

Programma del Corso di Fisica Nucleare e Subnucleare

(Aggiornato al 19 Aprile 2022)

Fisica delle Particelle Elementari [programma per l'AA 2021-2022]

Gli argomenti in *corsivo* sono da considerarsi opzionali. Per quanti volessero approfondire degli argomenti specifici, alcuni riferimenti bibliografici sono indicati tra parentesi. **Tutti gli argomenti sono trattati nel libro di testo.**

1) Introduzione al corso. Particelle elementari e punti materiali in meccanica classica. Estensioni alla meccanica relativistica e meccanica quantistica (non relativistica). [Terranova cap. 1, Bettini cap.1, Pal cap.1]

2) *Sistemi metrici e sistemi razionalizzati*. Unità naturali (NU) e SI. Esempi: Lunghezza Compton del protone, massa di Planck. Regole generali per la conversione SI-NU [Terranova 1.5, Bettini 1.5, Pal 1.7, Jackson App.A]

3) Vettori e vettori applicati: trasformazione di oggetti geometrici in forma controvariante e covariante. Scalari, vettori e tensori. Vettori covarianti: il gradiente. Definizione generale di vettori e tensori covarianti [Terranova 2.1, Rindler 7.1-7.2, 5.4-5.6]

4) Spaziotempo di Minkowski, tensore metrico, eventi time-like, space-like, light-like, prodotto scalare tra quadrivettori [Terranova 2.2, Rindler cap.5].

5) Principio di conservazione del quadrimomento. Rest frame e lab frame. Relazione tra gamma beta E e p delle particelle. Energia totale. Particelle massive e non massive. *Perche' proprio la luce ha la velocità limite. $E=mc^2$. E il decadimento del π^0* [Terranova 2.3, Rindler cap. 6, Bettini 1.3]

6) Vincoli cinematici dalla conservazione del quadrimomento. Prima variabile di Mandelstam (quadrato della "massa invariante"). Cinematica del decadimento a due e tre corpi [Terranova 2.4 2.5]

7) Decadimenti in fisica atomica e in fisica delle particelle. Lifetime. Estensione relativistica della regola di Fermi. Lo spazio fasi. La legge di Soddy del decadimento. Ampiezze parziali e Branching Ratio. Stati instabili in meccanica quantistica non relativistica. Breit-Wigner. *Il decadimento della Z^0 e il principio di indeterminazione*. [Terranova 2.6, Bettini 1.3, 1.6, Krane 6.1, 6.2]

8) La sezione d'urto. Sezione d'urto differenziale in meccanica classica e quantistica. Scattering su sfera massiva. Scattering a targhetta fissa e head-on (collider). Flusso e luminosità. Thick target. Flusso negli urti a due corpi. Formula relativistica della sezione d'urto. Moeller flux factor. Sezione d'urto Lorentz invariante. [Terranova 2.7, Mann 9.3, Bettini, 1.6, Leo 2.1.1]

9) Perdita in energia. Delle particelle cariche pesanti. Derivazione di Fermi-Jackson per la perdita classica di Bohr. Formula di Bethe-Bloch. M.i.p. density effect e relativistic rise. Una spiegazione intuitiva degli andamenti asintotici. Range. Perdita per ionizzazione degli elettroni. Bremsstrahlung. [Terranova 3.1, 3.2, Leo 2.2, 2.4]

10) Rivelatori di radiazioni ionizzanti. Eventi elementari (ione, elettrone-lacuna, fonone, diseccitazione). La camera a ionizzazione. Formazione del segnale e circuito equivalente. Il contatore proporzionale. Regime proporzionale e perdita di proporzionalità. Il contatore Geiger. Multiwire proportional chambers [Terranova 3.5-7, Knoll cap 5.I, 5.II, 5.VI, Bettini 1.12, Leo 6.2, 6.5]

11) Bremsstrahlung e perdita per radiazione. Energia critica, lunghezza di radiazione. L'esperimento di Anderson. Moto relativistico in campo magnetico statico. La scoperta dell'antimateria: il positrone. La produzione di coppie. Vincoli cinematici nel vuoto. *L'origine dell'antimateria e il teorema CPT* [Terranova 3.2-3, 5.8, Leo 2.4, 2.7, Bettini 2.6, 3.3]

12) Interazione fotoni: effetto fotoelettrico. Effetto Compton. Compton edge. Produzione di coppie: calcolo delle soglie di produzione. Annichilazione e formazione del positronio. Sciami elettromagnetici e *calorimetri elettromagnetici*. [Terranova 3.4, Leo 2.7]

