

**CORSO DI STUDIO** *Physics (LM-17)*

**ANNO ACCADEMICO** 2023-2024

**DENOMINAZIONE DELL'INSEGNAMENTO** *Particle detector Physics*

Principali informazioni sull'insegnamento	
Anno di corso	1°
Periodo di erogazione	1° Semestre: Settembre - Dicembre 2023
Crediti formativi universitari (CFU/ECTS)	6
SSD	FIS/01
Lingua di erogazione	Inglese
Obbligo di frequenza	Obbligatoria

Docente	
Nome e cognome	Marcello Abbrescia
Indirizzo mail	marcello.abbrescia@uniba.it
Telefono	0805443143
Sede	Dipartimento Interateneo di Fisica, via Amendola 173, Bari
Sede virtuale (Codice Microsoft Teams)	Vf3bjn6
Ricevimento (giorni, orari e modalità)	Previo appuntamento (preso per telefono o email) con il docente

Organizzazione della didattica			
Ore			
Totali	Didattica frontale	Pratica (laboratorio, campo, esercitazione, altro)	Studio individuale
150	40	15	95
CFU/ECTS			
6	5	1	

Obiettivi formativi	L'insegnamento si propone di fornire agli studenti una panoramica sui rivelatori di particelle utilizzati nella fisica delle particelle elementari, astroparticelle e fisica medica. A partire dai meccanismi fondamentali di interazione radiazione-materia si discutono i rivelatori a gas, semiconduttore, scintillazione, tecniche di calorimetria, insieme alle loro applicazioni per l'identificazione di particelle e le misure di direzione ed energia.
Prerequisiti	Conoscenze di base di: elettromagnetismo, struttura della materia, particelle e fisica nucleare. Calcolo integrale e differenziale, funzioni analitiche.

<b>Metodi didattici</b>	Viene usato un approccio di tipo "blended learning", combinando lezioni frontali in classe con l'uso di tecnologie digitali, ed includendo discussioni partecipate dagli studenti sulle tecnologie esaminate, e simulazioni per un approccio "hands-on". Le lezioni in aula sono supportate da videoproiettore e con l'ausilio di trasparenze fornite agli studenti. Inoltre, di tanto in tanto, vengono forniti contenuti digitali e seminariali, e software specializzati mirati all'approfondimento degli argomenti trattati nel corso, seguiti da una discussione in aula.
-------------------------	--

<b>Risultati di apprendimento previsti</b>  <i>Da indicare per ciascun Descrittore di Dublino (DD=</i>	<p><b>- DD1: conoscenza e capacità di comprensione</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>o Comprensione del metodo scientifico, della natura e delle modalità della ricerca in Fisica</li> <li>o Conoscenza del calcolo ad alte prestazioni</li> <li>o Conoscenza delle tecnologie necessarie nella fisica sperimentale</li> <li>o Conoscenza della strumentazione avanzata in fisica sperimentale</li> <li>o conoscerà i principali meccanismi di interazione radiazione-materia;</li> </ul>
--	--



<p><b>DD1</b> Conoscenza e capacità di comprensione</p> <p><b>DD2</b> Conoscenza e capacità di comprensione applicate</p> <p><b>DD3-5</b> Competenze trasversali</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o comprendere come utilizzare i meccanismi di interazione radiazione-materia per ottenere un segnale misurabile attraverso dispositivi elettronici;</li> <li>o conoscere le principali tipologie di rivelatori di particelle : scintillatori, rivelatori e semiconduttore, rivelatori a gas;</li> <li>o comprendere la struttura di apparati sperimentali complessi come quelli utilizzati nella fisica delle alte energie o nella fisica dei neutrini e raggi cosmici.</li> </ul> <p><b>- DD2: capacità di applicare conoscenza e comprensione</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Capacità di identificare gli elementi essenziali di un fenomeno</li> <li>● Capacità di utilizzare lo strumento dell'analogia per applicare soluzioni conosciute a problemi nuovi (problem solving)</li> <li>● Capacità di utilizzo di strumenti di calcolo matematico analitico e numerico</li> <li>● Capacità di utilizzo delle tecnologie elettroniche e informatiche e la loro applicazione all'acquisizione dei dati sperimentali</li> <li>● sviluppare un progetto di massima e ottimizzare un rivelatore per misura di posizione e traiettoria di particelle cariche con tecniche di tracciamento</li> <li>● sviluppare un progetto di massima e ottimizzare un rivelatore per misura di energia di particelle cariche e neutre con tecniche calorimetriche;</li> <li>● combinare le diverse tecniche di rivelazione per determinare il tipo di particella misurata e misurarne le principali caratteristiche.</li> </ul> <p><b>- DD3-5: competenze trasversali</b></p> <p><b>-DD3 :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● <b>Autonomia di giudizio</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>o Capacità di lavorare con crescenti gradi di autonomia, anche assumendo responsabilità nella programmazione di progetti e nella gestione di strutture</li> <li>o Sviluppo del senso critico necessario per discernere gli aspetti significativi da quelli marginali nella progettazione di un rivelatore di particelle e nella valutazione delle sue caratteristiche, valutando la correttezza delle assunzioni e tenendo conto delle approssimazioni adottate.</li> </ul> </li> </ul> <p><b>-DD4:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● <b>Abilità comunicative</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>o Competenze nella comunicazione in lingua italiana e in lingua inglese nei settori avanzati della Fisica</li> <li>o Acquisire capacità su come presentare concetti scientifici e risultati sperimentali riguardanti la fisica dei rivelatori di particelle in modo accurato, preciso e diretto. Acquisirà la capacità di interagire con i propri colleghi e lavorare in gruppo per raggiungere un obiettivo condiviso.</li> </ul> </li> </ul> <p><b>- DD5:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● <b>Capacità di apprendere in modo autonomo</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>o Acquisizione di strumenti conoscitivi di base per l'aggiornamento continuo delle conoscenze</li> <li>o Sviluppare capacità di accedere direttamente alle fonti, e di leggere, applicando senso critico, un articolo o del materiale scientifico riguardante i rivelatori di particelle per la fisica delle alte energie.</li> </ul> </li> </ul>
--	--

