



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO

## REGISTRO DELLE ATTIVITA' DIDATTICHE

### Dati Anagrafici

STEFANO FORTE

**Data di Nascita:** 21/06/1961 - **Codice Fiscale:** FRTSFN61H21F205Q

**Ruolo:** I FASCIA

PHYS-02/A

DIPARTIMENTO DI FISICA

### Dati dell'insegnamento

**Anno Accademico:** 2024/2025 - **Stato del registro:** APERTO

**Corso di Studio:** FISICA (Classe L-30)

**Insegnamento:** Fisica Quantistica (modulo 2)

**Forme Didattiche e Ore assegnate:**

Lezioni (40.0 ore)

### Riepilogo attività

Forma didattica	Ore registrate
Lezioni	76.0

### Dettaglio attività

---

Data	Ora Inizio	Ore	Modalità	Aula	Sede	Forma didattica	Argomento
01/10/2024	12:30	3.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Introduzione al corso: sistemi complessi separabili e non. Il ruolo delle simmetrie. Spazi di Hilbert prodotto diretto. Definizioni e semplici esempi. Vettori di base e prodotto scalare. Stati fisici fattorizzabili e non. Probabilità; congiunta. Entanglement. Esempio di due qubit. Sistemi d-dimensionali nella base delle posizioni. Funzione d'onda d-dimensionale e suo significato. $n$ corpi e $d$ dimensioni. L'operatore impulso e i suoi elementi di matrice. Traslazioni d-dimensionali. Commutazione delle traslazioni: interpretazione matematica e fisica. Hamiltoniane d-dimensionali. Termine cinetico e potenziale. Separabilità.
02/10/2024	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Potenziali separabili in coordinate cartesiane: autofunzioni prodotto ed autovalori somma. Verifica esplicita. Dimostrazione generale per hamiltoniane commutanti su sottospazi diversi. Esempi: buca parallelepipedale e oscillatore armonico multidimensionale. Degenerazione nel caso isotropo. Calcolo esplicito per l'oscillatore armonico. Il problema dei due corpi. Coordinate relative e baricentriche e loro canonicità. Trasformazione degli impulsi per cambiamenti lineari generali di coordinate.
03/10/2024	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Riassunto della derivazione delle relazioni di commutazione canoniche fra variabili trasformate. L'impulso come operatore differenziale. Manipolazioni con operatori differenziali: la relazione di commutazione canonica. Derivazione della legge di trasformazione degli impulsi sotto cambiamenti lineari di coordinate utilizzando la sua definizione come operatore differenziale. Problemi centrali. Coordinate sferiche. Decomposizione del termine cinetico in coordinate sferiche: caso classico. Identità per il modulo del prodotto esterno: il tensore completamente antisimmetrico e le sue proprietà. L'impulso radiale (versione non-hermitiana). Sua espressione in termini della derivata parziale rispetto alla coordinata radiale.
08/10/2024	12:30	3.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Esercitazioni tenute da Raoul Roentsch: Svolgimento dei problemi 1-3. Spazi prodotto diretto. La base delle coordinate e la base degli impulsi in tre dimensioni. Oscillatore armonico tridimensionale come combinazione di oscillatori unidimensionali.
15/10/2024	12:30	3.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Decomposizione del termine cinetico in parte radiale e parte angolare nel caso quantistico. L'operatore $L$ come operatore puramente angolare. Operatore impulso radiale autoaggiunto ed espressione in termini di esso del termine cinetico. Momento angolare e rotazioni. Caso classico: invarianza per rotazioni e carica di Noether associata. Caso quantistico: il momento angolare come generatore delle rotazioni sugli stati fisici. Non-commutazione delle componenti del momento angolare e suo significato. Calcolo del commutatore fra diverse componenti del momento angolare. Interpretazione fisica del risultato: natura vettoriale del momento angolare.
16/10/2024	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Ancora sulla natura vettoriale del momento angolare: rappresentazione delle trasformazioni in fisica quantistica sugli operatori, sugli stati e sugli autovalori. Invarianza di $L^2$ e suo commutatore con $L_i$ . Lo spettro del momento angolare. Operatori di innalzamento e abbassamento, loro relazioni di commutazione e loro azione sugli autostati di $L_z$ . Necessità che lo spettro di $L_z$ si arresti. Condizioni su i valori minimo e massimo dell'autovalore di $L_z$ : valori possibili dell'autovalore di $L_z$ e dell'autovalore di $L^2$ . Lo spettro del momento angolare. Autofunzioni nella base delle coordinate: le armoniche sferiche. Dipendenza delle armoniche sferiche dalla coordinata azimutale.

