

**Argomenti svolti nel corso di
FISICA DEGLI ACCELERATORI DI PARTICELLE**

Prof. Simone Di Mitri (simone.dimitri@elettra.eu)

A. A. 2020 – 2021

▪ **Richiami di Relatività Speciale (6 h)**

Teoria dell'etere, esperimento di Michelson-Morley, interpretazione della lunghezza di Lorentz, trasformazioni spazio-temporali di Lorentz-Fitzgerald. Contrazione delle lunghezze e dilatazione degli intervalli temporali. Trasformazione delle velocità.

Formalismo covariante, 4-vettore covariante e controvariante, forma compatta delle trasformazioni, prodotto scalare, tensore metrico euclideo.

Invarianti di Lorentz: distanza spazio-temporale, intervallo di tempo proprio.

4-vettore momento, trasformazione della energia e della quantità di moto. Invariante di Lorentz: massa inerziale. Relazioni tra quantità di moto, energia ed energia cinetica. Limite classico e ultra-relativistico della energia cinetica. Relazione massa-energia di Einstein. Definizione esplicita della quantità di moto relativistica. Massa a riposo nel centro di massa di un sistema composto. Fascio di particelle su bersaglio, fasci collidenti. Concetto di fotone, dualismo onda-particella e relazione di De Broglie.

Invarianti di Lorentz: fase di un'onda elettromagnetica. Effetto Doppler relativistico. Aberrazione della luce. Campo elettrico di carica puntiforme relativistica (effetto disco, carica spaziale).

4-vettore forza. Trasformazione della forza. Trasformazione della forza di Lorentz (campo elettrico e induzione magnetica). Accelerazione relativistica, forza ortogonale e parallela alla velocità.

▪ **Evoluzione storica e classificazione degli acceleratori (2 h)**

Cenni agli acceleratori elettrostatici: Cockroft-Walton, Van de Graaf, Tandem. Acceleratori elettromagnetici risonanti: tubi a deriva, ciclotrone di Lawrence, sincrociclotrone, ciclotrone a settori. Acceleratori elettromagnetici non risonanti: betatrone. Il sincrotrone e i suoi componenti. Gli anelli di accumulazione, le sorgenti di luce e i collisori. Acceleratori lineari (linac).

▪ **Strutture acceleranti (6 h)**

Campo e.m. in una cavità metallica risonante a simmetria cilindrica (pill-box). Campo elettrico accelerante di singola cella e in una struttura periodica. Strutture ad onda stazionaria e ad onda viaggiante. Guadagno di energia in una struttura accelerante a radiofrequenza. Tempo di transito.

Descrizione della cavità accelerante con circuito RLC: tensione e gradiente accelerante per onda stazionaria, onda viaggiante ad impedenza costante e a gradiente costante. Fattore di qualità. Tempo di riempimento. Velocità di gruppo. Fattore di attenuazione. Efficienza di accelerazione e considerazioni tecniche.

▪ **Dinamica longitudinale (4 h)**

Dispersione di energia. Momentum Compaction. Energia di transizione.

Dinamica in un linac. Stabilità di fase in regime non relativistico. Equazioni del moto in approssimazione di piccole ampiezze di oscillazione. Frequenza di sincrotrone, limite ultra-relativistico. Traiettorie nello spazio delle fasi. Lunghezza del pacchetto e spread di energia in regime ultra-relativistico. Campo elettrico di cattura.

Dinamica in un sincrotrone. Particella sincrona. Momentum compaction e funzione di dispersione di energia. Energia di transizione. Equazioni del moto in approssimazione di piccole ampiezze di oscillazione di sincrotrone. Frequenza di sincrotrone. Condizione di stabilità. Grandi ampiezze di oscillazione.

Accettazione RF. Smorzamento adiabatico delle oscillazioni di sincrotrone. Spazio delle fasi. Emittanza longitudinale.

