



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 LM-17)

**Insegnamento:** Fisica Teorica 2

**Forme Didattiche e Ore assegnate:**

Lezioni (42.0 ore)

### Riepilogo attività

| Forma didattica | Ore registrate |
|-----------------|----------------|
| Lezioni         | 42.0           |

### Dettaglio attività

---

| Data       | Ora Inizio | Ore | Modalità             | Aula         | Sede                   | Forma didattica | Argomento   |
|------------|------------|-----|----------------------|--------------|------------------------|-----------------|---|
| 28/09/2023 | 08:30      | 2.0 | sincrona in presenza | Aula E       | Dipartimento di Fisica | Lezioni         | Introduzione al corso: la teoria quantistica dei campi come linguaggio universale. Il ruolo delle simmetrie: cenni storici. Struttura del corso, libri di testo, esami. Singolarita' delle ampiezze: poli e tagli. L'ampiezza come residuo dei poli di una funzione di Green: la formula di riduzione e il suo significato. Campi fondamentali vs. campi interpolanti.  |
| 04/10/2023 | 10:30      | 2.0 | sincrona in presenza | Aula E       | Dipartimento di Fisica | Lezioni         | Poli nelle ampiezze one-particle reducible. Tagli nelle ampiezze e unitarieta'. Necessita' della continuazione analitica per usare le relazioni di crossing. Teorema ottico: dimostrazione formale. Forma esplicita: ampiezza in avanti e sezione d'urto totale Significato del risultato: identita' distribuzionali e tagli nelle ampiezze. Esempio esplicito: l'ampiezza $2 \rightarrow 2$ nella teoria $\phi^4$ . La regione in cui l'ampiezza a 1 loop sviluppa una parte immaginaria. Parte immaginaria e diagramma in canale s. Calcolo del diagramma a un loop in canale s con scelta simmetrica dell'impulso di loop.   |
| 05/10/2023 | 08:30      | 2.0 | sincrona in presenza | Aula E       | Dipartimento di Fisica | Lezioni         | Calcolo del diagramma a un loop: comparsa di una singolarita' sul cammino di integrazione e discontinuita'. Equivalenza del calcolo con la prescrizione di sostituire i propagatori con delta. Verifica del teorema ottico. Generalizzazione al caso di un vertice efficace. Regole di Cutkosky. Applicazione del teorema ottico al calcolo di tassi di decadimento. Diagrammi one-particle irriducibile. Propagatore completo come serie geometrica. Parte reale dell'ampiezza 1PI e massa fisica. Sua parte immaginaria e larghezza: relazione con la formula di Breit e Wigner relativistica. Espressione per la larghezza di decadimento. Introduzione alle simmetrie realizzate alla Wigner-Weyl in teoria dei campi. Dalle correnti conservate di Noether agli operatori quantistici associati.   |
| 11/10/2023 | 08:30      | 2.0 | sincrona in presenza | Aula Bonetti | Dipartimento di Fisica | Lezioni         | Relazioni di commutazione a tempi uguali fra densita' di carica (componenti temporali delle correnti) per operatori quantistici associati a trasformazioni di simmetria. Azione della trasformazione sui campi. Commutatori fra cariche e fra operatori di carica e campo. Algebra delle correnti. Invarianza a livello quantistico e commutazione delle cariche con la hamiltoniana. Commutatore con la densita' di hamiltoniana e conservazione della corrente. Funzioni di Green con una corrente conservata e operatori di campo. Divergenza della funzione di Green: prodotto cronologico e termini di contatto. Derivazione dell'identita' di Ward con un unico operatore di campo. Derivazione delle identita' di Ward nel caso generale con metodi funzionali. Trasformazione locale dei campi. Invarianza della misura di integrazione funzionale e invarianza dell'integrale funzionale sotto riparametizzazioni. |
| 12/10/2023 | 08:30      | 2.0 | sincrona in presenza | Aula E       | Dipartimento di Fisica | Lezioni         | Identita' di ward per la funzione a tre punti in QED scalare e spinoriale. Spazio delle posizioni e spazio degli impulsi. Forma generale della relazione. Calcolo al primo ordine perturbativo e diagrammi di Feynman. La rottura spontanea di simmetria: teorica classica dei campi, teoria quantistica dei campi e meccanica quantistica. Dimostrazione del teorema di Goldstone in teoria classica dei campi. Esempio del potenziale a "cappello messicano".   |
| 19/10/2023 | 08:30      | 2.0 | sincrona in presenza | Aula E       | Dipartimento di Fisica | Lezioni         | Il modello sigma: generalita' sui modelli sigma. Modello sigma lineare di Gell-Mann e Levy. Invarianza chirale e masse dei fermioni. Simmetria $SU(2) \times SU(2)$ e rotazione quadridimensionali. Trasformazioni left/right vs vettoriali/assiali. Trasformazioni dei campi e correnti di Noether. Rottura spontanea di simmetria. Lagrangiana dopo la rottura spontanea: massa per i fermioni e pioni senza massa. La rottura spontanea di simmetria in teoria dei campi. Operatori noninvarianti e invarianza del vuoto. Identita' di Ward per la funzione di Green a due punti e poli a massa nulla.   |
| 25/10/2023 | 08:30      | 2.0 | sincrona in presenza | Aula Bonetti | Dipartimento di Fisica | Lezioni         | Dimostrazione del teorema di Goldstone basata sulle identita' di Ward: argomento generale ed esempio specifico del modello sigma. La relazione di Golberger-Treiman: caso generale e modello sigma. Funzionali generatori. Il generatore delle funzioni di Green connesse. Il potenziale efficace: definizione e interpretazione fisica. Il potenziale efficace come generatore delle funzioni di Green 1PI.  |

