



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

FIS/02

DIPARTIMENTO DI FISICA

Dati dell'insegnamento

Anno Accademico: 2023/2024 - **Stato del registro:** APERTO

Corso di Studio: FISICA (Classe L-30)

Insegnamento: Fisica Quantistica (modulo 1)

Forme Didattiche e Ore assegnate:

Lezioni (40.0 ore)

Esercitazioni (24.0 ore)

Riepilogo attività

Forma didattica	Ore registrate
Lezioni	40.0
Esercitazioni	24.0

Dettaglio attività

Data	Ora Inizio	Ore	Modalità	Aula	Sede	Forma didattica	Argomento
28/02/2024	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Introduzione al corso. Fisica quantistica e fisica classica. La fisica quantistica come grammatica universale. Determinismo e realismo locale. Struttura e argomenti del corso. Lezioni e esercitazioni. Modalità di esame. L'esperimento della doppia fenditura e composizione delle probabilità in fisica classica. L'esperimento di Zeilinger. Motivazione e caratteristiche generali. Molecole di fullerene e schermo di NiS.
01/03/2024	13:30	1.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	L'esperimento di Zeilinger: caratteristiche del fascio e della rivelazione. Risultati dell'esperimento. Interferenza e suo significato. Interferenza per propagazione su cammini di lunghezza diversa. Interpretazione del risultato: impossibilità di individuare il cammino seguito. Scomparsa dell'interferenza quando il cammino viene rivelato.
05/03/2024	10:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Significato dell'esperimento di Zeilinger. I principi fondamentali della fisica quantistica: stocasticità, stato, sovrapposizione, misura singola. Il ket di stato e la notazione di Dirac. Sovrapposizione. Probabilità. Misure esclusive ed esaustive. Spazio di Hilbert. Prodotto scalare e sue proprietà: lo spazio dei bra. Vettori di base. Basi ortonormali. Probabilità del risultato di una misura come prodotto scalare fra vettori di stato.
06/03/2024	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Diverse scelte di base, collasso della funzione d'onda e rigenerazione sotto misura. Interferometro di Mac-Zehnder. La bomba di Elitzur e Vaidman. Relazione di completezza o risoluzione dell'identità e suo uso. Operatori; operatori lineari e loro azione sui vettori di base. Matrice associata ad un operatore.
08/03/2024	13:30	1.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Esercitazioni	Svolgimento dei problemi assegnati 1 e 2. La misura come proiezione. Inosservabilità della fase. Additività delle probabilità. Operatore di proiezione.
12/03/2024	10:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Operatori come prodotto ket-bra. Duplice funzione degli operatori: come operatori di evoluzione, o come osservabili. Operatori associati ad osservabili. Autovettori ed autovalori. Operatore aggiunto. Operatori autoaggiunti e hermitiani. Dimostrazione che gli operatori associati ad osservabili sono hermitiani. Dimostrazione che gli operatori hermitiani hanno autovettori ortogonali et autovalori reali: caso non-degenere. Caso degenere e ortogonalizzazione di Gram-Schmidt. Significato fisico della degenerazione: misure parziali. La misura come proiezione. Definizione di operatore di proiezione nel caso generale. Postulati della fisica quantistica. Formulazioni equivalenti: misure ripetute.
13/03/2024	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Cambiamenti di base. Matrice di trasformazione delle componenti di un ket di stato. Operatore di trasformazione. Forma alias-alibi della trasformazione. Elementi di matrice dell'operatore di trasformazione. Definizione di unitarietà e verifica dell'unitarietà dell'operatore di cambiamento di base. Azione del cambiamento di base su un operatore. Operatori unitariamente equivalenti: uguaglianza dello spettro. Operatori compatibili e incompatibili: comportamento sotto misura. Commutatore di due operatori. Dimostrazione che la commutazione è condizione necessaria e sufficiente per la compatibilità. Spettro degenere e diagonalizzazione in un sottospazio. Caratterizzazione della distribuzione statistica dei risultati di misure. Valor medio di un operatore.
15/03/2024	13:30	1.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Esercitazioni	Svolgimento dei problemi assegnati 3 e 6 e breve discussione dei problemi 4 e 5. Stati esclusivi e non. Proiettori. Rigenerazione. Valor medio di operatori.

