



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO

SCIENZE E TECNOLOGIE

Docente	Creazione	Stato	
STEFANO FORTE		Aperto	
Data di nascita	Codice fiscale		
21/06/1961	FRTSFN61H21F205Q		
Dipartimento di afferenza	Settore	Carriera	A.A.
DIPARTIMENTO DI FISICA	FIS/02-Fisica teorica, modelli e metodi matematici	PROFESSORE UNIVERSITARIO DI RUOLO I FASCIA	2014/15
Corso di Studio	Strutt.Responsabile	Insegnamento	Modulo
FISICA (Classe L-30) (F63)	FISICA (Classe L-30) (F63)	Fisica Moderna e Meccanica Quantistica (Mod. Meccanica Quantistica) (F63-18)	()

Forme didattiche previste dal Piano Didattico

- Lezioni(40 ore)

Note

Nessuna

Riepilogo Attività

Forma didattica	Stato	Numero	Ore
Lezioni	Da confermare	25	50

Dettaglio attività

Stato	Data	Ora inizio	Ore	Aula	Sede	Forma didattica	Argomento/Note
Da confermare	MER 01/10/2014	10:30	2	A	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Introduzione al corso: contenuti e informazioni organizzativa. Spazi di stati fisici prodotto diretto: vettori di base, stati fisici e loro prodotto scalare. Esempio: sistema di due qubit. Osservabili. Sistemi meccanici in piu' di una dimensione: operatore vettore posizione, suoi autostati e loro relazioni di ortonormalizzazione. Funzione d'onda e densita' di probabilita' di posizione.
Da confermare	VEN 03/10/2014	10:30	2	A	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Funzioni d'onda fattorizzate e non. L'operatore impulso in piu' di una dimensione ed i suoi elementi di matrice. Elementi di matrice di energia cinetica e potenziale. Equazione agli autovalori per l'hamiltoniana nello spazio delle coordinate. Problemi separabili. Esempio della buca di potenziale parallelepipedale. Separabilita' generale e separabilita' in coordinate cartesiane. Determinazione dello spettro di autofunzioni ed autovalori. Risoluzione diretta con un Ansatz prodotto. Dimostrazione formale che la soluzione fattorizzata e' la piu' generale. Buca cubica: degenerazione dei livelli. Oscillatore armonico tridimensionale. Degenerazione nel caso isotropo.
Da confermare	VEN 10/10/2014	10:30	2	A	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Calcolo della degenerazione per l'oscillatore armonico isotropo. Il problema dei due corpi. Coordinata del baricentro e relativa ed impulsi associati. Relazioni di commutazione. Costruzione degli impulsi associati ad un cambio lineare generico di coordinate: costruzione attraverso i commutatori e costruzione nella base delle coordinate attraverso il generatore delle traslazioni. Separazione del termine cinetico e separazione dell'hamiltoniana. Problemi centrali. Coordinate sferiche. Separazione del termine cinetico in coordinate sferiche: caso classico. Il tensore completamente antisimmetrico. Identita'.
Da confermare	MER 15/10/2014	10:30	2	A	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Definizione e proprieta' del tensore completamente antisimmetrico. Identita' vettoriale per il quadrato del prodotto esterno. Separazione del termine cinetico in coordinate sferiche nel caso classico. Proiezione dell'impulso lungo l'asse radiale e generatore delle stralazioni lungo la direzione radiale. Separazione del termine cinetico in meccanica quantistica: calcolo esplicito. L'operatore impulso radiale: non hermiticita' della definizione ingenua. Costruzione di un operatore impulso radiale hermitiano.
Da confermare	VEN 17/10/2014	10:30	2	A	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Espressione dell'hamiltoniana in termini di impulso radiale e momento angolare e sua separabilita' per problemi centrali. Il momento angolare. Rotazioni. Il momento angolare classico come carica di Noether. L'operatore momento angolare ed il generatore delle rotazioni. Commutatore tra due diverse componenti del momento angolare, e tra una componente del momento angolare ed il quadrato del momento angolare.
Da confermare	MER 22/10/2014	10:30	2	A	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Hermiticita' dell'operatore momento angolare ed irrilevanza dell'ordinamento nella sua definizione. Gli operatori momento angolare

come operatori differenziali nella base delle coordinate. Lo spettro del momento angolare. Operatori di innalzamento ed abbassamento e relazioni di commutazione. Necessita' che lo spettro si arresti. Determinazione degli autovalori di L_2 ed L_z . Normalizzazione degli stati.

