



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: 2021/2022 - **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)

Riepilogo attività

Forma didattica	Ore registrate
Lezioni	50.0

Dettaglio attività

Data	Ora Inizio	Ore	Modalità	Aula	Sede	Forma didattica	Argomento
01/03/2022	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Introduzione al corso: fisica classica e fisica quantistica. Indeterminismo e realismo locale. La fisica quantistica come grammatica universale. Indicazioni sulla didattica, i testi e le risorse web. L'esperimento della doppia fenditura. Granelli di sabbia e composizione della probabilità. L'esperimento di Zeilinger ed il suo risultato. Interferenza.
02/03/2022	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Origine dell'interferenza per le onde. Sua incompatibilità con la composizione classica delle probabilità. Misura e scomparsa dell'interferenza. I principi di base della fisica quantistica: stato, probabilità, sovrapposizione, misura. La notazione di Dirac. Ket di stato per un sistema a due livelli (un qubit). Sovrapposizione di due stati, a loro volta scritti come sovrapposizione.
08/03/2022	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Lo spazio degli stati fisici come spazio vettoriale complesso. Norma e prodotto scalare: lo spazio di Hilbert. Bra e ket. Proprietà del prodotto scalare. Lo spazio dei bra come spazio duale. Vettori di base. Misure esclusive ed esaustive: la base ortonormale. Misura in termini di prodotto scalare fra stati e probabilità in termini di norma. Molteplicità di basi ortonormali. Rigenerazione degli stati. Interferometro di Mach-Zehnder.
09/03/2022	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	La relazione di completezza ed il suo uso. Operatori lineari. Azione di un operatore sui vettori di base. Matrice associata ad un operatore. Composizione di due operatori. Notazione di Dirac e notazione matriciale. Operatore associato ad un osservabile. Autovalori e autovettori. Indipendenza dalla base di autovalori ed autovettori. Aggiunto di un operatore.
15/03/2022	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Operatori autoaggiunti. Operatori associati ad osservabili come operatori autoaggiunti: base degli autostati e base generale. Operatori autoaggiunti autovettori ortonormalizzabili e autovalori reali: dimostrazione della condizione necessaria. Caso degenerare e ortogonalizzazione di Gram-Schmidt. Operatori di proiezione e misura. Proiezione su uno stato., Proiezione generalizzata. Probabilità e risultati della misura in termini di proiezione. Postulati della fisica quantistica: formulazioni equivalenti. Cambiamenti di base. Matrice di cambiamento di base. Operatore di cambiamento di base. Unitarietà. Operatori di cambiamento di base come operatori unitari e viceversa. Operatori unitari e conservazione del prodotto scalare.
16/03/2022	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Trasformazione unitaria di operatori. Trasformazione alias e alibi. Operatori unitariamente equivalenti. Operatori compatibili e incompatibili: esempi. Commutatore (e anticommutatore) di due operatori. Dimostrazione che condizione necessaria e sufficiente affinché due operatori siano compatibili e che essi commutino.
22/03/2022	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	L'indeterminazione: definizione e significato fisico. Espressioni equivalenti dell'indeterminazione. Indeterminazione nulla e condizione di autostato (necessaria e sufficiente). Il principio di indeterminazione. Disuguaglianza di Schwartz. Parte reale e parte immaginaria del prodotto di due operatori. Dimostrazione ed enunciato del principio di indeterminazione. Suo significato fisico.
23/03/2022	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Forma del più generale stato di un qubit. Inosservabilità della fase: i vettori di stato come raggi nello spazio di Hilbert. Necessità della misura di più osservabili incompatibili per determinare completamente lo stato. La matrice densità. Matrice densità per uno stato puro e sue proprietà. Traccia e sue proprietà. Stati misti: definizioni a proprietà. La matrice densità; per uno stato misto. Probabilità classica e ampiezze quantistiche: esempi. Caratterizzazione della matrice densità per uno stato puro: traccia del quadrato della matrice. Determinante della matrice densità.
30/03/2022	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	La più generale matrice hermitiana 2×2 . Le matrici di Pauli e l'identità come base. Proprietà delle matrici di Pauli. Traccia fra matrici di Pauli come prodotto scalare. La più generale matrice densità: stato puro e stato misto. Sfera di Bloch. La più generale misura. Teorema di no-cloning Lo spazio delle coordinate. L'operatore posizione: autovettori ed autovalori. La funzione d'onda. Probabilità di posizione. Risoluzione dell'identità sullo spazio delle posizioni. La distribuzione delta di Dirac. Proprietà della delta.