19/03/2024	10:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Significato della compatibilita' di operatori. Indeterminazione: sua definizione ed equivalenza con la deviazione standard. Dimostrazione che condizione necessaria e sufficiente affinche' l'indeterminazione sia nulla e' che il sistema si trovi in un autostato dell'operatore associato all'osservabile che viene misurata. Implicazioni per la misura successiva di due operatori. Caso di operatori compatibili. Operatori incompatibili e indeterminazione. Indeterminazione di due operatori non-commutanti in uno stato generico. Dimostrazione del principio di indeterminazione: prima disuguaglianza (disuguaglianza di Schwartz). Seconda disuguaglianza e aggiunto del prodotto di due operatori hermitiani. Parte reale e parte immaginaria del valor medio del prodotto di due operatori hermitiani. Relazione di indeterminazione.
20/03/2024	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Il piu' generale stato quantistico. Arbitrarieta' della normalizzazione e inosservabilita' della fase. Raggi nello spazio di Hilbert. Necessita' della misura di piu' di un'osservabile per determinare completamente lo stato. La matrice densita'. Definizione. Hermitianita'. Normalizzazione. Calcolo del valor medio di osservabili in termini di matrice densita'. Traccia e sue proprieta'. Indipendenza della traccia dalla scelta di base. Matrice densita' per uno stato misto. Probabilita' della misura di un'osservabile in uno stato misto. Differenza fra sovrapposizione quantistica e sovrapposizione classica. Interferenza.
22/03/2024	13:30	1.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Esercitazioni	Svolgimento dei problemi 7 e 13. Operatore come prodotto ket bra: matrice come prodotto tensoriale (o esterno) di due vettore. Effetto (irreversibile) della misura sullo stato come azione dell'operatore di proiezione. Compatibilita' e autostati comuni.
26/03/2024	10:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Esercitazioni	Caratterizzazione della matrice densita': quadrato della matrice densita' per uno stato puro o uno stato misto. Dimostrazione che la matrice densita' per uno stato puro al quadrato e' uguale alla matrice di partenza. Dimostrazione che la traccia del quadrato della matrice densita' per uno stato misto e' strettamente minore di uno. Condizione necessaria e sufficiente perche' la matrice densita' descriva uno stato puo e' che al quadrato sia uguale a se stessa. Caso di un qubit: condizione sul determinante della matrice densita'. La piu' generale matrice densita': piu' generale matrice hermitiana 2x2 e base delle matrici di Pauli. Proprieta' delle matrici di Pauli. Conteggio dei parametri: matrice densita' per uno stato puro e per uno stato misto in termini di un vettore tridimensionale. Stato puro e sfera di Bloch. La piu' generale misura. Teorema di no-cloning.
27/03/2024	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Introduzione alla meccanica quantistica. Spazi di Hilbert infinito-dimensionali. La base delle coordinate. L'operatore posizione, i suoi autovalori e i suoi autostati. La funzione d'onda come densita' di probabilita' per misure di posizione. Risoluzione dell'identita' sulla base delle coordinate: la distribuzione delta di Dirac. Proprieta'; della delta di Dirac: normalizzazione, invarianza per traslazioni, simmetria. La delta come successione di funzioni. La delta come autofunzione della posizione: Prodotto scalare e norma. Normalizzazione in senso improprio e generalizzazione dello spazio di Hilbert all'inclusione di distribuzioni. Operatori funzioni dell'operatore coordinata.
03/04/2024	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Significato della misura di un'osservabile meccanica. Osservabili e leggi di conservazione. Il teorema di Noether e sua dimostrazione. L'impulso come quantita' classicamente conservata quando vi e' invarianza per traslazioni. Evoluzione temporale di uno stato quantistico. Le traslazioni in meccanica quantistica. Azione della traslazioni sugli stati o sui vettori di base: rappresentazione alias /alibi. Le traslazioni come cambiamento di base e come trasformazione unitaria. Operatori unitari come esponenziale di operatori hermitiani. Il generatore delle traslazioni. Elemento di matrice del generatore delle traslazioni. Significato dell'invarianza nel caso quantistico. Condizione di invarianza e condizione di commutazione del generatore. Conservazione dell'autovalore del generatore.
05/04/2024	13:30	1.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Esercitazioni	Svolgimento dei problemi 8-12: operatori come prodotto ket-bra. Svolgimento del problema 14: stati di minima indeterminazione e loro significato.

