanto caratterizzato da una solida formazione fisico-matematica e ingegneristica di base, unita a conoscenze di tipo specialistico, articolate nei vari orientamenti previsti. Vengono privilegiati gli aspetti metodologici con un approccio interdisciplinare utilizzabile anche in altri campi dell'ingegneria, al fine di un inserimento sia in attività produttive che in strutture in cui venga svolta prevalentemente attività di ricerca applicata.

## 2. Insegnamenti obbligatori

Il piano ufficiale degli studi per gli studenti di ingegneria nucleare prevede un certo numero di insegnamenti obbligatori, che comprendono quelli comuni a tutti i corsi di laurea in ingegneria, quelli specifici del settore industriale, e quelli caratterizzanti il corso di laurea in Ingegneria nucleare.

La formazione matematica deve essere sufficientemente approfondita, per cui agli strumenti matematici, necessari ad ogni ingegnere, forniti negli insegnamenti di *Analisi*

*matematica e Geometria*, occorre aggiungere, ad esempio metodi per la trattazione delle equazioni differenziali alle derivate parziali e nelle funzioni di variabile complessa (*Metodi matematici per l'ingegneria*) e fornire le principali tecniche di calcolo numerico (una semi-annualità di *Calcolo numerico*) per un totale di 4,5 unità didattiche. Ad esse si aggiunge una semi-annualità di *Meccanica analitica*, che sviluppa i metodi lagrangiani e hamiltoniani, fornendo altresì i fondamenti di calcolo delle probabilità.

Per quanto riguarda la *Fisica*, tre insegnamenti forniscono, oltre alle basi generali per la comprensione dei fenomeni fisici classici, nozioni di struttura della materia, con elementi di meccanica quantistica, di fisica nucleare, con elementi di fisica dello stato condensato e dei plasmi, per un totale di tre unità didattiche. Due insegnamenti trattano i fondamenti generali della *Chimica*, e le applicazioni, di *Scienza e tecnologia dei materiali nucleari*, per un totale di due unità didattiche. Un insegnamento di *Disegno tecnico industriale* permette la comprensione dei disegni di componenti meccanici, fornendo altresì le principali tecniche di rappresentazione, comprese quelle assistite dal computer (una unità didattica).

La cultura ingegneristica di base richiede cinque insegnamenti nelle aree del calcolo delle strutture (*Scienza delle costruzioni*), della meccanica applicata (*Meccanica applicata alle macchine*), dell'*Elettrotecnica*, con cenni di macchine elettriche, dell'*Elettronica applicata* e della *Termodinamica applicata*, per un totale di cinque unità didattiche. Completano la formazione ingegneristica gli insegnamenti di *Macchine e Costruzione di macchine* (che dedica ampia parte del corso al calcolo strutturale di componenti soggetti a sforzi termomeccanici), nonché gli insegnamenti di *Istituzioni di economia* (dedicata in parte alla gestione dell'impresa e all'economia delle fonti di energia) e di *Fondamenti di informatica*, che affronta le problematiche relative ai sistemi di elaborazione e alla loro programmazione, per un totale di cinque unità didattiche.

La preparazione professionale specifica nel campo dell'ingegneria nucleare richiede quattro insegnamenti di base, che trattano i seguenti argomenti: *Fisica dei reattori*, *Impianti nucleari*, *Strumentazione e misure per gli impianti nucleari* e *Termofluidodinamica*, per un totale di quattro unità didattiche.

Il corso di *Fisica del reattore* è di tipo integrato e si articola in due moduli di *Fisica dei reattori a fissione* e *Fisica dei reattori a fusione*, che hanno lo scopo, rispettivamente, di analizzare i principali metodi fisico-matematici della neutronica applicata, e di fornire gli elementi della teoria fisico-matematica che sta alla base del funzionamento delle macchine per lo studio della fusione nucleare. Il corso di *Impianti nucleari* è di tipo integrato e, accanto ad un modulo che illustra le caratteristiche e il funzionamento degli impianti a fissione comprende un modulo di *Ingegneria dei reattori nucleari a fusione 1*, che analizza dal punto di vista ingegneristico le principali macchine per lo studio della fusione nucleare controllata. Il corso di *Strumentazione e misure per gli impianti nucleari*, partendo dalla teoria della misura, affronta le problematiche inerenti alla strumentazione usata negli impianti nucleari per la misura di grandezze sia nucleari che non nucleari. Il corso di *Termofluidodinamica degli impianti nucleari 1* approfondisce la fluidodinamica e la termocinetica, fornendo le metodologie e gli strumenti di calcolo della meccanica dei fluidi e della trasmissione del calore.

Il quadro didattico proposto comprende quindi discipline rapportabili a 27 insegnamenti, raggruppate in 24 unità didattiche, come è mostrato nella tabella riassuntiva seguente. Il curriculum dell'ingegnere nucleare viene completato da cinque unità didattiche caratterizzanti gli orientamenti in cui si articola il Corso di laurea.

### 3. Quadro degli insegnamenti obbligatori

---

1:1 (1. anno, 1. periodo didattico)

Q0231 : Analisi matematica 1  
Q0620 : Chimica

---

1:2 Q1430 : Disegno tecnico industriale  
Q1901 : Fisica 1  
Q2300 : Geometria

---

2:1 Q0232 : Analisi matematica 2  
Q1902 : Fisica 2  
Q2170 : Fondamenti di informatica

---

2:2 Q0514 : Calcolo numerico (ridotto)  
Q3204 : Meccanica analitica (ridotto)  
Q3480 : Metodi matematici per l'ingegneria  
Q4670 : Scienza e tecnologia dei materiali nucleari

---

3:1 Q2040 : Fisica nucleare  
Q4600 : Scienza delle costruzioni  
Q5950 : Termodinamica applicata

---

3:2 Q1790 : Elettrotecnica  
Q1965 : Fisica dei reattori a fissione + Fisica dei reattori a fusione (integrato)  
Q3210 : Meccanica applicata alle macchine

---

4:1 Q1710 : Elettronica applicata  
Q2775 : Impianti nucleari + Ingegneria dei reattori nucleari a fusione 1 (integrato)  
Q5991 : Termofluidodinamica negli impianti nucleari 1

---

4:2 Q3110 : Macchine  
Q0940 : Costruzione di macchine  
Y<sub>1</sub>  
Y<sub>2</sub>

---

5:1 Q5270 : Strumentazione e misure per gli impianti nucleari  
Y<sub>3</sub>  
Y<sub>4</sub>  
Y<sub>5</sub>

---

5:2 Q3040 : Istituzioni di economia  
Y<sub>6</sub>  
Y<sub>7</sub>  
Y<sub>8</sub>

---

#### 4. Professionalità e orientamenti

I corsi previsti negli orientamenti in cui si articola il corso di laurea in Ingegneria nucleare approfondiscono le principali problematiche delle aree culturali di maggiore importanza del settore e rispondono alla esigenze di professionalità richieste.

##### *Orientamento impiantistico*

L'orientamento è finalizzato alla analisi, modellistica e progettazione, degli impianti nucleari a fissione e fusione.

Le conoscenze di meccanica dei fluidi, termodinamica, e scienza dei materiali vengono ulteriormente sviluppate e poste alla base dello studio dei reattori a fissione termici e veloci, e dei reattori a fusione.

I principali componenti dell'impianto vengono analizzati dal punto di vista funzionale, termomeccanico e dell'affidabilità, in condizioni di esercizio e di incidente.

L'orientamento è pertanto caratterizzato anzitutto da corsi rivolti:

- alla analisi di sicurezza degli impianti nucleari a fissione e fusione con metodologie deterministiche e probabilistiche (*Impianti nucleari 2*);
- all'analisi dei fenomeni termofluidodinamici in regime multifase (*Termofluidodinamica degli impianti nucleari 2*);
- alla progettazione termoidraulica di componenti e sistemi attinenti all'impiantistica nucleare (*Termotecnica del reattore*);
- all'approfondimento delle problematiche del ciclo del combustibile e delle tecnologie dei materiali per la fissione e la fusione (*Tecnologie ed applicazioni nucleari*);
- all'approfondimento della fisica e dell'ingegneria dei reattori nucleari a fusione (*Fisica e ingegneria dei plasmi + Ingegneria di reattori a fusione 2*);
- al calcolo strutturale di componenti soggetti a sforzi meccanici e termici (*Progetti e costruzioni nucleari*);
- all'analisi delle problematiche di radioprotezione e alla progettazione delle relative salvaguardie (*Protezione e sicurezza negli impianti nucleari*);
- all'approfondimento dei diversi aspetti del rischio tecnologico e all'applicazione dell'analisi affidabilistica al progetto di componenti e sistemi ingegneristici complessi (*Sicurezza e analisi di rischio*).

L'orientamento è volto a preparare sia ad una attività professionale nell'industria nucleare o comunque a tecnologia avanzata, che ad una attività di ricerca applicata.

##### *Orientamento energetico*

L'orientamento fornisce le conoscenze e gli strumenti metodologici per l'analisi, la modellistica e la valutazione tecnica, economica e ambientale dei sistemi industriali, principalmente, ma non solo, nucleari, finalizzati alla produzione di energia.

L'orientamento è pertanto caratterizzato da corsi rivolti:

- all'analisi dei fenomeni termofluidodinamici in regime multifase che si realizzano negli impianti di potenza (*Termofluidodinamica negli impianti nucleari 2*);
- all'analisi e alla valutazione dei sistemi energetici (*Energetica e sistemi nucleari*);
- alla valutazione di impatto ambientale per l'inserimento nel territorio dei sistemi energetici (*Localizzazione dei sistemi energetici*);
- alla analisi di sicurezza degli impianti nucleari a fissione e fusione con metodologie deterministiche e probabilistiche (*Impianti nucleari 2*);
- al controllo e alla regolazione degli impianti nucleari di potenza, inseriti in un sistema energetico complesso (*Dinamica e controllo degli impianti nucleari*);
- all'analisi delle problematiche di radioprotezione e alla progettazione delle relative salvaguardie (*Protezione e sicurezza degli impianti nucleari*);
- all'approfondimento dei diversi aspetti del rischio tecnologico e all'applicazione dell'analisi affidabilistica al progetto di componenti e sistemi ingegneristici complessi (*Sicurezza e analisi di rischio*);
- alla progettazione termoidraulica di componenti e sistemi attinenti all'impiantistica nucleare (*Termotecnica del reattore*);

L'orientamento è volto a preparare sia ad una attività professionale nell'industria nucleare, che ad una attività finalizzata all'analisi di sistemi energetici complessi.

#### *Orientamento Fisica dei reattori e controllo*

L'orientamento approfondisce i fenomeni fisici peculiari dei reattori a fissione e delle macchine per la fusione nucleare, al fine di preparare ad un'attività di ricerca ed alla progettazione nel campo della neutronica, della dinamica e controllo degli impianti nucleari e della fisica dei plasmi.

A tale scopo, sono previsti corsi che trattano gli aspetti fisico-matematici delle applicazioni ingegneristiche. Altri approfondiscono invece i metodi matematici e di calcolo necessari.

Vengono inoltre analizzati i problemi di stabilità, regolazione e controllo degli impianti per la produzione di energia elettrica e le metodologie per lo studio del comportamento dinamico dei sistemi complessi.

L'orientamento è caratterizzato da corsi destinati a:

- approfondire la teoria cinetica che sta alla base dello studio statistico della dinamica di sistemi fisici costituiti da un numero elevatissimo di particelle (*Trasporto di particelle e di radiazione*);
- approfondire gli aspetti fisico-matematici del trasporto per i neutroni e affrontare il progetto neutronico dei reattori nucleari (*Reattori nucleari avanzati*);
- sviluppare le metodologie di calcolo e di simulazione numerica in problemi di interesse per la fisica dei reattori nucleari (*Metodi matematici per i reattori nucleari*);
- studiare il controllo e la regolazione degli impianti nucleari (*Dinamica e controllo degli impianti nucleari*);
- acquisire strumenti fisico-matematici non trattati nei corsi di base (*Fisica matematica*);
- approfondire la fisica dei plasmi e l'ingegneria dei reattori nucleari a fusione (*Fisica e ingegneria dei plasmi + Ingegneria dei reattori nucleari a fusione 2*);
- completare la conoscenza sugli impianti nucleari con particolare riguardo ai problemi di sicurezza (*Impianti nucleari 2, Sicurezza e analisi di rischio*).

Questo orientamento si prefigge sia di fornire strumenti per l'analisi e la progettazione nel settore neutronico che di familiarizzare lo studente con metodologie scientifiche caratteristiche della ricerca tecnologica in vasti settori dell'ingegneria.

La preparazione è finalizzata non solo allo svolgimento di attività professionale nell'industria nucleare, ma anche ad un inserimento presso industrie a tecnologia avanzata e laboratori di ricerca.

### *Orientamento Fisico-strumentale*

L'orientamento è indirizzato alla formazione di tecnici e ricercatori in vari settori della fisica applicata e in particolare della fisica del nucleo e degli stati aggregati della materia. Fornisce inoltre una preparazione specialistica nel campo delle radiazioni e della strumentazione nucleare. Vengono approfondite le problematiche fisiche dell'energia nucleare da fissione e da fusione e della struttura dei materiali rilevanti nelle applicazioni tecnologiche avanzate.

L'orientamento è pertanto caratterizzato da corsi rivolti:

- ad approfondire la preparazione fisico-matematica con argomenti non trattati nei corsi di base (*Fisica matematica, Meccanica statistica*);
- alla utilizzazione della strumentazione basata sulle tecniche della fisica sperimentale (*Strumentazione fisica*);
- allo studio di macchine acceleratrici sia dal punto di vista costruttivo che applicativo (*Acceleratori di particelle*);
- all'approfondimento della fisica dei plasmi dell'ingegneria delle macchine per lo studio della fusione nucleare (*Fisica e ingegneria dei plasmi + Ingegneria dei reattori nucleari a fusione 2*);
- all'approfondimento della fisica e della tecnologia dei materiali utilizzati negli impianti nucleari (*Tecnologie e applicazioni nucleari, Radioattività + Superconduttività*);
- approfondire la teoria cinetica che sta alla base dello studio statistico della dinamica di sistemi fisici costituiti da un numero elevatissimo di particelle (*Trasporto di particelle e di radiazione*);

L'orientamento fornisce una preparazione adatta a un inserimento professionale nell'industria nucleare, in laboratori industriali e medici e in laboratori di ricerca sia di base che applicata.

## 5. Inquadramento delle discipline negli orientamenti

Seguono le tabelle dei corsi dei quattro orientamenti, che presentano ognuno le discipline caratterizzanti e quelle che consentono scelte orientate a sviluppare particolari sottosettori.

---

### *Orientamento fisico-strumentale*

- Y<sub>1</sub> Q2030 : Fisica matematica  
Y<sub>2</sub> Q5310 : Strumentazione fisica  
Y<sub>3</sub> Q3390 : Meccanica statistica  
Y<sub>4</sub> Q0010 : Acceleratori di particelle  
Y<sub>n</sub> Insegnamento a scelta tra  
Q4434 : Radioattività (ridotto) + Q5404 : Superconduttività (ridotto) [2. periodo didattico]  
Q2024 : Fisica e ingegneria dei plasmi (ridotto) + Q2934 : Ingegneria  
dei reattori nucleari a fusione 2 (ridotto) [2. pd]  
Q5680 : Tecnologie e applicazioni nucleari [1. pd]  
Q6050 : Trasporto di particelle e di radiazione [2. pd]
- 

### *Orientamento Fisica dei reattori e controllo*

- Y<sub>1</sub> Q6050 : Trasporto di particelle e di radiazione  
Y<sub>3</sub> Q4460 : Reattori nucleari avanzati  
Y<sub>4</sub> Q3470 : Metodi matematici per i reattori nucleari  
Y<sub>6</sub> Q1290 : Dinamica e controllo degli impianti nucleari  
Y<sub>n</sub> Insegnamento a scelta tra  
Q4740 : Sicurezza e analisi di rischio [2. periodo didattico]  
Q2772 : Impianti nucleari 2 [1. pd]  
Q2024 : Fisica e ingegneria dei plasmi (ridotto) + Q2934 : Ingegneria  
dei reattori nucleari a fusione 2 (ridotto) [2. pd]  
Q2030 : Fisica matematica [2. pd]

---

*Orientamento impiantistico*

- Y<sub>1</sub> Q5992 : Termofluidodinamica negli impianti nucleari 2  
Y<sub>6</sub> Q6010 : Termotecnica del reattore  
Y<sub>3</sub> Q2772 : Impianti nucleari 2  
Y<sub>4</sub> Q5680 : Tecnologie e applicazioni nucleari  
Y<sub>n</sub> Insegnamento a scelta tra  
Q2024 : Fisica e ingegneria dei plasmi (ridotto) + Q2934 : Ingegneria  
dei reattori nucleari a fusione 2 (ridotto) [2. periodo didattico]  
Q4410 : Protezione e sicurezza degli impianti nucleari [1. pd]  
Q4240 : Progetti e costruzioni nucleari [2. pd]  
Q4740 : Sicurezza e analisi di rischio [2. pd]
- 

*Orientamento energetico*

- Y<sub>1</sub> Q1830 : Energetica e sistemi nucleari  
Y<sub>2</sub> Q5992 : Termofluidodinamica negli impianti nucleari 2  
Y<sub>3</sub> Q3090 : Localizzazione dei sistemi energetici  
Y<sub>4</sub> Q2772 : Impianti nucleari 2  
Y<sub>n</sub> Insegnamento a scelta tra  
Q1290 : Dinamica e controllo degli impianti nucleari [2. periodo didattico]  
Q4740 : Sicurezza e analisi di rischio [2. pd]  
Q4410 : Protezione e sicurezza degli impianti nucleari [1. pd]  
Q6010 : Termotecnica del reattore [2. pd]
-

# Programmi degli insegnamenti

*I programmi sono riportati in ordine di anno e periodo didattico (a parità, in ordine alfabetico): a questa sezione seguono gli indici alfabetici generali, per titoli degli insegnamenti e per nomi dei docenti. Nell'intestazione ai singoli corsi, dove i titolari del corso siano più d'uno e afferenti ad uno stesso dipartimento, il nome del dipartimento non viene ripetuto.*

*La presente Guida è andata in stampa il 1993-07-13, e quanto riportato è da ritenersi aggiornato a quella data. La ristrettezza dei tempi di edizione non ha permesso di sottoporre all'attenzione dei singoli docenti i testi che seguono per una finale revisione: il CIDEM si scusa con docenti e studenti per eventuali sviste ed errori residui, assumendosene la responsabilità, e ringrazia anticipatamente coloro che vorranno segnalarli.*

## Q 0231      Analisi matematica 1

Anno:periodo 1:1    Impegno (ore): lezioni 72 esercitazioni 48    (settimanali 6/4)

Prof. Dina Giublesi (Matematica)

Finalità del corso è fornire gli strumenti di base del calcolo differenziale, propedeutici ai corsi della Facoltà di ingegneria, utilizzando il linguaggio moderno della matematica ed insegnando come affrontare i problemi con rigore e spirito critico.

