



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:** 2022/2023 - **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	50.0

### Dettaglio attività

---

Data	Ora Inizio	Ore	Modalità	Aula	Sede	Forma didattica	Argomento
28/09/2022	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Introduzione al corso. Fisica e meccanica quantistica su spazi prodotto diretto. Simmetrie, metodi di approssimazione, entanglement. Testi, esame, tutorato. Definizione di spazion di Hilbert prodotto diretto. Esempio: sistema di due qubit. Distinzione fra prodotto diretto e somma diretta. Conteggio degli stati. Probabilita' e probabilita' congiunta. Funzion d'ona fattorizzate e non: entanglement.
29/09/2022	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Spazi prodotto diretto nello spazio delle coordinate. Piu' dimensioni e piu' corpi. FUnzione d'onda in uno spazio n-dimensionale. Probabilita' delle misure di posizione. Operatore impulso e commutatore canonico in n dimensioni. Hamiltoniane n-dimensionali: potenziale e termine cinetico. Equazioni agli autovalori. Potenziali separabili e hamiltoniane separabili: autovalori ed autofunzioni. Esempio della buca di potenziale n-dimensionale. Stato fondamentale e primi stati eccitati. Degenerazione.
05/10/2022	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Buca di potenziale tridimensionale: caso generale e caso isotropo. Ocillatore armonico tridimensionale: caso generale e caso isotropo. Calcolo della degenerazione. Il problema dei due corpi. Coordinata baricentrale e coordinata relativa. Impulsi corrispondenti: baricentrale e relativo. Canonicita' delle relazioni di commutazione fra coordinate e impulsi baricentrali e relativi. Scomposizione della Hamiltoniana. Cambiamenti lineari generali di coordinate: trasformazione indotta sugli impulsi che preserva le relazioni di commutazione canoniche. Notazione per operatori differenziali e suo uso: esempio del calcolo della relazione di commutazione canonica.
06/10/2022	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Notazione e manipolazioni con operatori differenziali: applicazione alla determinazione dei generatori delle traslazioni rispetto a nuove coordinate. Problemi centrali. Coordinate sferiche e motivazione per il loro uso. Espressione del termine cinteico in coordinate sferiche nel caso classico. Tensore completamente antisimmetrico: definizione e proprieta'. Calcolo del prodotto scalare fra due prodotti esterni. Termine cinetico in coordinate sferiche nel caso quantistico. Gerneratore delle traslazioni della coordinata radiale e operatore impuslo radiale. Decomposizione del termine cinetico quantistico in termini di derivata radiale e operatore momento angolare.
12/10/2022	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Espressione del termine cintetico in termine di derivata radiale e operatore momento angolare. L'operatore hermitiano impulso radiale. Espressione del termine cinetico in termini di impulso radiale e mommento angolare. Il momento angolare: caso classico e caso quantistico. Momento angolare e rotazioni. Azione delle rotazioni sulle coordinate: trasformazione infinitesima. Espressione vettoriale e in componenti per la rotazione infinitesima generica. Calcolo delle cariche di Noether concervate in presenza di invarianza sotto rotazioni: il momento angolare classico. Riassunto della rappresentazione di trasformazioni sugli stati quantistici: stati, vettori di base ed operatori. L'operatore momento angolare come operatore hermitiano. Espreessione della trasformazione rotazione finita in termini del momento angolare. Caso infinitesimo. Dimostrazione che l'operatore momento angolare general una rotazione infinitesima sullo spazio delle funzioni d'onda.
13/10/2022	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Espressione esplicita degli operatori momento angolare come operatori differenziali. Trasformazione di stati, vettori di base, operatori. COmmutatore fra due componenti del momento angolare. Il momento angolare come vettore. Commutatore di una componente del momento angolare con il quadrato del momento angolare. Spettro del momento angolare. Operatori di innalzamento ed abbassamento e loro commutatori. Effetto dell'azione degli operatori di innalzamento ed abbassamento. Necessita' che lo spettro si arresti. Determinazione del minimo e del massimo e determinazione dello spettro. Normalizzazione degli stati.

