



# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO

## SCIENZE E TECNOLOGIE

### Docente

STEFANO **FORTE**

### Creazione

### Stato

Aperto

### Data di nascita

### Codice fiscale

21/06/1961 FRTSFN61H21F205Q

### Dipartimento di afferenza

DIPARTIMENTO DI FISICA

### Settore

FIS/02-Fisica teorica, modelli e metodi matematici

### Carriera

PROFESSORE UNIVERSITARIO DI RUOLO I FASCIA

### A.A.

2015/16

### Corso di Studio

FISICA (Classe L-30)  
(F63)

### Strutt.Responsabile

FISICA (Classe L-30)  
(F63)

### Insegnamento

Fisica Moderna e Meccanica Quantistica  
(Mod. Fisica Moderna)  
(F63-10)

### Modulo

()

### Forme didattiche previste dal Piano Didattico

- Lezioni (40 ore)
- Esercitazioni(20 ore)

### Note

Nessuna

### Riepilogo Attività

Forma didattica	Stato	Numero	Ore
Esercitazioni	Da confermare	10	10
Lezioni	Da confermare	25	50

## Dettaglio attività

Stato	Data	Ora inizio	Ore	Aula	Sede	Forma didattica	Argomento/Note
Da confermare	LUN 29/02/2016	10:30	2	A	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Introduzione al corso: la meccanica quantistica come grammatica universale. Contenuti ed organizzazione del corso. L'esperimento della doppia fenditura e l'esperimento di Zeilinger. Il caso di particelle classiche.
Da confermare	MER 02/03/2016	10:30	2	A	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Particelle quantistiche. Realizzazione dell'esperimento di Zeilinger con molecole di Fullerene. Interferenza: sovrapposizione di onde. Scomparsa dell'interferenza in presenza di misura. Principi della meccanica quantistica: stato, probabilità, misura. Lo stato come informazione.
Da confermare	LUN 07/03/2016	10:30	2	A	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Il formalismo di Dirac per i ket di stato. Linearità, sovrapposizione, misura e sua probabilità. I risultati di misure come ket di base. Prodotto scalare e sue proprietà. Spazio dei bra e spazio dei ket. Basi ortonormali. Ampiezza di probabilità per una misura in termini di prodotto scalare. Misure ripetute e rigenerazione degli stati.
Da confermare	MER 09/03/2016	10:30	2	A	Dipartimento di Fisica	Lezioni	La risoluzione dell'identità ed il suo uso. Operatori lineari. Azione degli operatori sugli stati. Azione sui vettori di base. Matrice associata ad un operatore. Operatori come prodotto ket-bra. Prodotto di due operatori. Valor medio di un'osservabile. Operatore associato ad un'osservabile: espressione nella base degli autostati.
Da confermare	MAR 15/03/2016	11:30	1	A	Dipartimento di fisica	Esercitazioni	Svolgimento di problemi assegnati. Misure e probabilità: la misura come proiezione. Sovrapposizioni di stati. Rigenerazione in seguito a misura e basi incompatibili.
Da confermare	MER 16/03/2016	10:30	2	A	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Valor medio di un osservabile come valor medio dell'operatore associato. Caratterizzazione degli operatori associati ad osservabili: autovalori reali ed autovettori ortogonali. Aggiunto di un operatore. Operatori autoaggiunti (o hermitiani). Dimostrazione che un operatore hermitiano ha autovalori reali ed autovettori ortonormali. Riassunto dei "postulati" della meccanica quantistica. Formulazione equivalente in termini di proiettori.
Da confermare	LUN 21/03/2016	10:30	2	A	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Cambiamenti di base: matrice ed operatore di cambiamento di base. Unitarietà: proprietà delle trasformazioni unitarie e significato fisico dell'unitarietà. Trasformazione degli operatori sotto cambiamento di base: rappresentazione aggiunta. Operatori unitariamente equivalenti. Operatori compatibili ed incompatibili. Commutatore. Commutazione e compatibilità: dimostrazione della condizione sufficiente. Caso non-degenere e caso degenere.
Da confermare	MAR 22/03/2016	11:30	1	A	Dipartimento di fisica	Esercitazioni	Svolgimento di problemi assegnati. Costruzione di una base ortonormale e indipendenza del prodotto scalare dalla scelta di base. Misura intermedia e composizione classica della probabilità in

un caso di rigenerazione degli stati.  
Costruzione esplicita di operatore associato ad osservabile.