Da confermare	VEN 24/10/2014 10:30 2	A	Dipartimento Lezioni di Fisica	Le autofunzioni del momento angolare nella base delle coordinate. Autofunzioni di L_z : armoniche sferiche e funzioni sferiche. Determinazione dello stato di minima terza componente. Costruzione degli stati per azione degli operatori di innalzamento. Ortogonalita' e completezza. Caso $m=0$: i polinomi di Legendre. Sviluppo di una funzione definita sulla sfera su una base di armoniche sferiche. Plidromia delle autofunzioni associate a l ed m semi-intero. Momento angolare orbitale e spin.
Da confermare	VEN 31/10/2014 10:30 2	A	Dipartimento Lezioni di Fisica	Esempi di sistemi mclassici aventi momento angolare o spin. Sistemi vettoriali: rotazioni. Notazione di Dirac e notazione vettoriale. Rotazioni infinitesime degli stati e matrici di rotazione. Generatore delle rotazioni. Espressione esplicita dei generatori. Relazioni di commutazione. Determinazione degli autostati di momento angolare totale e della terza componente del momento angolare. Spin $1/2$ e sistemi bipartiti. Operatori di momento angolare e matrici di Pauli.
Da confermare	MER 05/11/2014 10:30 2	A	Dipartimento Lezioni di Fisica	Relazioni di commutazioni tra le matrici di Pauli. Verifica del valore dello spin. Rotazione di 2π di uno stato di spin semi-intero. Interpretazione geometrica dello spin semi-intero: il "trucco della cintura" (o di Dirac). Relazione di completezza e funzione d'onda per sistemi con momento angolare orbitale e spin. Composizione di momenti angolari: l'operatore momento angolare totale. Relazioni di commutazione tra momento angolare totale, momento angolare orbitale e spin. Base del momento angolare totale e coefficienti di Clebsch-Gordan.
Da confermare	VEN 07/11/2014 10:30 2	A	Dipartimento Lezioni di Fisica	Determinazione dei valori permessi per il momento angolare totale. Conteggio degli stati. Calcolo dei coefficienti di Clebsch-Gordan per la combinazione di due spin $1/2$. Equazione di Schro"dingher per un problema centrale. Proiezione sugli autostati del momento angolare. Funzione d'onda radiale ridotta ed azione dell'operatore impulso radiale su di essa. Problema unidimensionale associato e condizioni al contorno.
Da confermare	MER 12/11/2014 10:30 2	A	Dipartimento Lezioni di Fisica	Operatore impulso radiale hermitiano sulla funzione d'onda radiale ridotta. Condizioni al contorno sul problema unidimensionale associato. Andamento nell'origine: integrabilita' e potenziale a delta. Andamento della funzione d'onda nell'origine e potenziale centrifugo. Andamento all'infinito per potenziali leganti. La particella libera in tre dimensioni in coordinate sferiche. Equazione di Bessel. Introduzione all'oscillatore armonico tridimensionale isotropo in coordinate sferiche.
Da confermare	VEN 14/11/2014 10:30 2	A	Dipartimento Lezioni di Fisica	Hamiltoniana per l'oscillatore tridimensionale isotropo per autofunzioni del momento angolare. Spettro nel caso di momento angolare nullo e problema unidimensionale associato: condizioni

al contorno. Operatori di innalzamento ed abbassamento generalizzati, operatore numero generalizzato, ed espressione dell'hamiltoniana in termini di essi. Effetto degli operatori di innalzamento ed abbassamento generalizzati sugli autostati dell'hamiltoniana.

