



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:** 2020/2021 - **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
29/09/2020	12:30	2.0	sincrona online	Zoom Aula B		Lezioni	Introduzione al corso: riepilogo delle idee fondamentali della fisica quantistica. Sistemi con molti di gradi di liberta': simmetrie ed entanglement. Programma del corso. Informazioni pratiche e logistiche sul corso. Vettore posizione in d dimensioni: spazi di Hilbert prodptto diretto. Definizione, prodotto scalare, spazio degli stati fisici. Esempio 1: due qubit. Esempio 2: n particelle in d dimensioni. Funzione d'onda per n particelle in d dimensioni. Probabilita' congiunta.
30/09/2020	12:30	2.0	sincrona online	Zoom Aula B		Lezioni	Operatore impulso d-dimensionale. Commutazione delle componenti dell'impulso. Hamiltoniana della forma standard in d dimensioni e suoi elementi di matrice. Laplaciano ed energia cinetica. Hamiltoniane separabili in coordinate cartesiane: autofunzioni ed autovalori. Autofunzioni fattorizzate e autovalori somma: condizione necessaria e sufficiente. Esempi espliciti di hamiltoniane separabili: buca di potenziale infinita parallelepipedale. Degenerazione nel caso cubico. Oscillatore armonico tridimensionale. Caso isotropo. Calcolo della degenerazione nel caso isotropo. Diverse scelte di base di autofunzioni degeneri.
01/10/2020	12:30	2.0	sincrona online	Zoom Aula B		Lezioni	Il problema dei due corpi. Passaggio alle coordinate baricentrale e relativa. Trasformazione indotta sugli impulsi: relazioni di commutazione. Separazione del termine cinetico, massa totale e massa ridotta. Separazione della Hamiltoniana. Trasformazioni lineari di coordinate. Trasformazione indotta sugli impulsi: derivazione dalle relazioni di commutazione. Notazione per l'impulso visto come operatore differenziale e suo uso. Trasformazione indotta sugli impulsi visti come generatori delle traslazioni (operatori di derivazione). Potenziali centrali. Coordinate sferiche. Separazione del termine cinetico nel caso classico. Identita' per il quadrato del prodotto esterno: proprieta; del tensore completamente antisimmetrico.
07/10/2020	12:30	2.0	sincrona online	Zoom Aula B		Lezioni	Invarianza per rotazioni della Hailtoniana centrale. Impulso radiale e generatore delle traslazioni della coordinata radiale. Sperazione del termine cinetico in termini di operatori radiali ed angolari. Indipendenza del momento angolare dalla coordinata radiale. Operatore impulso radiale: definizione hermitiana. Riscrittura del termine cinetico in termini dell'operatore impulso radiale hermitiano.
08/10/2020	12:30	2.0	sincrona online	Zoom Aula B		Lezioni	Rappresentazione di trasformazioni in fisica quantistica: operatori e stati. Il momento angolare in meccanica classica. Rotazioni infinitesime. Carica conservata per invarianza sotto rotazioni. Il momento angolare come operatore quantistico: azione sugli stati fisici. Azione sugli operatori vettoriali: il momento angolare come generatore delle rotazioni. Relazioni di commutazione fra le componenti del momento angolare. Commutatore delle componenti del omento angolare con il momento angolare totale. Interpretazione geometrica.
13/10/2020	12:30	2.0	sincrona online	Zoom Aula B		Lezioni	Determinazione degli autostati del momento angolare: autostati simultanei di L2 ed Lz. Operatori di innalzamento ed abbassamento e loro relazioni di commutazione. Costruzione di autostati successivi di L_z. Necessita di arrestare la serie: stati di massimo e minimo autovalore di Lz. Determinazione dei valori permessi di m e dell'autovalore del momento angolare totale. Costruzione degli autostati nella base delle coordinate. Armoniche sferiche: determinazione e proprieta' generali.
14/10/2020	12:30	2.0	sincrona online	Zoom Aula B		Lezioni	Aroniche sferiche: esempio nel caso l=4. Parita' delle armoniche sferiche. Ortonormalita' e completezza. Il caso m=0: polinomi di Legendre come polinomi ortogonali sul segmento. Valori permessi del momento angolare orbitale: monodromia delle funzioni d'onda. Lo spin: significato del momento angolare intrinseco. Esempi classici. Il casdo di spin 1. Rotazioni di un vettore. Generatore delle rotazioni su spazi vettoriali tridimensionali. Costruzione a partire di un esempio esplicito ed a partire dalle matrici di rotazione. Relazioni di commutazione. Autovalori ed autovettori della terza componente dello spin e dello spin totale. Vettori come stati di spin 1.