|            |       |     |                      |              |                        |         |  |
|------------|-------|-----|----------------------|--------------|------------------------|---------|--|
| 26/10/2023 | 08:30 | 2.0 | sincrona in presenza | Aula E       | Dipartimento di Fisica | Lezioni | Sviluppo in loop del funzionale generatore e sviluppo in potenze di $\hbar$ . L'azione efficace come path integral valutato nel limite classico. Derivazione della rottura spontanea di simmetria con il metodo del potenziale efficace. Invarianze e simmetrie. Invarianza di gauge nel caso abeliano. Trasporto parallelo e derivata covariante. Connessione e campo di gauge. Trasformazione del campo di gauge. Curvatura e tensore intensita' di campo. Lagrangiana della QED come piu; generale lagrangiana rinormalizzabile invariante di gauge. Trasformazioni di gauge nel caso non-abeliano. Derivata covariante.  |
| 02/11/2023 | 08:30 | 2.0 | sincrona in presenza | Aula E       | Dipartimento di Fisica | Lezioni | Riassunto della trasformazione dei campi di materia nel caso non abeliano. Legge di trasformazione dei campi di gauge nel caso non-abeliano. I campi di gauge come campi nella rappresentazione aggiunta del gruppo. Verifica esplicita della trasformazione della derivata covariante. Forma infinitesima della trasformazione dei campi di gauge. Derivata covariante di campi in rappresentazione aggiunta. Trasformazione infinitesima come derivata covariante. Il tensore intensita' di campo come commutatore di derivate covarianti. Lagrangiana per la teoria di gauge accoppiata alla materia. Equazioni classiche del moto. Identita' di Jacobi e identita' di Bianchi. Campi autoduali come soluzioni delle equazioni classiche del moto. Correnti di Noether associate all'invarianza di gauge.   |
| 08/11/2023 | 08:30 | 2.0 | sincrona in presenza | Aula Bonetti | Dipartimento di Fisica | Lezioni | Cariche di Noether e generatori delle trasformazioni di gauge. Integrazione per parti della derivata covariante. Dimostrazione che le cariche di Noether associate all'invarianza di gauge sono identicamente nulle. Quantizzazione di sistemi vincolati. Esempio di sistema quantistico in cui il baricentro e' fermo: distinzione fra conservazione e vincolo.. restrizione sullo spazio di Hilbert, Formulazione funzionale Hamiltoniana. Delta di Dirac funzionale. Espressione della delta funzionale sulla variabile coniugata al vincolo in termini di determinante funzionale. Espressione della delta funzionale ul vincolo mediante moltiplicatore di Lagrange. Formulazione lagrangiana e equazioni classiche del moto. Invarianza di gauge 0+1 dimensionale. Formula di Faddeev.   |
| 09/11/2023 | 08:30 | 2.0 | sincrona in presenza | Aula E       | Dipartimento di Fisica | Lezioni | Quantizzazione canonica del campo di Yang-Mills. Campi elettrici e magnetici ed equazioni del moto.. Gauge $A_0=0$ (di Weyl): Hamiltoniana e campi canonici. Generatore del vincolo. Verifica esplicita dell'azione de; generatore delle trasformazioni di gauge. Formulazione alla Schroedinger funzionale. Momento canonico come derivata funzionale. Condizione di vincolo sul funzionale di Schroedinger. Risoluzione del vincolo nel caso abeliano: proiettore trasverso e decomposizione del campo. Soluzione in assenza di cariche: funzionale del campo trasverso. Soluzione in presenza di una densita' di carica: onda piana funzionale e contributo coulombiano all'energia. Formulazione funzionale: delta funzionale della variabile coniugata al vincolo: caso abeliano e caso generale. Scelte di gauge. Riscrittura della delta funzionale come integrale gaussiano. L'argomento di Faddeev-Popov: direzioni piatte di integrazione. Rimozione del fattore infinito dovuto all'integrazione sul gruppo di gauge. |
| 15/11/2023 | 08:30 | 2.0 | sincrona in presenza | Aula Bonetti | Dipartimento di Fisica | Lezioni | Quantizzazione delle teorie di gauge in gauge di Lorenz e gauge lineari. Caso abeliano: irrilevanza del determinante funzionale. Inversione del termine cinetico. Scelte particolare per il parametro di gauge $\xi$ e loro significato: il limite $\xi \rightarrow 0$ . Indipendenza delle ampiezzedalla scelta di $\xi$ e invarianza di gauge. Il numeratore el propagatore come proiettore quando $\xi=0$ : gauge di Lorentz e gauge lineare. Il caso non-abeliano: determinante funzionale. Campi di ghost: propagatore e regole di Feynman. Cenno sulla simmetria BRS. Il modello di Higgs abeliano. Rottura spontanea di simmetria: settore scalare. Settore di gauge: termine di massa per il campo di gauge e accoppiamento gauge-scalare.   |