Da confermare	MER 23/03/2016	10:30 2	A	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Commutazione e compatibilita': dimostrazione della condizione necessaria. Indeterminazione di un'osservabile e sua relazione con la deviazione standard dei risultati delle misure. Digrassione: funzione di un operatore nella base dei suoi autostati. Dimostrazioe che l'indeterminazione e' nulla per sistemi che si trovano in un autostato dell'osservabile data (condizione necessaria e sufficiente). Dimostrazione del principio di intederminazione: disuguaglianza di Schwartz; parte reale e parte immaginaria del prodotto di due operatori.
Da confermare	LUN 04/04/2016	10:30 2	A	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Numero di parametri indipendenti che caratterizzano lo stato fisico per un sistema bipartito: i ket di stato come raggi. Caratterizzazione ddegli stati: la matrice (o operatore) densita'. Valor medio di un operatore come traccia nella base degli autostati. Proprieta' della traccia: ciclicita' ed indipendenza dalla base. Stati puri e stati misti: valor medio di un'osservabile in uno stato misto. Sovrapposizione quantistica e sovrapposizione statistica.
Da confermare	MAR 05/04/2016	11:30 1	A	Dipartimento di fisica	Esercitazioni	Svolgimento di problemi assegnati. Aggiunto del prodotto di operatori; decomposizione del prodotto di operatori in parte hermitiana e parte antihermitiana. Esponenziale di un operatore. Matrice di cambiamento di base. Autovalori di una matrice unitaria.
Da confermare	MER 06/04/2016	10:30 2	A	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Caratterizzazione della matrice densita' per stati puri e stati misti. Traccia della matrice densita'. Traccia del quadrato della matrice densita'. La matrice densita' per lo stato puro come proiettore: condizione sul determinante della matrice densita' per stati puri e sistemi bipartiti. Matrici di Pauli come matrici di base per le matrici hermitiane 2x2 e traccia come prodotto scalare. Decomposizione di una matrice hermitiana generica sulla base delle matrici di Pauli. Decomposizione della matrice densita' per stati puri e stati misti. Determinazione di una matrice densita' generica con una misura generale. Teorema di no-cloning.
Da confermare	LUN 11/04/2016	10:30 2	A	Dipartimento di Fisica	Lezioni	La base delle coordinate. Operatore posizione: autovalori ed autofunzioni. Risoluzione dell'identita': la delta di Dirca. Proprieta' della delta: normalizzazione, invarianza per traslazioni, simmetra. La delta come distribuzione. Relazione di ortonormalita': normalizzazione impropria. Relazione di completezza: la delta come matrice identita' nello spazio infinito-dimensionale. Prodotto scalare tra stati. Normalizzazione dei vettori di stato. Operatori diagonali nella base delle position: esempio dell'operatore potenziale armonico.
Da confermare	MAR 12/04/2016	11:30 1	A	Dipartimento di fisica	Esercitazioni	Svolgimento di esercizi assegnati. Operatori di proiezione: equivalenza di definizioni diverse. Operatori compatribili e