31/03/2022	12:30	1.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di fisica	Lezioni	La delta di Dirac come successione di gaussiane. La delta come autofunzione per gli autostati della posizione. la delta come matrice identita' nel caso continuo. Prodotto scalare fra stati. Normalizzazione: caso proprio e caso improprio. Elementi di matrice dell'operatore posizione. Funzioni di operatori: funzioni dell'operatore posizione e loro elementi di matrice nella base delle posizioni.
05/04/2022	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Opportunita' di una formulazione hamiltoniana per le osservabili quantistiche. Leggi di conservazione ed osservabili in meccanica classica. Il teorema di Noether. L'impulso come quantita' conservata quando vi e' invarianza per traslazioni. Traslazioni in meccanica quantistica. Azione alias e alibi della trasformazione. Operatori unitari ed hermitiani. Il generatore delle traslazioni. Elementi di matrice del generatore delle traslazioni nella base delle coordinate. Invarianza in fisica quantistica: evoluzione temporale unitaria. Invarianza e commutazione. Conservazione dell'autostato del generatore Condizione necessaria e sufficiente per la legge di conservazione quantistica.
06/04/2022	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Relazione fra generatore delle traslazioni ed impulso. Analisi dimensionale. La costante di Planck e la sua universalita'. Azione delle traslazioni sull'operatore posizione. La relazione di commutazione canonica. Commutatori e parentesi di Poisson: la quantizzazione canonica. La relazione di indeterminazione di Heisenberg. Elementi di matrice degli operatori posizione ed impulso: base delle posizioni e base degli impulsi. Autofunzioni dell'impulso nella base delle posizioni: le onde piane. Autostati dell'impulso come base ortonormale. Relazione di completezza per gli autostati dell'impulso. Rappresentazione della delta di Dirac come integrale su onde piane. Normalizzazione.
07/04/2022	12:30	1.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di fisica	Lezioni	Riassunto della normalizzazione degli autostati dell'impulso: cenni sull'integrazione in campo complesso con il metodo dei residui. Autofunzioni dell'impulso nella base delle coordinate e delle coordinate nella base degli impulsi, loro interpretazione come matrice di passaggio. Relazione fra la funzione d'onda nella base delle posizioni e degli impulsi: trasformata di Fourier. Elementi di matrice degli operatori canonici nella base delle coordinate e nella base degli impulsi. L'operatore impulso come generatore delle traslazioni della posizione.
13/04/2022	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Hermiticita' degli operatori posizione ed impulso. Integrazione per parti: lo spazio dei vettori di stato. Evoluzione temporale. Il tempo come parametro: dipendenza dal tempo del vettore di stato. L'operatore di evoluzione temporale ed il suo generatore. Evoluzione temporale infinitesima. Unitarieta' ed associativita' dell'evoluzione temporale. Invarianza per traslazioni temporali. Indipendenza dal tempo del generatore dell'evoluzione temporale. Conservazione dell'autovalore del generatore come condizione necessaria e sufficiente per l'invarianza.
26/04/2022	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Riassunto delle proprieta' dell'operatore di evoluzione temporale. Il teorema di Noether per trasformazioni che coinvolgono le coordinate. Invarianza per traslazioni temporali: la hamiltoniana classica come quantita' conservata e come generatore dell'evoluzione temporale. Operatore hamiltoniano e la costante di Planck. Evoluzione temporale infinitesima: l'equazione di Schrodinger per i ket. L'equazione di Schro" dinger nella base delle coordinate. Potenziali scrivibili come somma di energia cinetica e potenziale dipendente dalla coordinate. L'equazione di Schro" dinger per l'operatore di evoluzione temporale. Soluzione per hamiltoniane indipendenti dal tempo.
27/04/2022	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Dimostrazione esplicita dell'invarianza per traslazioni temporali dell'operatore di evoluzione temporale se la hamiltoniana non dipende dal tempo. Soluzione dell'equazione di Schroedinger per l'operatore di evoluzione temporale per hamiltoniane dipendenti dal tempo ma commutanti. Soluzione nel caso di hamiltoniane che a tempi diversi non commutano. Il prodotto cronologico. La serie di Dyson. Verifica esplicita della soluzione. Autostati della hamiltoniana. L'operatore di evoluzione temporale nella base dei suoi autostati. Evoluzione temporale di uno stato attraverso la sua decomposizione in autostati di energia.

