

IL NUCLEARE

16

Direttore

Ettore GADIOLI

Università degli Studi di Milano

Comitato scientifico

Giuseppe GORINI

Università degli Studi di Milano–Bicocca

Ignazio LICATA

Institute for Scientific Methodology

Elio SINDONI

Università degli Studi di Milano–Bicocca

Comitato redazionale

Francesca BALLARINI

Università degli Studi di Pavia

Francesco CERUTTI

European Organization for Nuclear Research CERN

Andrea MAIRANI

Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica

Comitato editoriale

Giuseppe BATTISTONI

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Laszlo SAJO BOHUS

Universidad Simón Bolívar

Piero CALDIROLA

International Centre for the Promotion of Science

Giuseppe GORINI

Università degli Studi di Milano–Bicocca

Ignazio LICATA

Institute for Scientific Methodology

Elio SINDONI

Università degli Studi di Milano–Bicocca

Mauro GIANNINI

Università degli Studi di Genova

IL NUCLEARE

La Fisica Nucleare ha portato a scoperte fondamentali ed è tuttora un campo di indagine alle frontiere della ricerca che permette in modo peculiare ed esclusivo lo studio della materia elementare in condizioni estreme.

Non meno importante è il suo utilizzo in ricerche e applicazioni tecnologiche di immediato interesse per la Società, tra cui oggi sono di particolare importanza la produzione controllata e sicura di energia e le applicazioni mediche per la diagnosi e la terapia di tumori.

Conclusioni analoghe si raggiungono se si considerano le ricerche sulla radioattività: accanto a studi di carattere fondamentale, le applicazioni di tipo medico ed industriale, per il controllo ambientale, la sicurezza, la datazione di reperti sono innumerevoli.

Questa collana si propone la pubblicazione di testi volti a descrivere questa variegata moltitudine di argomenti e a rappresentare una fonte di informazioni obiettive e documentate.

Classificazione Decimale Dewey:

530.1433 (23.) TEORIA QUANTISTICA DEI CAMPI. ELETTRODINAMICA QUANTISTICA

GRAZIANO MILETO

**PRODUZIONE DI COPPIE
DI-ELETTRONICHE NEGLI URTI
FRA IONI IN REGIME RELATIVISTICO**

SECONDA EDIZIONE





©

ISBN
979-12-218-0688-5

PRIMA EDIZIONE
ROMA 8 MAGGIO 2023

Ringrazio il Direttore della Collana il prof. Ettore Gadioli e tutto il Comitato Scientifico della stessa Collana, anche il Comitato Editoriale, il personale della “Aracne Editrice” ed il personale della società “Aduvare”.

*Questo libro è dedicato alla memoria di tutti gli scienziati
che hanno lavorato nei settori del titolo ed è un libro di ricerca
scientifica, di applicazioni, di teoria.*

Lo dedico anche a mia moglie la prof.ssa Concetta ed a mio figlio Giuseppe.

⁰Nella foto di copertina la vista della pulsar Psr J2030+4415 (J2030 in breve), distante più o meno 1600 anni luce dalla Terra: le osservazioni, condotte con l’osservatorio spaziale a raggi X Chandra della Nasa e supportate da diversi osservatori terrestri, hanno scoperto e misurato un lunghissimo fascio di materia ed antimateria, che si estende per oltre 64mila miliardi di chilometri ed è alimentato da una pulsar – una stella collassata in rapida rotazione e con un forte campo magnetico. La pulsar J2030, è un oggetto denso, grande come una città, che si è formato dal collasso di una stella massiccia e che attualmente gira su sé stesso circa tre volte al secondo. I raggi X osservati da Chandra (in blu), mostrano le particelle che fluiscono dalla pulsar lungo le linee del campo magnetico, a circa un terzo della velocità della luce. I dati ottici provenienti dal telescopio Gemini a Mauna Kea, Hawaii, appaiono rossi, marroni e neri. La prima risposta che hanno dato i ricercatori è che la pulsar possiede due caratteristiche estreme – la rotazione veloce e gli intensi campi magnetici – che consentono l’accelerazione delle particelle e l’emissione di radiazione ad alta energia – responsabile della formazione di coppie di elettroni e positroni. Per essere precisi, si tratta del processo di conversione della massa in energia notoriamente determinato dall’equazione $E = mc^2$, ma invertito, per convertire energia in massa. I positroni prodotti, poi, verrebbero dispersi nella galassia. Solitamente però, le pulsar generano venti di particelle cariche che rimangono confinate all’interno dei loro potenti campi magnetici. J2030 sta viaggiando attraverso il mezzo interstellare a più di un milione e mezzo di chilometri all’ora, trascinandosi il vento dietro di sé. Una massa di gas si muove davanti alla pulsar. La pulsar ha raggiunto quest’onda di gas che le viaggiava a prua provocando un’interazione con il campo magnetico interstellare, innescando la fuga di particelle. Il campo magnetico del vento della pulsar si è collegato al campo magnetico interstellare, e gli elettroni e i positroni ad alta energia sono spazzati fuori attraverso un canale generato dalla connessione [287].



