

Primo passo verso l'antinucleo

LA SCOPERTA DELL'ANTIDEUTERIO AL CERN

di Antonino Zichichi

«Coloro i quali dicono che l'antidrogeno è antimateria debbono riflettere su un dettaglio: beviamo acqua, non idrogeno liquido». Sono le parole di Paul Dirac a un gruppo di fisici riuniti attorno a colui che, con un'equazione [1], aprì orizzonti nuovi alle umane conoscenze.

Per avere l'acqua non basta l'idrogeno. Ci vuole anche l'ossigeno, il cui nucleo è fatto con 8 protoni e 8 neutroni. L'idrogeno è l'unico elemento della Tavola di Mendeleev fatto con due particelle cariche, l'elettrone e il protone, senza alcun bisogno che entrino in gioco le forze nucleari. Il primo esempio di elemento per la cui esistenza sono necessarie le forze nucleari è l'idrogeno pesante, il cui nucleo è fatto con un protone e un neutrone. Queste due particelle, per stare insieme, hanno bisogno della "colla nucleare". Dall'idrogeno pesante in su, tutti gli elementi della tavola chimica, hanno bisogno, per esistere, del neutrone. Senza neutroni non potrebbe esistere altro che l'idrogeno leggero. Addio acqua. E addio materia a noi familiare.

Nella famosa battuta di Dirac ci stanno 70 anni di scoperte teoriche e sperimentali, la cui conclusione è che l'esistenza dell'antimateria nucleare si regge su basi esclusivamente sperimentali. Infatti – come messo in evidenza da T.D. Lee [2] – il teorema CPT perde le sue basi alla scala di Planck (circa 10^{19} GeV) dove convergono tutte le forze fondamentali della natura. Essendo la Teoria della Grande Unificazione l'origine di tutto, se CPT crolla sul livello energetico della Grande Unificazione, addio a tutto ciò che deriva da CPT.

Due parole sui tre operatori di invarianza CPT. Il primo a essere stato scoperto è C: esso dice che tutta la realtà fisica deve restare invariata se si scambiano le cariche additivamente conservate con le corrispondenti anticariche. Il primo esempio fu quello dell'elettrone e dell'antielettrone. L'operatore C venne introdotto da H. Weyl nel 1931 [3].

L'operatore P (introdotto da E. P. Wigner, G. C. Wick e A. S. Wightman [4, 5]) dice che, scambiando i sistemi destrorsi con quelli sinistrorsi, i risultati di qualsiasi esperimento fondamentale non cambiano.

L'operatore T (scoperto da Wigner [6,7], J.S. Schwinger [8] e J.S. Bell [9]) stabilisce che, invertendo l'asse del tempo, la realtà fisica resta inalterata.

Il formalismo matematico, noto come *Relativistic Quantum Field Theory*, costruito per descrivere una forza fondamentale della natura possiede la proprietà di invarianza CPT: invertendo tutto non cambiano i risultati fisici. Riassumendo: se invertiamo tutte le cariche usando C, i tre assi dello spazio (x y z) usando P e l'asse del tempo usando T, tutto rimane come prima.

Adesso è necessario precisare che la materia è fatta di masse accoppiate con numeri quantici additivamente conservati (esempio: cariche elettriche, numeri leptonici, numeri barionici, cariche di "sapore" ecc.). Se a uno stato di materia applichiamo i tre operatori CPT otteniamo antimateria. Questo vuol dire che l'esistenza della materia, se vale il teorema CPT, implica l'esistenza dell'antimateria, e le masse di pezzi di materia debbono essere le stesse di quelle della corrispondente antimateria.

Supponiamo che la natura debba obbedire alla legge di invarianza C. In questo caso l'esistenza della materia esige che deve esistere l'antimateria. Se però non vale l'invarianza C, l'esistenza dell'antimateria è garantita da CPT.