17/10/2024	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Costruzione esplicita delle armoniche sferiche. Dipendenza dall'angolo azimuthale $\phi$ e condizione di autostato di $L_z$ . Dipendenza dalla coordinate polare $\theta$ delle funzioni sferiche e condizione di annichilazione dello stato con $m$ minimo dall'operatore di distruzione. Costruzione degli stati per azione dell'operatore di creazione. Ortogonalita' e completezza delle armoniche sferiche. Le armoniche sferiche con $l=0$ come base completa sul segmento. Cenno sui polinomi di Legendre. Momento angolare orbitale e spin. Spin in fisica classica: funzioni a valori vettoriali. Quantizzazione: rappresentazione delle rotazioni su uno spazio di Hilbert di dimensione finita. Un sistema quantistico a tre stati: sistemi vettoriali. Trasformazione sotto rotazioni del ket di stato. Generatore infinitesimo: i generatori come matrici. Espressione dei generatori. Significato dei generatori come generatori delle rotazioni.
22/10/2024	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Esercitazioni tenute da Raoul Roentsch: svolgimento dei problemi 5 e 8. Trasformazioni lineari di coordinate canoniche in termini di operatori di creazione e distruzione. Sistema di molte particelle in una buca. Limite di centro di massa infinitamente massivo.
23/10/2024	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Riassunto delle differenze fra momento angolare orbitale e spin: rotazioni realizzate su spazi di Hilbert di dimensione finita o infinita. Verifica della relazione di commutazione fra i generatori di spin 1. Calcolo del quadrato del momento angolare e verifica del valore dello spin. Autofunzioni di $L_z$ : base cartesiana e base circolare. Lo spin $1/2$ . Spinori. Costruzione dei generatori nella base in cui $s_z$ e' diagonale. Le matrici di Pauli. Verifica delle relazioni di commutazione. Calcolo del quadrato e verifica del valore del momento angolare. Rotazioni di $2\pi$ : il doppio ricoprimento delle rotazioni. Realizzazione meccanica dello spin semi-intero.
24/10/2024	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Esercitazioni tenute da Raoul Roentsch. Svolgimento dei problemi 10 e 12. Impulso radiale e laplaciano in $d$ dimensioni. Precessione di posizione e impulso in campo magnetico.
29/10/2024	12:30	3.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Sistemi con momento angolare orbitale e spin: funzione d'onda nello spazio complessivo. Combinazione di momenti angolari. Il momento angolare totale. Insieme massimale di operatori momento angolare commutanti: il momento angolare totale e la sua terza componente. Dimensione dello spazio e diverse scelte di base. I coefficienti di Clebsch-Gordan. Problemi 12 e 13: evoluzione temporale con una hamiltoniana proporzionale al generatore delle rotazioni. Soluzione delle equazioni alla Heisenberg: rotazione rappresentata sugli operatori o sui vettori. Problema 14: elementi di matrice e relazioni di indeterminazione per le diverse componenti del momento angolare. Problemi 17 e 19: funzioni d'onda spaziali scalari e vettoriali e sistemi di momento angolare pari a 1.
30/10/2024	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Composizione di momenti angolari: determinazione del valore massimo e del valore minimo del momento angolare totale. Coefficienti di Clebsch-Gordan: calcolo per la composizione di due spin $1/2$ . Considerazioni generali sull'entanglement e sulle particelle identiche. Problemi tridimensionali: equazione per la funzione d'onda radiale per autostati del momento angolare. Ridefinizione della funzione d'onda radiale per un fattore $1/r$ : sua utilita' e significato in termini di misura di integrazione. Equazione soddisfatta dalla funzione ridefinita. Condizioni al contorno: integrabilita' nell'origine.
31/10/2024	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Restrizioni sull'andamento della funzione d'onda nell'origine imposte dalla forma del potenziale: assenza di termini distribuzionali e zero della funzione $u$ nell'origine. Potenziali meno singolari che $1/r^2$ e andamento della $u$ nell'origine. Stati legati con potenziali che si annullano all'infinito e andamento della $u$ all'infinito. La particella libera: coordinate cartesiane e coordinate sferiche. Equazione agli autovalori per la funzione d'onda radiale: l'equazione di Bessel e le sue soluzioni. L'oscillatore armonico tridimensionale isotropo. Riassunto della soluzione in coordinate cartesiane. Soluzione in coordinate sferiche: equazione per la funzione d'onda radiale. Caso $l=0$ : relazione con il caso unidimensionale e condizioni al contorno. Caso $l>0$ : operatori di creazione e distruzione generalizzati. Operatore numero generalizzato e sua relazione con la hamiltoniana.