Indice

| | | |
|----------|---|-----------|
| | Prefazione dell'autore | 1 |
| 1 | Produzione Di Coppie Di-Elettriche Nel Regime Relativistico | 3 |
| 1.1 | Sommario | 3 |
| 1.2 | Introduzione ai dati sperimentali | 8 |
| 1.3 | Le collisioni nucleone-(di)nucleone | 8 |
| 1.3.1 | Interpretazione delle collisioni binarie (pp , pd) della collaborazione DLS | 10 |
| 1.3.2 | Le comparazioni TS (Teorico-Sperimentale) nelle collisioni binarie della collaborazione DLS | 11 |
| 1.4 | Le collisioni nucleo-nucleo della collaborazione DLS | 14 |
| 1.4.1 | Dati sperimentali collisioni A-A della collaborazione DLS | 14 |
| 1.4.2 | Comparazioni TS collisioni A-A della collaborazione DLS | 18 |
| 2 | Richiami sulla Relatività Ristretta | 25 |
| 2.1 | L'esperienza di Michelson-Morley | 26 |
| 2.2 | Quadrivettori e Trasformazioni di Lorentz | 27 |
| 2.2.1 | Cono di luce e simultaneità di due eventi | 30 |
| 2.2.2 | Composizione delle velocità | 32 |
| 2.3 | Il quadri-vettore energia-momento della quantità di moto | 33 |
| 2.4 | Sistemi di riferimento e massa invariante | 34 |
| 2.4.1 | Sistema del laboratorio | 34 |
| 2.4.2 | Sistema del centro di massa | 34 |
| 2.4.3 | La massa invariante | 34 |
| 2.5 | Momento trasverso e trasformazione degli angoli | 36 |
| 2.5.1 | Energia di Soglia di una Reazione | 38 |
| 2.5.2 | Scattering Elastico | 39 |

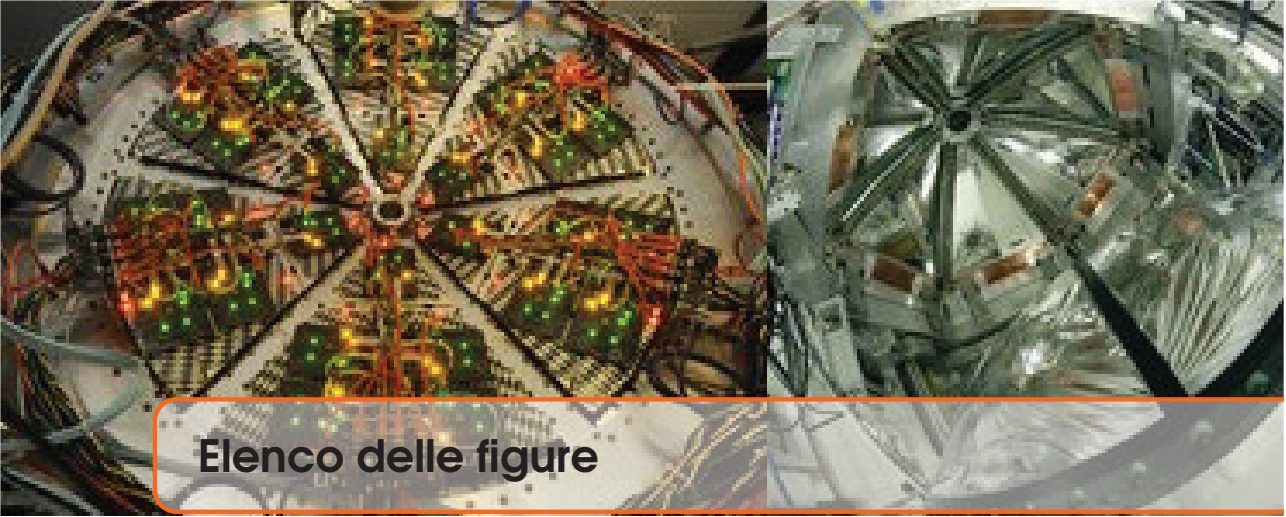
| | | |
|------------|--|-----------|
| 2.6 | Decadimento in due corpi | 40 |
| 2.6.1 | Decadimento del π_0 in due fotoni | 43 |
| 3 | Le variabili di Sudakov | 49 |
| 3.0.1 | Introduzione | 50 |
| 3.0.2 | La definizione e le proprietà delle variabili di Sudakov | 52 |
| 3.0.3 | La variabile di Sudakov e di Mandelstam | 53 |
| 3.0.4 | La variabile di Sudakov e l'energia nel LAB. | 53 |
| 3.1 | Il boost per i quadri-momenti nel CM e di Sudakov | 55 |
| 3.1.1 | Il boost per i 4-momenti del CM | 55 |
| 3.1.2 | Il boost per i quadri-momenti di Sudakov | 56 |
| 4 | La cinematica degli esperimenti | 61 |
| 4.1 | Introduzione | 61 |
| 4.2 | La cinematica degli urti relativistici fra ioni | 61 |
| 4.2.1 | Le collisioni e le grandezze cinematiche | 63 |
| 4.2.2 | I valori numerici della variabile di Sudakov | 64 |
| 4.3 | La densità d'energia nel tri-volume e nel quadri-volume del dominio di coerenza | 65 |
| 4.4 | Il c.e.m. coerente della G.D.R. | 66 |
| 4.4.1 | Introduzione | 66 |
| 4.4.2 | Il potenziale vettore coerente | 66 |
| 4.4.3 | La nozione di "coerenza" | 67 |
| 4.4.4 | Il potenziale 4-vettore del c.e.m. nel nucleo | 68 |
| 4.4.5 | La dimostrazione che $\vec{\nabla} \cdot \vec{A} = 0$ | 73 |
| 4.4.6 | La dimostrazione che $\vec{\nabla} \cdot \hat{e}_\phi = 0$ | 74 |
| 4.5 | La trasformata di Fourier del quadripotenziale | 75 |
| 4.6 | Il quadrato di $A_\mu(q)$ | 77 |
| 4.6.1 | Il quadrato $[\delta(q_0 - \omega)]^2$ | 77 |
| 4.6.2 | Il quadrato $[\delta(q^2)]^2$ | 78 |
| 4.6.3 | Il prodotto di $[\delta(q^2)]^2$ per $[\delta(q_0 - \omega)]^2$ ed il quadrato di $a(q)$ | 80 |
| 4.7 | Il quadri-volume | 81 |
| 4.8 | Il diagramma di Feynman dei di-elettroni | 81 |
| 4.9 | Le grandezze coerenti di $A_\mu(q)$ | 82 |
| 5 | Lo spettro dei di-elettroni | 85 |
| 5.0.1 | Introduzione | 85 |
| 5.1 | Il modulo al quadrato della matrice S | 88 |
| 5.1.1 | L'integrazione in $d^4 q_1 d^4 q_2$ | 91 |