|            |       |     |                      |              |                        |         |   |
|------------|-------|-----|----------------------|--------------|------------------------|---------|---|
| 16/11/2023 | 08:30 | 2.0 | sincrona in presenza | Aula E       | Dipartimento di Fisica | Lezioni | Regole di Feynman associate al termine di massa ed all'accoppiamento campo di gauge-bosone di Goldstone. Propagatore del fotone: self-energia e proiettore trasverso. Somma della serie geometrica e "protezione" della posizione del polo. Caso di simmetria rotta spontaneamente: contributo del bosone di Goldstone alla self-energia del fotone. Calcolo del propagatore e massa del fotone. Conteggio di gradi di liberta': la gauge unitaria. Argomento basato sull'invarianza di gauge per la forma dell'accoppiamento fra campo di gauge e corrente. Argomento basato sulle identita' di Ward per il contributo del Goldstone al propagatore del fotone. Il teorema di equivalenza.   |
| 22/11/2023 | 08:30 | 2.0 | sincrona in presenza | Aula Bonetti | Dipartimento di Fisica | Lezioni | Rinormalizzazione della QED. Lagrangiana rinormalizzata. Costanti di rinormalizzazione e condizioni di rinormalizzazione. Self-energia del fotone e rinormalizzazione del campo di gauge. Self energia dell'elettrone e rinormalizzazione del campo fermionico e della massa. Vertice e rinormalizzazione della carica. Regole di Feynman per i controtermini. Identita' di Ward e relazione fra costanti Z1 e Z2. Universalita' della carica.  |
| 23/11/2023 | 08:30 | 2.0 | sincrona in presenza | Aula E       | Dipartimento di Fisica | Lezioni | Calcolo della self-energia del fotone. Diagrammi di Feynman. Regularizzazione dimensionale e analisi dimensionale. Calcolo del denominatore: parametri di Feynman e rotazione di Wick. Calcolo del numeratore: tracce sulle matrici gamma in d dimensioni. Riduzione a integrali scalari: cenno sulla tecnica di Passarino--Veltman. Calcolo degli integrali scalari e risultato finale: invarianza di gauge e cancellazione della divergenza quadratica.   |
| 06/12/2023 | 08:30 | 2.0 | sincrona in presenza | Aula Bonetti | Dipartimento di Fisica | Lezioni | Espressione regolarizzata per la self-energia. Controtermini ed espressione rinormalizzata. Rinormalizzazione della carica elettrica. Dipendenza dalla scala dell'espressione rinormalizzata. Teorema ottico: parte immaginaria della self-energia e sezione d'urto leptone antileptone in leptone antileptone. Invarianza di scala in teorica classica dei campi. Dilatazioni. Corrente di Noether. Invarianza per dilatazioni e traccia del tensore energia-impulso.  |
| 13/12/2023 | 08:30 | 2.0 | sincrona in presenza | Aula Bonetti | Dipartimento di Fisica | Lezioni | Identita' di Ward per le dilatazioni per teorie rinormalizzabili. Irrilevanza della rottura dell'invarianza per termini di massa nel limite di alta energia. Identita' di Ward nel limite di alta energia per le funzioni di Green ed equivalenza con l'analisi dimensionale. Identita' di Ward per i vertici irriducibili e loro fallimento. Dipendenza dalla scala di quantita' rinormalizzate. Equazione del gruppo di rinormalizzazione per osservabili fisiche e sua soluzione. Costante di accoppiamento "running" e funzione beta. Calcolo della funzione beta in teoria $\phi^4$ nello schema fisico con regolarizzazione a cutoff e nello scheme $\overline{MS}$ con regolarizzazione dimensionale. indipendenza dallo schema di rinormalizzazione del primo coefficiente della funzione beta. |