03/05/2022	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	<p>Riassunto delle proprieta' degli autostati di energia. Valori medi ed elementi di matrice di un operatore in un autostato di energia. Stati stazionari. L'approccio di heisenberg alla macceanoica quantistica. Evoluzione temporale alla Heisenberg: operatori e stati. Indipendenza dalla rappresentazione della dipendenza temporale di valori medi. Indipendenza dalla rappresentazione della dipendenza temporale della ampiezza di probabilita' di risultati di misure. Eventual dipendenza parametrica dal tempo degli operatori alla Schrodinger. Equazioni del moto per gli operatori: le equazioni del moto di Heisenberg. Distionbzione fra l'a hamiltoninana alla Schrodinger ed alla heisenberg. Equazione del moto per la hamiltoniana alla Heisenberg. Leggi di conservazione e rappresentazione di Heisenberg: il teorema di Noether in meccanica quantistica. Equazioni del moto per gli operatori canonici. Commutatore di p con una funzione di q. Identita' delle leggi del moto per gli operatori alla Heisenberg e per le osservabili canoniche classiche. Teorema di Ehrenfest.</p>
05/05/2022	12:30	1.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	<p>Riassunto dell'equivalenza fra l'evoluzione temporale di elementi di matrice alla Heisenberg ed alla Schrodinger. Formulazione generale della relazione fra invarianza e conservazione. Leggi del moto classiche e transizione classico-quantistico come sostituzione delle parentesi di Poisson con i commutatori. Spiegazione fisica: l'Hamiltoniana classica come generatore dell'evoluzione temporale. La particella libera. Autostati dell'energia ed autostati dell'impulso. Equazione agli autovalori nella rappresentazione delle coordinate. Degenerazione dello spettro e scelta di una base completa di operatori.</p>
10/05/2022	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	<p>Stati di particella libera: base degli autostati di parita'. Evoluzione remporale degli stati di particella libera. Evoluzione temporale dei valori medi di posizione ed impulso fra autostati di particella libera scelti come autistati dell'impulso. Calcolo in rappresentazione di Heisenberg ed in rappresentazione di Schroedinger e lori equivalenza. I pacchetti d'onda. Stati di minima indeterminazione. Condizioni di minima indeterminazione: disuguaglianza di Schwartz e parte reale del prodotto di operatori. Risoluzione delle condizioni diu minima indeterminazione. Il pacchetto gaussiano. Calcolo dei valori medi di posizione ed impulso in un pacchetto gaussiano.</p>
11/05/2022	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	<p>Calcolo delle indeterminazioni in posizione ed impulso per il pacchetto gaussiano. Verifica della condizione di minima indeterminazione. Invarianza per traslazioni del risultato. Funzione d'onda nello spazio degli impulsi. Trasformata di Fourier della gaussiana. Larghezza della trasformata di Fourier di una funzione localizzata nello spazio delle posizioni. Allargamento di pacchetti d'onde generici. Commutatore di operatori posizione a tempi diversi e dipendenza dal tempo dell'indeterminazione in posizione.</p>
17/05/2022	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	<p>Allargamento di un pacchetto d'onde: dipendenza dal tempo dell'indeterminazione. Allargamento del pacchetto gaussiano. L'ordine di grandezza degli effetti quantistici: le unita' naturali. Caratteristiche qualitative dei potenziali: stati legati e scattering. La buca di potenziale. Autofunzioni all'interno ed all'esterno della buca. Limite di buca infinita. Condizioni al contorno: lo spettro discreto. Forma delle autofunzioni. Normalizzazione degli stati.</p>
18/05/2022	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	<p>Perche' l'energia dello stato fondamentale non e' nulla: il ruolo del principio di indeterminazione. Partita' delle autofunzioni di energia. Nondegenerazione dello spettro di stati legati per una hamiltoniana unidimensionale. Potenziali continui a tratti. La theta di Heaviside e la delta di Dirac. Conteggio del numero di soluzioni indipendenti per potenziali continui a tratti. Il gradino di potenziale. SOLUZIONE progressiva e soluzione regressiva. Determinazione della soluzione progressiva.</p>
24/05/2022	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	<p>Corrente di probabilita' e suo significato. Equazione di continuita'. Calcolo della coprente di probabilita' per una singola onda piana. Calcolo della corrente di probabilita' per il gradino di potenziale. Continuita' della corrente nell'origine. Coefficienti di trasmissione e riflessione. Soluzione regressiva. Soluzione con energia inferiore all'altezza del gradino. Corrente sotto il gradino: cenno sull'effetto tunnel. Ridlessione totale. Cenno sulla buca di altezza finita. Considerazioni qualitative: parte continua e parte discreta dello spettro. Andamento qualitavo delle soluzioni nelle regioni $E > V(x)$ e $E < V(x)$. Punti di raccordo. Raccordo delle soluzioni e spettro discreto.</p>