| | | |
|-------------|---|------------|
| 5.2 | La sezione d'urto di-elettronica della QEDC-GDR | 92 |
| 5.2.1 | Introduzione | 92 |
| 5.2.2 | La definizione del di-elettrone nella QEDC-GDR | 92 |
| 5.2.3 | La definizione di regione di accettazione del di-elettrone | 93 |
| 5.2.4 | L'espressione di $d^6\sigma$ | 93 |
| 5.2.5 | La $\frac{d\sigma}{dM_{e^+e^-}}$ con lo sviluppo della $ \overline{\mathcal{M}} ^2$ | 94 |
| 5.3 | Il Fattore di Forma nel modello QEDC-GDR | 96 |
| 5.4 | Componenti del quadri-momento di-elettronico | 98 |
| 5.5 | Le componenti del quadri-spostamento di-elettronico | 100 |
| 5.5.1 | Principio di indeterminazione di Heisenberg in Meccanica Quantistica | 102 |
| 5.6 | Lo Spazio Di-elettronico delle Fasi | 105 |
| 5.6.1 | Introduzione | 105 |
| 5.6.2 | Il passaggio al 4-spazio d^4q_{tot} | 106 |
| 5.7 | Le rielaborazioni delle delta | 106 |
| 5.7.1 | La delta su $ \vec{q}_{tot} $ | 106 |
| 5.7.2 | La delta su q_{0tot} | 107 |
| 5.7.3 | La delta su $\theta = \angle(\vec{q}_2, \vec{q}_{tot})$ | 107 |
| 5.8 | Lo sviluppo dei differenziali | 107 |
| 5.9 | Gli angoli di scattering nel laboratorio | 108 |
| 5.10 | La rielaborazione dei 4-prodotti scalari | 111 |
| 5.11 | Il segnale di-elettronico | 112 |
| 5.12 | Il volume del segnale di-elettronico | 113 |
| 5.13 | Il lifting unitario | 114 |
| 5.14 | Il valore di \vec{q}_- | 115 |
| 5.15 | Il numero di di-elettroni della QEDC-GDR | 116 |
| 5.16 | Collisione $^{40}\text{Ca} + ^{nat}\text{Ca}$ ad 1 A GeV | 117 |
| 5.16.1 | Introduzione | 117 |
| 5.16.2 | L'angolo fra i fotoni nel LAB | 118 |
| 5.16.3 | L'angolo fra i fotoni e i di-elettroni | 118 |
| 5.16.4 | Il valore di $ \vec{q}_- $ per la collisione $^{40}\text{Ca} + ^{nat}\text{Ca}$ | 118 |
| 5.16.5 | Il volume del segnale di-elettronico $V_S(M_{e^+e^-}, \Psi)$ | 120 |
| 5.16.6 | Il Plot3D del fattore di forma $F_{Ca-Ca}(M_{e^+e^-}, \vec{q}_{\perp tot})$ | 120 |
| 5.16.7 | Lo spazio di-elettronico delle fasi: Ψ_{DS} | 120 |
| 6 | Gli spettri di confronto TS Calcio-Calcio | 123 |
| 6.0.1 | Lo spettro Teorico-Sperimentale HSD e QEDC-GDR | 124 |
| 6.1 | Collisione di BEVALAC $^{12}\text{C} + ^{nat}\text{C}$ ad 1A GeV | 124 |
| 6.1.1 | La densità dei di elettroni | 124 |
| 6.1.2 | Numero di (e^+e^-) | 126 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 6.1.3 | L'angolo fra i fotoni nel LAB | 126 |
| 6.1.4 | L'angolo fra i fotoni e i di-elettroni | 126 |
| 6.1.5 | Il volume del segnale di-elettronico $V_S(M_{e^+e^-}, \psi)$ | 129 |
| 6.1.6 | Il Plot3D del fattore di forma $F_{Ca-Ca}(M_{e^+e^-}, \vec{q}_{\perp tot})$ | 129 |
| 6.1.7 | Lo spazio di-elettronico delle fasi: Ψ_{DS} | 129 |
| 6.1.8 | Spettro Teorico-Sperimentale HSD e QEDC-GDR | 129 |
| 6.1.9 | Conclusioni | 132 |
| 7 | Appendice. Produzione Di Coppie Di-Elettroniche | 141 |
| 7.1 | Supplementi di calcolo per "Produzione Di Coppie Di-Elettroniche" | 141 |
| 7.1.1 | Unità di misura dei termini della sezione d'urto | 142 |
| 7.1.2 | Un'analisi supplementare per $^{40}\text{Ca} + ^{nat}\text{Ca}$ | 142 |
| 7.1.3 | Significato dei simboli usati nelle equazioni | 144 |
| | Indice analitico | 165 |

⁰Nella foto di sfondo i rivelatori del Super-Kamiokande che è costituito da un serbatoio d'acqua da 50.000 tonnellate sepolto in una miniera in disuso. L'esperimento è stato progettato per misurare i neutrini rilevando le loro rare interazioni con elettroni o nucleoni nell'acqua. Queste interazioni possono produrre particelle secondarie che viaggiano più velocemente della velocità della luce nell'acqua e generare lampi della cosiddetta radiazione Cherenkov che può essere rilevata dai sensori che rivestono il serbatoio dell'acqua. Si prevede che tali lampi appaiano anche quando le particelle di materia oscura in arrivo si scontrano con, e quindi accelerano, i nuclei di idrogeno nell'acqua. Ma affinché ciò accada, le particelle leggere di materia oscura devono viaggiare insolitamente veloci, il che richiede una "spinta" dalle collisioni con i raggi cosmici adronici.