20/10/2020	12:30	2.0	sincrona online	Zoom Aula B		Lezioni	Spin 1/2 e stato di 1 qubit: lo stato di spin 1/2 come "building block". Spinori. Elementi di matrice degli operatori di spin 1/2 nella base di autostati di s_z. Matrici di Pauli, Relazioni di commutazione. Operatore spin totale. Rotazioni di 2pi per stati di spin semi-intero. Interpretazione fisica e interpretazione geometrica per uno stato di spin 1/2. Funzione d'onda per sistemi dodtai di gradi di liberta' spaziali e di spin: il caso di spin 1/2. Combinazione di momenti angolari. Momento angolare totale. Operatori diagonalizzabili simultaneamente. Passaggio dalla base dei momenti angolari alla base del momento angolare totale. Coefficienti di Clebsch-Gordan.

21/10/2020	12:30	2.0	sincrona online	Zoom Aula B	Lezioni	Discussione sul significato di momento angolare e spin. Spin per particelle puntiformi. Combinazione di momenti angolari: valore massimo del momento angolare totale. Conteggio degli stati e valore minimo del momento angolare totale. Rappresentazioni di spin elevato e tensori. Calcolo dei coefficienti di Clebsch-Gordan per due spin $1/2$ . Cenno sulle particelle identiche.
27/10/2020	12:30	2.0	sincrona online	Zoom Aula B	Lezioni	Problemi separabili in coordinate sferiche: riduzione del problema tridimensionale al problema radiale. Funzione d'onda radiale: riscaldamento della misura di integrazione ed impulso radiale hermitiano. Equazione agli autovalori per la funzione d'onda radiale riscalata. Condizioni al contorno: andamento nell'origine. Condizione di integrabilita' e condizione per potenziali che divergono meno che quadraticamente nell'origine. (In)esistenza di almeno uno stato legato ed andamento nell'origine. Andamento all'infinito. La particella libera: confronto fra la separazione in coordinate cartesiane ed in coordinate sferiche. Equazione di Bessel e funzioni di Bessel. L'oscillatore armonico isotropo: considerazioni generali.
28/10/2020	12:30	2.0	sincrona online	Zoom Aula B	Lezioni	Determinazione dello spettro dell'oscillatore armonico tridimensionale in coordinate sferiche. Settare con $l=0$ . Relazione con l'oscillatore armonico unidimensionale. Condizioni al contorno. Interpretazione della coordinata radiale. Operatori di creazione e distruzione generalizzati. Espressione della hamiltoniana in termini di essi: l'operatore numero generalizzato. Azione degli operatori di creazione e distruzione generalizzati su un autostato dell'operatore numero generalizzato. Costruzione degli spettri con $l$ alzato ed abbassato. Costruzione dell'intero spettro a partire da quello con $l=0$ . Autovalori dell'operatore numero generalizzato e della hamiltoniana.
03/11/2020	12:30	2.0	sincrona online	Zoom Aula B	Lezioni	Spettro della hamiltoniana. Valori permessi del momento angolare. Degenerazione. Calcolo esplicito della degenerazione. Teorema di degenerazione. Degenerazione e simmetrie. Operatori che commutano con la hamiltoniana. Simmetria complessiva dell'oscillatore armonico tridimensionale. L'atomo di idrogeno: generalita' sul potenziale coulombiano e sul suo ruolo in fisica classica e quantistica.
04/11/2020	12:30	2.0	sincrona online	Zoom Aula B	Lezioni	Hamiltoniana radiale dell'atomo di idrogeno: raggio di Bohr e riduzione a variabili adimensionali. Dipendenza degli autovalori di energia dai parametri. Cenno sulla soluzione dell'equazione differenziale: andamenti asintotici, sviluppo in serie, quantizzazione dei livelli energetici. L'atomo di Bohr: derivazione di Bohr dello spettro usando metodi semiclassici. Il problema di Keplero. Equazioni del moto e leggi di conservazione. Il vettore di Laplace-Runge-Lenz. Quantita' conservate per un'orbita classica. Vettore di Lenz ed eccentricita'.
