



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 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
29/09/2021	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula T	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Introduzione al corso: universalità della teoria dei campi. Il ruolo delle simmetrie in teoria quantistica dei campi. Piano del corso e informazioni pratiche. Proprietà; analitiche delle ampiezze: poli e tagli. La formula di riduzione e i poli nelle ampiezze. Derivazione alternativa della formula di riduzione. Operatori interpolanti per gli stati fisici.
30/09/2021	10:30	2.0	sincrona in presenza	Aula I	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Unitarietà della matrice S. Il teorema ottico: espressione formale. Espressione del teorema ottico per le ampiezze. Il teorema ottico in avanti: sezione d'urto totale e ampiezza in avanti. L'origine del teorema ottico: discontinuità delle ampiezze e discontinuità del propagatore. Formule di Cutkosky. Verifica esplicita al più basso ordine perturbativa per la teoria $\phi^4$ . Contributi e regioni in cui l'ampiezza ad un loop sviluppa una parte immaginaria. Calcolo della parte immaginaria dell'ampiezza ad un loop: integrazione con il teorema dei residui e uso della parte principale di Cauchy.
06/10/2021	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula T	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Verifica del teorema ottico per l'ampiezza di scattering a un loop nella teoria $\phi^4$ . Indipendenza del risultato dalla forma precisa dell'interazione. Applicazione del teorema ottico al caso di particelle instabili. Propagatore completo e sua espressione in termini di contributi one-particle irreducible (OPI). L'ampiezza one-particle irreducible come ampiezza di scattering $1 \rightarrow 1$ . Parte immaginaria dell'ampiezza OPI e tasso di decadimento: la formula di Brei e Wigner. Interpretazione fisica della formula di Breit e Wigner e sua generalizzazione relativistica. Espressione per il tasso di decadimento. Introduzione alle simmetrie in teoria dei campi. Simmetrie continue. Correnti di Noether. Realizzazione alla Wigner-Weyl e alla Nambu-Goldstone.
07/10/2021	10:30	2.0	sincrona in presenza	Aula I	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Algebra delle correnti: commutatori delle componenti temporali della corrente con i campi e fra di loro. Struttura di simmetria canonica della teoria di campo quantistica. Identità di Ward per la funzione a due punti con un campo ed una corrente: derivazione esplicita. Termine di contatto e derivata della theta di Heaviside. Identità di Ward per la funzione a $n+1$ punti con la corrente ed $n$ campi: derivazione funzionale. Variazione locale dei campi e corrente conservata; invarianza dell'integrale funzionale.
13/10/2021	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula T	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Esempi di identità di Ward: refazione fra propagatore e vertice in elettrodinamica scalare e spinoriale. La rottura spontanea di simmetria. Teoria classica dei campi. Dimostrazione del teorema di Goldstone in teoria dei campi classica. Il modello sigma non lineare. Potenziale ed esistenza di minimi non equivalenti. Simmetria globale della teoria.
14/10/2021	10:30	2.0	sincrona in presenza	Aula I	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Rottura spontanea di simmetria: scelta dello stato fondamentale. Il gruppo $O(4)$ come prodotto di due gruppi $O(3)$ . Simmetria rotta e non rotta; la rottura della simmetria assiale. Correnti di Noether. Espressione della lagrangiana in termini della deviazione del campo dal valor medio nello stato fondamentale. Campi pi senza massa, massa della sigma, massa per i fermioni. Impossibilità della rottura di simmetria in meccanica quantistica: tunneling fra i vuoti. Soppressione del tunneling e superselezione in teoria quantistica dei campi. Condizione necessaria e sufficiente per la rottura spontanea di simmetria in teoria quantistica dei campi: operatori non invariati. Dimostrazione del teorema di Goldstone usando le identità di Ward: funzione a due punti corrente-operatore noninvariante e presenza di un polo a massa nulla. Formula di riduzione: l'operatore non-invariante come campo interpolante per il bosone di Goldstone. Elemento di matrice della corrente e costante di decadimento. Esempio: rottura della simmetria assiale in una teoria con le simmetrie del modello sigma. Funzioni di Green a più punti e "soft pion theorems". Esempio: la relazione di Golberger Treiman. Espressione della massa del fermione in termini dell'accoppiamento scalare-fermione e del valor medio nel vuoto dell'operatore non-invariante.