09/04/2024	10:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Relazione fra invarianza, commutazione del generatore della trasformazione, e conservazione degli autovalori: la "versione quantistica del teorema di Noether". L'operatore impulso in e il generatore delle traslazioni: analisi dimensionale e la costante di Planck. Azione delle traslazioni sull'operatore posizione: il commutatore canonico. Parentesi di commutazione e parentesi di Poisson: la quantizzazione canonica. Elementi di matrice degli operatori posizione e impulso nella base delle coordinate e loro hermiticita'. Integrazione per parti. Le autofunzioni dell'operatore impulso nella base delle coordinate. Onde piane. Risoluzione dell'identita' e rappresentazione della delta di Dirac in termini di onde piane.
10/04/2024	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Dimostrazione che l'integrale di un'onda piana fornisce una rappresentazione della delta di Dirac: integrale con il metodo dei residui e calcolo della normalizzazione. Base delle posizioni e base degli impulsi: cambiamento di base e trasformata di Fourier. Significato fisico della trasformata di Fourier: la meccanica ondulatoria. Operatori posizione e impulso in base delle posizioni e base degli impulsi. Evoluzione temporale: dipendenza parametrica dal tempo del vettore di stato. La derivata rispetto al tempo come generatore. Operatore di evoluzione temporale e sua rappresentazione esponenziale. Forma infinitesima dell'evoluzione temporale: il generatore dell'evoluzione temporale. Invarianza per traslazioni temporali e suo significato.
12/04/2024	13:30	1.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Esercitazioni	Ulteriori commenti sul problema 14c e sugli stati di minima indeterminazione. Svolgimento del problema 16. Matrice densita' e misure necessarie per determinarla.
16/04/2024	10:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Il generatore delle traslazioni temporali infinitesime. Dimostrazione che se vi e' invarianza per traslazioni temporali il generatore non dipende dal tempo (condizione necessaria e sufficiente). Dimostrazione che se vi e' invarianza per traslazioni temporali il generatore dell'evoluzione temporale commuta con l'operatore di evoluzione temporale (condizione necessaria e sufficiente). Dimostrazione che se vi e' invarianza per traslazioni temporali allora l'autovalore dell'generatore dell'evoluzione temporale si conserva (condizione necessaria e sufficiente). Dimostrazione del teorema di Noether per trasformazioni dipendenti dal tempo. Il caso delle traslazioni temporali: invarianza per traslazioni temporali e conservazione dell'energia nel caso classico. L'operatore hamiltoniano come generatore delle traslazioni temporali: analisi dimensionale e fattore h tagliato. Equazione di evoluzione temporale in forma differenziale. L'equazione per i ket di stato. Base delle coordinate. Hamiltoniane della forma T+V con potenziali dipendenti solo dalla coordinata. L'equazione di Schroedinger.
17/04/2024	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Esercitazioni	L'equazione di Schroedinger per l'operatore di evoluzione temporale. Soluzione e determinazione dell'operatore di evoluzione temporale per (a) hamiltoniane dipendenti dal tempo e (b) hamiltoniane dipendenti dal tempo ma commutanti a tempi diversi. Il caso di hamiltoniane che a tempi diversi non commutano. Il prodotto cronologico. La serie di Dyson. Soluzione in termini di prodotto cronologico e dimostrazione. Stati stazionari. L'operatore di evoluzione temporale per hamiltoniane indipendenti dal tempo nella base degli autostati di energia. Proprieta' degli stati stazionari: conservazione dell'autobaloro e conservazione della distribuzione di probabilita'.
19/04/2024	13:30	1.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Esercitazioni	Svolgimento del problema 18: delta di Dirac di una funzione. Problema 20: parita' e sue autofunzioni.