▪ **Dinamica trasversa (10 h)**

Focalizzazione e reticoli magnetici. Indice di campo. Focalizzazione geometrica. Stabilità dell'orbita. Reticolo magnetico a gradienti alternati (FODO). Elementi magnetici: dipolo, quadrupolo, sestupolo. Espansione multipolare del campo magnetico. Equazione di Hill's per il moto di singola particella. Traiettorie principali. Criterio di stabilità. Funzione di dispersione. Trasporto in rappresentazione matriciale. Approssimazione di lente sottile. Teorema di Floquet. Traiettorie nello spazio delle fasi. Oscillazioni pseudo-armoniche di betatrone. Funzioni di Twiss. Proprietà della funzione di betatrone. ~~Proprietà dei reticoli aeromatico e isocrono.~~ Invarianza del determinante wronskiano. Spazio delle fasi pseudo-canonico. Invariante di Courant-Snyder. Omoteticità delle ellissi. Matrice del fascio. Trasformazione dei parametri di Twiss. Esempio: sezione diritta. Emittanza: statistica, geometrica e normalizzata. Emittanza secondo Liouville. Distorsione dell'orbita chiusa. Errore di campo di un dipolo. Quadrupolo disallineato. Analisi qualitativa della risonanza del secondo e terzo ordine. Concetto di risonanza e punto di lavoro. Cromatismo lineare. Correzione del cromatismo: i sestupoli. Cenno all'accettazione trasversa: limite fisico e apertura dinamica.

▪ **Formalismo hamiltoniano (4 h)**

Richiami di dinamica lagrangiana ed hamiltoniana. Funzione di Lagrange e Principio di minima azione di Hamilton. Momenti generalizzati. Equazioni di Hamilton. Variabili coniugate. Trasformazioni canoniche. Hamiltoniana di un sistema conservativo. Teorema di Liouville (fluido incompressibile). Sezione di Poincaré. Variabili angolo-azione. Hamiltoniana di singola particella in moto lineare. Equazione di Hill.

▪ **Luminosità e brillantezza (4 h)**

Luminosità istantanea e integrata di un acceleratore collisore. Brillantezza di un fascio di particelle cariche. Limite di diffrazione. Brillantezza di un fascio di radiazione. Ottimizzazione della brillantezza di un sincrotrone in funzione dei parametri ottici.

▪ **Accoppiamento debole nei piani trasversi (2 h)**

Cenni all'accoppiamento debole. Semplicità e integrali invarianti di Poincaré-Cartan. Spazio delle fasi 2- e 4-dimensionale.

▪ **Radiazione di sincrotrone (6 h)**

Proprietà della radiazione di sincrotrone. Formula di Larmor per la potenza irradiata. Perdita di energia per giro. Spettro e distribuzione angolare della radiazione di sincrotrone. Frequenza caratteristica. Dinamica del fascio: smorzamento adiabatico longitudinale e trasverso. Teorema di Robinson. Eccitazione quantistica del moto longitudinale e trasverso. Stato di equilibrio: dispersione di energia, lunghezza ed emittanza del fascio di particelle. Funzioni di distribuzione delle particelle in presenza di irraggiamento: equazione di Fokker-Planck. Vita media del fascio.

▪ **Laser ad elettroni liberi (4 h)**

Emissione spontanea da onduttore. Derivazione della formula di risonanza. Proprietà di un fascio di particelle accelerate per un FEL ad alto guadagno. Modello parametrico unidimensionale per un FEL in amplificazione spontanea (SASE). ~~FEL ad iniezione laser esterna (seeded).~~ Confronto di sorgenti di luce: sincrotroni e FEL.

Bibliografia e testi consigliati

- CAS (Cern Accelerator School) – Fifth General Accelerator Physics Course, CERN 94-01 – Vol.I (edited by Turner, 1994).
- CAS 91-04.
- CAS 85-19.
- H. Wiedemann, Particle Accelerator Physics, Vol. I (edited by Springer, 1998).
- The Evolution of Particle Accelerators & Colliders, Wolfgang K. H. Panofsky, Beam Line, Stanford Linear Accelerator Center, Spring 1997, Vol. 27, N.1.
- Dispense, pubblicazioni e appunti forniti dal docente.