20/10/2021	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula T	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Riassunto della derivazione della relazione di Golberger Treiman. Il formalismo dell'azione efficace. Il campo "classico". L'azione efficace e la sua interpretazione fisica. Interpretazione diagrammatica: il funzionale generatore delle funzioni di Green connesse. L'azione efficace come funzionale generatore delle funzioni di Green proprie (one-particle irreducible). Lo sviluppo in loop come sviluppo semiclassico. Calcolo del funzionale generatore delle funzioni di Green connesse al primo ordine dello sviluppo semiclassico.

21/10/2021	10:30	2.0	sincrona in presenza	Aula I	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Calcolo dell'azione efficace ad un loop. Cenni sulla rottura dinamica di simmetria. Dimostrazione del teorema di Goldstone usando il formalismo del funzionale efficace. Introduzione all'invarianza di gauge. Costruzione geometrica della derivata covariante: invarianza di gauge abeliana locale per campi di materia carichi. Operatore di trasporto parallelo e campo di gauge come connessione. Trasformazione del campo di gauge. Costruzione di un termine cinetico invariante per il campo di gauge: commutatore di due derivate covarianti (curvatura) come termine invariante. Invarianza di gauge nel caso non-abeliano: trasformazione, trasporto parallelo, connessione e derivata covariante. Derivazione della proprieta' di trasformazione del campo di gauge nel caso non abeliano.
27/10/2021	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula T	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Verifica che la legge di trasformazione del campo produce la corretta trasformazione covariante della derivata. Trasformazione infinitesima. Costruzione del tensore intensita' di campo a partire del commutatore di due derivate covarianti. Tensore covariante e lagrangiana invariante se espressa come traccia. Espressione in componenti del tensore intensita' di campo e della lagrangiana: dinamica non banale nel caso non-abeliano. Derivata covariante di una quantita' che si trasforma in rappresentazione aggiunta. Equazioni classiche del moto: derivazione usando le proprieta' di simmetria. Identita' di Binachi e campi self-duali. Cenni sugli istantoni. Correnti conservate per invarianza di gauge. Leggi di conservazione banali e legge di Gauss.
28/10/2021	10:30	2.0	sincrona in presenza	Aula I	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Le cariche di Noether come cariche locali e come generatori delle trasformazioni di gauge. QUANTIZZAZIONE di sistemi vincolati. Esempio di sistema centrale con vincolo di impulso totale nullo. Spazio di Hilbert vincolato.. Integrale funzionale: delta funzionale. Cambio di variabili e jacobiano nella delta funzionale. Parentesi di Poisson con il generatore del vincolo. Rappresentazione della delta funzionale come integrale su un moltiplicatore di Lagrange. Integrazione sugli impulsi e costruzione della Lagrangiana. Equazioni classiche del moto ed interpretazione del campo ausiliario come moltiplicatore di Lagrange. Formulazione finale del path-integral: formula di Faddeev. Formulazione canonica delle teorie di gauge non abeliane. Lagrangiana, campi elettrici e magnetici, equazioni del moto. Legge di Gauss e condizione $A^0=0$ . Il campo elettrico come momento canonico: quantizzazione canonica.
03/11/2021	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula T	Dipartimento di Fisica	Lezioni	La legge di Gauss come generatore delle trasformazioni di gauge. Formulazione funzionale: equazione di Schroedinger funzionale e vincolo sugli stati fisici. Caso abeliano: risoluzione del vincolo in termini di campo trasverso. Proiettore longitudinale e proiettore trasverso. Caso con densita' di carica diversa da zero: contributo coulombiano all'energia. Formulazione funzionale: riscrittura della formula di Faddeev utilizzando la rappresentazione gaussiana della delta funzionale. Diverse scelte di gauge: Weyl, Lorentz, lineari. Derivazione intuitiva della formula di Faddeev: integrazione sul gruppo dei gauge. Peso nell'integrale funzionale: non-invertibilita' in assenza di termine di gauge-fixing. Determinante fermionico per gauge lineari nel campo. Inversione dell'operatore cinetico in gauge di Lorentz.
04/11/2021	10:30	2.0	sincrona in presenza	Aula I	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Inversione del termine cinetico: gauge di Lorentz e gauge lineari. Limiti $\xi \rightarrow 0$ e $\xi \rightarrow$ infinito. Invarianza di gauge e indipendenza da $\xi$ nel calcolo di ampiezze. Il caso non abeliano. Determinante di gauge fixing, Ghosts e loro regole di Feynman. Cenni sulla simmetria BRS e la dimostrazione dell'invarianza di gauge in teoria delle perturbazioni. Il modello di Higgs: trattazione classica. Rottura spontanea della simmetria. Masse e accoppiamenti dei campi di materia. Termine cinetico: accoppiamenti e massa per il campo di gauge.