Utilizzando i dati raccolti tra il 1996 e il 2018, il team ha cercato tali eventi analizzando il segnale Cherenkov dalle particelle provenienti dalla direzione del centro della Via Lattea, dove si ritiene che la materia oscura sia più densa. Non trovando nulla al di là della prevista firma del neutrino, i ricercatori hanno stabilito i vincoli più forti finora sulla sezione d'interazione di questa materia oscura leggera e potenziata dai raggi cosmici con l'idrogeno.



Elenco delle figure

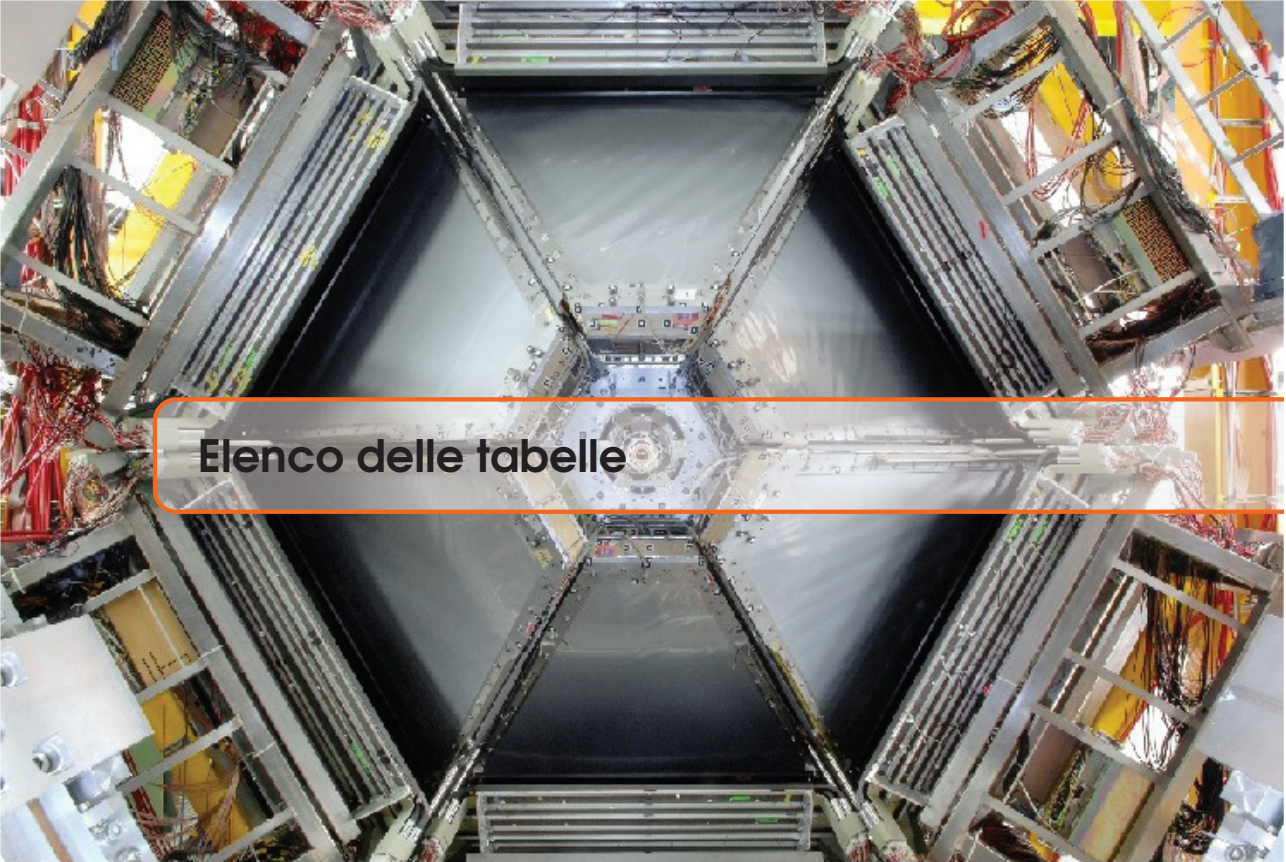
| | |
|---|----|
| 1.1 Il bosone di Higgs può intervenire anche alle energie di HADES del GSI ed a quelle del BEVALAC, più basse rispetto a quelle dell'LHC? E per gli esperimenti di cui tratta questo saggio? Se sì, il creatore delle masse delle particelle farà da mediatore nella diffusione $\gamma + \gamma \rightarrow H \rightarrow e^+ + e^-$. | 8 |
| 1.1 Il BEVALAC era posizionato a Berkeley sul lato montuoso nel campus dell'Università della California. | 9 |
| 1.2 Lo spettrometro DLS. | 9 |
| 1.3 Lo spettrometro DLS visto dall'alto: il raggio centrale è stato disposto a 40° dai due lati per essere settato nella regione centrale di rapidità (la regione in mezzo alla rapidità del proiettile e della targhetta). | 10 |
| 1.1 Canali di decadimento a tre corpi in coppie di-elettroniche, con la $N(1520)$, $N(1700)$ e Δ . | 11 |
| 1.2 Canali di decadimento a due corpi in coppie di-elettroniche. | 11 |
| 1.3 Sezione d'urto differenziale in massa invariante della produzione di coppie e^+e^- per le reazioni p+p (cerchi aperti) e p+d (cerchi chiusi) (116) . | 12 |
| 1.4 Spettro in massa invariante delle collisioni pp a differenti energie dai calcoli teorici (124) in confronto coi dati sperimentali DLS. | 13 |
| 1.5 Confronti TS sugli spettri di-elettronici dei dati pp alle energie di BEVALAC/SIS col modello UrQMD (129) . | 15 |
| 1.6 Confronti TS sugli spettri di-elettronici dei dati pd alle energie di BEVALAC/SIS col modello UrQMD (129) . | 16 |
| 1.1 Sezioni d'urto sperimentali in massa invariante misurate dalla Collaborazione DLS per diversi sistemi collisionali nucleo-nucleo. | 17 |
| 1.2 Rapporti delle sezioni d'urto di produzione di-leptonica delle reazioni Ca+Ca e C+C ad 1.04 AGeV. | 18 |
| 1.3 Spettro di confronto TS (Teorico-Sperimentale) dei di-leptoni per le collisioni al BEVALAC dei sistemi Ca+Ca e per il C+C, ad 1 AGeV. | 19 |
| 1.4 Spettro dei di-leptoni, confronto TS dall'articolo (126) modificato con la funzione "full" della p . | 21 |