**REQUISITI.** Le nozioni fondamentali di algebra, di geometria, di trigonometria, secondo i programmi di scuola secondaria superiore.

### PROGRAMMA

Teoria degli insiemi: nozioni di base.

Applicazioni fra insiemi: definizione e proprietà.

L'insieme dei numeri reali.

Funzioni elementari di variabile reale.

Successioni, limiti di successioni.

Le proprietà locali delle funzioni reali di variabile reale: continuità, limiti, derivabilità.

Confronto locale di funzioni.

Teoremi fondamentali del calcolo differenziale e le loro applicazioni.

Approssimazione locale di funzioni: formula di Taylor.

Cenni sulla approssimazione globale di funzioni reali di variabile reale.

Ricerca degli zeri di una funzione reale di variabile reale.

Teoria dell'integrazione: definizione di integrale indefinito, proprietà.

Regole di integrazione; l'integrale definito e le sue proprietà.

I teoremi della media; applicazioni numeriche.

Integrazione delle funzioni elementari.

Equazioni differenziali ordinarie del 1. ordine.

### BIBLIOGRAFIA.

Pagani, Salsa, *Analisi matematica 1*, Masson.

## Q 0620 Chimica

Anno:periodo 1:1 Impegno (ore): lezioni 85 esercitazioni 30 (settimanali 6/2)

Prof. Mag. Ja Rolando Leschiutta (Scienza dei materiali e ing. chimica)

Il corso si propone di fornire le basi teoriche necessarie per la comprensione e l'interpretazione dei fenomeni chimici e di dare una breve rassegna delle proprietà degli elementi più comuni e dei loro principali composti. Esso si articola di conseguenza in tre parti: una di chimica generale, alla quale vengono dedicate circa 60 ore di lezione; una di chimica inorganica (circa 20 ore di lezione) ed una di chimica organica (5-10 ore di lezione).

**REQUISITI.** Per seguire con profitto il corso sono sufficienti le nozioni di base relative alle leggi generali della chimica, alla simbologia e alla nomenclatura.

### PROGRAMMA

#### *Chimica generale.*

Sistemi omogenei e sistemi eterogenei. Concetto di fase, di composto, di elemento. Teoria atomico-molecolare. Legge di Avogadro. Determinazione dei pesi atomici e molecolari. Concetto di mole. Calcoli stechiometrici.

Nomenclatura chimica.

Il sistema periodico degli elementi. L'atomo secondo i modelli classici e quantomeccanici. Interpretazione elettronica del sistema periodico. Fenomeni legati all'emissione delle radiazioni luminose e dei raggi X.

Legame ionico, covalente, metallico. Energia reticolare, energia di legame. Grado di ossidazione.

Isotopia. Energia di legame dei nucleoni. Radioattività. Fenomeni di fissione e di fusione nucleare.

Leggi dei gas. Dissociazione termica. Teoria cinetica dei gas. Calore specifico dei gas.

Stato solido. Reticolo cristallino e cella elementare. Difetti reticolari. Soluzioni solide.

Stato vetroso. "Composti" nonstechiometrici.

Stato liquido. Equazione di Clausius - Clapeyron. Tensione di vapore delle soluzioni.

Fenomeni crioscopici ed ebullioscopici. Pressione osmotica.

Energia interna ed entalpia. Effetto termico delle reazioni. Entropia ed energia libera di reazione.

Velocità di reazione: catalisi. Legge dell'azione di massa. Principio dell'equilibrio mobile.

Regola delle fasi. Diagrammi di stato ad uno e due componenti. Applicazione della legge delle fasi agli equilibri chimici eterogenei.

Soluzioni di elettroliti. Elettrolisi. Costante di ionizzazione. Prodotto ionico dell'acqua.

Acidi e basi. *pH*. Idrolisi. Prodotto di solubilità.

Potenziale d'elettrodo. Serie elettrochimica. Tensioni di decomposizione. Potenziali di ossido-riduzione. Cenni di corrosione.

#### *Chimica inorganica*

Proprietà e metodi di preparazione industriale dei seguenti elementi e dei loro principali composti: idrogeno, ossigeno, sodio, rame, calcio, zinco, alluminio, carbonio, silicio, azoto, fosforo, cromo, uranio, zolfo, manganese, alogeni, ferro.

*Chimica organica:*

Cenni su idrocarburi saturi ed insaturi.

Fenomeni di polimerizzazione.

Alcoli, aldeidi, chetoni, acidi organici, eteri, esteri, ammine, ammidi, nitrili.

Benzene e suoi omologhi, fenoli, nitroderivati, ammine aromatiche.

**ESERCITAZIONI.** Le esercitazioni sono dedicate all'ampliamento di alcuni argomenti oggetto di lezione, ad esperienze di laboratorio e a calcoli relativi agli argomenti di chimica generale.

**BIBLIOGRAFIA.**

C. Brisi, V. Cirilli, *Chimica generale ed inorganica*, Levrotto & Bella, Torino, 1983.

M.J. Sienko, R.P. Plane, *Chimica : principi e proprietà*, Piccin, Padova, 1968.

C. Brisi, *Esercizi di chimica*, Levrotto & Bella, Torino, 1979.

P. Silvestroni, *Fondamenti di chimica*, Veschi, Roma, 1984.

L. Rosemberg, *Teoria e applicazioni di chimica generale*, Collana Schaum, ETAS Kompass.

M. Montorsi, *Appunti di chimica organica*, CELID, Torino, 1987.

## Q 1430 Disegno tecnico industriale

Anno:periodo 1:2 Impegno (ore): lezioni 56 esercitazioni 28 laboratori 28 (settimanali 4/2/2)

Prof. Giovanni Podda (Sistemi di produzione ed econ. dell'azienda)

L'insegnamento ha lo scopo di fornire agli allievi le nozioni fondamentali del disegno tecnico, nonché le prime indicazioni per il proporzionamento ed il montaggio di elementi e gruppi meccanici utilizzati in particolare nell'industria e negli impianti nucleari.

**PROGRAMMA**

La rappresentazione di elementi meccanici mediante proiezioni ortogonali ed assonometriche.

Normativa nazionale ed internazionale sul disegno tecnico.

Quotatura, con introduzione alla quotatura funzionale.

Tolleranze di lavorazione, dimensionali e geometriche; relazioni con i processi di lavorazione e criteri di scelta.

Elementi ricorrenti nelle costruzioni meccaniche: smussi, raccordi, gole, assi ed alberi, perni e snodi, tenute e guarnizioni.

Montaggio e fissaggio di organi meccanici: dispositivi di collegamento smontabili non filettati (chiavette, linguette, spine, scanalati) e filettati (viti, dadi, ghiere, dispositivi antisvitamento spontaneo).

Collegamenti saldati.

Cenni di tecnologia di base: lavorazioni fondamentali per deformazione ed asportazione di truciolo e loro influenza sul disegno dei pezzi meccanici.

Schemi delle principali macchine utensili.

Elementi di disegno assistito: trasformazioni nel piano; trasformazioni nello spazio; superfici nascoste; curve parametriche cubiche; superfici parametriche bicubiche.

**ESERCITAZIONI.**

Disegni e schizzi di complessivi e particolari.

Applicazione del programma AutoCAD.

Stesura di programmi per trasformazioni geometriche nel piano e nello spazio.

**BIBLIOGRAFIA.**

L.S. Straneo, R. Consorti, *Il disegno tecnico*, Principato, Milano, 1983.

E. Chevalier, E. Chirone, V. Vullo, *Manuale del disegno tecnico*, SEI, Torino, 1981.

M. Orlando, G. Podda, *Lineamenti di disegno automatico*, CLUT, Torino, 1988.

**Q 1901 Fisica 1**

Anno:periodo 1:2 Impegno (ore): lezioni 84 esercitazioni 28 laboratori 4 (settimanali 6/2)

Prof. Felice Iazzi (Fisica)

Il corso si propone di fornire gli elementi di base necessari per la comprensione della meccanica del punto e dei sistemi di particelle, dell'ottica geometrica dei sistemi ottici centrati, della fisica matematica del campo gravitazionale e coulombiano, dell'elettrostatica nel vuoto.

**PROGRAMMA**

Sistemi di unità di misura ed equazioni dimensionali. Incertezza associata a una misura.

Cinematica del punto. Trasformazione delle grandezze cinematiche con il mutare del sistema di riferimento. Trasformazioni di Lorentz.

Dinamica del punto. Attrito statico e dinamico.

Teorema dell'energia cinetica. Leggi di conservazione: energia, quantità di moto, momento angolare.

Sistemi spazialmente estesi: centro di massa. Corpo rigido. Assi principali d'inerzia.

Leggi di conservazione per sistemi estesi.

Oscillazioni armoniche.

Forze non conservative.

Principi della statica.

Cenni alla teoria dell'elasticità.

Statica e dinamica dei fluidi. Equazione di continuità.

Ottica geometrica e sistemi ottici centrati.

Concetto di campo: campi conservativi, energia potenziale.

Campi centrali statici nel vuoto: gravitazionale, coulombiano. Conduttori in condizioni statiche: capacità.

**ESERCITAZIONI.**

Comprendono sia una parte teorica, in cui si propongono e risolvono problemi inerenti alla materia esposta nelle lezioni, sia una parte sperimentale, in cui gli studenti affrontano la problematica della misura di grandezze fisiche valendosi della strumentazione esistente nei laboratori didattici (misura dell'accelerazione di gravità, del periodo del pendolo in funzione della lunghezza e dell'elongazione).

**BIBLIOGRAFIA.**

- G. Lovera, B. Minetti, A. Pasquarelli, *Appunti di Fisica I*, Ed. Levrotto & Bella, Torino, 1977.  
E. Amaldi, R. Bizzarri, G. Pizzella, *Fisica generale, elettromagnetismo, relatività, ottica*, Zanichelli, Bologna, 1986.  
A. Tartaglia, *Elettromagnetismo e ottica*, Levrotto & Bella, Torino, 1987.  
C. Mencuccini, V. Silvestrini, *Fisica 2 : elettromagnetismo e ottica*, Liguori, Napoli, 1988.

## Q 2300 Geometria

Anno:periodo 1:2 Impegno (ore): lezioni 72 esercitazioni 48 (settimanali 6/4)

Prof. Carla Massaza (Matematica)

Il corso si propone di fornire agli studenti una preparazione di base per lo studio di problemi con l'uso di coordinate in relazione alla geometria analitica del piano e dello spazio. Una parte del corso è anche dedicata al calcolo matriciale.

**REQUISITI.** Le nozioni del corso di *Analisi matematica I*, con particolare riguardo alle proprietà dei numeri reali e complessi, e alle operazioni di integrazione e di derivazione.

### PROGRAMMA

Vettori liberi ed applicati. Operazioni fondamentali sui vettori ed applicazioni geometriche. Geometria analitica del piano. Coniche come curve del 2° ordine. Altri luoghi geometrici.

Geometria analitica dello spazio. Coordinate cartesiane, cilindriche e sferiche. Proprietà generali di curve e superficie. Sfere e circonferenze. Coni e cilindri. Superfici di rotazione e quadriche.

Elementi di geometria differenziale delle curve. Curve in forma parametrica. Lunghezza di un arco di curva. Triedro fondamentale, curvatura e torsione. Applicazioni.

Campo complesso; polinomi e funzioni razionali sui complessi.

Spazi vettoriali, matrici e sistemi lineari. Sottospazi. Dimensione. Operatori lineari e matrici, con relative operazioni.

Risoluzione di sistemi lineari. Autovalori ed autovettori di un operatore lineare. Riduzione di una matrice a forma canonica di Jordan.

### BIBLIOGRAFIA.

- S. Greco, P. Valabrega, *Lezioni di matematica per allievi ingegneri, vol. 2* (in due parti), Levrotto & Bella, Torino.  
*Esercizi di geometria*, CELID.

## Q 0232      **Analisi matematica 2**

Anno: periodo 2:1    Impegno (ore): lezioni 72 esercitazioni 48 (settimanali 6/4)

Prof. Cristina Malaguzzi (Matematica)

Il corso si propone di completare la formazione matematica di base dello studente, con particolare riferimento al calcolo differenziale e integrali in più variabili, alla risoluzione delle equazioni e dei sistemi differenziali ed ai metodi di sviluppo in serie.

**REQUISITI.** Si richiede allo studente il possesso dei metodi di calcolo e delle considerazioni di carattere teorico forniti dai corsi di *Analisi matematica* e di *Geometria*.

### PROGRAMMA

Funzioni continue di più variabili.  
 Calcolo differenziali in più variabili.  
 Calcolo differenziale su curve e superfici.  
 Integrali multipli.  
 Integrali su curve e superfici.  
 Spazi vettoriali normati e successioni di funzioni.  
 Serie numeriche e serie di funzioni.  
 Serie di potenze.  
 Serie di Fourier.  
 Equazioni e sistemi differenziali.

### BIBLIOGRAFIA.

A. Bacciotti, F. Ricci, *Lezioni di Analisi matematica II*, Levrotto & Bella, Torino, (nuova edizione) 1991 .  
 M. Leschiutta, P. Moroni, J. Vacca, *Esercizi di matematica*, Levrotto & Bella, Torino, 1982

## Q 1902      **Fisica 2**

Anno: periodo 2:1    Impegno (ore): lezioni 82 esercitazioni 26 laboratori 12 (settimanali 6/2)

Prof. Enrica Mezzetti (Fisica)

La prima parte del corso si propone di fornire gli elementi di base necessari per la comprensione dell'elettromagnetismo nel vuoto e nella materia, della teoria delle onde elettromagnetiche e dell'ottica ondulatoria. La seconda parte è rivolta ai principi fondamentali della fisica atomica. La terza parte è dedicata alla termodinamica.

### PROGRAMMA

Campo elettrico nella materia: dielettrici e conduttori. Proprietà di trasporto, corrente elettrica, legge di Ohm, effetti termoelettrici.  
 Interazione magnetica. Campo magnetico nel vuoto e nella materia: sostanze diamagnetiche, paramagnetiche, ferromagnetiche.  
 Campi elettrici e magnetici dipendenti dal tempo: legge dell'induzione elettromagnetica, induttanza e cenni ai circuiti RLC, equazioni di Maxwell. Onde elettromagnetiche nel vuoto e nella materia.

Ottica ondulatoria: interferenza e diffrazione. Propagazione di onde elettromagnetiche in mezzi anisotropi; polarizzazione della luce.

Interazione della radiazione elettromagnetica con la materia; descrizione effetto fotoelettrico e Compton.

Meccanica quantistica: dualismo onda-particella, principio di indeterminazione di Heisenberg, nozioni introduttive sull'equazione di Schrödinger e funzione d'onda.

Emissioni spontanee e indotta: laser.

Termodinamica classica fino all'introduzione dei potenziali termodinamici ed elementi di termodinamica statistica: funzione di partizione.

### ESERCITAZIONI.

Comprendono sia una parte teorica, in cui si propongono e risolvono problemi inerenti alla materia esposta nelle lezioni, sia una parte sperimentale, in cui gli studenti affrontano la problematica della misura di grandezze fisiche, valendosi della strumentazione esistente nei laboratori didattici (uso di strumenti elettrici, misure relative a circuiti elettrici, misura di indici di rifrazione, di lunghezze d'onda con reticoli di diffrazione).

### BIBLIOGRAFIA.

E. Amaldi, R. Bizzarri, G. Pizzella, *Fisica generale : elettromagnetismo, relatività, ottica*, Zanichelli, Bologna, 1986.

G. Lovera, R. Malvano, B. Minetti, A. Pasquarelli, *Calore e termodinamica*, Levrotto & Bella, Torino, 1983.

M.W. Zemanski, *Calore e termodinamica per ingegneri*, Zanichelli, Bologna, 1970.

## Q 2170 Fondamenti di informatica

Anno: periodo 2:1 Impegno (ore): lezioni 52 esercitazioni 26 laboratori 26 (settimanali 4/2/2)

Prof. Aldo Laurentini (Automatica e informatica)

Il corso intende fornire una visione generale della struttura e delle principali applicazioni di un sistema di elaborazione dell'informazione.

Questo obiettivo sarà raggiunto mediante la descrizione: dei principi di funzionamento, dei principali blocchi costituenti l'architettura *hardware* e delle funzioni relative, dei principali sottosistemi del *software* di base, di un linguaggio di programmazione (Pascal) ed infine di alcune applicazioni.

### PROGRAMMA

Sistemi di numerazione; rappresentazione dell'informazione numerica (virgola fissa e virgola mobile) e non numerica in un elaboratore.

Algebra di Boole e circuiti logici.

Architettura della CPU (componenti, tecnologie, classificazioni, prestazioni); cenni sul linguaggio macchina.

Periferiche: prestazioni e tecnologie (dischi magnetici e ottici, nastri; *display*, stampanti e *plotter*; dispositivi d'ingresso: *mouse*, tavolette, *scanner*).

*Assembler*, linguaggi superiori, compilatori ed interpreti.