06/11/2024	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Riassunto delle relazioni fra operatori di creazione e distruzione e numero generalizzati. Dimostrazione che gli operatori di creazione e distruzione generalizzati collegano gli spettri degli operatori numero associati a diversi valori del momento angolare. Costruzione dello spettro per l generico a partire dello spettro con $l=0$ . Dimostrazione che non vi sono ulteriori autostati. Determinazione dello spettro completo della hamiltoniana. Stato fondamentale e primi stati eccitati: base cartesiana e base sferica. Calcolo della degenerazione e suo significato. Il teorema di degenerazione. Le simmetrie dell'oscillatore armonico tridimensionale. Il ruolo delle simmetrie nel calcolo della degenerazione: cenni sull'interpretazione dei risultati trovati in termini di teoria dei gruppi.
07/11/2024	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Il potenziale coulombiano. Analisi dimensionale e dipendenza dell'energia dai parametri. Considerazioni qualitative sul comportamento dei valori medi di energia cinetica e potenziale sotto riscaldamento. Cenni sulla soluzione dell'equazione differenziale: andamenti nell'origine e all'infinito. Spettro dell'atomo di idrogeno. L'atomo di Bohr. Orbite circolari e quantizzazione del momento angolare. Considerazioni generali sulla validità delle ipotesi di Bohr. Il problema di Keplero. Equazioni del moto. Conservazione del momento angolare. Il vettore di Laplace-Runge-Lenz e la sua conservazione. Conteggio delle quantità conservate per un'orbita chiusa classica. Planarità e modulo del vettore di Lenz. Eccentricità e vettore di Lenz.
12/11/2024	12:30	3.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Simmetrie del problema coulombiano nel caso quantistico. Operatore vettore di Lenz hermitiano. Commutatore dell'operatore vettore di Lenz con la hamiltoniana. Ortogonalità del vettore di Lenz e del momento angolare a livello operatoriale. Quadrato del vettore di Lenz. Problema 18: stati di momento angolare orbitale $l=1$ rappresentati come matrici. Base circolare e base cartesiana. Diverse rappresentazioni delle rotazioni: operatori e stati. Problema 20: autostati dello spin lungo un asse generico e proiettori. Bilineari fermionici e relazione fra la rappresentazione di spin=1/3 e quella di spin 1 delle rotazioni. Problema 21: evoluzione temporale di un sistema di spin 1/2 come rotazione.
13/11/2024	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Simmetrie del problema quantistico: relazioni di commutazione degli operatori momento angolare e vettore di Lenz fra loro. Le relazioni di commutazione in un autostato di energia. Ridefinizione del vettore di Lenz: relazioni di commutazione e gruppo di Lorentz. Disaccoppiamento dei generatori: simmetria come due insiemi di rotazioni. Vincolo sul valore del momento angolare totale. Relazione fra energia e momento angolare totale. Determinazione dello spettro di energia. Calcolo della degenerazione. Passaggio alla base fisica: valori permessi per il momento angolare. Autofunzione di stato fondamentale. Forma generica delle autofunzioni. Cenni sui polinomi di Laguerre.
19/11/2024	12:30	3.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Problema 22: calcolo di coefficienti di Clebsch-Gordan. Problema 23: interazione spin-spin, struttura fine, strutture iperfine e precessione dello spin per stati sovrapposizione. Problema 24 combinazione sequenziale di tre spin 1/2. Problema 25: bosoni di Schwinger. Diverse scelte di base per gli autostati dell'oscillatore bidimensionale isotropo.
21/11/2024	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Moti classici e "moti" quantistici. Derivazione delle equazioni di Lagrange da un principio variazionale. L'azione lungo una traiettoria classica come funzione principale di Hamilton. L'impulso come derivata della funzione caratteristica. L'equazione di Hamilton Jacobi: oscillatore armonico e potenziali generici. Il moto classico come generato da un'onda. Il propagatore: definizione e proprietà. Associatività. Invarianza per traslazioni. Evoluzione temporale finita come sequenza di evoluzioni infinitesime. Calcolo del propagatore per un'evoluzione temporale infinitesima.
26/11/2024	12:30	3.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Problema 26: livelli di Landau, accoppiamento con un campo magnetico classico, trasformazioni di gauge. Problema 27: valori medi nello stato fondamentale idrogenoide: potenze della coordinata, energia cinetica e potenziale e loro relazione. Distribuzione di probabilità nello spazio degli impulsi e trasformata di Fourier tridimensionale. Problema 28: atomo di idrogeno accoppiato a un campo magnetico, spettro, degenerazione ed evoluzione temporale di uno stato sovrapposizione