25/05/2022	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Riassunto dell'andamento qualitativo delle soluzioni di stato legato. Soluzioni di scattering. L'oscillatore armonico: suo significato ed importanza in fisica. Riassunto dell'oscillatore armonico classico: equazioni del moto e conservazione dell'energia/ Caso quantistico: approccio ondulatorio (Schroedinger) ed approccio algebrico (Heisenberg). Ruolo delle relazioni di commutazione. Energia dello stato fondamentale positiva e spettro discreto come conseguenza delle relazioni di commutazione. Determinazione dello spettro: gli operatori di creazione e distruzione. Espressione della hamiltoniana in termini di operatori di creazione e distruzione. L'operatore numero. Commutatori degli operatori di creazione e distruzione fra loro e con l'operatore numero. Gli operatori di creazione e distruzione come operatori di innalzamento ed abbassamento. Necessita' dell'esistenza di uno stato fondamentale. Spettro dell'operatore numero e spettro della hamiltoniana.
31/05/2022	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Riassunto delle proprietà dello spettro dell'oscillatore armonico. Calcolo della normalizzazione. Ortonormalità degli stati. Elementi di matrice degli operatori posizione ed impulso fra autostati di energia. Elementi di matrice degli operatori x^2 e p^2 . Indeterminazione di un autostato di energia. Lo stato fondamentale come stato di minima indeterminazione. Determinazione dalla funzione d'onda dello stato fondamentale di oscillatore armonico. Funzioni d'onda per gli stati eccitati. I polinomi di Hermite: polinomi ortogonali. Evoluzione temporale degli operatori posizione e impulso alle Heisenberg. Operatore di evoluzione temporale. Formule di Baker-Campbell-Hausdorff. Determinazione degli operatori x e p ad ogni tempo mediante il metodo BCH. Dipendenza dal tempo degli operatori di creazione e distruzione. Dipendenza dal tempo di x e p attraverso la loro espressione in termini di a e a^\dagger . L'operatore di creazione come creatore di un quanto di energia.
07/06/2022	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	(Feedback sul corso). Gli stati coerenti: motivazione e discussione qualitativa. Definizione costruzione dello stato. Normalizzazione. Quasi-ortogonalità degli stati coerenti. Valore medio del numero di occupazione e sua indeterminazione. Valori medi di posizione e impulso.
08/06/2022	08:30	1.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Indeterminazione e dipendenza temporale per lo stato coerente: lo stato coerente come pacchetto gaussiano che non si allarga. Gli stati "gatto di Schroedinger". Costruzione di uno stato gatto mediante l'effetto Kerr. Proprietà dello stato gatto: distinguibilità macroscopica degli stati che lo formano. Interferenza quantistica fra stati gatto. Scomparsa dell'interferenza sotto misura: la decoerenza.