11/11/2020	12:30	2.0	sincrona online	Zoom Aula B	Lezioni	Atomo di idrogeno quantistico: simmetrie. L'operatore vettore di Lenz. Commutatore con la hamiltoniana. Forma alternativa ed ortogonalita' con il momento angolare. Quadrato del vettore di Lenz. Relazioni di commutazione: momento angolare e vettore di Lenz. Vettore di Lenz rinormalizzato e suoi commutatori. Operatori di pseudo-momento angolare: relazioni di commutazione. Espressione della hamiltoniana in termini di pseudo-momenti angolari. Determinazione dello spettro della hamiltoniana. Ripristino delle costanti dimensionali.
12/11/2020	12:30	2.0	sincrona online	Zoom Aula B	Lezioni	Significato delle relazioni di commutazione e struttura di simmetria: i gruppi $SU(2) \times SU(2)$ ed $SO(3) \times (SO(3))$ . Il gruppo $SO(4)$ : rotazioni in 4 dimensioni. Interpretazione geometrica: l'atomo di idrogeno come particella libera sulla 3-sfera. Il gruppo $O(4)$ come simmetria della 3-sfera. Passaggio alla base fisica. Degenerazione. Il momento angolare come somma di pseudo-momenti angolari. Valori permessi del momento angolare totale. Segenerazione in termini di momento angolare fisico e della sua terza componente. Cenno sugli accoppiamenti spin spin e spin orbita: struttura fine e iperfine. Funzion d'onda nella base delle coordinate. Stato fondamentale e sua normalizzazione. Cenno sulla costruzione degli stati eccitati attraverso operatori di innalzamento ed abbassamento generalizzati. Condizione di annullamento del massimo valore di momento angolare. Funzione d'onda per $n$ generico come esponenziale allargato. Prefattore polinomiale. I polinomi di Laguerre.

17/11/2020	12:30	2.0	sincrona online	Zoom Aula B	Lezioni	I metodi di approssimazione in fisica quantistica. Limite classico ed approssimazione semiclassica. Difficolta' di costruire il limite classico e concetto di traiettoria. Il ruolo dell'azione: condizioni iniziali e finali. Le equazioni di Lagrange dal principio di minima azione. L'azione come funzione della posizione lungo la traiettoria: la funzione principale di Hamilton. Impulsi dalla funzione principale. Equazione di Hamilton-Jacobi soddisfatta dalla funzione principale di Hamilton. Sistemi che conserano l'energia e funzione caratteristica di Hamilton. Esempio dell'oscillatore armonico unidimensionale. Generalizzazione a piu' dimensioni. La funzione principale di Hamilton come funzione d'onda classica. Velocita' di fase e velocita' di gruppo. Il propagatore in meccanica quantistica: definizione e proprieta': associativita' del propagatore.
18/11/2020	12:30	2.0	sincrona online	Zoom Aula B	Lezioni	Il propagatore come funzione d'onda. Calcolo del propagatore per un'evoluzione temporale infinitesima. Espressione in termini dell'elemento di azione. Normalizzazione nel limite $t-t' \rightarrow 0$ , Composizione di evoluzioni temporali infinitesime. L'integrale di cammino. Significato dell'integrale di cammino come integrale funzionale. Interpretazione fisica dell'integrale funzionale come somma sui cammini. Il limite classico: dominanza del cammino di minima azione. La formulazione di Feynman della meccanica quantistica. Verifica che il path integral soddisfi l'equazione di Schroedinger.
24/11/2020	12:30	2.0	sincrona online	Zoom Aula B	Lezioni	Il metodo WKB. Fase della funzione d'onda come azione semiclassica. Ordine zero e equazione di Hamilton-Jacobi. Correzioni fino al secondo ordine. Forma esplicita della soluzione al primo ordine. Stati del continuo e stati legati. Interpretazione semiclassical della correzione al primo ordine. Validita' dell'approssimazione WKB. Variazione della lunghezza d'onda. Punti di inversione. Applicazione alla buca di potenziale. Condizioni di raccordo.