Da confermare	MER 13/04/2016 10:30 2	A	Dipartimento di Fisica	Lezioni	<p>incompatibili. Proprieta' delle matrici di Pauli. Basi complete di operatori.</p> <p>Misura, invarianza, leggi di conservazione: il teorema di Noether. Invarianza per traslazioni e conservazione dell'impulso. Traslazioni in meccanica quantistica. L'operatore di traslazione come cambiamento di base. Azione sui vettori di base e sui vettori di stato. Traslazione dell'argomento della funzione d'onda. Traslazione, sviluppo di Taylor, ed azione esponenziale dell'operatore derivata. Operatori unitari di trasformazione come esponenziale di un generatore hermitiano. Il generatore della traslazioni ed il suo elemento di matrice. Invarianza in meccanica quantistica. Operatore di evoluzione temporale. Condizione di invarianza dei risultati di una misura.</p>
Da confermare	MER 27/04/2016 10:30 2	A	Dipartimento di Fisica	Lezioni	<p>Equivalenza tra invarianza e commutazione del generatore della trasformazione con l'operatore di evoluzione temporale. Deduzione dall'invarianza della legge di conservazione per gli autovalori del generatore. Impulso e generatore delle traslazioni: costante di proporzionalita'. La costante <math>h</math> tagliato e la sua universalita'. Azione delle traslazioni sull'operatore coordinata. Commutatore impulso-posizione: il commutatore canonico. Quantizzazione come trasformazione delle parentesi di Poisson in commutatori. Principio di indeterminazione di Heisenberg. Elementi di matrice degli operatori posizione ed impulso nella base delle coordinate.</p>
Da confermare	LUN 02/05/2016 10:30 2	A	Dipartimento di Fisica	Lezioni	<p>Hermiticita' degli operatori posizione ed impulso e loro elementi di matrice nella base delle coordinate. Hermiticita' dell'operatore impulso e suoi elementi di matrice fra stati qualunque: andamento delle funzioni d'onda all'infinito. Autofunzioni dell'operatore impulso nella base delle coordinate. Condizione di normalizzazione e rappresentazione della delta di Dirac. Relazione tra la base delle posizioni e la base degli impulsi: trasformata di Fourier. Spazio delle configurazioni classico e quantistico. Commento sulla normalizzazione: autofunzioni dell'impulso ed autofunzioni del generatore delle traslazioni. Rappresentazione degli operatori posizione ed impulso nella base degli impulsi. Evoluzione temporale: vettori di stato come funzioni della posizione e dell'impulso. Il tempo come parametro. Il generatore dell'evoluzione temporale: cinematiche (dipendenza dal tempo) e dinamica (azione dell'operatore di evoluzione temporale).</p>
Da confermare	MAR 03/05/2016 11:30 1	A	Dipartimento di fisica	Esercitazioni	<p>Svolgimento di esercizi assegnati. Indeterminazione minima per operatori in spazi di imensione finita. Matrici densita' unitariamente equivalenti per stati misti. Matrice densita' sulla base delle matrici di Pauli. Matrice densita' dopo una misura. Matrice densita' per uno stato</p>

sovrapposizione casuale e risoluzione dell'identita'.

Da confermare	MER 04/05/2016	10:30 2	A	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Operatore evoluzione temporale e generatore dell'evoluzione temporale. Invarianza per traslazioni temporali in meccanica quantistica. Traslazione temporale, evoluzione temporale e loro significato. Indipendenza dal tempo del generatore. Commutazione del generatore e conservazione dei suoi autostati. Invarianza per evoluzione temporale in meccanica classica. Il teorema di Noether per trasformazioni che modificano il tempo. Applicazione al caso dell'evoluzione temporale: l'hamiltoniana come quantita' conservata. Il generatore dell'evoluzione temporale quantistica e l'operatore hamiltoniano.
Da confermare	LUN 09/05/2016	10:30 2	A	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Evoluzione temporale in forma infinitesima: l'equazione di Schroedinger. Forma dell'equazione di Schroedinger nello spazio delle posizioni per hamiltoniane consistyenti di un termine cinetico e di un potenziale dipendente dalle posizioni ed indipendente dal tempo. Soluzioni dell'equazioone di Schroedinger. Caso di sistemi invarianti per traslazioni temporali. Confronto tra traslazioni temporali e traslazioni spaziali. Caso di hamiltoniane dipendenti dal tempo, ma commutanti a tempi diversi. Caso di hamiltoniane dipendenti dal tempo e non commutanti a tenmpi diversi. L'operatore prodotto cronologico. Esponenziale ordinato nel tempo.
Da confermare	MAR 10/05/2016	11:30 1	A	Dipartimento di fisica	Esercitazioni	Svolgimento di esercizi assegnati. Ancora sul significato della matrice densita'. La delta di Dirac di una funzione. Operatore parita', autovalori ed autofunzioni.
Da confermare	MER 11/05/2016	10:30 2	A	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Verifica del fatto che che l'esponenziale cronologicamente ordinato soddisfa l'equazione di Schrodinger. L'operatore di evoluzione temporale nella base degli autostati dell'energia per sistemi invarianti per traslazioni temporali. Stati stazionari, loro evoluzione temporale, e valori medi di operatori in uno stato stazionario. Formulazione alla Heisenberg dell'evoluzione temporale. Calcolo di valori medi di operatori e dipendenza dal tempo delle ampiezze per risultati di misure in rappresentazione di heisenberg. Equivalenza con il risultato alla Schroedinger. Equazioni del moto alla Heisenberg per gli operatori.
Da confermare	LUN 16/05/2016	10:30 2	A	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Equazioni alla Heisenberg per gli operatori posizione ed impulso per un'hamiltoniana della forma $H=T+V$ e potenziale dipendente dalla posizione. Loro equivalenza in forma con le equazioni classiche di Hamiltoni. Teorema di Ehrenfest: la meccanica classica come limite della meccanica quantistica quando l'indeterminazione e' piccola. La particella libera: autostati dell'impulso, autiostati dell'energia ed autostati della parita'. Dipendenza dal tempo per gli autostati dell'energia (alla Schrodinger).