| | | |
|-----|---|----|
| 1.5 | Spettro dei di-leptoni, confronto TS dall'articolo (126) modificato con la funzione "full" della ρ . | 22 |
| 1.6 | Confronto TS fra lo spettro dei di-leptoni dall'articolo (126) modificato con la funzione "full" della ρ in un approccio di trasporto ricavato dall'approccio termodinamico. | 23 |
| 1.7 | Spettro dei di elettroni, confronto TS calcolato col modello UrQMD per la reazione Ca+Ca alle energie di BEVALAC/SIS (129). | 23 |
| 1.8 | Spettro dei di elettroni, confronto TS calcolato col modello UrQMD per la reazione C+C alle energie di BEVALAC/SIS (129). | 24 |
| 2.1 | Schema dell'apparato sperimentale di Michelson e Morley. | 26 |
| 2.1 | Piano x_t degli eventi; sono rappresentati il cono di luce passante per l'origine ed una possibile linea di universo passante anch'essa per l'origine. | 31 |
| 2.1 | Rappresentazione dell'angolo polare θ e dell'angolo azimutale ϕ relativi all'impulso nel sistema del laboratorio. | 37 |
| 2.2 | Urto di una particella incidente su un bersaglio con produzione di n particelle nello stato finale. | 38 |
| 2.3 | Scattering elastico di un elettrone su un nucleo. | 40 |
| 2.4 | Frazione di energia iniziale conservata dall'elettrone diffuso in funzione dell'angolo di diffusione, per energie di 0.5 e 10 GeV e per nuclei di $A = 1$ e $A = 50$. | 41 |
| 2.1 | Decadimento in due corpi, che viaggiano in versi opposti. | 41 |
| 2.2 | Cinematica del decadimento $\pi_0 \rightarrow \gamma\gamma$ nel sistema di riferimento del centro di massa e nel laboratorio. | 44 |
| 2.3 | Angolo di apertura α_{\min} tra i due fotoni, nel sistema di riferimento del laboratorio, in funzione dell'energia del π_0 . La linea tratteggiata rappresenta l'angolo di apertura minimo per il decadimento $\eta \rightarrow \gamma\gamma$. | 45 |
| 2.4 | Distribuzione di energia dei fotoni nel decadimento $\pi_0 \rightarrow \gamma\gamma$ nel sistema di riferimento del centro di massa e nel laboratorio. | 46 |
| 2.5 | Distribuzione di probabilità dell'angolo compreso tra i due fotoni nel decadimento $\pi_0 \rightarrow \gamma\gamma$, nel sistema di riferimento del laboratorio, per due diverse energie del π_0 . Si può notare come l'angolo minimo, che cresce al diminuire dell'energia del π_0 , corrisponda al massimo della distribuzione di probabilità. | 47 |
| 4.1 | Grafico polare del valore efficace del potenziale vettore. | 67 |
| 4.2 | Grafico vettoriale del versore $\hat{e}_\phi = (-\sin \phi, \cos \phi, 0)$. | 72 |
| 4.1 | Schema collisionale della QED in cui sono riportate le relazioni fra i 4-impulsi: p_1 e p_2 sono i 4-impulsi degli ioni. q_1 e q_2 sono i 4-impulsi dei fotoni (coerenti e reali). q_- e q_+ sono i 4-impulsi dell'elettrone e del positrone uscenti. | 82 |
| 5.1 | Diagramma di Feynman (diretto ed incrociato) del processo di produzione di coppie di-leptoniche. p_1 e p_2 sono i 4-impulsi degli ioni. q_1 e q_2 sono i 4-impulsi dei fotoni coerenti e reali. q_- e q_+ sono i 4-impulsi dei di-elettroni uscenti. | 86 |
| 5.2 | L'ordine più basso a cui contribuiscono i diagrammi di Feynman $\gamma + \gamma \rightarrow l^+ l^-$. | 87 |
| 5.3 | I diagrammi di tipo autoenergia che contribuiscono ai diagrammi di Feynman $\gamma + \gamma \rightarrow l^+ l^-$. | 88 |
| 5.4 | I diagrammi di tipo box che contribuiscono ai diagrammi di Feynman $\gamma + \gamma \rightarrow l^+ l^-$. | 89 |