20/10/2022	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Autofunzioni del momento angolare nello spazio delle coordinate: le armoniche sferiche. Equazione per la terza componente e dipendenza dall'angolo azimutale. Condizione di minimo autovalore di $L_z$ e determinazione dell'armonica sferica di minimo $m$ . Costruzione delle armoniche sferiche per azione degli operatori di innalzamento. Forma qualitativa delle armoniche sferiche. Condizione di normalizzazione. Relazioni di ortogonalita' e completezza: scelta della misura. Autofunzioni con $m=0$ come polinomi ortogonali sul segmento: i polinomi di Legendre. Valori ammessi per il momento angolare totale: monodromia delle armoniche sferiche. Momento angolare orbitale e spin: significato dello spin nel caso classico. Spazio di Hilbert per stati di spin 1. Rotazioni sullo spazio di Hilbert. Definizione del generatore come matrice $3 \times 3$ e sua relazione con la trasformazione degli stati.
26/10/2022	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Costruzione esplicita dei generatori di spin 1 come matrici $3 \times 3$ che generano le rotazioni. Verifica delle relazioni di commutazione. Verifica del fatto che il quadrato del momento angolare e' proporzionale all'identita e che il coefficiente di proporzionalita' corrisponde a spin 1. Autostati della terza componente dello spin. Stati di polarizzazione. Spin 1/2: costruzione degli elementi di matrice degli operatori nella base degli autostati della terza componente dello spin. Matrici di Pauli, Verifica delle relazioni di commutazione. Verifica del valore dello spin totale. Interpretazione geometrica. Sistemi con momento angolare orbitale e spin: spazio delle configurazioni come spazio prodotto diretto.
27/10/2022	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Combinazione di momenti angolari: considerazioni generali. Il momento angolare totale. Regole di commutazione. Impossibilita' di diagonalizzare simultaneamente il momento angolare totale e le terze componenti dei momenti angolari componenti. Costruzione dell'insieme di operatori di momento angolare massimamente commutanti. Coefficienti di Clebsch-Gordan. Valori permessi per la terza componente del momento angolare totale. Range di valori permessi per il momento angolare totale: conteggio degli stati. Esempio: determinazione di coefficienti di Clebsch-Gordan per la composizione di due spin 1/2. Cenno sulle particelle identiche.
02/11/2022	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	L'equazione di Schroedinger radiale. Problema agli autovalori radiale sulla base degli autostati del momento angolare. Ridefinizione della funzione d'onda radiale. Condizioni al contorno: andamento nell'origine. Normalizzabilita'. Potenziali senza distribuzioni. Potenziali che divergono meno che quadraticamente. Andamento all'infinito. La particella libera in coordinate sferiche: funzioni di Bessel. $L$ ; oscillatore armonico isotropo in coordinate sferiche. Settore con $l=0$ e relazione con il problema unidimensionale. Condizioni al contorno.
03/11/2022	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Operatori di creazione e distruzione generalizzati e loro relazione con la hamiltoniana. Costruzione dell'operatore numero generalizzato. Gli operatori di creazione e distruzione generalizzati come operatori di innalzamento ed abbassamento. Costruzione dello spettro con $l$ generico a partire dallo spettro con $l=0$ . Esautivita' degli stati ottenuti. Calcolo della degenerazione. Teorema di degenerazione e suo significato.
09/11/2022	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Calcolo della degenerazione e simmetrie: considerazioni generali. L'esempio dell'oscillatore armonico isotropo. Insieme massimale di operatori commutanti con la hamiltoniana. Cenni sul gruppo $SU(3)$ . Cenni sulle rappresentazioni irriducibili. Le rotazioni come sottogruppo di $SU(3)$ . Il potenziale coulombiano e gli atomi idrogenoidi. Forma della hamiltoniana. Il raggio di Bohr. Riduzione del problema agli autovalori al caso adimensionale e dipendenza dello spettro dai parametri. Cenno sulla soluzione mediante equazioni differenziali. L'atomo di Bohr: orbite circolari. Quantizzazione del momento angolare e determinazione dello spettro.