Il linguaggio Pascal ed il suo uso. Code, *stack* e tabelle.

Sistemi operativi e *software* di sistema. L'MS/DOS.

Cenni su comunicazioni e reti di calcolatori.

*Software* di utilità per la gestione basi dati, l'editoria elettronica, ecc. Cenni sulla progettazione assistita dal calcolatore (CAD).

## BIBLIOGRAFIA.

P. Demichelis, E. Piccolo, *L'informatica di base, Fortran 77 e Pascal*, Levrotto & Bella, Torino, 1987.

M. Mezzalama, N. Montefusco, P. Prinetto, *Aritmetica dei calcolatori e codifica dell'informazione*, UTET, Torino, 1988.

K. Jensen, N. Wirth, *Pascal user manual and report : ISO Pascal standard*, 3rd ed., Springer, New York, 1985.

**Q 0514      Calcolo numerico**

(Corso ridotto, 1/2 annualità)

Anno:periodo 2:2    Impegno (ore): lezioni 38 esercitazioni 12 (settimanali 3/1)

Prof. Annamaria Orsi Palamara (Matematica)

Il corso ha lo scopo di illustrare i metodi numerici di base e le loro caratteristiche (condizioni di applicabilità, efficienza sia in termini di complessità computazionale che di occupazione di memoria) e di mettere gli studenti in grado di utilizzare librerie scientifiche per la risoluzione di problemi numerici.

REQUISITI. *Analisi matematica 1*, Geometria e algebra, *Fondamenti di informatica*

## PROGRAMMA

1. Preliminari: condizionamento di un problema e stabilità di un algoritmo.
2. Risoluzione di sistemi lineari: metodo di Gauss; fattorizzazione di una matrice e sue applicazioni; metodi iterativi.
3. Calcolo degli autovalori di una matrice.
4. Approssimazione di funzioni e di dati sperimentali: interpolazione con polinomi algebrici e con funzioni *spline*. Minimi quadrati. Derivazione numerica.
5. Equazioni e sistemi di equazioni non lineari: metodo di Newton e sue varianti; metodi iterativi in generale.
6. Calcolo di integrali: formule di Newton-Cotes; polinomi ortogonali; formule gaussiane; *routines* automatiche.
7. Equazioni differenziali ordinarie per problemi ai valori iniziali: metodi *one-step* e *multistep*; stabilità dei metodi; sistemi *stiff*.

## BIBLIOGRAFIA.

G. Monegato, *Fondamenti di calcolo numerico*, Levrotto & Bella, Torino, 1990.

**Q 3204      Meccanica analitica**

(Corso ridotto, 1/2 annualità)

Anno:periodo 2:2    Impegno (ore): lezioni 40 esercitazioni 20 (settimanali 6/4)

Prof. Franco Piazzese (Matematica)

Il corso, presentando i fondamenti della meccanica analitica, offre agli studenti un collegamento di natura concettuale fra la meccanica classica e alcuni importanti argomenti della fisica moderna, conducendoli, in particolare, alle soglie della meccanica quantistica e della moderna meccanica statistica.

**PROGRAMMA**

Richiami sulla meccanica del punto e dei sistemi di punti. Vincoli. Principio dei lavori virtuali ed equazioni di Lagrange. Potenziali dipendenti dalla velocità e funzione di dissipazione.

Principio di Hamilton. Deduzione delle equazioni di Lagrange dal principio di Hamilton. Estensione del principio di Hamilton a sistemi non conservativi e non olonomi. Teoremi di conservazione e proprietà di simmetria.

Trasformazioni di Legendre ed equazioni del moto di Hamilton. Teoremi di conservazione e significato fisico dell'hamiltoniana. Deduzione delle equazioni di Hamilton da un principio variazionale (principio di Hamilton modificato). Principio di minima azione di Maupertuis.

Analogia formale con il principio di Fermat dell'ottica geometrica. Trasformazioni canoniche. Parentesi di Poisson.

Trasformazioni canoniche infinitesime, costanti del moto e proprietà di simmetria. Invarianza canonica dell'estensione in fase. Approccio probabilistico: il concetto di *ensemble* e il teorema di Liouville.

**BIBLIOGRAFIA.**

H. Goldstein, *Classical mechanics*, 2nd ed., Addison-Wesley, 1980.

H. Goldstein, *Meccanica classica*, Zanichelli, Bologna. (NB: è preferibile la versione inglese, in quanto quella italiana è la traduzione della prima edizione, 1950).

C. Cercignani, *Spazio, tempo, movimento*, Zanichelli, Bologna, 1976.

**Q 3480 Metodi matematici per l'ingegneria**

Anno: periodo 2:2 Impegno (ore): lezioni 80 esercitazioni 40 (settimanali 6/4)

Prof. Luciano Pandolfi (Matematica)

Il corso si propone di provvedere gli strumenti matematici che risulteranno utili alla comprensione dei corsi successivi.

REQUISITI. *Analisi matematica 2, Geometria.*

**PROGRAMMA**

*Funzioni di variabile complessa.* Funzioni olomorfe; formula integrale di Cauchy e conseguenze; singolarità isolate; sviluppo di Laurent e residui; principio dell'argomento e teorema di Rouché; funzioni armoniche; trasformate ed antitrasformate di Laplace e di Fourier.

*Cenni sull'integrale di Lebesgue.*

*Spazi di Hilbert.* Definizioni e proprietà fondamentali; sistemi ortonormali completi e sviluppi in serie; spazi  $L^2$  con peso e polinomi ortogonali; operatori lineari negli spazi di Hilbert.

*Equazioni a derivate parziali.* Equazioni quasilineari del primo ordine; equazioni del secondo ordine omogenee o no; equazioni ellittiche, paraboliche ed iperboliche (esemplificate dall'equazione di Laplace, del calore e delle onde); metodo di separazione di variabili.

*Funzioni di Bessel.*

**BIBLIOGRAFIA.**

L. Pandolfi, *Complementi di analisi matematica*, Levrotto & Bella, Torino, 1989.

## Q 4670    **Scienza e tecnologia dei materiali nucleari**

Anno: periodo 2:2    Impegno (ore): lezioni 70    esercitazioni 20    laboratori 15    (settimanali 6/2)

Prof. Margherita Appendino Montorsi (Scienza dei materiali e ing. chimica)

Il corso verte sullo studio delle proprietà, dei metodi di elaborazione e delle caratteristiche di impiego dei materiali di più comune utilizzazione nella pratica della ingegneria nucleare.

**REQUISITI.** È indispensabile la conoscenza della chimica generale ed inorganica e di alcune nozioni fondamentali di chimica organica, nonché dei concetti base della fisica (*Chimica, Fisica 1*).

### PROGRAMMA

Acqua per uso industriale. Determinazione e metodi di abbattimento della durezza. Degasazione. Deionizzazione con resine scambiatrici. Metodi di depurazione.

Combustione e combustibili.

Sistemi omogenei. Metodi di separazione fondati sulla distillazione frazionata, cristallizzazione, scambio ionico.

Sistemi eterogenei. Diagrammi di stato binari e ternari.

Stato solido. Struttura cristallina. Difetti di punto, di linea, di volume. Microstruttura e proprietà meccaniche, termiche ed elettriche dei materiali.

Materiali ceramici di uso industriale. Refrattari. Nuovi ceramici.

Materiali compositi.

Leganti idraulici. Cemento Portland, pozzolanico e d'alto forno. Il calcestruzzo. Normative di legge.

Materiali ferrosi. Diagramma di stato ferro-cementite e ferro-grafite. Caratteristiche meccaniche degli acciai. Trattamenti termici e trattamenti di indurimento superficiale.

Acciai speciali. Ghise da getto. Normativa UNI.

Leghe di rame, di alluminio e di zirconio.

Polimeri termoplastici e termoindurenti.

Materiali nucleari. Combustibili e mezzi fertili. Produzione del biossido di uranio. Refrigeranti. Materiali per controllo e schermatura. *Reprocessing* del combustibile per via umida e per via secca. Stoccaggio delle scorie radioattive.

**ESERCITAZIONI.** Calcoli numerici e illustrazione di prove di laboratorio riguardanti gli argomenti sopra elencati.

In laboratorio: saggi analitici e tecnologici su acque, combustibili, materiali leganti, leghe metalliche, materiali nucleari.

### BIBLIOGRAFIA.

C. Brisi, *Chimica applicata*, Levrotto & Bella, Torino, 1988.

## Q 2040 Fisica nucleare

Anno:periodo 3:1 Impegno (ore): lezioni 78 esercitazioni 16 laboratori 10 (settimanali 6/2)

Prof. Piero Quarati (Fisica)

Nella prima metà del corso viene introdotta la meccanica quantistica. Le applicazioni ed esercizi riguardano argomenti di importanza istituzionale per la fisica atomica e nucleare e sono rivolti all'apprendimento della fisica dei fenomeni e agli ordini di grandezza delle quantità fisiche misurabili.

Nella seconda parte oltre ad una trattazione degli atomi idrogenoidi e di fenomeni di confine tra fisica atomica e nucleare si introducono le forze nucleari e si trattano modelli della struttura nucleare e di reazioni nucleari utilizzando, ove possibile, i principi fondamentali della fisica classica e quantistica.

### PROGRAMMA

La quantizzazione delle grandezze fisiche.

Le leggi della radiazione.

Aspetti ondulatori della materia.

L'equazione di Schrödinger ed applicazioni.

Fondamenti matematici della meccanica quantistica.

L'oscillatore armonico ed applicazioni.

Costanti del moto e leggi di conservazione.

Teoria delle perturbazioni.

*Spin*.

Particelle identiche e fisica dei molti corpi.

Atomi idrogenoidi.

Atomi esotici.

Le forze nucleari.

Il problema dei due corpi.

Modelli nucleari.

Teoria degli urti.

Reazioni nucleari.

Fissione.

Fusione.

Decadimenti alfa, beta e gamma.

Cenni alle reazioni nucleari di interesse per la fisica del plasma.

Cenni alle particelle elementari; astrofisica e nucleosintesi.

### ESERCITAZIONI.

Risoluzione di problemi e approfondimento di argomenti accennati nelle lezioni.

Esercitazioni di laboratorio: contatore Geiger; misura di raggi gamma.

### BIBLIOGRAFIA.

H. Haken, H. Wolf, *Fisica atomica e quantistica*, Bollati Boringhieri, 1990.

K. Krane, *Introduction to nuclear physics*, Wiley, New York, 1987.

W.E. Meyerhof, *Elements of nuclear physics*, McGraw-Hill, New York, 1967.

K.N. Mukhin, *Experimental nuclear physics*, MIR, Mosca, 1988.

## Q 4600 Scienza delle costruzioni

Anno:periodo 3:1 Impegno (ore): lezioni 52 esercitazioni 52 (settimanali 4/4)

Prof. Franco Algotino (Ing. strutturale)

Il corso pone le basi per lo studio del corpo deformabile.

Imposta il problema del corpo elastico e presenta la soluzione del problema di Saint Venant. Vengono studiate principalmente strutture monodimensionali (travi e sistemi di travi).

Si imposta infine il problema della stabilità e della non linearità, con trattazione della teoria di Eulero. Oltre alla impostazione teorica ed analitica dei problemi strutturali, particolare riguardo viene dato alle soluzioni ottenute mediante procedimenti numerici.

REQUISITI. Statica nel piano e nello spazio, geometria delle aree, analisi matematica, calcolo numerico.

### PROGRAMMA

Richiami di statica e geometria delle aree.

Analisi dello stato di deformazione: componenti della deformazione, deformazioni principali, equazioni di congruenza.

Analisi dello stato di tensione: equazioni di equilibrio, cerchi di Mohr, tensioni principali.

Equazione dei lavori virtuali. Teoremi energetici.

Leggi costitutive del materiale. Il corpo elastico: la legge di Hooke. Tensioni ideali, limiti di resistenza.

Il problema di Saint Venant: impostazione generale del problema, flessione deviata, torsione, taglio.

Il principio di Saint Venant: teoria delle travi.

Travature piane caricate nel loro piano e caricate trasversalmente. Travature spaziali.

Calcolo delle sollecitazioni e degli spostamenti in travature isostatiche ed iperstatiche.

Problemi non lineari con grandi deformazioni. Fenomeni di instabilità. L'asta caricata di punta: teoria di Eulero, l'asta oltre il limite elastico.

### ESERCITAZIONI.

Gli allievi, in gruppi, guidati dal docente, risolvono problemi concreti, ed eseguono elaborati servendosi di *personal computers*.

### BIBLIOGRAFIA.

P. Cicala, *Scienza delle costruzioni, vol. 1 e 2*, Levrotto & Bella, Torino, 1984.

G. Faraggiana, A.M. Sassi Perino, *Applicazioni di scienza delle costruzioni*, Levrotto & Bella, Torino, 1986.

## Q 5950 Termodinamica applicata

Anno:periodo 3:1 Impegno (ore): lezioni 56 esercitazioni 56 laboratori 8 (settimanali 4/4)

Prof. Paolo Gregorio (Energetica)

Il contenuto del corso è ripreso dal capitolo sulla termodinamica dell'insegnamento tradizionale della fisica tecnica presso questa Facoltà, opportunamente ampliato ed adattato alle esigenze del corso di laurea in Ingegneria nucleare.

Gli argomenti trattati stabiliscono tutti i fondamenti della termodinamica di base ed alcuni elementi delle applicazioni ingegneristiche della termodinamica avanzata ed hanno inoltre funzione propedeutica ai corsi successivi del triennio (in particolare *Macchine, Termocinetica, Termofluidodinamica degli impianti nucleari 1 e 2*, ecc.). Il corso comprenderà lezioni di tipo tradizionale, esercitazioni individuale grafiche e di calcolo ed alcune esperienze di laboratorio.

REQUISITI. *Analisi matematica 2, Fisica 2.*

## PROGRAMMA

### *Introduzione.*

Natura della termodinamica, relazione con la meccanica classica, temperatura, calore e legge "0", scale di temperatura, il principio di stato, lavoro, proprietà termodinamiche, leggi fondamentali della termodinamica, gas ideale.

### *Richiami ed applicazioni del primo principio della termodinamica.*

Sostanze pure e cambiamenti di stato: proprietà delle sostanze pure, evaporazione, proprietà del vapore umido (regioni di saturazione), stati metastabili, rappresentazioni grafiche (diagrammi di Clapeyron, Gibbs e Mollier).

### *Analisi energetica dei sistemi aperti.*

Bilanci energetici e convenzioni di segno, il sistema chiuso, il sistema aperto, il volume di controllo, sommario dei casi speciali di sistemi aperti, il coefficiente di Joule-Thomson.

### *Richiami alle nozioni di base sul secondo principio della termodinamica.*

Secondo principio, enunciato secondo Kelvin-Planck e secondo Clausius, processi reversibili e cicli, temperatura termodinamica, equazione di Clausius, definizione macroscopica dell'entropia, principio dell'incremento di entropia, entropia di una sostanza pura, variazione di entropia per un gas ideale, il ciclo di Carnot, il secondo principio per i sistemi aperti, interpretazione microscopica dell'entropia.

### *Lavoro disponibile ed analisi dei processi.*

Concetto generale, sistemi aperti interagenti con una o più capacità termiche in condizioni di moto stazionario, sistemi chiusi soggetti a trasformazioni finite e cicliche, analisi dei processi per sistemi aperti e sistemi chiusi, rappresentazioni grafiche.

### *Equazioni di stato e relazioni generali.*

Preliminari matematici, funzioni di Helmholtz e Gibbs, l'equazione dell'energia, le relazioni di Maxwell, entalpia, energia interna ed entropia, relazioni tra calori specifici, l'equazione di Clausius-Clapeyron, equazioni di stato, proprietà dei gas reali.

### *Miscele di aria e vapor d'acqua.*

La legge di Gibbs-Dalton, proprietà energetiche delle miscele, saturazione adiabatica, la carta psicrometrica, processi di condizionamento dell'aria, torri di refrigerazione.

### *Cicli.*

Considerazioni generali, cicli a vapore, deviazioni dai cicli teorici, analisi dei cicli, compressori di gas, cicli delle macchine a combustione interna (Otto, Diesel, Stirling), cicli delle macchine con turbine a gas, analisi exergetica dei cicli, cicli inversi a vapore, la pompa di calore, cicli inversi ad assorbimento.

### *Termodinamica dei processi irreversibili.*

Leggi fenomenologiche e loro applicabilità, relazioni di reciprocità di Onsager, flusso termico e generazione entropica, fenomeni termoelettrici (effetti Seebeck, Peltier, Thomson), circuiti termoelettrici.

### *Conversione diretta dell'energia.*

Celle a combustibile, dispositivi termoelettrici e termoionici, generatori magnetoidrodinamici.

### *Irraggiamento.*

Leggi fondamentali e corpo nero, fattori di forma, corpi grigi, analogia elettrica, irraggiamento solare, effetti sulle proprietà termodinamiche e di trasporto.

ESERCITAZIONI. Esercizi di calcolo su tutti gli argomenti trattati, esercitazioni di calcolo e grafiche sui cicli, con particolare riferimento a quelli utilizzati negli impianti nucleari, alcune esercitazioni di laboratorio.

#### BIBLIOGRAFIA.

C. Boffa, P. Gregorio, *Elementi di fisica tecnica*, vol. 2, Levrotto & Bella, Torino, 1981.  
 P. Gregorio, *Esercizi di fisica tecnica*, 2 v., Levrotto & Bella, Torino, 1990.  
 P. Gregorio, *Fisica tecnica : temi d'esame svolti*, Levrotto & Bella, Torino, 1990.

## Q 1790 Elettrotecnica

Anno:periodo 3:2 Impegno (ore): lezioni 86 esercitazioni 20 laboratori 14 (settimanali 6/2/2)

Prof. Edoardo Barbisio (Ing. elettrica industriale)

Scopo del corso è fornire una metodologia per una corretta utilizzazione di macchine ed impianti elettrici, che tenga conto dei problemi di sicurezza dell'operatore e dell'impianto.