Dipendenza dal tempo degli operatori posizione ed impulso (alla Heisenberg). Dipendenza dal tempo degli elementi di matrice degli operatori posizione ed impulso tra autostati dell'impulso; calcolo alla Heisenberg e calcolo alla Schrodinger.

Da confermare	MAR 17/05/2016 11:30	1	A	Dipartimento di fisica	Esercitazioni	Svolgimento di esercizi assegnati. Dilatazioni in meccanica classica ed in meccanica quantistica. Il generatore delle dilatazioni. Normalizzazione degli stati ed hermitianita'. Azione dell'operatore parita' sugli autostati dell'impulso; l'operatore modulo dell'impulso. Operatori polinomiali in x e p: hermitianita' e simmetrizzazione.
Da confermare	MER 18/05/2016 10:30	2	A	Dipartimento di fisica	Lezioni	Commutatore tra operatore posizione alla Heisenberg a tempi diversi per la particella libera; indeterminazione di misure successive di posizione. Pacchetti d'onde e loro evoluzione temporale. Il pacchetto di minima indeterminazione. SOLUZIONE delle condizioni di minima indeterminazione e determinazione del pacchetto gaussiano. Calcolo di valori medi di posizione ed impulso e delle relative indeterminazioni per il pacchetto gaussiano. Il pacchetto gaussiano nello spazio delle posizioni e nello spazio degli impulsi. Trasformata di Fourier della gaussiana e suo significato.
Da confermare	LUN 23/05/2016 10:30	2	A	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Dipendenza dal tempo per un pacchetto gaussiano. Velocita' di fase e velocita' di gruppo. Allargamento del pacchetto gaussiano: equazioni del moto di Heisenberg per le indeterminazioni in posizione ed impulso. Stime qualitative: unita' naturali. Significato fisico dell'allargamento del pacchetto. Stime per l'indeterminazione in posizione ed impulso: tempo iniziale e dipendenza dal tempo. Problemi unidimensionali: introduzione generale. Potenziali continui a tratti. La buca di potenziale: regioni e condizioni di raccordo.
Da confermare	MAR 24/05/2016 11:30	1	A	Dipartimento di fisica	Esercitazioni	Svolgimento di esercizi assegnati. Il gruppo di Galileo ed il suo generatore. Azione sugli operatori ed azione sugli stati. Esponenziali di operatori non commutanti. Precessione per un sistema a due livelli. Inversione temporale e sue proprieta'.
Da confermare	MER 25/05/2016 10:30	2	A	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Condizioni di raccordo e loro significato: discontinuita' finita ed infinita. Condizioni al contorno per la buca di potenziale infinita e loro interpretazione. Soluzioni per le autofunzioni: soluzioni pari e dispari. Autovalori di energia e valori permessi dell'impulso. Parita' delle autofunzioni. Non-degenerazione dello spettro per problemi generali unidimensionali. Energia minima e sua interpretazione fisica in termini di indeterminazione.
Da confermare	LUN 30/05/2016 10:30	2	A	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Il gradino di potenziale. La funzione di Heaviside come distribuzione e la delta di Dirac come sua derivata. Condizioni di raccordo e numero di soluzioni indipendenti. Soluzioni di scattering. Determinazione della prima soluzione. Corrente di probabilita': equazione di continuita', significato fisico, relazione con

l'elemento di matrice dell'impulso. Dimostrazione dell'equazione di continuita'. Calcolo della corrente per stati di onda piana e per sovrapposizioni di due onde piane progressiva e regressiva. Costanza della corrente e sua continuita' attraverso la discontinuita' del potenziale. Coefficienti di trasmissione e riflessione.