Da confermare	MER 19/11/2014 10:30 2	A	Dipartimento Lezioni di Fisica	Determinazione dello spettro: costruzione degli autostati mediante l'azione degli operatori di creazione sugli autostati del settore di momento angolare nullo. Autovalori degli operatori numero generalizzati e dell'hamiltoniana: spettro di autovalori dell'energia. Degenerazione dello spettro: equivalenza con la trattazione in coordinate cartesiane. Teorema di degenerazione nel caso generale. Grado di degenerazione e simmetria dall'hamiltoniana.
Da confermare	VEN 21/11/2014 10:30 2	A	Dipartimento Lezioni di Fisica	Il [potenziale coulombiano. Hamiltoniana radiale: analisi dimensionale e dipendenza degli autovalori di energia dai parametri del problema. Cenni sulla soluzione dell'equazione differenziale radiale. Richiami sul potenziale coulombiano nel caso classico: trattazione hamiltoniana del problema di Keplero. Leggi di conservazione: momento angolare e vettore di Lenz. Costanti del moto indipendenti e condizioni iniziali: relazioni tra vettore di Lenz, momento angolare ed hamiltoniana. Il vettore di Lenz in meccanica quantistica. Operatore vettore di Lenz. Struttura delle relazioni di commutazione.
Da confermare	MER 26/11/2014 10:30 2	A	Dipartimento Lezioni di Fisica	Commutazione dell'operatore vettore di Lenz con l'hamiltoniana. Algebra di operatori: vettore di Lenz, momento angolare, hamiltoniana. Ortogonalita' di vettore di Lenz e momento angolare. Relazione tra il quadrato del vettore di Lenz, l'hamiltoniana, ed il quadrato del momento angolare. Insieme completo di operatori diagonalizzabili simultaneamente all'hamiltoniana. Rinormalizzazione del vettore di Lenz su un autostato dell'energia. Operatori F e loro relazioni di commutazione: momenti angolari disaccoppiati. Determinazione dello spettro: relazione tra autovalore dell'energia ed autovalori degli operatori F. Calcolo della degenerazione. Passaggio alla base fisica: il momento angolare come combinazione di due momenti angolari 'astratti'. Calcolo della degenerazione: base degli operatori F e base fisica.
Da confermare	VEN 28/11/2014 10:30 2	A	Dipartimento Lezioni di Fisica	Costruzione delle autofunzioni dell'atomo di idrogeno nella base delle posizioni. Funzione d'onda per lo stato fondamentale. Ripristino delle costanti dimensionali. Forma generica delle autofunzioni per gli stati eccitati. Il ruolo dell'azione in meccanica classica ed in meccanica quantistica. Principio variazionale ed equazioni del moto classiche. Dipendenza della azione lungo una traiettoria classica dal punto e dal tempo finale. Impulso come gradiente della azione classica. Dipendenza della azione dal tempo e equazione di Hamilton-Jacobi. Esempio: l'oscillatore armonico classico. Soluzione dell'equazione di Hamilton-Jacobi per sistemi invarianti per traslazioni temporali e funzione caratteristica di Hamilton. Caso n-dimensionale.
Da confermare	MER 03/12/2014 10:30 2	A	Dipartimento Lezioni di Fisica	La azione (funzione principale di Hamilton) come "funzione d'onda classica": moti classici, velocita' del moto e velocita' dell'onda. L'azione in

meccanica quantistica. Evoluzione temporale di un autostato della posizione e propagatore. Associativita' del propagatore. Calcolo del propagatore per un'evoluzione temporale infinitesima: il propagatore come esponenziale dell'elemento di azione. Evoluzione temporale finita come composizione di evoluzioni temporali infinitesime. L'integrale di cammino di Feynman. Integrale di cammino come integrale funzionale. Interpretazione fisica: interferenza di cammini. Cammino dominante nel limite $\hbar \rightarrow 0$ e limite classico.

Da confermare	VEN 05/12/2014 10:30 2	A	Dipartimento di Fisica	Lezioni	La formulazione di Feynman della meccanica quantistica. Dimostrazione che la funzione d'onda scritta in termini di path integral soddisfa l'equazione di Schrodinger. L'approssimazione WKB: equazione di Schrodinger per la fase della funzione d'onda. Approssimazione semiclassicalica e sviluppo in serie di potenze di \hbar . Ordine zero dell'approssimazione semiclassica: l'equazione di Hamilton-Jacobi di nuovo, e la sua soluzione nel caso stazionario. Primo ordine dell'approssimazione semiclassica: la soluzione WKB.
Da confermare	MER 10/12/2014 10:30 2	A	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Interpretazione della soluzione WKB al primo ordine. Energia maggiore del potenziale e soluzione oscillante; energia minore del potenziale e soluzione esponenziale. Validita' dell'approssimazione WKB: tasso di variazione della lunghezza d'onda. Cenni sulla soluzione WKB ai due lati di un punto di inversione e suo raccordo. Soluzione WKB per una buca di potenziale di forma generica. Raccordo delle autofunzioni e condizione di quantizzazione (di Bohr-Sommerfeld) sullo spettro di energia. La teoria delle perturbazioni indipendenti dal tempo. Caso non-degenere. Soluzione perturbativa e sistema di equazioni per gli ordini successivi della perturbazione all'autovalore ed all'autostato. Ortogonalita' della perturbazione alla soluzione imperturbata. Determinazione della correzione all'energia al primo ordine, e della correzione all'energia al k-esimo ordine in termine della correzione all'autovalore al (k-1)-esimo ordine.
Da confermare	VEN 12/12/2014 10:30 2	A	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Struttura generale dell'equazione per la teoria perturbativa al k-esimo ordine, e derivazione da essa dell'equazione per la k-esima correzione all'autovalore e la k-esima correzione all'autostato. Forma generale della soluzione iterativa. Soluzione per l'autostato e diagonalizzazione in un sottospazio. Soluzione esplicita fino al secondo ordine. Caso degenere: sottospazi degeneri. Ortogonalita' della perturbazione all'intero sottospazio degenere. Diagonalizzazione della perturbazione nel sottospazio degenere.
Da confermare	MER 17/12/2014 10:30 2	A	Dipartimento di Fisica	Lezioni	La teoria delle perturbazioni dipendenti dal tempo: motivazioni fisiche. Rappresentazione di interazione, sua relazione con la rappresentazione di Heisenberg. Evoluzione temporale per lo stato in rappresentazione di interazione: equazione differenziale e sua soluzione in termini di prodotto cronologico. Calcolo dell'ampiezza di transizione tra autostati dell'energia in rappresentazione di interazione e sua relazione con la probabilita' di transizione. Espressione per l'ampiezza di transizione fino al