A tal fine, dopo aver esposto i fondamenti dell'analisi delle reti di bipoli (con accenni ai tripoli e ai doppi bipoli di più frequente impiego) e della teoria dei campi, evidenziando le interconnessioni metodologiche d'approccio, se ne mostra l'impiego nei modelli delle principali macchine e degli impianti di distribuzione dell'energia elettrica.

Tali argomenti sono integrati da notizie riguardanti le basilari apparecchiature di comando e di protezione.

REQUISITI. (Consigliati) *Analisi matematica 2, Fisica 2.*

#### PROGRAMMA

Reti elettriche a costanti concentrate in regime stazionario e sinusoidale quasi stazionario, metodo simbolico.

Potenza istantanea, attiva, reattiva e apparente; teorema di Boucherot.

Rifasamento.

Cenno sugli strumenti di misura.

Reti in regime transitorio.

Sistemi trifasi simmetrici ed equilibrati: misure di potenza con inserzione Aron e rifasamento.

Campo di corrente stazionario: impianti di messa a terra e normative anti-infortunistiche. Misure degli impianti di terra. Dimensionamento e protezione delle condutture.

Campo magnetico stazionario. Circuiti magnetici. Magneti permanenti.

Campi elettromagnetici quasi stazionari. Induzione elettromagnetica. Perdite nei materiali ferromagnetici.

Trasformatori monofasi e trifasi. Autotrasformatori.

Macchine ad induzione trifase e monofase.

Macchine a corrente continua.

#### BIBLIOGRAFIA.

Civalleri, *Elettrotecnica*, Levrotto & Bella, Torino, 1982.

Fiorio, Gorini, Meo, *Appunti di elettrotecnica*, Levrotto & Bella, Torino, 1984.

Kupfmuller, *Fondamenti di elettrotecnica*, UTET, Torino, 1973.

Chua, Desoer, Kuh, *Circuiti lineari e non lineari*, Jackson, Milano, 1991.

Laurentini, Meo, Pomè, *Esercizi di elettrotecnica*, Levrotto & Bella, Torino, 1975.

Fiorio, *Problemi di elettrotecnica*, CLUT, Torino, 1989.

Bobbio, *Esercizi di elettrotecnica*, CUEN, Napoli, 1992.

# Q 1965 **Fisica dei reattori a fissione + Fisica dei reattori a fusione**

(Corso integrato)

Anno: periodo 3:2 Impegno (ore): lezioni 80 esercitazioni 40 (settimanali 6/4)

Prof. Silvio Edoardo Corno (Energistica)

La *Fisica dei reattori a fissione* si prefigge di chiarire i principi di funzionamento di tali macchine dal punto di vista del bilancio neutronico e della distribuzione spaziale della potenza, sia in condizioni statiche che dinamiche. I principali metodi fisico-matematici della neutronica applicata vengono analizzati con l'intento di evidenziare il loro effettivo significato fisico e di rendere comprensibili le implicazioni ingegneristiche della teoria nel progetto delle centrali a fissione.

La *Fisica dei reattori a fusione* si propone di fornire la propedeutica essenziale e i più semplici elementi della teoria fisico-matematica che sta alla base del funzionamento delle macchine con cui si tenta di ottenere la fusione nucleare controllata. L'enfasi è posta sui fondamenti dell'elettrodinamica classica e della fluidodinamica dei continui ionizzati, analizzando le orbite delle particelle cariche in campo magnetico e la propagazione delle onde nei plasmi.

L'approccio metodologico vuole essere formativo più che informativo: ciò al fine di permettere che l'allievo sia messo in grado di affrontare autonomamente tutta una vasta gamma di problemi fisico-matematici che si incontrano anche in altri svariati campi della ricerca applicata. Gli argomenti trattati fanno parte del patrimonio culturale strettamente caratteristico dell'ingegnere nucleare.

## PROGRAMMA

### *Fisica dei reattori a fissione*

1. Fissione dei nuclei pesanti: bilancio energetico; fondamenti concettuali della teoria di una generica reazione a catena; i neutroni come portatori della catena; classificazione dei reattori.
2. Diffusione e rallentamento dei neutroni nei mezzi materiali: equazione di diffusione monocinetica; moderatori; rallentamento continuo; metodi a multigruppi energetici; cenni al collegamento tra teorie di tipo diffusivo e trasportistico.
3. Teoria della criticità delle strutture moltiplicanti: interazione tra sorgenti neutroniche e mezzi moltiplicanti; equazione critica dei reattori omogenei nudi e riflessi, in diverse approssimazioni; teoria dell'età alla Fermi; cenni ai teoremi fondamentali della fisica dei reattori.
4. Reattori eterogenei: necessità ed effetto dell'eterogeneità; catture in risonanza, moltiplicazioni veloci, utilizzazione dei neutroni termici nei reticoli.
5. Cinetica delle strutture moltiplicanti: influenza dei neutroni ritardati; soluzione delle equazioni dinamiche in diverse approssimazioni; cenni alle retroazioni di temperatura e di densità del combustibile e del moderatore.
6. Metodi perturbativi nella statica e nella dinamica: funzione importanza dei neutroni; applicazioni ad uno e due gruppi energetici.
7. Controllo della reazione a catena: teoria elementare delle barre di controllo; nozioni elementari sulla stabilità; aspetti neutronici della sicurezza intrinseca nei reattori a fissione.

### *Fisica dei reattori a fusione*

1. Fusione dei nuclei leggeri: tipi di reazioni sfruttabili nell'energetica industriale; bilanci energetici; criteri di ignizione di un plasma.

2. Descrizione delle principali macchine per la fusione nucleare ad alta temperatura.
3. Fondamenti di elettrodinamica classica: equazioni di Maxwell; potenziali elettrodinamici; teoremi di conservazione; propagazione dell'energia raggianti.
4. Orbite di particelle cariche in presenza di campo elettromagnetico esterno.
5. Descrizione dielettrica di un plasma: onde nei plasmi.
6. Formulazione delle equazioni di base della magnetofluidodinamica ideale.
7. Cenni ai problemi del riscaldamento dei plasmi ed alla dissipazione di energia radiante.

ESERCITAZIONI. Le esercitazioni prevedono applicazioni teoriche e numeriche.

#### BIBLIOGRAFIA.

- B. Montagnini, *Lezioni di fisica del reattore nucleare*, Univ. di Pisa, 1983.  
 A.F. Henry, *Nuclear reactor analysis*, MIT Press, Cambridge (Mass.), 1975.  
 R.O. Dendy, *Plasma dynamics*, Oxford Science Publ., Oxford, 1990.  
 S.E. Corno, Appunti alle lezioni dei corsi di Fisica dei reattori a fissione e a fusione.

## Q 3210 Meccanica applicata alle macchine

Anno/periodo 3:2 Impegno (ore): lezioni 78 esercitazioni 52 (settimanali 6/4)

Prof. Giovanni Jacazio (Meccanica)

Il corso tratta i problemi relativi alla meccanica del corpo rigido e alla trasmissione della potenza e si suddivide nei seguenti capitoli fondamentali: 1) principi generali di meccanica dei corpi rigidi; 2) componenti impiegati nella trasmissione del moto; 3) dinamica dei sistemi meccanici.

#### PROGRAMMA

##### 1. Meccanica dei corpi rigidi.

Moto di un corpo puntiforme e di un corpo rigido rispetto a sistemi fissi e mobili di coordinate. Proprietà di inerzia dei corpi rigidi. Forze di massa e forze di superficie. Gradi di libertà. Equazioni di equilibrio della dinamica. Lavoro ed energia. Urto fra corpi rigidi.

##### 2. La trasmissione del moto.

Giunti, flessibili, ingranaggi, rotismi, freni, frizioni, cuscinetti e lubrificazione.

##### 3. Vibrazioni meccaniche.

Vibrazioni di sistemi a uno e a più gradi di libertà. Vibrazioni di sistemi a parametri distribuiti. Modi di vibrazione. Vibrazioni casuali. Equilibramento dei sistemi rotanti. Velocità critiche degli alberi.

##### 4. Servomeccanismi.

La regolazione dei sistemi meccanici. Risposta in frequenza. Stabilità. Principali tipi di servomeccanismi e loro caratteristiche.

ESERCITAZIONI. Le esercitazioni consistono nella presentazione e risoluzione di problemi di meccanica relativi agli argomenti svolti a lezione.

#### BIBLIOGRAFIA.

- G. Jacazio, B. Piombo, *Meccanica applicata alle macchine*, Levrotto & Bella, Torino, 1991.  
 G. Jacazio, B. Piombo, *Esercizi di meccanica applicata alle macchine*, Levrotto & Bella, Torino, 1982.

## Q 1710 Elettronica applicata

Anno:periodo 4:1 Impegno (ore): lezioni 70 esercitazioni 20 (settimanali 6/2)

Prof. Maurizio Vallauri (Elettronica)

Il corso è organizzato come insegnamento di elettronica applicata per non elettronici; in quanto inserito nel corso di laurea in Ingegneria nucleare esso ha lo scopo di presentare i principi dell'elettronica con accento sulle applicazioni che interessano precipuamente la tecnica nucleare.

**REQUISITI.** *Elettrotecnica, Metodi matematici per l'ingegneria*

### PROGRAMMA

#### 1. *Fondamenti.*

Circuiti e sistemi. Reti lineari resistive. Sorgenti dipendenti. Amplificatori operazionali. Capacità e induttanze.

#### 2. *Elettronica lineare.*

Processi di conduzione elettrica. Circuiti a diodi e applicazioni. Elettronica fisica dei transistori bipolari, FET, MOS. Circuiti con transistori: modelli per grandi e piccoli segnali. Reazioni nei sistemi fisici, reazione e stabilità negli amplificatori. Risposta in frequenza degli amplificatori.

#### 3. *Elettronica non lineare.*

Circuiti digitali: algebra binaria, realizzazioni circuitali integrate di funzioni logiche. Applicazioni della tecnica digitale: multivibratori, contatori, registri. Realizzazioni digitali dei multivibratori. Conversione analogica-digitale e digitale-analogica.

#### 4. *Elettronica della tecnica nucleare.*

Elementi base di una catena di conteggio: amplificatore per impulsi, circuiti di coincidenza e anticoincidenza, discriminazione integrale e differenziale, misura di cadenza di conteggio. Analizzatori multi-canali. Sistema di regolazione automatica del reattore e suoi componenti.

**ESERCITAZIONI.** Le esercitazioni comprendono applicazioni di calcolo, progetto e verifica di massima relative ai principali argomenti del corso.

### BIBLIOGRAFIA.

Gli allievi avranno a disposizione note manoscritte riproducibili sui principali argomenti del corso.

*Per eventuale consultazione:*

J. Millman, Grabel, *Microelectronics*, 2nd ed., McGraw-Hill, 1987.

R.J. Smith, *Circuits, devices, and systems*, 5th ed., Wiley, 1992.

U. Tietze, C. Schenk, *Halbleiter-Schaltungstechnik*, 7. Aufl., Springer, 1985.

## Q 2030      Fisica matematica

Anno: periodo 4:1    Impegno (ore): lezioni 60 esercitazioni 40 (settimanali 4-6/2-4)

Prof. Guido Rizzi (Matematica)

Argomento principale del corso: introduzione alla relatività speciale (RS). Argomento ulteriore (facoltativo, in ambito seminariale): introduzione alla relatività generale (RG). Concedendo uno spazio relativamente ampio a questioni di carattere metodologico, il corso intende: *i*) proporre una visione sintetica, rigorosa e concettualmente semplice di un ampio dominio della fisica moderna; *ii*) familiarizzare lo studente con una mentalità, un linguaggio, una metodologia che gli consentano sia di approfondire la propria cultura scientifica sia di rendere possibile e fruttuosa un'eventuale collaborazione con i fisici, anche a livello di ricerca.

Il corso si articola in lezioni e seminari (facoltativi).

**REQUISITI.** Gli argomenti dei corsi di *Analisi matematica 2*, *Fisica 2*, *Meccanica analitica (ridotto)*, *Geometria*, *Metodi matematici per l'ingegneria*.

### PROGRAMMA

#### *Meccanica relativistica.*

Vengono anzitutto introdotte le tecniche matematiche adatte allo studio dei campi e della RS (calcolo tensoriale in varietà piatte). Tali tecniche saranno utilizzate sistematicamente in tutto il corso. Si introducono i due principi della RS e lo spaziotempo minkowskiano della RS. In tale contesto si studia la meccanica della particella, sia con massa propria costante che con massa propria variabile. Tale studio viene poi esteso ai sistemi di particelle e ai continui materiali, anche in presenza di interazioni a distanza. Particolare attenzione è rivolta ai teoremi di conservazione.

#### *Elettrodinamica relativistica.*

In questa parte, che è la più ampia del corso e forse la più significativa, si istituisce la teoria di Maxwell-Lorentz in forma covariante nello spaziotempo minkowskiano. La teoria è applicata, in particolare, allo studio dell'irraggiamento elettromagnetico di una carica accelerata.

#### *Seminario di RG.*

Introduzione matematica (necessariamente ampia): forme lineari e multilineari; varietà differenziabili; varietà a connessione affine; varietà riemanniane; geodetiche e curvatura di una varietà. Calcolo tensoriale in varietà curve. Introduzione fisica: i fondamenti della RG. *Red-shift* gravitazionale. Gravitazione e geometria: modello matematico dello spaziotempo fisico secondo la RG. Sistemi di riferimento in RG. Equazioni gravitazionali einsteiniane. Approssimazione newtoniana; soluzione di Schwarzschild.

### BIBLIOGRAFIA.

G. Rizzi, *Introduzione alla relatività speciale*, 2 v., CLUT.

G. Rizzi, *Introduzione alla relatività generale : appunti*.

C. Cattaneo, *Introduzione alla teoria einsteiniana della gravitazione*, Veschi, Roma, 1960.

V. Cantoni, *Appunti di fisica matematica*, Veschi, Roma, 1983.

## Q 2775 Impianti nucleari + Ingegneria dei reattori nucleari a fusione 1

(Corso integrato)

Anno:periodo 4:1 Impegno (ore): lezioni 80 esercitazioni 28 (settimanali 6/2)

Prof. Bruno Panella, Prof. Roberto Zanino (Energetica)

Il corso integrato intende fornire le conoscenze di base dell'ingegneria degli impianti nucleari a fissione e a fusione, con particolare riferimento alle centrali per la produzione di energia elettrica.

Dopo aver descritto i principali tipi di *reattori a fissione*, e giustificate le scelte di impianto e dei materiali, verranno analizzati i metodi di progettazione dei componenti e i problemi di sicurezza.

Per i *reattori a fusione*, dopo aver studiato il bilancio energetico dell'impianto vengono descritte le principali macchine sperimentali e presentati i componenti più importanti di un *tokamak*.

### PROGRAMMA

#### *Impianti nucleari.*

L'energia nucleare nel contesto energetico mondiale: risorse, produzione e consumi di energia; potenzialità e problematiche della fonte nucleare.

Scelta dei materiali nei reattori nucleari. Classificazione e schemi di impianto delle principali tipologie: reattori a gas-grafite, ad acqua leggera e pesante, autofertilizzanti. Descrizione dei componenti principali di una centrale di potenza. Ciclo del combustibile nucleare: bilanci di materiale nel ciclo.

Sicurezza degli impianti nucleari. Protezione dalle radiazioni, difesa in profondità, controllo del reattore, coefficienti di reattività, sistema di protezione del nocciolo, sistema di rimozione del calore residuo, sistema di refrigerazione di emergenza; classificazione dei transitori incidentali. Incidente base di progetto e incidenti severi. Analisi deterministica e probabilistica degli incidenti. Reattori intrinsecamente sicuri: sistemi attivi e passivi.

Metodologia di progettazione, normativa nucleare, garanzia della qualità, ingegneria dei circuiti, progetto termoidraulico e termomeccanico, calcolo degli schermi.

Cenno al costo di produzione dell'energia elettronucleare.

#### *Ingegneria dei reattori nucleari a fusione 1.*

Introduzione alla fusione: reazioni di fusione nucleare, criterio di Lawson, ignizione, schema di un reattore; principali tipi di reattori: confinamento magnetico del plasma, confinamento inerziale. Il *tokamak*.

Bilancio energetico del plasma: impurezze, processi radiativi, interazioni plasma-parete, metodi di riscaldamento del plasma. Bilancio energetico dell'impianto.

Componenti di un reattore a fusione di tipo *tokamak*: magneti, *blanket*, prima parete e limiter/divertore.

Descrizione di macchine sperimentali a medio campo (JET, ecc.) e ad alto campo (FTU, ALCATOR, C-Mod). Descrizione dei progetti ITER e IGNITOR.

ESERCITAZIONI. Calcolo di alcuni componenti di impianti a fissione e a fusione.

### BIBLIOGRAFIA.

C. Lombardi, *Impianti nucleari*, CLUP, Milano, 1982.

M. Cumo, *Impianti nucleari*, UTET, Torino, 1976.

S. Glasstone, A. Sesonke, *Nuclear reactor engineering*, Van Nostrand, New York, 1981.

[segue]

- J. Weisman, *Elements of nuclear reactor design*, Elsevier, Amsterdam, 1977.  
 J. Raeder [et al.], *Controlled nuclear fusion*, Wiley, New York, 1986.  
 T.J. Dolan, *Fusion research*, Pergamon, New York, 1982.  
 W.M. Stacey jr., *Fusion*, Wiley, New York, 1984.  
 J. Wesson [et al.], *Tokamaks*, Clarendon, Oxford, 1987.

## Q 5270      **Strumentazione e misure per gli impianti nucleari**

Anno: periodo 4:1    Impegno (ore): lezioni 52 laboratori 52 (settimanali 4/4)

Prof. Aldo Pasquarelli (Fisica)

Il corso è finalizzato alla formazione di una cultura di base sui principi di funzionamento della strumentazione convenzionale e nucleare di corrente impiego negli impianti nucleari, alla formulazione dei criteri metodologici e normativi per la definizione delle grandezze da misurare in un impianto e la caratterizzazione delle specifiche per la scelta della strumentazione più idonea ed infine alla acquisizione di una professionalità relativa alla taratura ed analisi degli errori della strumentazione nucleare e convenzionale.