10/11/2021	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula T	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Propagatore del fotone e self-energia del fotone. Proiettore trasverso. invarianza di gauge e posizione nel polo del propagatore: protezione della massa in assenza di eccitazioni a massa nulla. Bosone di Goldstone e polo nell'origine per la self-energia scalare. Calcolo della self-energia scalare ad albero nel modello di Higgs abeliano. Contributo del bosone di Goldstone. Valore della massa. "Scomparsa" del bosone di Goldstone e polarizzazione longitudinale: lagrangiana in gauge unitaria. Forma generale della lagrangiana invariante di gauge locale in termini della corrente di Noether associata alla simmetria globale. Costante di decadimento del bosone di goldstone e contribuito al propagatore del campo di gauge. Teorema di equivalenza: il bosone di Goldstone come stato di polarizzazione longitudinale: argomento con l'identita' di Ward.

11/11/2021	10:30	2.0	sincrona in presenza	Aula I	Dipartimento di Fisica	Lezioni	La rinormalizzazione della QED. Lagrangiana scritta in termini di campi e costanti di accoppiamento rinormalizzate. Costanti di rinormalizzazione. Controtermini. 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. Invarianza di gauge e assenza di rinormalizzazione della massa del fotone. Forma esplicita delle quattro condizioni di rinormalizzazione. Regole di Feynman per i controtermini. Identita' di Ward e relazione fra le costanti di rinormalizzazione del vertice e della funzione d'onda del fermione. Implicazioni per l'universalita' della carica elettrica. Calcolo della polarizzazione del vuoto a un loop. Divergenza quadratica superficiale dell'integrale. Regolarizzazione dimensionale: dimensionalita' di campi e carica. Denominatore e parametri di Feynman. Numeratore: tracce di matrici gamma in d dimensioni. Calcolo del numeratore. Shift della variabile di integrazione. Riduzione ad integrali scalari.
17/11/2021	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula T	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Rotazione di Wick. Espressione per gli integrali scalari. Espressione finale per la self-energia: cancellazione dei termini di massa. Espressione per la self-energia scalare. Rinormalizzazione: determinazione del controtermine e self-energia rinormalizzata. Rinormalizzazione della carica dell'elettrone. Calcolo della parte immaginaria della self-energia scalare. Teorema ottico per l'ampiezza $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ . Parte immaginaria dell'ampiezza ad un loop e sezione d'urto totale $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ .
18/11/2021	10:30	2.0	sincrona in presenza	Aula I	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Discussione sul teorema ottico: stati finali e tagli di Cutkosky. Significato fisico del teorema ottico. Le dilatazioni. Definizione della trasformazione. Coreente di Noether. Legge di conservazione e tensore energia impulso. Identita' di Ward per la corrente per dilatazioni: funzioni di Green nello spazio delle coordinate. Identita' di Ward per le funzioni di Green proprie nello spazio degli impulsi. Rinormalizzazione e fallimento dell'identita' di Ward. Un esempio esplicito: il caso dell'identita' di Ward per osservabili fisiche. Sezione d'urto ridotta (asimensionale): dipendenza dalla scala.
25/11/2021	10:30	2.0	sincrona in presenza	Aula I	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Riassunto della contraddizione fra identita' di Ward e comportamento di quantita' rinormalizzate. Studio di un esempio esplicito: l'ampiezza $2 \rightarrow 2$ nella teoria $\phi^4$ . Indipendenza dalla scala di rinormalizzazione di osservabili fisiche. Dipendenza dalla scala di rinormalizzazione: l'equazione di gruppo di rinormalizzazione per osservabili fisiche. Funzione beta. Indipendenza della funzione beta dalla scala. Costante di accoppiamento running. La costante di accoppiamento running come soluzione dell'equazione di gruppo di rinormalizzazione. Calcolo della funzione beta al primo ordine per la teoria $\phi^4$ : schema fisico e schema $\overline{MS}$ . La funzione beta come dipendenza (finita) dalla scala dalla costante di rinormalizzazione bare (divergente). La funzione beta per la QED. Determinazione della costante di accoppiamento running per funzioni beta quadratiche al primo ordine. Cenno sull'andamento degli ordini superiori. Costanti di accoppiamento crescenti e decrescenti. Il polo di Landau e la "trivialita'".