Supponiamo che CP sia valida. Anche in questo caso l'esistenza della materia esige che deve esistere l'antimateria. Se però CP non vale, l'esistenza dell'antimateria è garantita da CPT. Se però crolla CPT, allora l'esistenza dell'antimateria è solo la fisica sperimentale a poterla garantire. Questa telegrafica rassegna non è un racconto, ma la sintesi di ciò che è effettivamente avvenuto nel corso di quasi 70 anni, a partire dal 1929 quando Dirac scoprì la sua equazione. H. Weyl scoprì C e si pensava che la scoperta dell'antielettrone da parte di C.D. Anderson [10] e della produzione in coppia di elettroni e antielettroni da parte di P.M.S. Blackett e G. Occhialini [11] ne fossero la prova. C'era poi l'eguaglianza delle vite medie dei muoni positivi e di quelli negativi.

Si andò così avanti con la scoperta dell'antiprotone (E. Segrè e altri [12]), dell'antineutrone (O. Piccioni e altri [13]) e infine del secondo mesone strano neutro, con lunga vita media (L.M. Lederman e altri [14]).

Questo apparente trionfo degli operatori di invarianza andava in parallelo col successo nella identificazione di un formalismo matematico in grado di descrivere le forze fondamentali della natura. Partendo dalle quattro equazioni di Maxwell e portando avanti il discorso era venuta fuori una costruzione meravigliosa, da noi già citata: la *Relativistic Quantum Field Theory*. Questo formalismo avrebbe dovuto essere in grado di descrivere non solo le forze elettromagnetiche (da cui aveva tratto le sue origini), ma anche le forze deboli e quelle nucleari. A reggere queste convinzioni erano due grandi conquiste: la prima formulazione matematica delle forze deboli, fatta da E. Fermi, e il trionfo di H. Yukawa [15] con la

scoperta della colla nucleare, grazie a C. Lattes, Occhialini e C. Powell. A questi straordinari successi fecero però seguito enormi difficoltà. Nella *Quantum Electro-Dynamics* i poli di Landau e la conclusione che la carica elettrica fondamentale (“nuda”) doveva essere zero; nelle forze deboli il fatto che ai livelli energetici di 300 GeV crollava l’unitarietà; nelle forze nucleari l’enorme proliferazione di mesoni e barioni. Questa proliferazione era totalmente fuori da qualsiasi comprensione in termini di Relativistic Quantum Field Theory. Ed è così che viene fuori un formalismo matematico che è la totale negazione del concetto di “campo”: la cosiddetta “matrice di *scattering*”, detta *matrice-S*.

Per la sua esistenza bastavano tre cose: analiticità, unitarietà e *crossing*. Perché complicarsi la vita con la Relativistic Quantum Field Theory se basta la matrice-S? Se però non c’è la Relativistic Quantum Field Theory, come la mettiamo con l’esistenza dell’invarianza rispetto a tutti gli operatori insieme, CPT? Ed ecco aprirsi un altro fronte.

Nel 1953 R.H. Dalitz [16] tira fuori il famoso (θ - τ) puzzle: due mesoni con proprietà identiche dovevano essere con parità opposte. Spinti da questo “puzzle” T.D. Lee e C.N. Yang [17] analizzano i risultati sperimentali nello studio delle forze deboli e scoprono che non esisteva alcuna prova a conferma della validità di C e P nelle interazioni deboli. Nel giro di un anno C.S. Wu [18] scopre che le leggi di invarianza C e P vengono violate nelle interazioni deboli. Come la mettiamo con l’esistenza dell’antimateria? Viene così fuori l’idea di L.D. Landau [19]: se ciascun operatore C e P è violato, il loro prodotto CP può essere conservato.

L’esistenza dell’antimateria è garantita dalla validità di CP. Si arriva così al 1964, anno in cui viene scoperta la violazione di CP nel decadimento dei mesoni neutri strani [20]. C’è un piccolo dettaglio su cui si è sempre sorvolato. Nel 1957, prima che venisse sperimentalmente scoperta la violazione di P e C, in un lavoro da pochi letto (o capito) Lee, R. Oehme e Yang [21] avevano messo in evidenza che – contrariamente a quanto da molti detto e ripetuto – l’esistenza dei due mesoni neutri strani θ_1 e θ_2 non era prova né della validità di C né di P né del loro prodotto CP.