Da confermare	MAR 31/05/2016 11:30	1	A	Dipartimento di fisica	Esercitazioni	Svolgimento di esercizi assegnati. Ancora sull'inversione temporale: spazio degli impulsi. Propagatore di feynman per la partecalle libera. Potenziale lineare: equazioni del moto alla Heisemberg per gli operatori canonici ed i loro quadrati.
Da confermare	MER 01/06/2016 10:30	2	A	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Gradino di potenziale: seconda soluzione indipendente. Caso di energia mniore dell'altezza del gradino. Penetrazione al di sotto della barriera. Riflessione totale della corrente. Limite di barriera di altezza infinita. Cenno sull'effetto tunnel. Discussione qualitativa di potenziali. Andamento all'infinito: stati legati e stati del continuo. Assenza di soluzione di ennergia minore del minimo del potenziale. Caso di energia maggiore del minimo del potenziale e mniore del valore asintotico del potenziale: andamenti nelle varie regioni, punti di inversione e raccordo delle soluzioni. Spettro discreto e parita' alternante. Esistenza di almeno uno stato legato.
Da confermare	LUN 06/06/2016 10:30	2	A	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Stati del continuo. Spettro legato e spettro continuo. Riassunto delle caratteristiche generali degli spettri. L'oscillatore armonico: suo ruolo in meccanica classica e in meccanica quantistica. L'oscillatore armonico classico: equazioni del moto e leggi di conservazione. Caso quantistico: energia dello stato fondamentale e princip[io di indeterminazione. Elementi di matrice degli operatori x e p e discretezza dello spettro. Operatori di creazione e distruzione: definizione, espressione dell'hamiltoniana in termini di essi e relazioni commutazione. L'operatore numero. Commutatori degli operatori di creazione e distruzione con l'operatore nulo: operatori di creazione e distruzione come operatori di innalzamento ed abbassamento degli autovalori. Esistenza dello stato di vuoto. Determinazione dello spettro dell'operatore numero e dello spettro dell'hamiltoniana.
Da confermare	MAR 07/06/2016 11:30	1	A	Dipartimento di fisica	Esercitazioni	Risoluzione e discussione di esercizi assegnati. Dipendenza dal tempo dell'indeterminazione per il potenziale lineare. Indeterminazione dell'energia in nuno stato gaussiano. Sovrapposizione di stati gaussiani: base degli impulsi ed evoluzione temporale. Autofunzioni di energia per il potenziale lineare nella base degli impulsi e loro evoluzione temporale. Potenziale deltiforme: soluzioni di stato legato e soluzioni di scattering.
Da confermare	MER 08/06/2016 10:30	2	A	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Normalizzazione delle autofunzioni dell'oscillatore armonico. Elementi di matrice degli operatori di creazione e distruzione e degli ioperatori canonici nella base delle autofunzioni dell'energia.

Indeterminazione di posizione ed impulso negli autostati di energia: lo stato fondamentale come stato gaussiano. Valori medi di energia potenziale e cinetica: equipartizione dell'energia. Autofunzioni dell'oscillatore armonico nella base delle coordinate: determinazione dello stato fondamentale e degli stati eccitati. Polinomi di Hermite. Dipendenza temporale degli operatori  $x$  e  $p$  alla Hesienberg. Dipendenza dal tempo degli operatori di creazione e distruzione, ed espressione in termini di essi degli operatori posizione ed impulso in funzione del tempo. Dipendenza temporale di  $x$  e  $p$  attraverso l'uso dell'operatore di evoluzione temporale e formule di Baker-Campbell-Hausdorff.

Da LUN 13/06/2016 10:30 2 A Dipartimento Lezioni  
confermare di Fisica

Riassunto dell'evoluzione temporale per l'oscillatore armonico: formule di Baker-Campbell-Hausdorff e loro uso. Gli stati coerenti: definizione di stato coerente. Relazione di ricorrenza e forma esplicita. Calcolo della normalizzazione. Valori medi di posizione ed impulso in uno stato coerente. Dipendenza temporale dello stato coerente. Indeterminazione in posizione ed impulso: lo stato coerente come pacchetto di minima indeterminazione che non si allarga. Quasi-ortogonalita' di stati coerenti ben distinti. Stati coerenti e test della meccanica quantistica. Dallo stato coerente allo stato "gatto di Schro'dinger": effetto Kerr. Calcolo della probabilita' di posizione in uno stato gatto di Schro'dinger: interferenza quantistica. Scomparsa dell'interferenza sotto misura: il collasso della funzione d'onda come conseguenza della descrizione quantistica del rivelatore.