01/12/2021	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula T	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Costante di accoppiamento running: dipendenza dall'ordine perturbativo nel calcolo della funzione beta. Calcolo risommatto ed accuratezza logaritmica. Confronto del risultato leading log con il risultato next-to-leading order per la funzione a quattro punti OPI in teoria $\phi^4$ . Interpretazione fisica della crescita della costante di accoppiamento con la scala in QED: il vuoto come mezzo dielettrico. Teorie di gauge non abeliane: liberta' asintotica. Campi di gauge: il vuoto come mezzo paramagnetico. Decoupling di gradi di liberta' pesanti a bassa energia. Unificazione di accoppiamenti ad alta energia come soluzione al problema della "trivialita'". Cenno su punti fissi UV stabili e IR stabili. La forma corretta dell'identita' di Ward per l'invarianza di scale: funzioni di Green bare e funzioni di Green rinormalizzate. Scaling ingenuo delle funzioni di Green Bare. Derivazione dell'equazione di Callan-Symanzik per le funzioni di Green rinormalizzate: dimensione anomala. Proprieta' elementari della dimensione anomala. Equazione per le osservabili fisiche e dimensione anomala nulla.

09/12/2021	10:30	2.0	sincrona in presenza	Aula I	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Soluzione dell'equazione di Callan-Symanzik. Dipendenza dalla costante di accoppiamento running. Soluzione leading e next-to-leading. Natura leading-log della soluzione. Caso di teorie asintoticamente libere. Dimostrazione dell'annullarsi della dimensione anomala per quantità conservate. Lo sviluppo di Wilson. Significato fisico del risultato e sua utilità. "Dimostrazione" col metodo del path integral.
15/12/2021	08:30	2.0	sincrona in presenza	Aula T	Dipartimento di Fisica	Lezioni	Uso dello sviluppo di Wilson. Scaling geometrico degli operatori e dominanza degli operatori di dimensione più bassa (in unità di massa) nel limite di alta energia. Scaling anomalo dei coefficienti di Wilson. Equazione di Callan Symanzik per i coefficienti di Wilson e sua risoluzione. Elementi di matrice dipendenti dalla scala e coefficienti di Wilson indipendenti dalla dimensione anomala. Esempio di applicazione: la sezione d'urto $e+e \rightarrow$ adroni nel modello standard. Espressione in termini della self-energia. Self-energia in termini di correnti. Classificazione degli operatori e calcolo dei coefficienti di Wilson. Operatore dominante e self-energia. Espressione in termini di dimensione anomala. Feedback sull'insegnamento.
16/12/2021	10:30	2.0	sincrona in presenza	Aula I	Dipartimento di fisica	Lezioni	L'anomalia chirale. Modello sigma accoppiato all'elettrodinamica. Corrente assiale e rottura spontanea di simmetria. Conservazione della corrente assiale e identità di Ward per la corrente assiale e due correnti vettoriali. "Teorema di Sutherland-Veltman" e decadimento del pione in due fotoni. Contributo assiale e controcontributo pseudoscalare. Identità di Ward e cancellazione dei due contributi. Calcolo diagrammatico: non-cancellazione e origine dell'anomalia. Forma operatoriale dell'equazione di anomalia. Cenno sul metodo di Adler (point-splitting) e di Fujikawa (path integral). Forma generale dell'equazione di anomalia. Implicazioni per teorie chirali: condizioni di 't Hooft: cancellazione delle anomalie. Anomalia e simmetria chirale in teorie con fermioni di Dirac. Corrente conservata con inclusione del termine di Chern-Simons. Non-invarianza di gauge del termine di Charn-Simons. Campi di pura gauge: il termine di Chaern-Simons come indice di avvolgimento. Significato dell'indice di avvolgimento. Classi di equivalenza di campi. Cenno sugli istantoni come soluzioni di tunneling. Algebra dei generatori di simmetria: carica assiale conservata, hamiltoniana e trasformazioni di gauge topologicamente non banali. Diagonalizzazione dei generatori di gauge: il vuoto theta. Regola di super-selezione fra i vuoti theta. Violazione di CP. Cenno su assioni e meccanismo di Peccei-Quinn.