La rottura di CP coinvolge quella di T se vogliamo che rimanga integro il prodotto CPT. Per alcuni dei padri fondatori della fisica moderna l’invarianza rispetto all’inversione del tempo, a livello delle leggi fondamentali, doveva restare intoccabile. Quindi doveva crollare CPT. Dopotutto perché no. In fondo il baluardo di CPT era la Relativistic Quantum Field Theory, ma adesso questo formalismo matematico sembrava dovesse cedere il passo alla matematica della matrice-S.

Il crollo degli operatori di invarianza (C, P, CP) e l’apparente trionfo della matrice-S erano accoppiati a risultati sperimentali i quali dicevano che

di antideutoni non c'era traccia nonostante fossero prodotti dieci milioni di pioni.

Ero a Dubna quando, nel 1964, Jim Cronin presentò i risultati del suo lavoro [20]. Avevo alla mia destra Bruno Touschek e alla mia sinistra Bruno Pontecorvo. Entrambi mi dissero: “*e questi hanno perso la loro reputazione*”. A quella novità che metteva in crisi l'invarianza CP furono pochi a crederci. Tra questi però c'era Dirac: la prese sul serio ed entrò in una fase di grande depressione scientifica. Lui, famoso per la sua prudenza, aveva giurato sull'invarianza C. Adesso crollava addirittura CP. E per avere il primo esempio di antimateria era necessario salvare CPT, quindi invocare la violazione di T. Le uniche cose da fare erano di natura tecnologico-sperimentale. E infatti la scoperta dell'antimateria ha richiesto la costruzione del più potente fascio di particelle negative nel protosincrotone del CERN e l'invenzione di una tecnica nuova per riuscire a misurare con precisione, mai prima realizzata, i tempi di volo delle particelle cariche. È così che siamo riusciti a scoprire che un antideutone viene prodotto non dopo dieci milioni, bensì dopo cento milioni di pioni [22].

Per capire l'importanza di questa scoperta è necessario avere le idee chiare su cosa si deve intendere per materia. Le particelle non bastano per costruire la materia. Ci vuole anche la colla. Usando quella elettromagnetica si fanno atomi e molecole. Per fare i nuclei ci vogliono protoni, neutroni e colla nucleare. È come se avessimo mattoni. Per costruire una casa ci vuole la colla, non bastano i mattoni. La materia corrisponde alla casa, non ai mattoni e basta.

Se, grazie a determinate leggi, sappiamo che devono esistere mattoni e antimattoni, tutto ciò che si può fare è avere mucchi di mattoni e mucchi di antimattoni. Non case e anticase. Se la realtà in cui viviamo ci dice che esistono le case; per essere sicuri che debbano esistere le anticase ci vuole una legge che stabilisca l'esistenza delle anticolle esattamente identiche alle colle che permettono ai mattoni di incollarsi per fare le case. Affinché questo avvenga è necessaria la validità della legge di invarianza CPT.

Oggi sappiamo che tutte le forze fondamentali convergono all'energia di Planck, dove non vale più l'invarianza CPT. D'altronde se al “punto” sostituiamo la “cordicella” le cose non cambiano: la Relativistic Quantum String Theory non riesce a tirar fuori la validità di CPT. Questo vuol dire che non c'è teoria che possa garantire, partendo dall'esistenza delle “case”, che devono esistere le “anticase”. Ecco perché la certezza che oltre all'antidrogeno devono esistere tutti gli antiatomi con i loro antinuclei nasce da quell'esperimento [22] fatto al CERN nel marzo del 1965. Ed ecco perché vorrei chiudere con la citazione di Heisenberg che

Lee ha fatto a Bologna, nella sua lezione d'apertura al simposio celebrativo del 30° anniversario della scoperta dell'antimateria: «*Nel suo libro The Physicist's Conception of Nature Werner Heisenberg scrive: «Penso che la scoperta dell'antimateria sia forse il maggiore dei grandi salti nella fisica del nostro secolo». Ora, Heisenberg ha scoperto la meccanica quantistica nel 1925. Dal 1972, egli è stato testimone di quasi tutti i grandi salti della fisica moderna. Ebbene egli classificherebbe la scoperta dell'antimateria come il più grande di tutti i salti».*