13) Simmetrie in meccanica quantistica, operatori unitari e antiunitari. Simmetrie continue e discrete. Rappresentazione esponenziale degli operatori continui. Traslazioni e conservazione del momento. Rotazioni e conservazione del momento angolare (*dimostrazione facoltativa*). Traslazioni temporali e conservazione dell'energia. *Il primo teorema di Noether* [Terranova 5.1-4]

14) Inversioni. Numeri quantici additivi e moltiplicativi. La parità. Operatore classico e quantistico. La parità di un sistema quantistico: atomo di idrogeno. Derivazione euristica della parità del fotone dalle transizioni di dipolo elettrico. La parità intrinseca. Teorema di Dirac (parità particelle-antiparticelle). Parità intrinseca dei fermioni elementari. Parità del protone, neutrone e deuterio. *Parità dei mediatori delle forze*. [Terranova 5.5-6, Sozzi, 1.4, Mann cap.4, Bettini 5.1, Weinberg 4.7]

15) Parità del pione. Esperimento di Chinowsky Steinberger. Parità di coppie di particelle. Coppie di particelle a spin 0. C parità. C parità del fotone. C-parità classica del campo elettromagnetico [Terranova 5.6, 5.7, Mann 6.1, Bettini 3.2, 3.3, 3.5]

16) C parità del pione, di un sistema bosone-antibosone e fermione antifermione. Il decadimento del positronio: orto e para positronio. La costante di struttura fine. Carica elettrica in Natural Units (Heaviside-Lorentz e Gaussiano). [Terranova 5.7, 5.8, 6.7, 6.9, Bettini 3.3, Mann 6.4]

17) Elettrodinamica classica come teoria relativistica. Trasformazioni classiche di gauge. Hamiltoniana di una particella in campo e.m. Trasformazioni di gauge in meccanica quantistica. *Derivazione della Hamiltoniana semiclassica dal principio di gauge*. Teorie di gauge basate sulla simmetria U(1). Il principio di gauge. [Terranova 6.1-5, Weinberg 10.2, Cohen-Tannoudji H-III]

- 18) Processi di QED e descrizione mediante diagrammi di Feynman. Particelle virtuali e causalità relativistica. s-channel, t-channel, u-channel. [Terranova 6.6, Bettini 5.5, 5.6, 1.6, Thomson 5.1, 5.2]
- 19) Positronio. Running di α . [Terranova 6.7-9, Bettini 5.7, 1.11]
- 20) Acceleratori elettrostatici. Circuito di livellamento e ponte a diodi: l'acceleratore di Cockroft-Walton. Acceleratori lineari. Il principio di stabilità di fase nei LINACS. [Terranova 4.1-3]
- 21) Acceleratori circolari: il sincrotrone. Principio di stabilità di fase nei sincrotroni. Condizione di weak focusing. Strong focusing. Limitazioni dei sincrotroni. *Colliders*. [Terranova 4.4-5, Krane 15.1, 15.4, Rossbach, sec.1, Wilson cap 1]
- 22) Interazioni forti. Quark. Interazione tra particelle con un solo tipo di carica (elettrodinamica) e con diversi tipi di cariche (cromodinamica). Simmetria di gauge per le interazioni forti. Gruppi non abeliani: rappresentazioni, rappresentazioni irriducibili e fondamentali. Il gruppo SU(3) e i *gruppi SU(N)*. [Terranova 7.1-5, Bettini 4.11, Mann 3.1, 3.2, 3.4, 15.1]
- 23) Cromodinamica quantistica (QCD). Fotoni e gluoni. I generatori di SU(3) e i tipi di gluone. Differenze tra QED e QCD: lo scattering tra particelle di uguale carica e quello tra quark di uguale colore. [Terranova 7.6, Mann 18.4, Bettini 6.3, 6.5]
- 24) Running di α (formula di Landau) e α_s (formula di Gross-Politzer-Wilczek), libertà asintotica. Λ_{QCD} e regime non perturbativo. Confinamento e libertà asintotica. Singoletti di colore (adroni). [Terranova 6.9, 7.6, Bettini 6.5, 3.4, Mann 6.2]
- 25) Mesoni, Barioni, *Glueball*, *tetraquark* e *pentaquarks*. *Classificazione* degli stati degeneri in fisica atomica e applicazione alla classificazione degli adroni. Conservazione del flavor nella QCD. La simmetria di flavor e il limite chirale: il caso F=6 e SU(6). Il caso F=2 e SU(2) (regime di Fisica Nucleare) e la simmetria di isospin. [Terranova 8.1-2, Bettini 6.4, Mann 18.4, 15.4, Weiberg 4.3, 4.6]
- 26) Il modello a due quark (u,d). Barioni: $I=3/2$ (Delta) e $I=1/2$ (p,n). La scoperta della Delta(1232) e l'esperimento di Anderson-Fermi, *masse e lattice-QCD*. *Stati di ground (N(938)) e eccitati (N(1520), N(1535)), risonanza di Roper N(1440)*. [Terranova 8.3-4, 8.5, 8.6, Bettini 3.9, 3.10, Anderson]
- 27) Mesoni nel modello a due quark. Parità dei barioni e mesoni. *Modello a tre quark* [Terranova 8.7, 8.6, Mann 15.4, 16.1, Bettini 4.8]
- 28) Processi leptonici, semileptonici e adronici. Le simmetrie delle interazioni deboli. Conservazione del numero leptonic totale e del numero barionico. *Lepton family number e oscillazioni del neutrino*. [Terranova 10.1-3, Bettini 7.1, 3.7, 3.8, 7.4, Pal 16.1]