27/11/2024	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Riassunto della forma Lagrangiana e della forma Hamiltoniana del propagatore per evoluzione temporale infinitesima. Limite per $\delta t = 0$ e calcolo della normalizzazione. Composizione di evoluzioni temporali infinitesime. Propagatore per evoluzione temporale finita e somma sui cammini. Il path integral: integrale funzionale e suo significato. Limite classico e dominanza del cammino di minima azione. Dimostrazione che il path integral soddisfa l'equazione di Schroedinger.
28/11/2024	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Il metodo WKB. Collegamento con il path-integral. Equazione soddisfatta dalla fase della funzione d'onda. Problemi stazionari: equazione per la dipendenza spaziale per un autostato di energia. Sviluppo perturbativo in serie di $\hbar$ fino al secondo ordine. Ordine zero ed equazione di Hamilton Jacobi. Primo ordine: soluzione generale. Caso esponenziale e caso oscillante. Validita' dell'approssimazione WKB. Trattazione semiclassica delle buca di potenziale: funzioni di Airy e condizioni di raccordo. Condizione di quantizzazione dello spettro (di Bohr-Sommerfeld).
03/12/2024	12:30	3.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Esercitazioni tenute da Raoul Roentsch. Problemi (30-32): proprieta' del propagatore. Problema 33: potenziale anarmonico in approssimazione semiclassica.
04/12/2024	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Introduzione alla teoria delle perturbazioni. Perturbazioni indipendenti dal tempo nel caso non-degenere. Sistema di equazioni a tutti gli ordini perturbativi. Proiezione del sistema lungo l'autostato imperturbato e equazione per l'autovalore. Proiezione del sistema nel sottospazio ortogonale e equazione per l'autovettore. Ortogonalita' della correzione allo stato imperturbato. Inversione dell'operatore nel sottospazio. Soluzione generale. Soluzione esplicita fino al primo ordine per lo stato ed al secondo ordine per l'autovalore.
05/12/2024	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Riassunto della teoria perturbativa indipendente dal tempo; Correzione allo stato al secondo ordine. Considerazioni sull'andamento della serie perturbativa al crescere dell'ordine. Teoria delle perturbazioni nel caso degenere. La perturbazione all'autovalore come autovalore della hamiltoniana perturbante nel sottospazio degenere. Introduzione alla teoria perturbativa dipendente dal tempo. La rappresentazione di interazione: suo significato fisico. Relazione fra rappresentazioni di Schroedinger, Heisenberg e interazione. Evoluzione degli stati in rappresentazione di interazione. Serie di Dyson. Equivalenza dell'ampiezza di probabilita' di una misura nelle tre rappresentazioni.
10/12/2024	12:30	3.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Ampiezze di transizione in rappresentazione di interazione. Sviluppo perturbativo dell'ampiezza di transizione fino al secondo ordine. Transizione indotta da un potenziale statico che agisce per un tempo lungo. Regola aurea di Fermi. Problema 34: potenziale coulombiano schermato. Andamenti asintotici. Problema 35: oscillatore armonico traslato. Confronto della soluzione perturbativa ed esatta. Problema 36: potenziale coulombiano incrementato di una unita': determinazione del parametro perturbativo. Problema 37: oscillatore armonico traslato, perturbazione a tutti i livelli. Cenno sul potenziale deltiforme in campo elettrico.
11/12/2024	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Introduzione alla teoria dell'urto. La sezione d'urto. Scelta di base per gli stati entranti. Normalizzazione degli stati e spazio delle fasi. Fattore di flusso. Espressione generale della sezione d'urto. Calcolo della sezione d'urto in approssimazione di Born. Angolo di scattering. Fattore di forma. Il potenziale di Yukawa e il potenziale di Coulomb.
12/12/2024	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Problema 37: perturbazione lineare al potenziale deltiforme. Problema 38: perturbazione al secondo ordine ad un oscillatore armonico isotropo, base cartesiana e base sferica. Problema 39: oscillatore armonico bidimensionale perturbato da un termine non-diagonale: perturbazione degenere al primo ordine. Problema 40: perturbazione lineare di un atomo di idrogeno: rimozione [parziale della degenerazione.
17/12/2024	12:30	3.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Identita' di particelle in fisica classica e quantistica. Operatore Identita' definita sugli stati fisici e sulle osservabili. Esempio di due spin 1/2. Identita' su spazio di Hilbert ristretto. Operatori di scambio distinti e non-commutazione. Degenerazione di scambio. Segnatura di una permutazione. Stati simmetrici e antisimmetrici. Conseguenze della simmetrizzazione e dell'antisimmetrizzazione. Entanglement, Principio di Pauli (o di esclusione). Relazione spin-statistica: bosoni e fermioni. Effetto della statistica fermionica. Esempio dell'atomo di elio. Orto- e para-elio. Energia classica e energia di scambio.