secondo ordine perturbativo. Calcolo dell'ampiezza di transizione al primo ordine per potenziali che non dipendono dal tempo esplicitamente, ma vengono 'accesi' ad un tempo iniziale, nel limite di azione del potenziale per un lungo intervallo di tempo. La regola aurea di Fermi.

Da confermare	VEN 19/12/2014 10:30 2	A	Dipartimento Lezioni di Fisica	Introduzione alla teoria della diffusione. Concetto di sezione d'urto: caso classico e caso quantistico. Matrice S. Normalizzazione degli stati fisici e spazio delle fasi. Calcolo del flusso di particelle. Approssimazione di Born per la sezione d'urto e regola aurea di Fermi. Caso di potenziali centrali.
Da confermare	MER 07/01/2015 10:30 2	A	Dipartimento Lezioni di Fisica	Particelle identiche: indistinguibilità in meccanica classica e meccanica quantistica. Invarianza sotto scambio della funzione d'onda. L'operatore di scambio e le sue proprietà. Invarianza degli stati ed invarianza degli operatori (osservabili) sotto scambio. Più di due particelle: non-commutazione degli operatori di scambio. Degenerazione di scambio. Sottospazi invarianti: stati simmetrici e stati antisimmetrici. Segnatura della permutazione. Non-invarianza dei sottospazi a simmetria mista. Bosoni e fermioni: la relazione spin-statistica. Funzioni d'onda per bosoni e fermioni e principio di esclusione di Pauli. Legame tra statistica e spin per sistemi bidimensionali: lo scambio come rotazione.
Da confermare	VEN 09/01/2015 10:30 2	A	Dipartimento Lezioni di Fisica	Funzioni d'onda per bosoni e fermioni ed entanglement. Richiami sulla matrice densità. Stati puri e stati misti: significato e caratterizzazione. Matrice densità per un sistema composto. Matrice densità ridotta e traccia sui sottosistemi. Esempio di particelle in un tripletto di spin: transizione da stato puro a stato misto. Relazione tra entanglement e transizione da stato puro a stato misto sotto traccia rispetto ad un sottosistema. Il paradosso EPR: misure causalmente disconnesse. Le "calze di Bertlmann" ed il realismo locale. Sistema in un singoletto di spin: non-commutazione degli operatori di spin lungo assi diversi ed impossibilità di una descrizione compatibile con il realismo locale.
Da confermare	MER 14/01/2015 10:30 2	A	Dipartimento Lezioni di Fisica	Teorie di variabili nascoste come mezzo per rendere la meccanica quantistica compatibile con il realismo locale: esempio del sistema di un qubit. Disuguaglianze di Bell: misure correlate per due particelle e misure di particella singola. Calcolo delle correlazioni in meccanica quantistica e nell'ipotesi di realismo locale. Derivazione della disuguaglianza nell'ipotesi di realismo locale. Sua violazione in meccanica quantistica. Completezza della meccanica quantistica: il problema della misura. Non-unitarietà della misura quantistica. Decoerenza come fonte della transizione classico-quantistico.