REQUISITI. *Fisica nucleare.*

### PROGRAMMA

1. Fondamenti di teoria delle misure e funzioni della strumentazione negli impianti: il sistema internazionale; definizione, realizzazione, riproduzione e disseminazione delle unità; campioni; procedimenti logico operativo di una misurazione; incertezze di misura e loro classificazione; trattamento statistico dei dati sperimentali; valutazione dell'incertezza di una misura diretta ed indiretta; compatibilità di più misure e loro riferibilità; il monitoraggio negli impianti industriali; le misure per le funzioni di controllo; le misure per l'analisi ingegneristica sperimentale.
2. Configurazione generalizzata e funzionale di una catena di misura.
3. Caratteristiche di funzionamento generalizzate per una catena di misura: caratteristica statica; caratteristica dinamica; analisi degli errori.
4. Dispositivi di misura (sensori e trasduttori): dispositivi per la misura di spostamenti; dispositivi per la misura di forze, coppie e potenze meccaniche; dispositivi per la misura di pressioni assolute e differenziali; dispositivi per la misura di portata e velocità di un fluido; sensori e trasduttori per la misura di temperature e flussi termici; dispositivi per la misura del livello; dispositivi per la misura delle grandezze caratteristiche di un deflusso bifase (frazione di vuoto, portata, identificazione di *flow pattern*).
5. Strumentazione per la rilevazione e misura di particelle ionizzanti.
6. Strumentazione *in core*.
7. Strumentazione *ex core*.
8. Sistemi per la manipolazione, trasmissione e registrazione dei dati.
9. Normative e criteri per il progetto delle catene di misura per il monitoraggio ed il controllo degli impianti nucleari.

**LABORATORI.**

- A Misure di portata con flangia tarata: il rilevamento di  $\Delta p$ ,  $p$  e  $T$  avviene con trasduttori; la conversione in portata viene eseguita in modo analogico.
- B Taratura d'un igrometro capacitivo.
- C Misure di portata (gas) con sensore anemometrico.
- D Misure di spostamento e di angolo.
- E Modello d'acquisizione dati semplificato con gestione d'un voltmetro digitale e di una stampante.

**BIBLIOGRAFIA.**

Petternell, Vitelli, *Strumentazione industriale*, UTET, Torino.  
 Doebelin, *Measurement systems*, McGraw-Hill, Int. Student Ed.  
 Serie di monografie dei principali costruttori.

## **Q 5991    Termofluidodinamica negli impianti nucleari 1**

Anno:periodo 4:1    Impegno (ore): lezioni 80 esercitazioni 28    (settimanali 6/2)

Prof. Mario Malandrone (Energetica)

Il corso ha il fine di fornire allo studente di Ingegneria nucleare gli strumenti di base per poter affrontare in modo rigoroso lo studio termoidraulico di un impianto nucleare. A causa della generalità e del peso dato ai metodi per affrontare problemi di moto dei fluidi e di scambio termico, il corso può essere consigliato anche a studenti in Ingegneria meccanica e aeronautica.

Il programma comprende l'analisi dei processi di trasferimento di massa, di energia e di quantità di moto nei fluidi, con particolare riferimento ai fluidi usati come refrigeranti dei reattori nucleari di potenza. Viene inoltre studiato in profondità il problema della conduzione nei solidi. È infine trattato lo scambio termico per irraggiamento.

**REQUISITI.** *Metodi matematici per l'ingegneria, Termodinamica applicata.*

**PROGRAMMA**

Dopo aver illustrato le proprietà termodinamiche e di trasporto dei fluidi e dei solidi, si fa cenno alla statica dei fluidi e quindi si esaminano le equazioni di conservazione della massa, dell'energia e della quantità di moto, che vengono applicate ai condotti chiusi, per fluidi ideali e viscosi: equazione di Bernoulli e di Navier-Stokes. Sono studiati il concetto di turbolenza e la teoria dello strato limite. Vengono illustrate le formulazioni per la determinazione del profilo di velocità e delle cadute di pressione nei condotti chiusi.

Viene quindi approfondito il meccanismo di trasferimento del calore: modelli di Leveque, Graetz, Eckert (moto laminare); modelli di Reynolds, Prandtl, Von Karman e Martinelli (moto turbolento). Dopo un cenno sull'analisi dimensionale si analizzano le formulazioni per il coefficiente di scambio termico. Si studiano poi la convezione naturale e lo scambio termico nei metalli liquidi. Si analizzano infine problemi di conduzione in geometrie complesse, come le alette, e in condizioni bidimensionali e tridimensionali, stazionarie e non stazionarie, con particolare riferimento ai solidi generanti calore (tipici dei reattori nucleari). Si esaminano i metodi numerici per la risoluzione delle equazioni più generali della conduzione.

Sullo scambio termico per irraggiamento vengono trattati gli argomenti seguenti: leggi fondamentali e corpo nero, fattori di forma, corpi grigi, analogia elettrica, irraggiamento solare, suoi effetti sulle proprietà termofisiche dei materiali.

Viene infine illustrato il calcolo di progetto e di verifica degli scambiatori di calore con i metodi della differenza di temperatura logaritmica media e NUT.

**ESERCITAZIONI.** Le esercitazioni comprendono la risoluzione di numerosi problemi sia di meccanica dei fluidi che di scambio termico, e lo svolgimento di esercitazioni di laboratorio sugli scambiatori di calore.

#### BIBLIOGRAFIA.

B. Panella, *Lezioni di termocinetica*, CLUT, Torino, 1979.

J.G. Knudsen, D.L. Katz, *Fluid dynamics and heat transfer*, McGraw-Hill, New York, 1958.

E.R.G. Eckert, R.M. Drake jr, *Heat and mass transfer*, McGraw-Hill, New York, 1959.

H.S. Carslaw, J.C. Jaeger, *Conduction of heat in solids*, Clarendon, Oxford, 1959.

F.M. White, *Fluid mechanics*, McGraw-Hill Int. Student Ed., 1986.

J.P. Jolman, *Heat transfer*, McGraw-Hill Int. Student Ed. 1987.

C. Boffa, P. Gregorio, *Elementi di fisica tecnica*, Levrotto & Bella, Torino, 1981.

P. Gregorio, *Esercizi di fisica tecnica*, Levrotto & Bella, Torino, 1990.

## Q 0940 Costruzione di macchine

Anno:periodo 4:2 Impegno (ore): lezioni 75 esercitazioni 45 (settimanali 6/4)

Prof. Graziano Curti (Meccanica)

Il corso si propone di fornire agli allievi gli insegnamenti metodologici e le nozioni tecniche necessari per affrontare il problema della progettazione in campo meccanico.

Vengono trattati argomenti di carattere generali, quali il comportamento a fatica, lo scorrimento a caldo e lo smorzamento interno dei materiali, le vibrazioni flessionali e torsionali e le velocità critiche degli alberi rotanti e argomenti di carattere particolare riferiti ai principali organi di macchine.

**REQUISITI.** *Scienza delle costruzioni, Meccanica applicata alle macchine, Disegno tecnico industriale*

#### PROGRAMMA

Materiali e loro caratteristiche.

La resistenza dei materiali a fatica e allo scorrimento.

Fatica oligociclica. Meccanica della frattura.

Effetti di intaglio.

Collegamento forzati, filettature, viti e bulloni.

Chiavette, linguette, accoppiamenti scanalati.

Travi curve, molle.

Risultati della teoria di Hertz.

Cuscinetti, generalità e montaggio degli stessi.

Assi e alberi.

Ingranaggi a evolvente, ruote a denti diritti ed elicoidali, normali e a profili spostati: condizioni geometrico-cinematiche e verifiche di resistenza.

Dischi rotanti a forte velocità e sottoposti a gradienti termici.

Tubi spessi.

Variazioni flessionali e velocità critiche di sistemi a masse concentrate e distribuite.  
Oscillazioni torsionali.

#### ESERCITAZIONI.

Consistono nella progettazione di un gruppo meccanico e comprendono un dimensionamento di massima (calcoli e disegno) degli organi principali del gruppo.

#### BIBLIOGRAFIA.

R. Giovannozzi, *Costruzione di macchine, vol. 1-2*, Pàtron, Bologna.

## Q 1830 Energetica e sistemi nucleari

Anno:periodo 4:2 Impegno (ore): lezioni 86 esercitazioni 28 (settimanali 6/2)

Prof. Evasio Lavagno (Energetica)

Il corso si propone di fornire le conoscenze e gli strumenti metodologici utili per la valutazione dei sistemi energetici industriali e civili per la produzione dell'energia elettrica e per la produzione combinata di energia elettrica e termica.

Vengono analizzate con dettaglio le soluzioni impiantistiche e di sistema, nucleari e convenzionali, particolarmente innovative dal punto di vista tecnologico e ambientale e dotate di elevate caratteristiche di sicurezza.

L'insegnamento può essere seguito anche da studenti di altri corsi di laurea, i quali siano particolarmente interessati all'analisi dei sistemi energetici.

#### PROGRAMMA

*Forme e trasformazioni fondamentali dell'energia.*

Fonti e usi finali dell'energia. I cicli di trasformazione delle fonti fossili e nucleari e di quelle rinnovabili.

*Fondamenti di energetica.*

Principi di conservazione dell'energia; energia ed exergia; metodologie per l'analisi energetica ed exergetica dei cicli e delle trasformazioni termodinamiche.

*Le fonti primarie di energia.*

Classificazione e caratteristiche; modalità di utilizzazione.

*Sistemi, processi e tecnologie.*

Impianti di trasformazione delle fonti energetiche: solare diretto e indiretto, biomassa, carbone, idrocarburi, fissione e fusione nucleare, idrogeno. Tecnologie per il vettore energetico.

*Interazioni tra i sistemi energetici e l'ambiente.*

Impatti ambientali, loro valutazione e mitigazione.

*Le nuove tecnologie.*

Maturità tecnologica e commerciale. Situazione attuale e prospettive per impianti e sistemi provati e per proposte innovative da punto di vista tecnologico e ambientale. Stato dell'arte in relazione a: cicli a carbone, celle a combustibile, cicli dell'idrogeno, reattori nucleari avanzati, reattori nucleari innovativi a sicurezza intrinseca, fonti rinnovabili.

*Modelli per l'analisi dei sistemi energetici.*

Valutazione delle caratteristiche tecnologiche, economiche ed ambientali; programmi e codici (TEMIS, MARKAL, GRAFENE).

ESERCITAZIONI. Le esercitazioni consistono nello sviluppo di casi concernenti particolari cicli energetici e nell'applicazione di alcuni modelli di analisi integrale tecnico-economica e ambientale.

## Q 3110 Macchine

Anno: periodo 4/2 Impegno (ore): lezioni 78 esercitazioni 48 (settimanali 6/4)

Prof. Paolo Campanaro (Energetica)

Nel corso sono esposti i principi termodinamici e fluidodinamici necessari ad una corretta comprensione del funzionamento delle macchine a fluido.

Di queste viene poi sviluppata l'analisi del funzionamento nei tipi di più comune impiego (sia macchine motrici, sia macchine operatrici) con l'approfondimento richiesto dall'obiettivo di far diventare l'allievo nella sua futura attività professionale un accorto utilizzatore sia nella scelta delle macchine stesse, sia nel loro esercizio.

A questo scopo viene dato ampio spazio ai problemi di scelta, di installazione, di regolazione, sia in sede di lezione, sia in sede di esercitazione, dove vengono esemplificate le necessarie calcolazioni.

### REQUISITI.

Sono nozioni propedeutiche essenziali quelle presenti nel corso di *Termodinamica applicata* e, in parte, nel corso di *Meccanica applicata alle macchine*.

### PROGRAMMA

Considerazioni generali sulle macchine a fluido motrici ed operatrici. Classificazioni. Applicazione di concetti di termodinamica e fluidodinamica alle macchine.

Cicli e schemi di impianti a vapore d'acqua; mezzi per migliorare il rendimento dell'impianto. Cicli rigenerativi. Impianti con produzione combinata di energia meccanica e calore.

Turbine a vapore. Triangoli di velocità. Stadi ad azione e a reazione, portate, potenze, rendimento. Regolazione degli impianti. La condensazione degli impianti a vapore.

Compressori di gas; classificazione, schemi di funzionamento.

Generalità sui turbocompressori. Valutazione della caratteristica adimensionata d'un turbocompressore. Similitudine di funzionamento. Instabilità per stallo e pompaggio. La regolazione dei turbocompressori.

Compressori volumetrici (a stantuffo, rotativi del tipo a palette e Roots). Generalità, funzionamento, perdite caratteristiche, regolazione.

Turbine a gas: considerazioni termodinamiche sul ciclo; organizzazione meccanica, funzionamento e regolazione degli impianti. Ciclo con aria e ciclo con elio: analisi comparata delle due soluzioni.

Macchine idrauliche motrici e operatrici; turbine Pelton, Francis, Kaplan e loro regolazione.

Le turbopompe, loro regolazione. Pompe volumetriche. La cavitazione nelle turbomacchine idrauliche. Le pompe-turbine.

Motori alternativi a combustione interna: classificazione, cicli di lavoro. Perdite caratteristiche, rendimenti, prestazioni. Alimentazione e regolazione di tali motori.

**ESERCITAZIONI.** Il corso delle esercitazioni prevede applicazioni specifiche di calcolo sulle macchine trattate a lezione, con particolare attenzione a temi relativi all'impianto nucleotermoelettrico.

### BIBLIOGRAFIA.

Appunti delle lezioni sono messi a disposizione degli allievi.

A.E. Catania, *Complementi di esercizi di macchine*, Levrotto & Bella, Torino, 1979.

A. Beccari, *Macchine*, vol. 1, CLUT, Torino, 1980.

F. Montevocchi, *Turbine a gas*, CLUP, Milano, 1977.

## Q 5310 Strumentazione fisica

Anno:periodo 4:2 Impegno (ore): lezioni 90 (settimanali 6)

Prof. Luigi Gonella (Fisica)

Si presenta la problematica delle apparecchiature utilizzanti a fini applicativi fenomeni fisici che l'usuale didattica tratta solo nell'ambito dei corsi di fisica. Tali apparecchiature, ampiamente usate in vasti settori industriali, ben ricadono nella competenza degli ingegneri nucleari che hanno maggior formazione in campo fisico dei colleghi di altri rami.

Si affronta il tema coll'esempio di due settori di largo interesse applicativo, la strumentazione da vuoto e quella ottica, ed una trattazione sugli sviluppi odierni della metrologia. L'enfasi vien posta sull'evoluzione di linguaggio, metodo, e definizione stessa dei problemi che si richiede per passare dall'approccio scientifico dei testi di fisica a quello ingegneristico.

Il corso prevede lezioni con alcune esercitazioni progettuali e visite d'istruzione.

**REQUISITI.** Biennio, *Termodinamica applicata, Elettrotecnica.*

### PROGRAMMA

#### *Metrologia odierna.*

Sostituzione del concetto d'incertezza a quello d'errore; tipi di grandezze misurabili; grandezze d'influenza e taratura.

#### *Strumentazione da vuoto.*

Fenomenologia fondamentale dei gas a bassa pressione; parametri applicativi dedotti dalla teoria, cinetica dei gas e loro limiti; unità di misura; regimi di flusso; portata di condotti; velocità di svuotamento; sorzione e degasamenti; fenomeni elettrici; gette-raggio e spruzzamento; pompe e vacuometri dei vari tipi; giunzioni e valvole; tecnologia dell'impianto; misura gas residuo, cercafughe.

#### *Strumentazione ottica.*

Radiometria e fotometria; problematica generale dello strumento ottico; tecnologia dei fenomeni ottici; sorgenti e rivelatori di luce, compreso occhio umano; formazione d'immagini; ottica parassiale e suo trattamento matriciale; pupille e finestre; fotometria d'immagine; aberrazioni e loro correzione; la formazione d'immagine come trasferimento d'informazione; funzioni di trasferimento ottico; approccio in termini di diffrazione e trasformata di Fourier; strumentazione basata sulla deformazione dell'immagine per lo studio ottico dei materiali.

### ESERCITAZIONI.

Progetto di un impianto da vuoto. Calcoli fotometrici su sistemi ottici.

### BIBLIOGRAFIA.

S. Allaria, *Il vuoto oggi*, Paravia (TSP ; 4).

Appunti del corso.

## Q 5992 Termofluidodinamica negli impianti nucleari 2

Anno: periodo 4:2 Impegno (ore): lezioni 78 esercitazioni 26 laboratori 6 (settimanali 6/2)

Prof. Mario Malandrone (Energetica)

Il corso è strutturato in modo da fornire agli studenti del corso di laurea nucleare i modelli interpretativi dei fenomeni connessi allo scambio termico e al moto dei fluidi bifase per il calcolo termo-idraulico dei circuiti degli impianti di potenza (con particolare attenzione agli impianti nucleari); il corso può essere consigliato anche a studenti dei corsi di laurea in meccanica e chimica.

REQUISITI. *Termofluidodinamica negli impianti nucleari 1.*

### PROGRAMMA

Il programma del corso estende l'analisi dei processi di trasferimenti di massa, di energia e di quantità di moto, già svolta nel corso di *Termofluidodinamica negli impianti nucleari 1* per i fluidi monofase, al caso delle miscele bifase utilizzate come refrigeranti nei reattori nucleari di potenza.

La prima parte del corso tratta i problemi associati all'idrodinamica dei fluidi bifase. Dopo aver descritto i caratteri distintivi dei vari tipi di moto esistenti nei deflussi adiabatici e diabatici, ed aver fornito i criteri per la loro individuazione, si esaminano le equazioni di conservazione della massa, dell'energia e della quantità di moto per i fluidi bifase al fine di valutare le cadute di pressione nei condotti sia adiabatici che diabatici. Vengono presentati i modelli analitici e le correlazioni empiriche per i vari tipi di moto del fluido. Questa prima parte comprende inoltre la trattazione degli efflussi critici e dell'instabilità dei deflussi bifase.