23/04/2024	10:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Riassunto delle proprietà degli stati stazionari. Valor medio di un operatore in uno stato stazionario. Dipendenza temporale in rappresentazione di Heisenberg. Operatori dipendenti dal tempo e stati indipendenti dal tempo. Vocabolario di traduzione fra la rappresentazione di Schroedinger e quella di Heisenberg. Equivalenza nel calcolo di probabilità di risultati di misure nelle due rappresentazioni. Le equazioni del moto di Heisenberg per gli operatori. Dipendenza parametrica dal tempo. Dipendenza dal tempo di elementi di matrice e leggi di conservazione. Equazioni del moto per gli operatori posizione e impulso. Commutatore di una funzione della posizione con l'impulso e viceversa. Equazioni del moto quantistiche ed equazioni classiche. Teorema di Ehrenfest. Parentesi di Poisson e parentesi di commutazione.
30/04/2024	10:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Esercitazioni	Svolgimento dei problemi 20, 21, 22. Trasformazione sotto parità degli autostati dell'impulso. Calcolo di commutatori di funzioni di x e p usando la rappresentazione in termini di operatori differenziali. (Esercitazione svolta dal Prof. Marco Zaro).
03/05/2024	13:30	1.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Esercitazioni	Svolgimento del problema 24. Evoluzione temporale di un qubit con hamiltoniana proporzionale a una matrice di Pauli. Precessione. (Esercitazione svolta dal prof. Marco Zaro).
07/05/2024	10:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	La particella libera. Onde piane. Autostati dell'impulso e autostati della parità. Dipendenza temporale. Dipendenza temporale degli elementi di matrice degli operatori posizione e impulso fra autostati di onda piana: rappresentazione di Heisenberg e rappresentazione di Schroedinger. Indeterminazione posizione-impulso e stati di minima indeterminazione. La condizione di minima indeterminazione.
08/05/2024	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Esercitazioni	Costruzione dello stato di minima indeterminazione: il pacchetto gaussiano. Base degli impulsi e base delle posizioni. Trasformata di Fourier di una gaussiana. Larghezza del pacchetto gaussiano trasformato di Fourier. Calcolo semplice dei valori medi e delle indeterminazioni di x e p per il pacchetto gaussiano e verifica della condizione di minima indeterminazione. Considerazioni qualitative sulla larghezza della trasformata di Fourier di un pacchetto d'onde. Allargamento del pacchetto d'onde: commutatore degli operatori posizione a tempi diversi.
10/05/2024	13:30	1.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Esercitazioni	Svolgimento del problema 29 e breve discussione dei problemi 25, 26 e 30: evoluzione temporale di un qubit e precessione, teorema del viriale, equazioni del moto e leggi di conservazione per un potenziale lineare.
14/05/2024	10:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Allargamento del pacchetto d'onde: dipendenza dell'indeterminazione in posizione dal tempo. Caso gaussiano. Stima degli effetti quantistici. Analisi dimensionale e dimensionalità delle costanti. I potenziali continui a tratti: buche, gradini, barriere. La buca di potenziale. Autofunzioni in una buca infinitamente profonda. Spettro di energia. Caratteristiche dello spettro: stati legati. Parità. Energia di stato fondamentale e principio di indeterminazione. Non-degenerazione dello spettro discreto in una dimensione.
15/05/2024	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Esercitazioni	Il gradino di potenziale. La theta di Heaviside come distribuzione: relazione fra la theta e la delta di Dirac. Condizioni di raccordo. Necessità della continuità della funzione e della sua derivata. Equazione agli autovalori. Soluzione con $E > 0$. Soluzione nelle due regioni. Condizioni di raccordo. Conteggio delle soluzioni indipendenti. Soluzione di onda progressiva: determinazione della soluzione mediante le condizioni di raccordo. Corrente di probabilità. Equazione di continuità: significato e dimostrazione. Calcolo della corrente per un'onda piana e per una sovrapposizione di due onde piane. Calcolo della corrente per le autofunzioni di energia per il gradino di potenziale. Verifica che la corrente non dipende da x e che la corrente nelle due regioni è uguale. Interpretazione in termini di corrente trasmessa e corrente riflessa.
17/05/2024	13:30	1.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Esercitazioni	Breve discussione del problema 31: funzione d'onda conderivata discontinua. Problema 32: allargamento di un pacchetto d'onde e reversibilità. Svolgimento del problema 33: trasformata di Fourier di una sovrapposizione di gaussiane.