| 20/12/2023 | 08:30 | 2.0 | sincrona in presenza | Aula Bonetti | Dipartimento di Fisica | Lezioni | Calcolo della funzione beta al primo ordine per la QED. Distinzione fra scala di rinormalizzazione e di regolarizzazione. Soluzione dell'equazione del gruppo di rinormalizzazione per la costante di accoppiamento running per funzioni beta quadratiche. Interpretazione fisica della costante di accoppiamento running e confronto con i calcoli ad ordine fisso. Approssimazione leading log. Polo di Landau e divergenza della costante di accoppiamento ad alta energia. Decoupling e limite di bassa energia. Diversi andamenti per la costante di accoppiamento: punti fissi. Interpretazione fisica della crescita della costante d'accoppiamento ad alta energia. Teorie di gauge nonabeliane e liberta' asintotica. Trasmutazione dimensionale e scala della teoria.                         |
| 21/12/2023 | 08:30 | 2.0 | sincrona in presenza | Aula E       | Dipartimento di Fisica | Lezioni | L'equazione di Callan-Symanzik: equazioni di GR per funzioni di Green bare. Equazioni per funzioni di Green rinormalizzate e dimensione anomala. Soluzione dell'equazione di Callan-Symanzik. Verifica esplicita della soluzione. Calcolo della soluzione al leading log per funzioni beta quadratiche: integrazione sulle scale ed integrazione sulle costanti di accoppiamento Sviluppo leading log per le funzioni di Green. Equazione di Callan Symanzik per osservabili fisiche. Introduzione allo sviluppo di Wilson: l'idea base.  |
| 10/01/2024 | 08:30 | 2.0 | sincrona in presenza | Aula Bonetti | Dipartimento di Fisica | Lezioni | Lo sviluppo di Wilson: derivazione con il metodo del path integral. Scaling degli operatori. Equazioni del gruppo di rinormalizzazione per i coefficienti di Wilson e loro soluzione. Operatori dipendenti dalla scala. Esempio: la self-energia del fotone e la sezione d'urto totale $e^-e^-$ in adroni (o altre particelle). Feedback sull'insegnamento.   |

|            |       |     |                            |        |                           |         |  |
|------------|-------|-----|----------------------------|--------|---------------------------|---------|--|
| 11/01/2024 | 08:30 | 2.0 | sincrona<br>in<br>presenza | Aula E | Dipartimento<br>di Fisica | Lezioni | L'anomalia chirale: il decadimento del pione in due fotoni e il modello sigma. Teorema di Sutherland-Veltman e violazione anomala dell'identita' di Ward. Anomalia ABJ: derivazioni di Adler e di Fujikawa. Non--rinormalizzazione dell'anomalia e teorema di Adler-Bardeen. Anomalie per correnti non-abeliane. Necessita' della cancellazione delle anomalie per teorie con fermioni chirali: principio di 't Hooft. Il problema U(1). Corrente e carica chirale conservata e non. Termine di Chern-Simons. Il numero di avvolgimento e le classi di omotopia delle trasformazioni di gauge. Istantoni e vuoti non-equivalenti. Commutatori della carica chirale e dei generatori delle trasformazioni di gauge con la hamiltoniana. Il vuoto theta. Rottura anomala della simmetria chirale e violazione di CP. Il problema CP forte e l'assione. |
|------------|-------|-----|----------------------------|--------|---------------------------|---------|--|