Biografia

Antonino Zichichi è autore di molte scoperte e invenzioni. Ha fondato il Centro di Cultura Scientifica Ettore Majorana, ed è autore del progetto Gran Sasso. Nel 1978 l'ECFA gli affidò la direzione del gruppo di studio per i nuovi acceleratori. Il progetto da studiare era per un collider con circonferenza 13 Km e un tunnel capace di contenere una sola macchina. Zichichi elaborò un progetto [23] per una macchina da 27 Km in un tunnel in grado di contenere sia una macchina per (e^+e^-) , da cui nacque LEP, sia una collider a protoni (in sigla 10% ELN) da cui è nato LHC.

Link

<http://www.ccsem.infn.it/>



Figura 1: Il professor Dirac circondato da giovani fisici a Erice, dopo una lezione in cui spiegava la differenza tra antiparticelle e antimateria. È in questa occasione che ha detto quanto riportato in apertura di questo articolo.

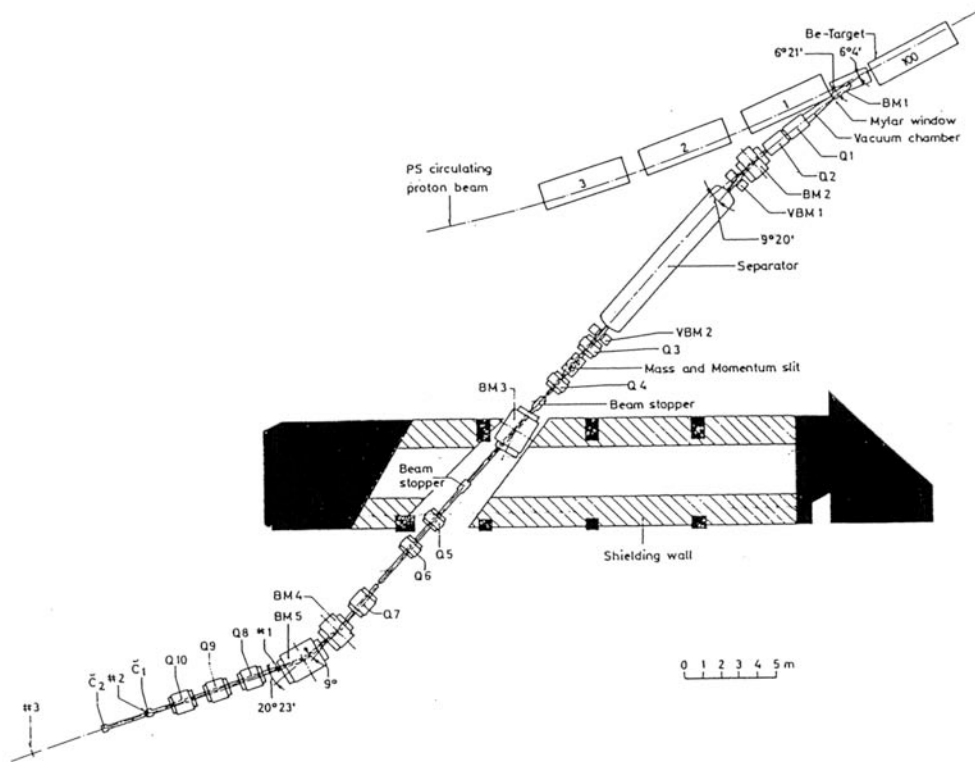


Figura 2: Lo schema dell'apparato sperimentale che ha permesso la scoperta dell'antimateria.