21/05/2024	10:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Esercitazioni	Riassunto della soluzione con $E > v_0$ progressiva per il gradino. Coefficienti di trasmissione e riflessione. Interpretazione fisica e verifica che $T+R=1$. Soluzione regressiva: simmetria $k \leftrightarrow -k$ e coefficienti di trasmissione e riflessione. Il caso di energia minore dell'altezza del potenziale. Soluzione esponenzialmente smorzata nella regione II. Annullarsi del coefficiente di trasmissione e riflessione totale. Interpretazione fisica dell'annullarsi della corrente trasmessa. Discussione generale del conteggio di parametri e soluzioni indipendenti per potenziali continui a tratti. Cenni sull'effetto tunnel.
22/05/2024	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Considerazioni qualitative generali sullo spettro in presenza di potenziali generici. Conteggio del numero di costanti per potenziali continui a tratti. Potenziali leganti simmetrici. Punti di inversione. Andamento qualitativo delle soluzioni nelle varie region. Condizioni di raccordo. Spettro discreto e autofunzioni a parita' alternate. Esistenza di almeno una autofunzione di energia, Stati del continuo. Il potenziale armonico: considerazioni generali e richiamo del caso classico. Dimostrazione che gli autovalori di energia sono non-negativi. Elementi di matrice degli operatori x e p fra autostati di energia.
24/05/2024	13:30	1.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Esercitazioni	Breve discussione dei problemi 34 e 35. Moto del pacchetto gaussiano in rappresentazione di Schroedinger. Allargamento del pacchetto infinitamente localizzato. Crescita con l'energia dell'indeterminazione in una buca. Problema 36: interferenza fra autostati di energia per una buca di potenziale. Dipendenza dal tempo. Traslazione della buca di potenziale.
31/05/2024	13:30	1.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Esercitazioni	Breve discussione dei problemi 37, 38 e 39. Matrice densita' per uno stato sovrapposizione; buca di potenziale e parita' (37). Autofunzioni di energia per il potenziale lineare (38). Conservazione generale della corrente per la buca di potenziale (39). Soluzione del problema 40: il potenziale deltiforme. Vari metodi di soluzione.
04/06/2024	10:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Lo spettro dell'oscillatore armonico. Operatori di creazione e distruzione. Hamiltoniana in termini di operatori di creazione e distruzione: l'operatore numero. Relazioni di commutazione degli operatori di creazione e distruzione fra loro e con l'operatore numero. Costruzione dello spettro: azione degli operatori di creazione e distruzione su un autostato dell'operatore numero. Necessita' che lo spettro si arresti: non-negativita' degli autovalori. Lo spettro della hamiltoniana. Energia di stato fondamentale. Normalizzazione degli stati. Elementi di matrice degli operatori di creazione e distruzione, posizione e impulso fra autostati di energia. Valor medio e indeterminazione in posizione e impulso e valor medio dell'energia cinetica e potenziale in un autostato di energia. Lo stato fondamentale come stato di minima indeterminazione. Costruzione della funzione d'onda di stato fondamentale. Primo stato eccitato.
05/06/2024	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Funzioni d'onda per l'oscillatore armonico: i polinomi di Hermite. Cenni sui polinomi ortogonali. Dipendenza dal tempo. Principio di Ehrenfest. Dipendenza dal tempo degli operatori di creazione e distruzione. Interpretazione fisica: dipendenza dal tempo del quanto di energia. Dipendenza dal tempo degli operatori x e p alla Heisenberg dalla definizione di operatori alla Heisenberg in termini di operatore di evoluzione temporale. Formule di Baker-Campbell-Hausdorff: dimostrazione. Uso della prima formula per determinare la dipendenza dal tempo di x_h e p_h . Gli stati coerenti. Definizione. Determinazione della funzione d'onda. Normalizzazione.
11/06/2024	10:30	1.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Feedback sull'insegnamento e sulle esercitazioni.
11/06/2024	11:30	1.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Esercitazioni	Problemi 41 e 42. Buca deltiforme e barriera deltiforme. Condizioni di raccordo della derivata prima. Oscillatore armonico. Valori medi di posizione e impulso fra autostati distinti. Parita' dell'operatore di creazione e parita' degli autostati di oscillatore.
12/06/2024	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	