<b>Syllabus</b>	
Contenuti di insegnamento (Programma)	<b>1. Concetti introduttivi</b>



La tradizione dei rivelatori per immagini. Scoperta delle prime particelle. Camere a nebbia. Unità di misura. Dall'immagine ai rivelatori elettronici. Camere a scintilla. Rivelatori elettronici più sofisticati. Progettazione di rivelatori di particelle. Caratteristiche dei rivelatori di particelle. Particelle rivelabili. Cenni sui meccanismi di interazione di particelle nei rivelatori. Struttura degli esperimenti di fisica delle alte energie. Rivelatori di particelle di fisica astroparticellare e applicazioni mediche.

### **2. Interazione radiazione-materia**

Nozioni di base sulla rivelazione e l'identificazione di particelle. Possibili tipi di interazioni. Sezione d'urto. Attenuazione della radiazione nella materia. Interazioni elettromagnetiche di particelle cariche nella materia. Ionizzazione ed eccitazione. Perdita di energia delle particelle cariche. Calcolo di Bohr di  $dE/dx$ . Equazione di Bethe-Bloch e suo significato. Dipendenza da  $A$  e  $Z$ .  $dE/dx$  per l'identificazione delle particelle. Range medio delle particelle e picco di Bragg. Fluttuazioni nella perdita di energia. Perdita di energia per gli elettroni. Bremsstrahlung. Perdita di energia per i muoni. Scattering multiplo. Radiazione Cherenov. PID con rivelatori Cherenkov a soglia. Radiazione di transizione. Rivelatori di radiazione di transizione. Interazioni dei fotoni con la materia. Intensità di un fascio di fotoni. Sezione d'urto del fotone. Effetto fotoelettrico. Emissione di fotoelettroni. Meccanismi di rilassamento. Resa di fluorescenza. Scattering Compton. Produzione di coppie. Dipendenza delle interazioni elettromagnetiche dal materiale.

### **3. Rivelatori a gas**

Schemi e principi di funzionamento dei rivelatori a gas. Eccitazione e ionizzazione nei gas. Ionizzazione secondaria. Perdita di energia in vari gas. Statistiche della produzione di ioni-elettroni. Diffusione di elettroni e ioni nei gas. Deriva di ioni/elettroni nei gas. Velocità di deriva. Diffusione in campi elettrici. Diffusione in campi magnetici. Effetti dei gas elettronegativi. Campi elettrici intensi. Primo coefficiente di Townsend. Approssimazione di Korff. Guadagno elettronico nei gas. Valanghe. Streamer. Breakdown. Regimi di funzionamento dei rivelatori a gas. Geometrie di rivelatori a gas. Camere di ionizzazione. Limiti delle camere a ionizzazione. Rivelatori a gas proporzionali. Sviluppo di valanghe in rivelatori proporzionali. Valutazione del guadagno del rivelatore. Formula Diethorn. Scelta della miscela di gas. Uso di gas quencher. Invecchiamento nei rivelatori a filo. Contatori Geiger-Muller. Camere proporzionali multifilari. Campo elettrico e potenziale in una MWPC. Scelta della geometria. Risoluzione spaziale in MWPC. Forze elettrostatiche. Camere a deriva. Misure di posizione in camere a deriva. Grafico spazio-tempo. Stabilità di funzionamento. Geometrie delle camere di deriva. Time Projection Chambers. Esempi di TPC. Il regime a streamer. Tubi a streamer. Rilevatori visivi di streamer. Camere a piani resistivi. RPC: modalità di funzionamento, valanga e streamer. Esempi di applicazione di RPC nei moderni esperimenti HEP. Simulazione di rivelatori a gas con GARFIELD++.