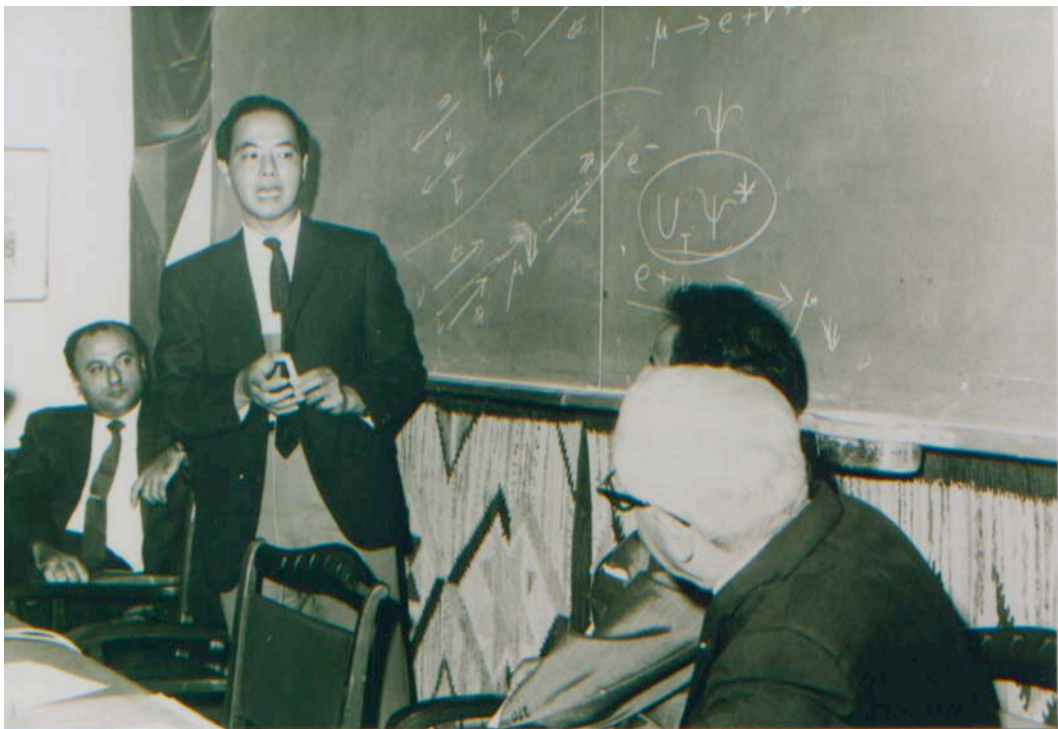
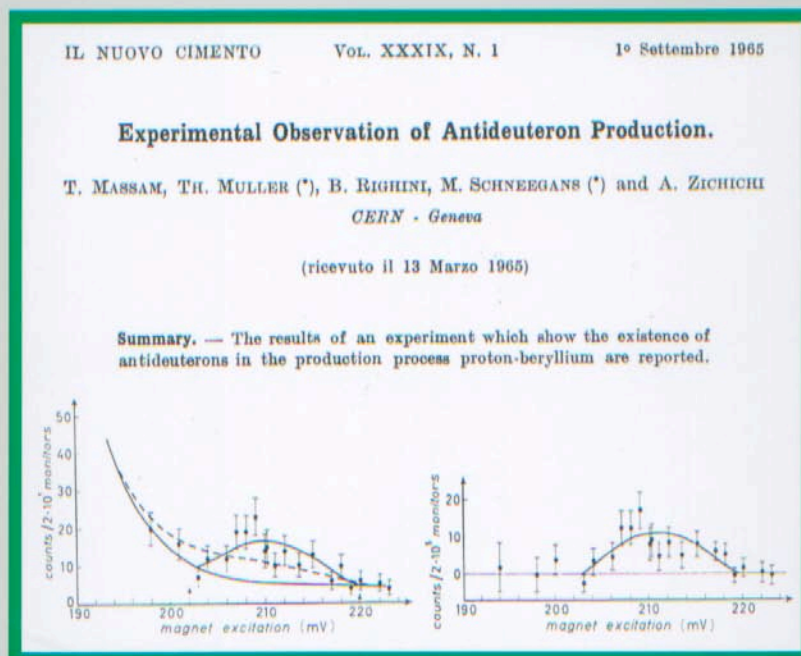


Figura 3: T.D. Lee durante la sua lezione in cui spiega perché il teorema CPT perde la sua validità alla Scala di Planck (a sinistra nella foto Melvin Schwartz, all'estrema destra Isidor I. Rabi).