29) Elicità del fotone e possibilità concettuale della violazione della parità. Hamiltoniane chirali e l'ipotesi di Lee e Yang [Terranova 10.5]

30) Elicità di un fermione. Elicità dei fermioni massivi: osservatori inerziali ed elicITÀ. La chiralità. *Chiralità in meccanica quantistica relativistica*. L'esperimento di Chien Shiung Wu. [Terranova 10.5, Bettini 7.2, 7.3]

31) I neutrini e la loro chiralità. Cattura elettronica e assorbimento risonante. L'esperimento di Goldhaber. *Il decadimento del pione e la teoria V-A* [Terranova 10.6, 10.7, Bettini 7.5, 3.6, Pal 14.2]

32) La teoria elettrodebole: *mediatori massivi (W, Z⁰), unificazione elettrodebole e diagrammi di Feynman*. [Terranova 12.1-2, Bettini 9.1, 9.3] La scoperta delle correnti neutre: fasci di neutrini, magnetic horns. L'esperimento Gargamelle [Terranova 12.4, Bettini 9.1, 9.3, 7.10, Mann 21.3]

33) Collider p anti-p, produzione degli antiprotoni. Urti tra protoni e tra quark. La scoperta della Z⁰ [Terranova 12.5, Wilson 11.1, 11.3, Bettini 1.11, 9.7]

Libro di testo:

F. Terranova, *A modern primer in particle and nuclear physics*, Oxford Univ. Press, 2021

Altri libri consigliati:

Bettini, *Introduction to Elementary Particle Physics*, Cambridge University Press, 2014 (2nd edition)

Rindler: W. Rindler *Relativity*, Oxford University Press; 2nd edition (2006)

Mann: R. Mann *An Introduction to Particle Physics and the Standard Model*, CRC Press, 1st edition (2009)

Leo: W.R.Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics experiments*, Springer, 2nd edition (1994)

Knoll: G. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, Wiley; 4th edition (2010)

Pal: P.B. Pal, *An Introductory Course of Particle Physics*, CRC Press; 1st edition (2014)

Roszbach: J. Roszbach, P. Schmuser "Basic course on accelerator optics" , DESY-M-93-02 (available online), 1993.

Anderson: H. L. Anderson. Early history of physics with accelerators. *Journal de Physique Colloques*, 1982, 43 (C8), pp.C8-101-C8-162. (available online)

Thomson: M. Thomson, *Modern Particle Physics*, Cambridge University Press; 1st edition (2013)

Sozzi: M. Sozzi, *Discrete Symmetries and CP Violation: From Experiment to Theory*, Oxford University Press, 1st edition (2012)

Weinberg: S. Weinberg, *Lectures on Quantum Mechanics*; 2nd edition (2015)

Wilson: E. Wilson, *An introduction to Particle Accelerators*, Oxford University Press, 1st edition (2001)

Jackson: J.D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, Wiley; 3rd edition (1998)

Cohen-Tannoudji: C. Cohen-Tannoudji, B. Diu, F. Laloe, *Quantum mechanics*, Wiley, 1st edition (1977)