### **4. Rivelatori a stato solido**

Sviluppi storici dei rivelatori a stato solido. Vantaggi e svantaggi dei rivelatori a semiconduttore. Semiconduttori elementari. Semiconduttori composti. Semiconduttori intrinseci. Struttura a bande dei livelli elettronici. Dipendenza dalla temperatura. Energia di Fermi. Concentrazione dei portatori di carica. Velocità di deriva e mobilità. Resistività. Proprietà di Si e Ge. Principi di funzionamento di un rivelatore al Si. Silicio drogato di tipo n. Silicio drogato di tipo p. Livello di Fermi nei semiconduttori drogati. Livelli di donatore e accettore in Si e AsGa. Giunzioni p-n. Caratteristiche elettriche di una giunzione p-n. Polarizzazione diretta e inversa. Zona di svuotamento. Corrente di leakage. Capacità del rivelatore e tensione di svuotamento. Tecniche di produzione. Cristalli e wafer. Rilevatori a pad. Rivelatori a strip accoppiati in CC. Rivelatori a strip accoppiati in CA. Metodi di polarizzazione: polisilicio, punch through, FOXFET. Moduli stereo. Rivelatori al silicio a doppia faccia. Rivelatori a pixel. Distribuzione di Landau in strati sottili. Rapporto segnale-rumore nei rivelatori al silicio. Contributi al rumore: corrente di leakage, capacità del rivelatore, resistenze parallelo e serie.



	<p>Risoluzione spaziale. Diffusione. Letture digitali e analogiche. Danni da radiazione. Difetti puntiformi e cluster. Dipendenza dal tipo e dall'energia della radiazione. Invecchiamento e corrente di dispersione. Annealing. Concentrazione efficace di drogaggio. Tipo di inversione. Efficienza della raccolta di carica. Il rivelatore di tracciamento di CMS. Esperienze di laboratorio con rivelatori a silicio.</p> <p><b>5. Formazione del segnale nei rivelatori di particelle</b></p> <p>Richiami di elettrostatica. Carica indotta su elettrodi metallici. Principio di sovrapposizione. Carica indotta su un piano infinito. Carica in movimento davanti a un piano. Carica indotta su un elettrodo a strip. Teorema di reciprocità. Potenziale di ponderazione. Carica indotta nel caso generale. Corrente indotta. Teorema di Ramo-Shockley. Polarità del segnale. Geometria a piani paralleli. Segnali nei rivelatori a diamanti con TCT. Segnali nelle camere di ionizzazione. Segnali nel calorimetro ad Ar liquido ATLAS. Segnali nei rivelatori di diamanti. Segnali nei rivelatori al silicio. Segnali nei rivelatori a gas. Campo di ponderazione in geometrie a strip parallele. Segnali nelle camere a filo.</p> <p><b>6. Calorimetria</b></p> <p>Concetti basilari. Tipi di calorimetri. Calorimetri elettromagnetici. Cascate elettromagnetiche. Lunghezza di radiazione. Energia critica. Modello semplificato per cascate elettromagnetiche. Sviluppo longitudinale e trasversale delle cascate EM. Misure sulle cascate EM. Risposta e linearità. Fonti di non linearità. Calorimetri omogenei. Calorimetri a campionamento. Risoluzione energetica dei calorimetri EM: fluttuazioni di campionamento, termine di rumore, termine costante, contributi addizionali. ECAL dell'esperimento CMS. Il calorimetro dell'esperimento FERMI-LAT. Calorimetri adronici. Cascate adroniche. Lunghezza di interazione. Dipendenza dal materiale. Sviluppo laterale e longitudinale delle cascate adroniche. Cascate EM interne e frazione EM. Calorimetri a compensazione. Calorimetri a scintillatori, a gas liquidi, a contatori proporzionali, a tubi streamer o Geiger. Risoluzione energetica dei calorimetri adronici. HCal degli esperimenti CMS e ATLAS.</p> <p><b>6. Scintillatori</b></p> <p>Caratteristiche generali. Configurazione di base di un contatore a scintillazione. Scintillatori inorganici: costante di tempo ed emissione luminosa. Scintillazione in gas nobili liquidi. Scintillatori organici. Scintillatori plastici e liquidi. Shift della lunghezza d'onda. Rendimento nell'emissione di luce e legge di Birk. Rivelazione di fotoni. Fotomoltiplicatori, fotocatodi, catena di dinodi. Risoluzione energetica dei fotomoltiplicatori. Piastre a microcanali. Fotomoltiplicatori al silicio. Applicazioni: calorimetro a spaghetti, ECAL di CMS, tile calorimeter di ATLAS, HCal dell'esperimento CALICE, ECAL a scintillatori dell'esperimento CALICE.</p> <p><b>7. Identificazione di particelle e sistemi di rivelatori</b></p> <p>Rilevatori di tracciamento. Magneti per esperimenti 4<math>\pi</math>. Tracciamento in un campo magnetico. Risoluzione nel momento. Identificazione delle particelle. Motivazioni per l'identificazione delle particelle. Misura della velocità delle particelle: Time Of Flight, rivelatori Cherenkov, rivelatori di radiazione di transizione, TRD di ATLAS e ALICE, dE/dx. PID negli esperimenti spaziali: PAMELA. Sistemi rivelatori: scelta progettuale. Occupazione e densità dei canali. Material budget. Frequenza di eventi. Trigger e livelli di trigger.</p>
Testi di riferimento	<ul style="list-style-type: none"><li>- Hermann Kolanoski and Norbert Wermes, Particle Detectors: Fundamentals and Applications, Oxford University Press, 2020, ISBN-13: 9780198858362</li><li>- F. Sauli: Gaseous Radiation Detectors: Fundamentals and Applications, Cambridge University Press, July 2014, ISBN: 9781107337701</li><li>- C. Grupen and B. Swartz, Particle Detectors, Cambridge University Press, 2008</li><li>- G. Knoll, Radiation Detection and Measurement, Wiley and sons, 3rd edition</li><li>- W. R. Leo, Techniques for Nuclear and Particle Physics experiments, Springer-Verlag, 1994</li><li>- Christian W. Fabjan and Herwig Schopper Editors, Particle Physics Reference Library, Volume 2: Detectors for Particles and Radiation, Springer</li></ul>