La seconda parte del corso inizia con il capitolo dedicato alla fenomenologia dell'ebollizione sia nel caso di fluido stagnante che nel caso di circolazione forzata. Dopo aver trattato gli aspetti fondamentali del fenomeno dell'ebollizione nucleata, sono presentati i modelli analitici e le correlazioni empiriche che interpretano i fenomeni della generazione della fase gassosa e i meccanismi di trasmissione del calore associati. Successivamente sono descritti i fenomeni associati alla crisi termica e sono presentate le correlazioni che consentono la previsione dell'evento. L'ultimo capitolo di questa parte è dedicato ai fenomeni di scambio termico in ultracrisi.

La terza parte del corso analizza in dettaglio i fenomeni della condensazione.

Nello svolgimento del programma vengono inoltre descritti i metodi e le apparecchiature utilizzati per la misura delle grandezze caratteristiche della termoidraulica dei deflussi bifase.

### ESERCITAZIONI.

Le esercitazioni consistono nella soluzione di problemi termoidraulici bifase.

LABORATORI. Visite precedute da brevi presentazioni alle esperienze in corso presso il Dipartimento di Energetica.

### BIBLIOGRAFIA.

J.G. Collier, *Convective boiling and condensation*, McGraw-Hill, 1972.

G.B. Wallis, *One dimensional two-phase flow*, McGraw-Hill, 1969.

G.F. Hewitt, N.S. Hall-Taylor, *Annular two-phase flow*, Pergamon, 1970.

A.E. Bergles, J.G. Collier, J.M. Delhaye, G.F. Hewitt, F. Mayinger, *Two-phase flow and heat transfer in the power and process industries*, Hemisphere, 1981.

D. Chisholm, *Two-phase flow in pipelines and heat exchangers*, Godwin, 1983.

## Q 6050 Trasporto di particelle e di radiazione

Anno: periodo 4:2 Impegno (ore): lezioni 84 esercitazioni 28 (settimanali 6/2)

Prof. Bruno Coppi (Energetica)

Lo studio dell'evoluzione dinamica di sistemi fisici costituiti da un numero elevatissimo di particelle (quali ad esempio i gas, i plasmi, i neutroni nella materia) richiede in linea di principio l'uso di un numero altrettanto elevato di variabili per la loro descrizione. In realtà un grande numero di fenomeni può venire descritto correttamente per mezzo di un numero alquanto limitato di parametri.

Lo scopo del corso è duplice. Da un lato, mostrare come l'analisi statistica e l'esistenza di scale temporali diverse nell'evoluzione di un sistema permettano una descrizione semplificata ma appropriata nell'analisi di singoli fenomeni. Dall'altro, descrivere i modelli cinetici più importanti per lo studio dei fenomeni di interesse nella fisica dei reattori nucleari ed inquadrarli da un punto di vista unitario.

In particolare, il corso costituisce un'introduzione di tipo teorico allo studio della fisica dei plasmi.

### PROGRAMMA

#### 1. *Calcolo delle probabilità.*

Variabili aleatorie, valor medio, varianza, covarianza, teorema del limite centrale e sue applicazioni.

#### 2. *Derivazione delle equazioni cinetiche.*

Funzioni di densità ad una e più particelle, equazione di Liouville, catena di Bogolyubov–Born–Green–Kirkwood–Yvon, ipotesi di Bogolyubov e soluzione perturbativa, campo autoconsistente, integrale degli urti.

#### 3. *Equazione di Boltzmann per i gas.*

Derivazione fenomenologica dell'equazione di Boltzmann ed a partire dalla catena BBGKY, sezioni d'urto, teorema H, distribuzione di equilibrio, condizioni al contorno e secondo principio della termodinamica.

#### 4. *Elementi di meccanica statistica.*

Calcolo delle proprietà macroscopiche di un sistema in equilibrio per mezzo di medie temporali, ipotesi ergodica e sue giustificazioni, sistemi non isolati, definizione della temperatura, distribuzione canonica.

#### 5. *Derivazione delle equazioni dei fluidi.*

Derivazione dei parametri macroscopici di un fluido a partire dalla distribuzione microscopica, equazioni di continuità, metodo di Chapman–Enskog e soluzioni di ordine 0 (equazione di Bernoulli) e di ordine 1 (equazione di Navier–Stokes).

#### 6. *Equazione del trasporto per i neutroni.*

Equazione del trasporto lineare, metodi analitici, problema di Milne.

#### 7. *Equazione di Vlasov per i plasmi.*

Smorzamento di Landau, teoria quasi lineare, modi BGK, metodi alle particelle.

#### 8. *Propagazione di onde elettromagnetiche nei dielettrici e nei plasmi.*

Proprietà generali del tensore dielettrico, relazioni di Kramers–Krönig, propagazione in mezzi non lineari (equazione di Schrödinger non lineare e soluzioni solitoniche), tensore dielettrico nel plasma freddo, onde in plasmi non magnetizzati e in plasmi magnetizzati.

### ESERCITAZIONI.

Le esercitazioni prevedono la descrizione e l'utilizzo di programmi numerici per la simulazione di plasmi.

## BIBLIOGRAFIA.

L. Landau, E. Lifshits, *Fisica cinetica*, Editori Riuniti, Roma, 1979.

R. Davison, *Neutron transport theory*, Oxford University Press, Oxford, 1958.

K. Huang, *Statistical mechanics*, Wiley, New York, 1963.

K. Hinchin, *Mathematical foundations of statistical mechanics*, Dover, New York, 1949.

N. Krall, A. Trivelpiece, *Principles of plasma physics*, San Francisco Press, San Francisco.

Y.L. Klimontovich, *The statistical theory of non-equilibrium processes in a plasma*, Pergamon, New York, 1967.

R. Davidson, *Methods in nonlinear plasma theory*, Academic Press, New York, 1972.

## Q 4740 Sicurezza e analisi di rischio

Anno:periodo 4,5:2 Impegno (ore): lezioni 78 esercitazioni 18 (settimanali 6/2)

Prof. Giovanni Del Tin (Energetica)

Il corso si propone di fornire gli elementi conoscitivi e gli strumenti operativi per l'analisi di sicurezza di impianti e sistemi complessi, attraverso le metodologie sia deterministiche che probabilistiche.

### PROGRAMMA

Modalità di analisi dell'impianto e del processo (sequenze incidentali innescate da eventi interni, sequenze incidentali causate da eventi esterni).

Modelli fisici per la previsione dei rilasci accidentali di energia e di sostanze pericolose (modelli di calcolo relativi a: irraggiamento da incendi, sovrappressione da esplosione, dispersione dei rilasci di aeriformi, liquidi saturi, fluidi solubili e insolubili in acqua).

*Identificazione del rischio:* analisi di operabilità (HAZOP) e analisi dei modi e degli effetti dei guasti (FMEA).

*Stima del rischio:*

- valutazione della probabilità di accadimento e dimensioni delle conseguenze degli eventi incidentali;
- analisi statistiche;
- analisi di affidabilità con le tecniche dell'albero degli eventi, dell'albero dei guasti e con metodi markoviani;
- metodi simulativi.

*Valutazione e controllo dei rischi:*

- modalità di intervento per ridurre le probabilità di accadimento dell'incidente;
  - mitigazione delle conseguenze attraverso interventi;
  - nel progetto dell'impianto (*stand-by*, ridondanza, diversificazione, sistemi di protezione),
  - nella localizzazione (valutazioni di localizzazioni alternative),
  - nelle procedure di esercizio e manutenzione (sistemi con componenti riparabili e non),
  - nelle procedure di emergenza;
- costruzione del *probabilistic risk assessment* (PRA) per un impianto di riferimento.

### ESERCITAZIONI.

È prevista l'analisi particolareggiata di un impianto di riferimento attraverso l'applicazione delle tecniche FMEA, HAZOP, albero degli eventi, albero dei guasti e con l'utilizzazione di codici di calcolo per l'analisi quantitativa.

### BIBLIOGRAFIA.

M.D. Shooman, *Probabilistic reliability: an engineering approach*, McGraw-Hill, 1969.

A. Pages, M. Gondran, *Fiabilité des systèmes*, Eyrolles, Paris, 1980.

E.J. Henley, H. Kumamoto, *Reliability engineering and risk assessment*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1981.

R. Billinton, R.N. Allan, *Reliability evaluation of engineering systems*, Plenum, New York, 1983.

A.E. Green, *Safety systems reliability*, Wiley, Chichester, 1983.

## Q 0010 Acceleratori di particelle

Anno:periodo 5:1 Impegno (ore): lezioni 60 esercitazioni 10 (settimanali 6)

Prof. Pier Paolo Delsanto (Fisica)

Il corso si propone di dare agli studenti le nozioni fondamentali riguardanti il funzionamento, i criteri di progetto e le caratteristiche di fascio delle macchine acceleratrici più comunemente impiegate nel campo della ricerca e delle applicazioni, in particolare industriali e biomediche.

Gli acceleratori sono visti in stretta connessione coi problemi di schermatura, dosimetria, trasporto di fascio e vuoto ad essi correlati. Si danno cenni sulle sorgenti a radioisotopi e sulle loro applicazioni.

REQUISITI. Nozioni elementari di relatività ristretta e di fisica nucleare.

### PROGRAMMA

Circuiti magnetici e curve di demagnetizzazione.

Acceleratori elettrostatici: Cockroft-Walton e Van der Graaf.

Cenni sulla teoria della scarica nei gas. Legge di Paschen. Equazione di Fowler-Nordheim.

Lenti elettromagnetiche e approssimazione parassiale. Confronto fra i diversi tipi di acceleratori elettromagnetici. Principio della stabilità di fase.

Sorgenti ioniche. Perdite di energia per radiazione. Effetto di coerenza.

Condizioni di stabilità e oscillazioni di betatrone. Iniezione e utilizzo degli elettroni in un betatrone.

Diversi tipi di sincrotroni. Equazione di fase e oscillazioni di sincrotrone. Effetti di risonanza. Sincrotroni a gradiente alterato.

Calcolo del diagramma di stabilità col metodo delle matrici caratteristiche.

Altri tipi di acceleratori: *linacs*, ciclotroni e sincrociclotroni. SSC e altri programmi internazionali in via di sviluppo.

Cenni sulle applicazioni degli acceleratori in campo scientifico, industriale e biomedico. Cenni sulle sorgenti a radioisotopi e loro impieghi.

### BIBLIOGRAFIA.

S. Humphries jr., *Principles of charged particle acceleration*, Wiley, 1986.

E. Persico, E. Ferrari, S.E. Segre, *Principles of particle accelerators*, Benjamin, 1968.

W. Scharf, *Particle accelerators and their uses*, Harwood, 1986.

## Q 2772 Impianti nucleari 2

Anno:periodo 5:1 Impegno (ore): lezioni 76 esercitazioni 24 (settimanali 6/2)

Prof. Giovanni Del Tin (Energetica)

Il corso si propone di fornire elementi per il calcolo e la progettazione di impianti nucleari a fissione e a fusione e per le relative analisi di sicurezza.

REQUISITI. *Fisica dei reattori a fissione + Fisica dei reattori a fusione (integrato), Impianti nucleari + Ingegneria dei reattori nucleari a fusione 1 (integrato), Termofluidodinamica negli impianti nucleari 1.*

## PROGRAMMA

*Reattori nucleari a fissione.*

Criteri, metodi e normative per la progettazione dei principali componenti dell'impianto e dei sistemi ausiliari, di protezione e di emergenza.

Regimi transitori e analisi di sicurezza. Transitori di reattività. Transitori di perdita di carico elettrico. Transitori di perdita di portata. Transitori conseguenti alla riduzione della capacità di asportazione del calore del circuito primario (LOHS). Transitori di perdita di refrigerante (LOCA). Forze di getto e forze di reazione. Analisi di sicurezza con metodologie probabilistiche: PRA.

*Reattori nucleari a fusione.*

Identificazione degli eventi iniziatori di sequenze incidentali critiche. Analisi di alcuni transitori incidentali: perdite di portata e di refrigerante nei sistemi preposti alla rimozione del calore, perdita di vuoto, perdita di integrità fisica del sistema di immagazzinamento del trizio. Analisi di sicurezza dei magneti, del sistema criogenico e del sistema di vuoto.

ESERCITAZIONI. Calcolo e progettazione di massima di un contenitore di sicurezza. Esempio di analisi di sicurezza di un sistema con metodologie probabilistiche.

## BIBLIOGRAFIA.

E.E. Lewis, *Nuclear power reactor safety*, Wiley, New York, 1977.

N.J. McCormick, *Reliability and risk analysis*, Academic Press, London, 1981.

J. Wesson, *Tokamaks*, Clarendon, Oxford, 1987.

**Q 3090 Localizzazione dei sistemi energetici**

Anno:periodo 5:1 Impegno (ore): lezioni 78 esercitazioni 28 (settimanali 6/2)

Prof. Evasio Lavagno (Energetica)

Il corso si propone di analizzare le metodologie e le procedure di localizzazione di impianti e sistemi energetici, con particolare attenzione alle tecnologie di salvaguardia ambientale. La scelta tra soluzioni alternative, a parità di servizi resi, viene impostata sulla base di un approccio di tipo sistemico, che si pone obiettivi di razionalizzazione tecnico-economica ed ambientale.

L'insegnamento può essere seguito anche da studenti di altri corsi di laurea, i quali siano particolarmente interessati al rapporto energia-ambiente.

## PROGRAMMA

*Elementi di energetica.*

Le trasformazioni energetiche. I sistemi energetici: dalle fonti agli usi finali.

*Gli impianti ed i sistemi energetici.*

Caratteristiche costruttive e funzionali dei vari tipi di impianti e sistemi elettrogeneratori e di produzione di energia termica. Infrastrutture. I cicli del combustibile ed i relativi impatti. Valutazioni qualitative e quantitative dei rilasci di esercizio. I rilasci incidentali. Tecniche di controllo e riduzione delle emissioni.

*Il contesto normativo.*

Norme e procedure della legislazione nazionale ed internazionale. Analisi critica di alcuni casi rilevanti.

*Metodi di analisi comparata di impianti e sistemi energetici.*

Definizione dei parametri di valutazione in termini di validità: tecnologica, energetica, socioeconomica, territoriale, ambientale. Criteri e metodi per l'ottimizzazione delle scelte.

ESERCITAZIONI. Le esercitazioni consistono nello sviluppo di casi concernenti diversi sistemi energetici.

## Q 3390 Meccanica statistica

Anno: periodo 5:1 Impegno (ore): lezioni 75 esercitazioni 20 (settimanali 6/2)

Prof. Mario Rasetti (Fisica)

Il corso intende dare agli studenti una buona conoscenza operativa nelle aree più rilevanti della meccanica statistica: fenomeni di equilibrio, sia classici che quantistici, e di nonequilibrio; processi stocastici e teoria del trasporto; nonché fornire una serie di esempi di applicazione, soprattutto rilevanti alla fisica dei reattori, alla chimica, alla termodinamica, alla fisica dei fluidi classici e quantistici (in particolare nei suoi aspetti di più diretto interesse per l'elettronica), alla fisica dei plasmi e del progetto di reattori a fusione.

REQUISITI. Principi generali della fisica sia classica che moderna (termodinamica, elettromagnetismo, meccanica classica e quantistica), matematica: generale e complementi.

### PROGRAMMA

Principi fondamentali della meccanica statistica: spazio delle fasi; ergodicità e *mixing*; teorema di Liouville.

Fenomeni di equilibrio: il concetto di *ensemble*; *ensemble* microcanonico, canonico e gran canonico; funzione di partizione; teorema di equipartizione; gas perfetto, potenziali termodinamici.

Sistemi quantistici: Fermi-Dirac; Bose-Einstein; condensazione bosonica.

Fenomeni di non-equilibrio: teorema di Wiener; teorema di Nyquist; moto browniano; equazioni di Langevin e di Fokker-Planck; *random walk*.

Teoria cinetica; termodinamica dei processi irreversibili: relazioni di Onsager; teorema di fluttuazione e dissipazione.

Applicazioni: gas reale; relazioni chimiche; solidi: proprietà elettriche, elettroniche, termiche, magnetiche dei solidi (metalli, semiconduttori); processi cooperativi e transizioni di fase: superconduttività, ferromagnetismo; polimeri; plasmi e sistemi condensati ionizzati e nuclearmente reattivi (reattori a fusione); proprietà di trasporto neutronico: effetti quantistici.

### ESERCITAZIONI.

Svolgono problemi ed esempi relativi alle applicazioni e simulazioni al calcolatore.

### BIBLIOGRAFIA.

M. Rasetti, *Modern methods in statistical mechanics*, World Scientific, Teanek, 1987.

## Q 3470 Metodi matematici per i reattori nucleari

Anno:periodo 5:1 Impegno (ore): lezioni 84 esercitazioni 28 (settimanali 6/2)

Prof. Gianni Coppa (Energistica)

Il corso si propone di descrivere i metodi matematici e le tecniche di analisi numerica di maggiore importanza per l'ingegneria nucleare.

La maggior parte dei metodi descritti è principalmente finalizzata alla fisica dei reattori nucleari, sempre però tenendo presenti le possibili applicazioni ad altri rami dell'ingegneria.

### PROGRAMMA

#### 1. *Metodi alle differenze finite per la soluzione delle equazioni della diffusione.*

Metodi di discretizzazione spaziale ad una o più dimensioni; metodi diretti e iterativi per la soluzione numerica delle equazioni discretizzate (metodi di Gauss, Jacobi, Gauss-Seidel, sovrarilassamento); analisi della convergenza ed ottimizzazione; equazioni multigruppi: iterazioni interne ed esterne.

#### 2. *Elementi di calcolo variazionale.*

Equazione di Eulero-Lagrange; moltiplicatori di Lagrange; generalizzazione a casi multidimensionali. Condizioni al contorno; variazione seconda, condizioni di Legendre e Jacobi.