10/11/2022	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Le simmetrie del problema classico di Keplero. Equazioni di Hamilton. Conservazione del momento angolare. Il vettore di Laplace-Runge-Lenza e la sua conservazione. Conteggio delle quantità conservate per un'orbita classica. Ortogonalità del vettore di Lenza e del momento angolare e relazione fra la sua normal, il momento angolare totale e l'energia. Interpretazione geometrica: norma del vettore di Lenz ed eccentricità. Simmetrie del problema quantistico. L'operatore vettore di Lenz hermitiano. Sue forme equivalenti. Commutazione delle componenti del vettore di Lenz con la hamiltoniana. Ortogonalità al momento angolare nel caso quantistico. Norma del vettore di Lenz quantistico.
16/11/2022	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Relazione di commutazione fra tutti gli operatori che commutano con la hamiltoniana: simmetrie del problema. Ridefinizione degli operatori vettore di Lenz. Disaccoppiamento degli operatori: la simmetria come prodotto di due rotazioni. Stati fisici, autovalori, determinazione dello spettro. Ripristino delle costanti dimensionali. Calcolo della degenerazione. Passaggio alla base fisica come combinazione di momenti angolari. Cenni sulle simmetrie del problema: il gruppo $O(4)$ e il gruppo di Lorentz. Costruzione dello stato fondamentale: equazione differenziale.
17/11/2022	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Determinazione della funzione d'onda di stato fondamentale per l'atomo di idrogeno. Stati eccitati: operatori di creazione e distruzione generalizzati. Polinomi di Laguerre e polinomi ortogonali. Metodi di approssimazione in fisica quantistica: generalità. Il limite classico della meccanica quantistica: vari approcci. Difficoltà nell'approccio lagrangiano alla fisica quantistica. Riassunto della derivazione delle equazioni di Lagrange da un'approccio variazionale. L'azione come funzione caratteristica di Hamilton: condizioni iniziali e condizioni finali.
22/11/2022	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	L'azione come funzione principale di Hamilton. Impulso e funzione principale. La funzione di Hamilton come "funzione d'onda" classica. L'equazione di Hamilton Jacobi per la funzione principale di Hamilton. Esempio dell'oscillatore armonico. Sistemi che conservano l'energia: funzione principale e funzione caratteristica. Il moto classico come generato da un'onda. Il propagatore in fisica quantistica. Sua definizione. Il propagatore come funzione d'onda. Associatività del propagatore. Calcolo del propagatore per un'evoluzione temporale infinitesima.
29/11/2022	17:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di fisica	Lezioni	Calcolo della normalizzazione del propagatore. Forma lagrangiana e forma hamiltoniana. Controllo della normalizzazione del limite $\hbar \rightarrow 0$ . Il path integral per una evoluzione temporale finita: somma sui cammini ed integrale funzionale. Limite classico e dominanza del cammino di minima azione. Il path integral in forma hamiltoniana. L'approccio di Feynman alla meccanica quantistica. Equazione di Schrödinger soddisfatta dal path integral.
30/11/2022	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Dimostrazione che il path integral soddisfa l'equazione di Schrödinger. Il metodo WKB. La azione come fase della funzione d'onda. Equazione WKB per la fase della funzione d'onda. Limite classico ed equazione di Hamilton-Jacobi. Problemi stazionari e separazione della dipendenza dal tempo. Sviluppo della fase della funzione d'onda in serie di potenze di $\hbar$ . Ordine zero: l'equazione di Hamilton Jacobi e la sua soluzione come primo ordine di una funzione d'onda semiclassica. Metodo di determinazione delle correzioni: espressione esplicita fino al secondo ordine in $\hbar$ .
06/12/2022	11:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di fisica	Lezioni	Riassunto della funzione d'onda con il metodo WKB al primo ordine. Prima correzione quantistica: calcolo e sua interpretazione come "fase modulata". Soluzione oscillante e soluzione esponenziale. IRigione di validità della approssimazione semiclassica. Soluzione semiclassica per la bica di potenziale. Condizioni di raccordo. Condizione di quantizzazione di Bohr-Sommerfeld. La teoria delle perturbazioni indipendenti dal tempo: caso non-degenere. Sviluppo dell'autostato e sviluppo dell'autovalore. Sistema di equazioni accoppiate per le correzioni di ordine successivo. Ortogonalità della correzione all'autostato allo stato imperturbato. Equazione nella direzione dello stato imperturbato: espressione per la correzione al primo ordine all'autovalore, e espressione per la correzione all'ordine $n$ in termini della correzione all'autostato all'ordine $n-1$ .