| | | |
|------|--|-----|
| 5.5 | I diagrammi di tipo vertice che contribuiscono ai diagrammi di Feynman $\gamma + \gamma \rightarrow l^+ l^-$ | 89 |
| 5.6 | I diagrammi con fotone irradiato reale come correzione ai diagrammi di Feynman $\gamma + \gamma \rightarrow l^+ l^-$ | 90 |
| 5.1 | Grafico di $q_{3tot}(M_{e^+e^-}, \vec{q}_{\perp tot})$ nel range d'accettazione. | 99 |
| 5.2 | Grafico di $q_{0tot}(M_{e^+e^-}, \vec{q}_{\perp tot})$ nella regione d'accettazione. | 100 |
| 5.3 | Plot3D della $M_{\perp} = \sqrt{M_{e^+e^-}^2 + \vec{q}_{\perp tot}^2}$. | 101 |
| 5.4 | Plot3D di $ \vec{q}_{tot}(M_{e^+e^-}, y_{Lab}) $ nella regione d'accettazione. | 101 |
| 5.1 | Plot3D della relazione (5.9.8). | 110 |
| 5.1 | Numero di coppie di-elettroniche per effetto della QEDC-GDR, nella regione d'accettazione, per la collisione $^{40}\text{Ca} + ^{nat}\text{Ca}$. | 117 |
| 5.2 | Intersezione del numero di coppie di-elettroniche per effetto della QEDC GDR con la retta $n_{DLS} = 4698$, nella regione d'accettazione, per la collisione $^{40}\text{Ca} + ^{nat}\text{Ca}$. | 117 |
| 5.3 | Intersezione del numero di coppie di-elettroniche per effetto della QEDC GDR con la retta $n_{DLS} = 4698$, nella regione d'accettazione, per la collisione $^{40}\text{Ca} + ^{nat}\text{Ca}$. | 118 |
| 5.4 | $\theta = \angle(\vec{q}_2, \vec{q}_{tot})$ per la collisione $^{40}\text{Ca} + ^{nat}\text{Ca}$, nella regione d'accettazione. | 119 |
| 5.5 | Plot3D del 1° valore di quadrupolo del modulo $ \vec{q}_{\perp} $ per la collisione $^{40}\text{Ca} + ^{nat}\text{Ca}$, nella regione d'accettazione calcolato con la QEDC-GDR. | 119 |
| 5.6 | $S_{e^+e^-}(M_{e^+e^-}, \psi)$ per la collisione $^{40}\text{Ca} + ^{nat}\text{Ca}$. | 120 |
| 5.7 | Il volume del segnale di-elettronico $V_S(M_{e^+e^-}, \psi)$ per la collisione $^{40}\text{Ca} + ^{nat}\text{Ca}$. | 121 |
| 5.8 | Il Plot3D del fattore di forma $F_{Ca-Ca}(M_{e^+e^-}, \vec{q}_{\perp tot})$ nella regione d'accettazione. | 121 |
| 5.9 | Plot3D di Ψ_{DS} della QEDC-GDR nella regione d'accettazione, per la collisione $^{40}\text{Ca} + ^{nat}\text{Ca}$. | 122 |
| 6.1 | Confronto TS per la collisione $^{40}\text{Ca} + ^{nat}\text{Ca}$ a 1.04 A GeV. L'insieme dei punti in verde è quello calcolato col modello HSD. La curva blu (a maggior spessore) è stata calcolata col mio modello QEDC-GDR. | 125 |
| 6.1 | Numero di coppie $(e^+ e^-)_{TP}$ nella regione d'accettazione. | 127 |
| 6.2 | Intersezione del numero di coppie di-elettroniche per effetto della QEDC GDR con la retta $n_{DLS} = 2841$, nella regione d'accettazione, per la collisione $^{12}\text{C} + ^{nat}\text{C}$. | 127 |
| 6.3 | Grafico teorico della densità di carica di-elettronica QEDC-GDR per la collisione $^{12}\text{C} + ^{nat}\text{C}$ ad 1.04 GeV. | 127 |
| 6.4 | $\psi = \angle(\vec{q}_1, \vec{q}_2)$ per la collisione $^{12}\text{C} + ^{nat}\text{C}$, nella regione d'accettazione. | 128 |
| 6.5 | $\theta = \angle(\vec{q}_2, \vec{q}_{tot})$ per la collisione $^{12}\text{C} + ^{nat}\text{C}$, nella regione d'accettazione. | 128 |
| 6.6 | Il volume del segnale $V_S(M_{e^+e^-}, \psi)$ per la collisione $^{12}\text{C} + ^{nat}\text{C}$. | 129 |
| 6.7 | Il Plot3D di $S(M_{e^+e^-}, \psi)$ per la collisione $^{12}\text{C} + ^{nat}\text{C}$. | 130 |
| 6.8 | Il Plot3D del fattore di forma $F_{C-C}(M_{e^+e^-}, \vec{q}_{\perp tot})$ nella regione d'accettazione. | 130 |
| 6.9 | Plot3D del valore migliore di $ \vec{q}_{\perp} $ per la collisione $^{12}\text{C} + ^{nat}\text{C}$ a 1.04 GeV, nella regione d'accettazione calcolato con la QEDC GDR. | 131 |
| 6.10 | Plot3D di $\Psi_{DileptonicSpace}$ della QEDC-GDR nella regione d'accettazione, per la collisione $^{12}\text{C} + ^{nat}\text{C}$. | 131 |
| 6.11 | Confronto TS per la collisione $^{12}\text{C} + ^{nat}\text{C}$ a 1.04 A GeV. L'insieme dei punti in verde è quello calcolato col modello HSD. La curva blu (a maggior spessore) è stata calcolata col mio modello QEDC-GDR. | 132 |