#### 3. *Applicazione dei metodi variazionali.*

Trasformazione di equazioni differenziali in equazioni funzionali; metodi di Ritz e dei residui pesati; metodi agli elementi finiti; metodi *coarse mesh*.

#### 4. *Metodi alle ordinate discrete per la soluzione dell'equazione del trasporto.*

Metodi di discretizzazione spazio-angolare; metodo delle collisioni successive; analisi della convergenza e metodi di accelerazione; *ray effects* e metodi agli elementi finiti angolari.

5. *Metodi numerici per la soluzione di equazioni alle derivate parziali dipendenti dal tempo.* Schemi espliciti ed impliciti; analisi di consistenza, stabilità e convergenza; metodi a più dimensioni: direzioni alternate e metodi localmente monodimensionali; equazioni non lineari; applicazioni alle equazioni della diffusione e a quelle della convezione.

Sono previste alcune lezioni integrative per coloro che non abbiano conoscenze sulla teoria del trasporto dei neutroni.

**ESERCITAZIONI.** Le esercitazioni prevedono delle applicazioni e la messa a punto di programmi numerici su alcuni argomenti del corso.

### BIBLIOGRAFIA.

B. Montagnini, *Lezioni di fisica del reattore nucleare*, Univ. di Pisa, 1983.

Y. Ronen, *Handbook of nuclear reactor calculations*, CRC, Boca Raton, 1986.

V. Smirnov, *Cours de mathématiques supérieures*, MIR, Mosca, 1975.

J. Joye, *Computational techniques for differential equations*, North-Holland, 1984.

## **Q 4410 Protezione e sicurezza degli impianti nucleari**

Anno: periodo 5:1 Impegno (ore): lezioni 78 (settimanali 6)

Prof. Luigi Gonella (Fisica)

Il corso è inteso a fornire le nozioni di radioprotezione e i principi di sicurezza usati in campo nucleare, ponendo particolare attenzione al confronto critico con i rischi e le normative di sicurezza degli altri settori della tecnica, allo scopo di mettere in grado l'ingegnere nucleare di estendere ad altri campi i criteri protezionistici avanzati propri del nucleare.

**REQUISITI.** Nozioni generali di fisica nucleare, di fisica del reattore nucleare e di impianti nucleari.

### **PROGRAMMA**

Il concetto e la misura del rischio. Quadro globale dei rischi delle vita comune e delle attività civili e industriali. Rischi d'azione e di carenza, immediati e ritardati. Legami tra il rischio e l'impatto ambientale.

Trasferimento d'energia dalla radiazione alla materia. Grandezze dosimetriche, relazione fluenza-dose. Valutazione dell'esposizione interna all'organismo.

Effetti biologici e sanitari delle radiazioni ionizzanti. Equivalente di dose. Relazione dose-effetto. Esposizione di una popolazione. Posizione delle radiazioni ionizzanti nel quadro generale degli agenti genotossici.

Criteri generali della radioprotezione. Dose permissibile e principio ALARA. Livelli di riferimento e stati di emergenza. Concentrazioni permissibili e limiti d'assunzione. Normativa internazionale e nazionale. Confronto colle normative di sicurezza a protezione in altri campi.

Fondo naturale e ambientale di radiazione. Sorgenti industriali, mediche e miscellanee. Il reattore come sorgente di radiazione. Scorie di fissione e di attivazione. Trattamento delle scorie. Il problema della "proliferazione". Cenni sui problemi di protezione e sicurezza nei reattori a fusione.

Analisi degli incidenti e della relativa contaminazione nelle varie condizioni d'impianto. Impostazione delle analisi di sicurezza. Il rischio dell'elettroproduzione nucleare in confronto a quello degli altri mezzi di trasformazione d'energia e nel quadro generale dei rischi.

**BIBLIOGRAFIA.** Appunti delle lezioni.

## Q 4434 Radioattività

(Corso ridotto, 1/2 annualità)

Anno:periodo 5:1 Impegno (ore): lezioni 30 esercitazioni 20 (settimanali 4)

Prof. Bruno Minetti (Fisica)

Il corso si propone di approfondire le informazioni di base sui metodi sperimentali, già visti nel corso di *Fisica nucleare*, in vista di applicazioni specifiche (ad es. misura di radioattività ambientale, inquinamento radioattivo di falde acquifere, ecc.) e di approfondire alcuni argomenti specifici non sufficientemente sviluppati nel corso di *Fisica nucleare*.

### PROGRAMMA

Richiami su reazioni nucleari, concetto di sezione d'urto, decadimento radioattivo.

Passaggio di particelle e radiazioni nella materia: perdita di energia, *stragglings*, *range* di particelle cariche, interazione di particelle neutre.

Trattamento statistico dei dati sperimentali in fisica nucleare, distribuzioni di Poisson e di Gauss.

Tecniche di simulazione e metodi di Montecarlo.

*Test* di ipotesi.

Tecniche di progetto di un esperimento di fisica nucleare.

Teoria del decadimento beta.

Teoria del decadimento gamma.

Modello ottico.

BIBLIOGRAFIA. Appunti dalle lezioni.

## Q 4460 Reattori nucleari avanzati

Anno: periodo 5:1 Impegno (ore): lezioni 84 esercitazioni 28 (settimanali 6/2)

Prof. Piero Ravetto (Energetica)

Il corso intende introdurre lo studente alle problematiche più avanzate tipiche dell'analisi del *core* dei reattori nucleari a fissione e alle tematiche di neutronica delle macchine per la fusione nucleare controllata.

La prima parte è dedicata all'impostazione rigorosa dell'analisi stazionaria e dinamica del comportamento neutronico dei *core*, basata essenzialmente sull'equazione del trasporto, con particolare riguardo agli aspetti specifici della teoria della moltiplicazione neutronica e del controllo della reazione a catena, che sono necessari per la progettazione dei reattori provati e di nuova concezione.

Nella seconda parte vengono affrontati i problemi neutronici progettuali specifici dei diversi tipi di reattori. Vengono infine esaminate alcune tematiche relative alla emissione e distribuzione dei neutroni nei reattori a fusione, alla deposizione di energia e alla attivazione dei materiali.

### PROGRAMMA

#### 1. *Impostazione del problema dell'analisi neutronica dei core dei reattori nucleari.*

Dati nucleari (librerie di sezioni d'urto, metodi statistici di aggiustamento). Teoria del trasporto dei neutroni nelle strutture moltiplicanti (diverse forme dell'equazione, principali metodi di soluzione, teoria della criticità, teoria asintotica, equazione aggiunta e funzione importanza). Calcoli di cella. Generazione delle costanti multigruppo (equazioni multigruppo in diffusione e trasporto, calcolo delle risonanze, termalizzazione, coefficiente di diffusione). Cinetica dei reattori (modelli puntiformi, modelli spaziali e spettrali, transitori incidentali e loro modellizzazione matematica, contoreazioni e fenomeni di non linearità, effetti a breve e a lungo termine, calcoli perturbativi di parametri integrali).

#### 2. *Analisi e progetto dei reattori a fissione.*

Reattori ad acqua. Reattori veloci (diverse concezioni di *core*, *core* eterogenei, grandi *core*). Reattori ad alta temperatura. Reattori a sicurezza intrinseca e passiva. Configurazione ottimale dei *core*.

#### 3. *Problemi neutronici nelle macchine per la fusione nucleare.*

Ignizione del plasma e generazione di neutroni. Problemi connessi allo studio di geometrie complesse. Problemi legati all'anisotropia dello *scattering*. Calcolo dei *blankets*.

**ESERCITAZIONI.** Le esercitazioni prevedono la descrizione di codici di uso corrente nella progettazione e nell'analisi di sicurezza dei reattori nucleari, e la messa a punto di programmi numerici su alcuni argomenti del corso.

### BIBLIOGRAFIA.

B. Montagnini, *Lezioni di fisica del reattore nucleare*, Univ. di Pisa, 1983.

Y. Ronen, *Handbook of nuclear reactor calculations*, CRC, Boca Raton, 1986.

## Q 5404 Superconduttività

(Corso ridotto, 1/2 annualità)

Anno: periodo 5:1 Impegno (ore): lezioni 50 (settimanali 4)

Prof. Mario Rasetti (Fisica)

Finalità del corso è di dare una descrizione sistematica della fenomenologia connessa con il fenomeno della superconduttività e delle proprietà strutturali dei superconduttori (in particolare ad alta temperatura critica), di fornire gli strumenti fondamentali necessari per una descrizione microscopica (quantistica) della superconduttività, utilizzandoli poi per valutare le proprietà fisiche caratteristiche essenziali dei superconduttori, di descrivere infine le più importanti applicazioni della superconduttività alla tecnologia avanzata.

REQUISITI. Sono necessarie nozioni propedeutiche di meccanica quantistica e di meccanica statistica.

### PROGRAMMA

#### *Fenomenologia*

1. Proprietà elettrodinamiche macroscopiche dei superconduttori: resistenza elettrica a bassa temperatura; effetto Meissner, campi magnetici critici; fenomeni dipendenti dalla forma; quantizzazione del flusso magnetico; correnti persistenti.
2. Proprietà termodinamiche: il *gap* di energia; parametri d'ordine; calore specifico; modello fenomenologico a due fluidi.
3. Equazioni elettrodinamiche di Landau.
4. Teorie fenomenologiche più raffinate: le equazioni non-locali di Pippard; la teoria di Ginzburg-Landau; energia di superficie, interfacce.
5. Ulteriori proprietà fenomenologiche: superconduttori di tipo II, campi critici inferiore e superiore, energia delle linee di flusso, correnti critiche; *tunneling*, quasiparticelle, effetto Josephson, giunzioni.

#### *Teoria microscopica*

6. Richiami di seconda quantizzazione: modi normali di un cristallo, fononi; fermioni; fenomeni di *scattering*.
7. Costruzione della hamiltoniana di Bloch-Frölich: modello di Sommerfeld, interazioni coulombiane, *scattering* degli elettroni dalle vibrazioni del cristallo.
8. Lo stato fondamentale: instabilità dello stato fondamentale normale; coppie di Cooper; lo stato fondamentale di Bardeen, Cooper, Schrieffer.
8. Stati eccitati: eccitazioni fermioniche; effetti di coerenza, perturbazioni.
10. Temperatura finita: transizione di fase, temperatura critica; effetti di prossimità; effetto Meissner.
11. Criteri per la superconduttività: semiconduttori superconduttori; caratteristiche corrente-campo.

#### *Alta temperatura critica*

12. I nuovi materiali superconduttori: perovskiti, YBaCuO, ecc.; proprietà strutturali; caratteristiche elettromagnetiche e meccaniche, metodi di produzione.
13. Verso una teoria dell'alta  $T_c$ : modello di Hubbard e sue varianti; stato fondamentale, *pairing* di elettroni; ruolo dei fononi; anyoni e statistiche esotiche, quanti di flusso.

## Q 5680 Tecnologie e applicazioni nucleari

Anno: periodo 5:1 Impegno (ore): lezioni 76 esercitazioni 24 (settimanali 6/2)

Prof. Mario De Salve (Energetica)

Il corso si propone di fornire le nozioni di base sulla tecnologia, sulle proprietà e sulle prestazioni dei materiali impiegati negli impianti nucleari a fissione a fusione, con particolare riguardo agli aspetti concernenti il danno da radiazione.

**REQUISITI.** *Impianti nucleari + Ingegneria dei reattori nucleari a fusione 1 (integrato), Scienza e tecnologia dei materiali nucleari.*

### PROGRAMMA

I materiali nucleari per reattori a fissione e fusione, loro caratteristiche e proprietà: i combustibili, i moderatori, i materiali strutturali, i materiali fertili, i refrigeranti.

Effetto delle radiazioni e delle fissioni nei solidi cristallini: nozioni generali.

Effetto delle radiazioni sui materiali.

Comportamento elasto-plastico nei materiali strutturali: il fenomeno del *creep*.

Danneggiamento nei materiali per la prima parete dei reattori a fusione: erosione, *sputtering*, evaporazione, disruzione, *blistering*, infragilimento.

Selezione dei materiali per la fusione in relazione al problema della radioattività indotta da flusso neutronico.

Cenni di meccanica della frattura.

Progetto e costruzione dell'elemento di combustibile.

Il ciclo del combustibile.

Tecnologia del trizio.

Trattamento e confinamento delle scorie radioattive.

Materiali superconduttori e tecnologia dei magneti.

### ESERCITAZIONI.

Dimensionamento termomeccanico di una barretta di combustibile.

Calcoli di attivazione di componenti sottoposti ad irraggiamento neutronico.

### BIBLIOGRAFIA.

M.Cumo, *Impianti nucleari*, UTET, Torino, 1976.

*Il ciclo del combustibile*, ENEA, Roma, 1981.

V.T. Adrian Roberts, *Structural materials in nuclear power systems*, Plenum, New York, 1981.

G. Casini (ed.), *Engineering aspects of thermonuclear fusion reactors*, Harwood, 1981.

## Q 6010 Termotecnica del reattore

Anno: periodo 5:1 Impegno (ore): lezioni 80 esercitazioni 24 (settimanali 6/2)

Prof. Bruno Panella (Energetica)

Le finalità del corso sono di approfondimento del funzionamento termico e idraulico dei reattori nucleari sia termici che veloci. Vengono forniti gli strumenti teorici e di calcolo per il progetto termoidraulico del nocciolo di reattori nucleari. Alcune lezioni sono dedicate ai problemi di scambio termico dei reattori a fusione nucleare.

REQUISITI. *Termofluidodinamica negli impianti nucleari 2.*

### PROGRAMMA

Confronto dei principali parametri termoidraulici dei vari tipi di reattori nucleari.

Fluidi refrigeranti.

Metodologia del progetto del nocciolo e interdipendenza tra le varie fasi progettuali.

Progetto termoidraulico: limiti termici di progetto e procedure di progettazione.

Fattori di canale caldo per il flusso e l'entalpia.

Reattori ad acqua: dimensionamento di massima del nocciolo; progetto termico della barretta di combustibile; crisi termica; ottimizzazione delle prestazioni termiche; scelta della pressione; calcolo del generatore di vapore; fattori di forma nucleari; distribuzione di potenza e di portata; calcolo del canale caldo del nocciolo.

Scambio termico e moto dei fluidi bifase.

Miscelamento tra sottocanali degli elementi di combustibile a fascio di barre.

Codici di calcolo termoidraulico.

Analisi statistica dei fattori ingegneristici di canale caldo.

Analisi statistica del margine di crisi termica.

Reattori veloci: scambio termico e fluidodinamica con metalli liquidi; calcolo termoidraulico del nocciolo; calcolo del generatore di vapore e dello scambiatore intermedio.

Calcolo termoidraulico del nocciolo dei reattori a gas ad alta temperatura.

Reattori a fusione nucleare: deposizione di energia termica; estrazione di potenza; crisi termica ad altissimi flussi; problemi termoidraulici di sicurezza.

### ESERCITAZIONI.

Calcolo termoidraulico del nocciolo di reattori ad acqua e a gas.

Calcolo termoidraulico del generatore di vapore di un reattore veloce.

### BIBLIOGRAFIA.

R.T. Lahey, F.J. Moody, *The thermal-hydraulics of a boiling water reactor*, American Nuclear Society, New York, 1977.

L.S. Tong, J. Weisman, *Thermal analysis of pressurized water reactor*, American Nuclear Society, La Grange Park, 1979.

B. Panella, *Reattori nucleari ad acqua leggera: termoidraulica del nocciolo*, CELID, Torino, 1981.

J.G. Yeveck, A. Amorosi, *Fast reactor technology: plant design*, MIT Press, Cambridge (Mass.) and London, 1980.

Yu.S. Tant [et al.], *Thermal analysis of liquid metal fast breeder reactor*, American Nuclear Society, La Grange Park, 1978.

G. Melese, R. Katz, *Thermal and flow design of helium-cooled reactors*, American Nuclear Society, La Grange Park, 1984.

## Q 1290 Dinamica e controllo degli impianti nucleari

Anno: periodo 5:2 Impegno (ore): lezioni 84 esercitazioni 20 laboratori 6 (settimanali 6/2)

Prof. Mario De Salve (Energetica)

Il corso si propone di fornire le metodologie per l'analisi della dinamica delle centrali nucleotermoelettriche e per il controllo automatico delle stesse.

Esso si propone di sviluppare: *a)* caratteristiche funzionali delle centrali nucleotermoelettriche; *b)* elementi di teoria dei controlli automatici; *c)* cinetica puntiforme; *d)* modelli termoidraulici dinamici per sistemi e componenti; *e)* instabilità termoidrauliche; *f)* strumentazione termoidraulica e nucleare.

Il corso può essere consigliato anche per l'analisi del sistema di produzione dell'energia elettrica con centrali sia nucleari che convenzionali.

### PROGRAMMA

1. Analisi delle caratteristiche funzionali delle centrali nucleotermoelettriche. Requisiti e caratteristiche dei sistemi di regolazione e protezione. Programmi di regolazione ed inserzione in rete delle centrali nucleotermoelettriche. Cenni sui problemi connessi alla gestione di una rete elettrica. Modelli dinamici di sistemi fisici di tipo elettrico, meccanico, termico. Simulazione dinamica con l'analisi del programma TUTSIM di sistemi lineari e non lineari. Elementi di analisi dei segnali: il programma DADISP. Sottosistemi delle centrali nucleari con reattori PWR.
2. Cenni di teoria dei sistemi e della regolazione. Regolatori; funzioni di trasferimento; sistemi di retroazione. Metodi per lo studio della stabilità dei sistemi a retroazione. Studio di sistemi dinamici lineari nel dominio della frequenza e della stabilità con il programma CC.
3. Cenni di cinetica puntiforme; inserzione a gradino, a rampa, sinusoidale della reattività. Funzione di trasferimento di un reattore a potenza zero senza effetti di retroazione. Coefficienti di temperatura della reattività; coefficiente dei vuoti, della pressione; coefficienti compositi. Difetto di temperatura; difetto di potenza; margini di spegnimento. Funzioni di trasferimento di un reattore con retroazioni della temperatura del combustibile e del moderatore. Analisi delle condizioni di stabilità. Instabilità da xenon. Barre di controllo.
4. Strumentazione nucleare *in core* ed *ex core*. Misure di flussi neutronici, periodo, efficacia delle barre di controllo. Misure termiche e fluidodinamiche.
5. Regolazione del circuito primario e secondario di una centrale. Comportamento dinamico del BWR. Instabilità termofluidodinamica. Mappa di regolazione di un BWR. Cenni sui comportamenti dinamici di componenti tradizionali dell'impianto: Procedure di avviamento e spegnimento. Cenni sulla simulazione analogica. Trasistori ATWS.