14/12/2022	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Equazione per l'autostato. Inversione di un operatore in un sottospazio. Proiezione dell'equazione per la k-esima corezione all'autostato nel sottospazio ortogonale allo stato imperturbato. Calcolo della correzione al primo ordine all'autostato e del secondo ordine all'autovalore. Cenni sulla struttura degli ordini perturbativi piu' elevati e sulla convergenza della serie perturbativa. Caso degenerare. Correzione all'autovalore al primo ordine come autovalore della perturbazione nel sottospazio degenerare. La teoria delle perturbazioni dipendente dal tempo ed il suo significato. Rappresentazione di interazione. Equazione di Schrodinger per gli stati in rappresentazione di interazione.
15/12/2022	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Equivalenza del calcolo dell'ampiezza di transizione in rappresentazione di Schrodinger, Heisenberg e interazione. Espressione dell'ampiezza di transizione in rappresentazione di interazione. Sviluppo perturbativo fino al secondo ordine. L'ampiezza di transizione al primo ordine: espressione per potenziali generali. Potenziali indipendenti dal tempo che agiscono per un tempo finito. Dimostrazione della regola aurea di Fermi.
21/12/2022	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Introduzione alla teoria dell'urto. La sezione d'urto: definizione e sua motivazione. Espressione della sezione d'urto in meccanica quantistica. La matrice S. Calcolo dello spazio delle fasi: onde piane, autostati dell'impulso e dell'energia. Calcolo del fattore di flusso. Espressione finale per la sezione d'urto per flusso di particelle libere entranti ed uscenti. Il primo ordine perturbativo: regola aurea di Fermi ed espressione della sezione d'urto in approssimazione di Born. Fattore di forma. Caso di potenziali centrali. Introduzione ai sistemi di molti corpi quantistici non fattorizzabili: entanglement e particelle identiche.
11/01/2023	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Particelle identiche in fisica classica e fisica quantistica. Definizione formale di particelle identiche. Operatore di scambio: definizione e proprieta'. Azione dell'operatore di scambio sugli stati e sugli operatori. Sistemi di n particelle identiche: non-commutazione e degenerazione di scambio. Stati completamente simmetrici e antisimmetrici. Statistiche di Bose e Fermi. Effetto della statistica sullo spettro e principio di esclusione di Pauli. Relazione spin statistica in teoria quantistica dei campi e in meccanica quantistica nonrelativistica: scambio e rotazioni.
12/01/2023	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Riassunto delle proprieta' della matrice densita'. Matrice densita' per sistemi formati da due sottosistemi. Misure relative ad un sottosistema a matrice densita' ridotta. Esempio di un sistema di due spin 1/2. Matrice densita' per stati puri e stati misti e entanglement: matrice densita' ridotta. Dimostrazione che condizione sufficiente perche' la matrice ridotta per uno stato puro rimanga pura e' che lo stato non sia entangled. Discussione su corso ed esercitazioni.
18/01/2023	12:30	2.0	sincrona in presenza	Aula B	Dipartimento di fisica	Lezioni	L'esperimento EPR: le "calze di Bertlsmann" ed il realismo locale. Variabili nascoste. Le disuguaglianze di Bell: misure congiunte in fisica quantistica ed in una teoria realistica locale. Il problema della misura. Decoerenza.