| | | |
|------|--|-----|
| 6.12 | Il flusso combinato degli elettroni e dei positroni misurato dallo spettrometro AMS-02 moltiplicato per E^3 insieme ai risultati degli esperimenti precedenti ((1) S. Torii et al., <i>Astrophys. J.</i> 559, 973 (2001); (2) M. A. DuVernois et al., <i>Astrophys. J.</i> 559, 296 (2001); (3) J. Chang et al., <i>Nature (London)</i> 456, 362 (2008); (4) K. Yoshida et al., <i>Adv. in Space Res.</i> 42, 1670 (2008); (5) F. Aharonian et al., <i>Phys. Rev. Lett.</i> 101, 261104 (2008); (6) F. Aharonian et al., <i>Astron. Astrophys.</i> 508, 561 (2009); (7) M. Ackermann et al., <i>Phys. Rev. D</i> 82, 092004 (2010).) | 136 |
| 6.13 | Comparazione fra il flusso degli elettroni (punti in blu, scala a sinistra) ed il flusso dei positroni (punti in rosso, scala a destra) misurato dalla collaborazione AMS-02. | 136 |
| 7.1 | Plot3D del 2° valore di quadrupolo del $ \vec{q}_- $ per la collisione $^{40}\text{Ca}+^{nat}\text{Ca}$, nella regione d'accettazione calcolato con la QEDC GDR. | 142 |
| 7.2 | Confronto TS per la collisione $^{40}\text{Ca}+^{nat}\text{Ca}$ a 1.04 A GeV. La curva è quella calcolata col modello QEDC-GDR (con l'altra soluzione di $ \vec{q}_- $ di Fig. 7.1) entro il range dell'esaltazione (non ancora spiegato dagli altri modelli), con i punti sperimentali. | 143 |
| 7.3 | Confronto TS per la collisione $^{40}\text{Ca}+^{nat}\text{Ca}$ a 1.04 A GeV. La curva è quella calcolata col modello QEDC-GDR (con l'altra soluzione di $ \vec{q}_- $ di Fig. 7.1) entro il range dell'esaltazione (non ancora spiegato dagli altri modelli), con i punti sperimentali. | 143 |

⁰Nella foto il fronte (a destra) ed il retro del RICH, dell'esperimento HADES al GSI. Il rivelatore Ring Imaging Cherenkov (RICH) è il fulcro dell'esperimento HADES. Il rivelatore RICH serve a rilevare gli elettroni e i positroni che si formano quando due nuclei atomici entrano in collisione. Filtra queste particelle tra i molti altri prodotti di reazione. Il rivelatore comprende una camera riempita con gas perfluorbutano (C4F10). Elettroni e positroni viaggiano attraverso questo gas più velocemente della luce, provocando l'emissione di una speciale forma di luce nota come radiazione Cherenkov. Ciò consente agli scienziati di distinguere elettroni e positroni da altre particelle più lente.



Elenco delle tabelle

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | Numero di coppie misurate nelle reazioni Nucleo-Nucleo dalla Collaborazione DLS. | 14 |
| 4.1 | Valori numerici, in unità naturali e del SI, per le grandezze cinematiche degli ioni nelle collisioni Ca-Ca e C-C. | 64 |
| 4.2 | Grandezze fisiche per i nuclei Ca e C, in unità del SI. | 64 |
| 4.3 | Grandezze fisiche per i nuclei Ca e C, in unità naturali. | 64 |
| 4.4 | Valori numerici, in unità naturali e del SI, della variabile di Sudakov per le collisioni Ca-Ca e C-C. | 66 |
| 4.5 | Valori numerici, in unità naturali, del SI e combinate, della densità d'energia nel CM per le collisioni Ca-Ca e C-C. | 66 |

⁰Nella foto la Camere di Deriva. La parte iniziale dello spettrometro magnetico comprende quattro cosiddette camere di deriva multifilare (MDC). Queste camere sono riempite di gas (elio e butano) e attraversate da una moltitudine di sottili fili anodici, attorno ai quali si forma un campo elettrico. Quando le particelle cariche - siano questi elettroni o frammenti pesanti del nucleo atomico - volano attraverso una camera, ionizzano alcuni degli atomi di gas, innescando così un segnale in un filo anodico adiacente.

Ogni camera contiene sei moduli trapezoidali montati uno sopra l'altro, ciascuno dei quali a sua volta è costituito da diversi strati di fili tesi. Disporre i fili in uno schema incrociato significa che un numero di segnali si sovrappone, mostrando così dove una particella carica ha attraversato l'MDC.

Sulla base del tempo di deriva (il tempo dalla ionizzazione di un atomo di gas all'attivazione di un segnale elettrico sul filo dell'anodo), il percorso di una particella può essere tracciato con una precisione di una frazione di millimetro. Questa estrema precisione è necessaria per determinare l'angolo con cui la particella lascia il bersaglio. HADES è dotato di quattro MDC: due a monte e due a valle di un magnete superconduttore.



Prefazione dell'autore

Il modello QEDC–GDR si basa sulla Fisica della QED, elaborata sull'elettrodinamica quantistica nella materia condensata, con le ipotesi di coerenza quantistica (sviluppate da svariati ricercatori) nonché della Risonanza di Dipolo Gigante; la teoria è estrapolata dalle teorie quantistiche e relativistiche dei campi di Daniel Kastler, Richard Feynman, Giuliano Preparata, Steven Weinberg, Roy J. Glauber, Gerhard Baur, V. Yu. Ponomarev, Victor V. Voronov, per citarne alcuni dei più recenti sviluppatori. In questo volume il modello QEDC–GDR viene proposto per spiegare l'emissione esaltata dei dielettroni (coppie elettrone-positrone) nelle collisioni a 1.04 A GeV fra ioni poco massivi. Il modello QEDC–GDR si pone in modo complementare agli altri modelli HSD e UrQMD, di E. L. Bratkovskaya e W Greiner. Questi ultimi, usando i soli decadimenti Dalitz, di bremsstrahlung e quelli diretti dei mesoni vettori, riescono a giustificare l'andamento dei dati sperimentali solo per le basse e le alte energie collisionali. Le misure sperimentali sono state ottenute, dal 1995 in poi, al BEVALAC dalla collaborazione DLS (non più esistente oggi), i cui dati sperimentali sono confermati oggi dalla collaborazione HADES del GSI (<https://www-hades.gsi.de/>). Il modello QEDC–GDR sviluppato dal prof. Mileto Graziano, invece, dà una giustificazione dell'esaltazione delle coppie dielettroniche