25/11/2020	12:30	2.0	sincrona online	Zoom Aula B	Lezioni	Condizione di quantizzazione WKB per la buca di potenziale. Confronto con la discussione qualitativa della buca di potenziale. Condizioni di quantizzazione di Bohr-Sommerfeld. La teoria delle perturbazioni indipendenti dal tempo. Idea del metodo. Caso non-degenere. Perturbazione all'autovalore ed allo stato. Ortogonalita' della perturbazione allo stato allo stato imperturbato. Determinazione della correzione all'autovalore al primo ordine e ad un ordine generico. Inversione di un operatore in un sottospazio. Determinazione della correzione all'autostato: calcolo esplicito al primo ordine.
01/12/2020	12:30	2.0	sincrona online	Zoom Aula B	Lezioni	Correzione all'autovalore ed all'autostato fino al secondo ordine. Considerazioni generali sull'andamento della serie perturbativa. Perturbazione di un livello degenere: diverse scelte di base e rimozione della degenerazione. La teoria delle perturbazioni dipendenti dal tempo: considerazioni introduttive. Problemi di stato legato vs. problemi d'urto. La rappresentazione di interazione. Riassunto della relazione fra rappresentazione di Schroedinger e di Heisenberg. Definizione della rappresentazione di interazione. Equazione di evoluzione temporale per gli stati in rappresentazione di interazione.
02/12/2020	12:30	2.0	sincrona online	Zoom Aula B	Lezioni	Equivalenza del calcolo di ampiezze di transizione in rappresentazione di interazione e di Schroedinger. Soluzione per l'operatore di evoluzione temporale in rappresentazione di interazione. Serie di Dyson e suo sviluppo perturbativo. Calcolo dell'ampiezza di transizione. Espressione esplicita fino al secondo ordine. Considerazioni qualitative. Ampiezza di transizione al primo ordine per potenziali costanti. Limite di grandi tempi e regola aurea di Fermi. Considerazioni generali sulla teoria dell'urto. Motivazione intuitiva per la definizione della sezione d'urto.
09/12/2020	12:30	2.0	sincrona online	Zoom Aula B	Lezioni	Definizione formale della sezione d'urto e sue caratteristiche. Matrice S. Stati in e out: onde piane. Normalizzazione nella base sferica per autostati di energia. Calcolo del fattore di flusso. Espressione generale per la sezione d'urto. Calcolo al primo ordine (approssimazione di Born) mediante la regola aurea di Fermi. Interpretazione del risultato e densita' di stati. Calcolo per potenziali dipendenti solo dalla coordinata: fattore di forma. Espressione esplicita per potenziali centrali. Particelle identiche: differenza fra fisica classica e quantistica. Definizione formale di particelle identiche: isomorfismo di spazi di Hilbert ed inosservabilita' dello scambio. Esempio di due spin 1/2 in un autostato dello spin totale.
15/12/2020	12:30	2.0	sincrona online	Zoom Aula B	Lezioni	Indistinguibilita': condizione sugli stati fisici. Proprieta' dell'operatore di scambio. Condizione sulle osservabili ed equivalenza con la condizione sugli stati. Osservabili sullo spazio di autostati dello scambio. Piu' di due particelle identiche: degenerazione di scambio. Stati simmetrici e stati antisimmetrici. Principio di esclusione: implicazioni per lo spettro e gli stati. Teorema spin-statistica. Rotazioni e scambio.

16/12/2020	12:30	2.0	sincrona online	Zoom Aula B	Lezioni	Entanglement: caratterizzazione a livello di ket di stato. Matrice densità: riassunto delle principali proprietà. Matrice densità per sistemi composti. Misure parziali: esempio di due spin $1/2$ . Misura parziale e trasformazione dello stato puro in stato misto. Dimostrazione del fatto che uno stato non entangled sotto misura parziale rimane puro (condizione sufficiente). Discussione sul corso.
13/01/2021	12:30	2.0	sincrona online	Zoom Aula B	Lezioni	Il paradosso di Einstein-Podolsky-Rosen ed il realismo locale. Paradosso EPR e "calze di Bertlmann". Variabili nascoste. Le disuguaglianze di Bell: probabilità di misure congiunte. Interpretazione realistica locale: valore dello spin lungo assi diversi. Derivazione delle disuguaglianze e loro violazione in fisica quantistica. Il problema della misura. Interazione con l'ambiente. Decoerenza.