18/12/2024	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Riassunto delle proprietà di orto- e para-elio. Significato fisico del teorema spin-statistica. Lo scambio come rotazione nel piano. Esercizio 40: momento di dipolo di un atomo di idrogeno perturbato da un campo elettrico. Esercizi 41 e 42: transizioni indotte da un campo elettrico dipendente dal tempo sullo stato fondamentale di una buca di potenziale e di un oscillatore armonico.
19/12/2024	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Problema 42: ampiezza di transizione esatta fra autostati di oscillatore armonico libero in rappresentazione di Heisenberg. Problema 43: potenziale dipendente dal tempo espresso come esponenziale di operatore di creazione. Problema 44: "riempimento" degli stati per sistemi di bosoni e di fermioni. Problemi 45 e 46 buche e oscillatori armonici tridimensionali per un sistema di due bosoni o fermioni con o senza interazioni dipendenti dallo spin. Problema 47: sistema di tre particelle di spin 1/2 in campo magnetico in una buca cubica: determinazione dello stato fondamentale.
07/01/2025	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Stati entangled: riassunto della definizione. Matrice densità per un sistema in spazio prodotto diretto. Misura su un sottosistema: esempio di sistema di protone ed elettrone con misura dello spin del protone. Matrice densità ridotta: calcolo esplicito nell'esempio precedente. Relazione fra stati entanglement dello stato di partenza e natura pura o mista della matrice densità ridotta. Decomposizione di Schmidt e sua dimostrazione. Numero di Schmidt e entanglement. Dimostrazione che condizione necessaria e sufficiente affinché la matrice densità ridotta resti pura è che lo stato di partenza non sia entangled. Il paradosso EPR. Realismo locale: esempio della coppia EPR. Le calze di Bertlmann. Impossibilità che lo spin sia determinato lungo assi diversi.
08/01/2025	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Significato fisico della matrice densità ridotta: sistemi isolati. Realismo locale e variabili nascoste. Teoria di variabili nascoste per misure di spin 1/2. La disuguaglianza di Bell: probabilità congiunta per misure di spin lungo due assi. Calcolo in fisica quantistica. Realismo locale e probabilità per misure di spin lungo due assi a singola particella. Derivazione della disuguaglianza di Bell. Violazione della disuguaglianza in fisica quantistica. Il problema della misura. Decoerenza e accoppiamento con l'ambiente. La funzione d'onda dell'universo.