⁰Nella foto di sfondo la Facility for Rare Isotope Beams (FRIB) della Michigan State University. FRIB ha un acceleratore che spinge gli atomi a metà della velocità della luce, frantumandoli su un bersaglio che produce isotopi rari (vedi Notizie sulla ricerca: Isotopi rari per la scelta). Per consentire a tale macchina di erogare efficacemente fasci ionici ad alta potenza, una sezione del tubo che guida il fascio è intersecata da una pellicola solida che rimuove gli elettroni dal fascio ionico. Questa rimozione aumenta lo stato di carica del raggio, migliorandone l'efficienza di accelerazione. Il materiale di rimozione della carica, tuttavia, può essere degradato dai fasci ionici. Ora, Takuji Kanemura e i suoi colleghi della FRIB riferiscono del successo di un metodo alternativo di rimozione della carica utilizzato presso la FRIB, che secondo loro supera i limiti di altre tecniche di rimozione della carica.

Il nuovo metodo utilizza un getto a film sottile di litio liquido per eliminare la carica del raggio. Il getto iniziale di 0,5 mm di diametro si sviluppa in un getto di 10–20 μm pellicola spessa 1 cm che scorre direttamente attraverso il percorso del fascio ionico ad una velocità di 50 m/s. Dopo che il raggio di ioni uranio da 20 MeV per nucleone del FRIB ha colpito il getto, lo stato di carica medio del raggio raddoppia a 73,7, il valore necessario per un'accelerazione ottimale. Il getto rimane idrodinamicamente stabile.

Nei test, Kanemura e i suoi colleghi dimostrano che il loro getto di rimozione della carica può eguagliare le prestazioni di un tradizionale dispositivo di rimozione della carica solida, che ha uno stato di carica fino a 76,9. Inoltre, il getto non subisce alcun degrado, aumentando indefinitamente la durata dell'estrattore di carica.

proprio nell'intervallo di energia che sfugge agli altri modelli, questo perché usa le ipotesi di coerenza quantistica, negli stati iniziali, e di entanglement, per gli stati finali e si basa sulle uniche particelle realmente stabili, i fotoni e gli elettroni. Tra le implicazioni vi è la virtuale perdita della causalità, che apre una discussione dal punto di vista epistemologico, in quanto le grandezze del detector influenzano gli stati degli osservabili. La quantizzazione di Planck ed il principio di indeterminazione di Heisenberg, sono ingredienti fondamentali nei calcoli. La Risonanza di Dipolo Gigante è la sezione d'urto che ingloba tutte le altre e quindi previste dagli altri modelli. Proprio perché si basa sui modelli collisionali sviluppati parallelamente da Gerhard Baur e Carlos Bertulani, il modello QEDC-GDR s'impone come decisivo nella descrizione della dinamica ionica collisionale. Non viene usata la teoria della QCD, pur riconoscendone la piena validità, perché l'autore non ha voluto approfondire la sua applicazione, in questa prima fase di studio. Il libro apre spunti epistemologici sulla moderna fisica quantistica e nucleare. Per una buona introduzione alla parte teorica del libro, per poi svolgere i calcoli, risolvendoli, per la sezione d'urto si rimanda al mio libro [288]. Ho tentato di essere esplicativo nei confronti di molte formule che lasciano qualche volta dei dubbi interpretativi. Il libro è stato scritto in ambiente \LaTeX che è un linguaggio di programmazione potente ed ad alti livelli, per imparare a scrivere con esso si suggerisce la lettura di alcuni saggi sull'ambiente di programmazione freeware in \LaTeX . Ma è il software che crea il libro oltre che l'autore che in fase di stesura diviene un programmatore: per scrivere questo testo sono serviti almeno quattro compilatori \LaTeX , perché ognuno aveva qualche caratteristica utile diversa dall'altro come \TeX Maker, Lyx e Kile. Le figure sono state create nell'ambiente Mathematica della Wolfram, quindi con un codice di programmazione, ove ovviamente non erano già esistenti in letteratura sono state all'uopo realizzate. Lo stesso dicasi per le numerose equazioni che si troveranno sempre con il numero dell'equazione accanto per potersi riferire ad una data equazione e per poterla, in futuro, anche raffinare o aggiustare. Le equazioni sono state riprese dai numerosi testi elencati in bibliografia, riscritte con pazienza certosina, al fine di rendere il testo utile ed efficace oltre che specialistico. Nella versione e-book sono interattivi l'indice generale, le equazioni e i numeri delle citazioni bibliografiche, nonché le note, per navigare meglio nel testo.

Alla fine del libro sono inclusi in ordine sparso i file di lavoro sul software Mathematica, per far vedere come si sono ottenuti dopo vari calcoli i grafici o plot riportati nel libro e come si sono realizzati i calcoli complessi riportati nel testo, con i numeri di pagine che non sono in correlazione con quelli del libro che finisce con le pagine dell'indice analitico.

Questo libro include l'aggiornamento ad un mio libro pubblicato nel 2015, [253].

Scritto in Taurianova, afferente alla Città Metropolitana di Reggio Calabria (Italia).

L'autore
Mileto Graziano