ESERCITAZIONI. Applicazioni della teoria dei controlli automatici e della cinetica puntiforme.

### BIBLIOGRAFIA.

Appunti del Docente.

A. Novelli, *Elementi di controllo del reattore nucleare*, CLUP, Milano, 1980.

J. Lewis, *Nuclear reactor kinetics and control*, Pergamon, 1978.

D.C. Hetrick, *Dynamics of nuclear reactor*, Univ. of Chicago Press, 1971.

## Q 2024 **Fisica e ingegneria dei plasmi** (Corso ridotto, 1/2 annualità)

Anno: periodo 5:2 Impegno (ore): lezioni 42 esercitazioni 14 (settimanali 3/1)

Prof. Franco Porcelli (Energética)

Scopo del corso è fornire le basi per la comprensione dei processi fisici nei plasmi completamente ionizzati, con particolare attenzione alle applicazioni di interesse term nucleare.

Il corso è diretto sia agli studenti che intendono lavorare nel campo della fusione term nucleare controllata – ai quali si consiglia di accoppiare questo corso a quello complementare di *Ingegneria dei reattori nucleari a fusione 2 (ridotto)* – sia più in generale a coloro che intendono approfondire concetti e metodi di analisi nello studio di sistemi lontani dall'equilibrio termodinamico.

### PROGRAMMA

1. *Introduzione.* Definizione di plasma. Grandezze e concetti fondamentali. Bilancio energetico di un plasma term nucleare. Il *tokamak*.
2. *Teoria delle orbite.* Moto di particelle cariche confinate magneticamente. Collisioni di Coulomb. Fenomeni radiativi.
3. *Leggi di conservazione.* L'equazione di Boltzmann per un plasma magnetizzato. Modelli fluidi. Equazione di stato. Teorema del viriale.
4. *Il modello magnetoidrodinamico (MHD) ideale.* Il plasma come conduttore elettrico perfetto. Congelamento delle linee di campo magnetico. Onde di Alfvén.
5. *Equilibrio e stabilità MHD.* Superfici magnetiche. Il principio dell'energia. Limiti operativi di un *tokamak* dovuti ad instabilità MHD. Evidenze sperimentali.
6. *Modelli magnetoidrodinamici non ideali.* Modello resistivo. Instabilità cinetiche. Cenni ai fenomeni di trasporto anomalo.
7. Problemi aperti nella fisica dei *tokamak*.

**ESERCITAZIONI.** Le esercitazioni prevedono una serie di applicazioni ai *tokamak* degli argomenti trattati nelle lezioni.

### BIBLIOGRAFIA.

- G. Schmidt, *Physics of high temperature plasmas*, Academic Press, New York, 1979.  
F.F. Chen, *Introduction to plasma physics and controlled thermonuclear fusion*, Plenum, New York, 1984.  
J.P. Freidberg, *Ideal magnetohydrodynamics*, Plenum, New York, 1987.  
J.A. Wesson [et al.], *Tokamaks*, Clarendon, Oxford, 1987.

## Q 2934 Ingegneria dei reattori nucleari a fusione 2

(Corso ridotto, 1/2 annualità)

Anno: periodo 5:2 Impegno (ore): lezioni 50 (settimanali 4)

Prof. Roberto Zanino (Energetica)

Questo corso intende fornire conoscenze relativamente approfondite sull'ingegneria dei reattori nucleari a fusione, con particolare riferimento al *tokamak*.

L'enfasi è sulle basi fisiche delle soluzioni impiantistiche presentate. Anzitutto vengono illustrati alcuni metodi per il controllo, e per la descrizione della termofluidodinamica, della scarica di plasma. Vengono quindi analizzate le caratteristiche costruttive e funzionali dei principali componenti del reattore, sviluppando allo scopo semplici modelli matematici.

Una frazione significativa del corso è dedicata infine allo studio della regione di bordo del plasma e delle sue interazioni con la parete: queste costituiscono il principale problema aperto nei *tokamak*, insieme a quello del confinamento. Si consiglia di accoppiare questo corso con quello complementare di *Fisica e ingegneria dei plasmi (ridotto)*.

### PROGRAMMA

*Controllo del plasma.*

Equilibrio 2-D di un plasma a simmetria assiale: equazione di Grad-Schlueter-Shafra-  
nov. Soluzione perturbativa.

*Termofluidodinamica del plasma.*

Equazioni di Braginskii. Trasporto (neoclassico) in geometria toroidale. Trasporto anomalo: analisi statistica dei dati; leggi di scala empiriche nei *tokamak*.

*Ingegneria dei magneti.*

Analisi delle sollecitazioni ed elementi di calcolo strutturale. Magneti superconduttori. Refrigerazione e criogenia. Operazione dei magneti poloidali in un *tokamak*.

*Ingegneria del blanket.*

Elementi di analisi neutronica. Criteri per la scelta di *breeder*, moltiplicatore, refrigerante, materiali strutturali. Soluzioni impiantistiche.

*Interazioni plasma-parete.*

Modelli 1-D dello *scrape-off layer*. Strato limite elettrostatico. Interazioni plasma-particelle neutre. Impurezze. Carichi termici sui componenti affacciati al plasma.

Ingegneria delle disruzioni. Ingegneria della prima parete e del limiter/divertore.

*Riscaldamento e alimentazione del plasma.*

Riscaldamento ohmico e addizionale. Iniezione di *pellet*; modelli di ablazione. Cenni al ciclo del combustibile.

*Progetto del reattore.*

Limiti operazionali. Vincoli ingegneristici. Problemi aperti.

### BIBLIOGRAFIA.

J. Raeder [et al.], *Controlled nuclear fusion*, Wiley, New York, 1986.

T.J. Dolan, *Fusion research. Vol. 3*, Pergamon, New York, 1982.

W.M. Stacey jr., *Fusion*, Wiley, New York, 1984.

J.A. Wesson [et al.], *Tokamaks*, Clarendon, Oxford, 1987.

## Q 3040 Istituzioni di economia

Anno:periodo 5:2 Impegno (ore): lezioni 60 esercitazioni 40 (settimanali 4/2-4)

Prof. Mercedes Bresso (Idraulica, trasporti e infrastr. civili)

### PROGRAMMA

Gli strumenti per l'analisi del sistema economico (indici modelli, *input-output*, contabilità nazionale).

Cenni di storia dell'analisi economica; crescita e sviluppo dei sistemi economici.

Elementi di microeconomia: i comportamenti degli operatori; la formazione dei prezzi; l'impresa e le decisioni produttive; i mercati dei fattori produttivi; le forme di mercato: mercati concorrenziali e mercati non concorrenziali.

Elementi di macroeconomia: macroeconomia di piena occupazione; macroeconomia con disoccupazione; il ruolo dello Stato e la politica economica: teorie keynesiane e sviluppi recenti.

## Q 4240 Progetti e costruzioni nucleari

Anno:periodo 5:2 Impegno (ore): lezioni 60 esercitazioni 50 (settimanali 4/4)

Prof. Francesco A. Raffa (Meccanica)

Finalità del corso è la presentazione delle moderne metodologie di calcolo utili alla formazione di progettisti di componenti meccanici per l'industria nucleare.

La trattazione è svolta con l'intento di stimolare nello studente l'acquisizione delle metodologie suddette con uno stretto riferimento alla fisica dei problemi normalmente affrontati nell'ambito della progettazione meccanica.

A questo scopo, si espongono dapprima i principi di base della teoria dell'elasticità e successivamente vengono studiati elementi strutturali significativi quali le piastre, i gusci e i solidi di rivoluzione. Vengono infine descritti alcuni aspetti dei problemi di vibrazione delle strutture con particolare riferimento all'impiego di metodi numerici.

REQUISITI. *Scienza delle costruzioni.*

### PROGRAMMA

Principi di base della teoria dell'elasticità.

Calcolo di resistenza dei tubi spessi e sottili soggetti a pressione interna ed esterna e a gradienti di temperatura; tubi cerchiati.

Instabilità elastica dei recipienti cilindrici a parete sottile soggetti a pressione esterna.

Teoria delle piastre e dei gusci: piastre rettangolari e circolari inflesse, cenni sui gusci e sulle membrane.

Metodo degli elementi finiti: scrittura di rigidezza e di flessibilità, formulazione generale degli elementi finiti (principio dei lavori virtuali, metodo di Ritz); elementi asta e trave, elementi piani (triangolari e quadrangolari) ed assialsimmetrici, elemento piastra; formulazione isoparametrica; elementi finiti gerarchici e  $h$ - e  $p$ -convergenza.

Metodo degli elementi al contorno: generalità sulle equazioni integrali e sulla loro soluzione numerica; applicazione del metodo alla soluzione di specifici problemi elastici.

Dinamica strutturale: sistemi continui, sistemi a un grado di libertà, sistemi a molti gradi di libertà, cenni sull'analisi modale; impiego degli elementi finiti in dinamica.

**ESERCITAZIONI.** Consistono nell'analisi delle tensioni e delle deformazioni di elementi strutturali mediante codici agli elementi finiti.

**BIBLIOGRAFIA.** Appunti e dispense.

## Indice alfabetico degli insegnamenti

<i>pag.</i>	<i>corso</i>	<i>[anno:periodo]</i>
42	Q0010	Acceleratori di particelle [5:1]
13	Q0231	Analisi matematica 1 [1:1]
18	Q0232	Analisi matematica 2 [2:1]
20	Q0514	Calcolo numerico (corso ridotto, 1/2 annualità) [2:2]
14	Q0620	Chimica [1:1]
34	Q0940	Costruzione di macchine [4:2]
52	Q1290	Dinamica e controllo degli impianti nucleari [5:2]
15	Q1430	Disegno tecnico industriale [1:2]
29	Q1710	Elettronica applicata [4:1]
26	Q1790	Elettrotecnica [3:2]
35	Q1830	Energetica e sistemi nucleari [4:2]
16	Q1901	Fisica 1 [1:2]
18	Q1902	Fisica 2 [2:1]
27	Q1965	Fisica dei reattori a fissione + Fisica dei reattori a fusione (corso integrato) [3:2]
53	Q2024	Fisica e ingegneria dei plasmi (corso ridotto, 1/2 annualità) [5:2]
30	Q2030	Fisica matematica [4:1]
23	Q2040	Fisica nucleare [3:1]
19	Q2170	Fondamenti di informatica [2:1]
17	Q2300	Geometria [1:2]
31	Q2775	Impianti nucleari + Ingegneria dei reattori nucleari a fusione 1 (corso integrato) [4:1]
42	Q2772	Impianti nucleari 2 [5:1]
54	Q2934	Ingegneria dei reattori nucleari a fusione 2 (corso ridotto, 1/2 annualità) [5:2]
55	Q3040	Istituzioni di economia [5:2]
43	Q3090	Localizzazione dei sistemi energetici [5:1]
36	Q3110	Macchine [4:2]
20	Q3204	Meccanica analitica (corso ridotto, 1/2 annualità) [2:2]
28	Q3210	Meccanica applicata alle macchine [3:2]
44	Q3390	Meccanica statistica [5:1]

45	Q3470	Metodi matematici per i reattori nucleari	[5:1]
21	Q3480	Metodi matematici per l'ingegneria	[2:2]
55	Q4240	Progetti e costruzioni nucleari	[5:2]
46	Q4410	Protezione e sicurezza degli impianti nucleari	[5:1]
47	Q4434	Radioattività (corso ridotto, 1/2 annualità)	[5:1]
48	Q4460	Reattori nucleari avanzati	[5:1]
24	Q4600	Scienza delle costruzioni	[3:1]
22	Q4670	Scienza e tecnologia dei materiali nucleari	[2:2]
41	Q4740	Sicurezza e analisi di rischio	[4,5:2]
32	Q5270	Strumentazione e misure per gli impianti nucleari	[4:1]
37	Q5310	Strumentazione fisica	[4:2]
49	Q5404	Superconduttività (corso ridotto, 1/2 annualità)	[5:1]
50	Q5680	Tecnologie e applicazioni nucleari	[5:1]
24	Q5950	Termodinamica applicata	[3:1]
33	Q5991	Termofluidodinamica negli impianti nucleari 1	[4:1]
38	Q5992	Termofluidodinamica negli impianti nucleari 2	[4:2]
51	Q6010	Termotecnica del reattore	[5:1]
39	Q6050	Trasporto di particelle e di radiazione	[4:2]

## Indice alfabetico dei docenti

<i>pag.</i>	<i>Docente</i>	<i>corso</i>	<i>[anno:periodo]</i>
24	Algostino, Franco (Ing. strutturale)	Q4600	Scienza delle costruzioni [3:1]
22	Appendino Montorsi, Margherita (Chimica)	Q4670	Scienza e tecnologia dei materiali nucleari [2:2]
26	Barbisio, Edoardo (Ing. elettrica)	Q1790	Elettrotecnica [3:2]
55	Bresso, Mercedes (Idraul., trasp., infrastr. civ.)	Q3040	Istituzioni di economia [5:2]
36	Campanaro, Paolo (Energetica)	Q3110	Macchine [4:2]
45	Coppa, Gianni (Energetica)	Q3470	Metodi matematici per i reattori nucleari [5:1]
39	Coppi, Bruno (Energetica)	Q6050	Trasporto di particelle e di radiazione [4:2]
27	Corno, Silvio Edoardo (Energetica)	Q1965	Fisica dei reattori a fissione + Fisica dei reattori a fusione (int.) [3:2]
34	Curti, Graziano (Meccanica)	Q0940	Costruzione di macchine [4:2]
50	De Salve, Mario (Energetica)	Q5680	Tecnologie e applicazioni nucleari [5:1]
52	=	Q1290	Dinamica e controllo degli impianti nucleari [5:2]
41	Del Tin, Giovanni (Energetica)	Q4740	Sicurezza e analisi di rischio [4,5:2]
42	=	Q2772	Impianti nucleari 2 [5:1]
42	Delsanto, Pier Paolo (Fisica)	Q0010	Acceleratori di particelle [5:1]
13	Giublesi, Dina (Matematica)	Q0231	Analisi matematica 1 [1:1]
37	Gonella, Luigi (Fisica)	Q5310	Strumentazione fisica [4:2]
46	=	Q4410	Protezione e sicurezza degli impianti nucleari [5:1]
24	Gregorio, Paolo (Energetica)	Q5950	Termodinamica applicata [3:1]
16	Iazzi, Felice (Fisica)	Q1901	Fisica 1 [1:2]
28	Jacazio, Giovanni (Meccanica)	Q3210	Meccanica applicata alle macchine [3:2]
19	Laurentini, Aldo (Autom. inform.)	Q2170	Fondamenti di informatica [2:1]
35	Lavagno, Evasio (Energetica)	Q1830	Energetica e sistemi nucleari [4:2]
43	=	Q3090	Localizzazione dei sistemi energetici [5:1]
18	Malaguzzi, Cristina (Matematica)	Q0232	Analisi matematica 2 [2:1]
33	Malandrone, Mario (Energetica)	Q5991	Termofluidodinamica negli impianti nucleari 1 [4:1]
38	=	Q5992	Termofluidodinamica negli impianti nucleari 2 [4:2]
17	Massaza, Carla (Matematica)	Q2300	Geometria [1:2]

18	Mezzetti, Enrica (Fisica)	Q1902	Fisica 2 [2:1]
47	Minetti, Bruno (Fisica)	Q4434	Radioattività (1/2) [5:1]
20	Orsi Palamara, Annamaria (Matematica)	Q0514	Calcolo numerico (1/2) [2:2]
21	Pandolfi, Luciano (Matematica)	Q3480	Metodi matematici per l'ingegneria [2:2]
31	Panella, Bruno (Energetica)	Q2775	Impianti nucleari + Ingegneria dei reattori nucleari a fusione 1 (int.) [4:1]
51	=	Q6010	Termotecnica del reattore [5:1]
32	Pasquarelli, Aldo (Fisica)	Q5270	Strumentazione e misure per gli impianti nucleari [4:1]
20	Piazzese, Franco (Matematica)	Q3204	Meccanica analitica (1/2) [2:2]
15	Podda, Giovanni (Sist. produzione)	Q1430	Disegno tecnico industriale [1:2]
53	Porcelli, Franco (Energetica)	Q2024	Fisica e ingegneria dei plasmi (1/2) [5:2]
23	Quarati, Piero (Fisica)	Q2040	Fisica nucleare [3:1]
55	Raffa, Francesco A. (Meccanica)	Q4240	Progetti e costruzioni nucleari [5:2]
44	Rasetti, Mario (Fisica)	Q3390	Meccanica statistica [5:1]
49	=	Q5404	Superconduttività (1/2) [5:1]
48	Ravetto, Piero (Energetica)	Q4460	Reattori nucleari avanzati [5:1]
30	Rizzi, Guido (Matematica)	Q2030	Fisica matematica [4:1]
14	Rolando Leschiutta, Magda (Chimica)	Q0620	Chimica [1:1]
29	Vallauri, Maurizio (Elettronica)	Q1710	Elettronica applicata [4:1]
31	Zanino, Roberto (Energetica)	Q2775	Impianti nucleari + Ingegneria dei reattori nucleari a fusione 1 (int.) [4:1]
54	=	Q2934	Ingegneria dei reattori nucleari a fusione 2 (1/2) [5:2]