Note ai testi di riferimento	Materiale aggiuntivo costituito dalle trasparenze presentate a lezione

Valutazione	
Modalità di verifica dell'apprendimento	L'esame finale accerta l'acquisizione delle conoscenze e delle abilità attese tramite lo svolgimento di una prova orale. Nella prova orale, della durata tipica di 40-50 minuti, viene chiesto di discutere, tipicamente, tre argomenti svolti durante il corso.
Criteria di valutazione	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <b>Conoscenza e capacità di comprensione</b> Verrà valutata la capacità di padroneggiare le principali tecniche strumentali per la rivelazione di particelle nel campo della fisica delle alte energie, e la capacità di individuare l'utilizzo della corretta tecnica sperimentale in relazione all'obiettivo scientifico-sperimentale da raggiungere in relazione all'identificazione e la misura delle proprietà delle particelle elementari.</li> <li>● <b>Conoscenza e capacità di comprensione applicate</b> Verranno valutate le capacità di applicare le conoscenze acquisite nel campo della fisica dei rivelatori di particelle per la progettazione di esperimenti ad alte energie o di astroparticelle. Verranno inoltre valutate le capacità di eseguire semplici calcoli e simulazioni numeriche per l'ottimizzazione di apparati per la fisica delle alte energie.</li> <li>● <b>Autonomia di giudizio</b> Verrà valutata la capacità acquisita di applicare il ragionamento critico per selezionare gli aspetti rilevanti nella progettazione di rivelatori ed esperimenti nel campo della fisica delle particelle ed astroparticellare. Verrà valutata la capacità di identificare potenziali problemi mediante attraverso osservazioni qualitative e quantitative, e di proporre soluzioni originali.</li> <li>● <b>Abilità comunicative</b> Verrà valutata la capacità dello studente di esporre oralmente in inglese, con proprietà di linguaggio e rigore terminologico, argomenti scientifici relativi alla fisica della rivelazione di particelle, illustrandone in sintesi la motivazione delle scelte effettuate ed i risultati attesi.</li> <li>● <b>Capacità di apprendere</b> Verrà valutata la capacità dello studente di affrontare la fisica dei rivelatori a partire dai principi fisici e non con un semplice approccio fenomenologico. Inoltre verrà valutata la capacità di consultare efficacemente il materiale bibliografico indicato ed il materiale di supporto, selezionando correttamente le fonti utili nei vari casi e soffermandosi sugli aspetti significativi.</li> </ul>
Criteria di misurazione dell'apprendimento e di attribuzione del voto finale	Durante la prova orale, a cui è attribuito il 100% del punteggio finale, sono valutate le capacità di illustrare con completezza e precisione gli argomenti ad altre persone, collegare diverse parti del programma, utilizzare il linguaggio scientifico introdotto nel corso e il formalismo matematico in maniera adeguata al livello del corso.
Altro	