THE DISCOVERY OF NUCLEAR ANTIMATTER

Edited by L. Maiani and R. A. Ricci



«I think that this discovery of antimatter was perhaps the biggest jump of all the big jumps in physics in our century»

Werner Heisenberg

Figura 4: La copertina del volume celebrativo del XXX anniversario della scoperta dell'antideutone.



Figura 5: Dalla destra nella foto: Val L. Fitch, Sheldon L. Glashow, A. Zichichi che premia il Best Student della Scuola di Fisica Subnucleare (Erice, 1981).

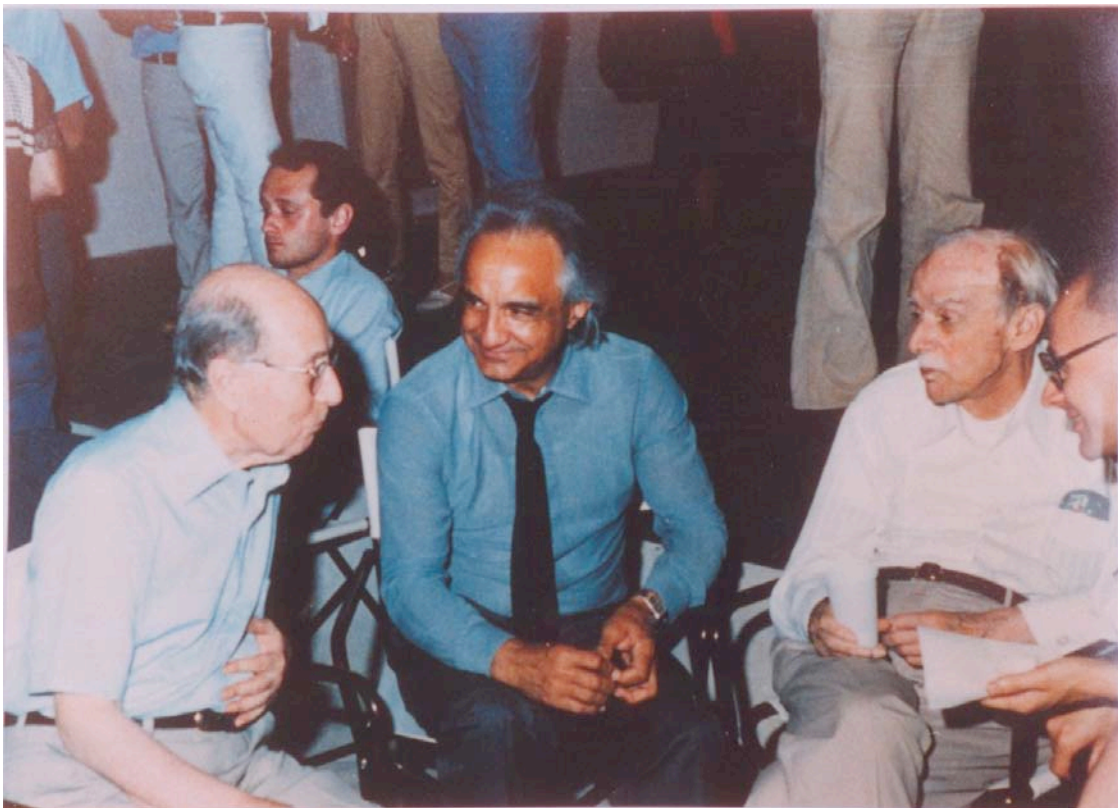


Figura 6: Eugene P. Wigner, A. Zichichi, Paul Dirac (Erice, 1982).



Figura 7: John S. Bell (Erice, 1963).



Figura 8: Eugene P. Wigner (Erice, 1981).



Figura 9: M.me Wu a Erice nel 1994.



Figura 10: Richard R. Dalitz a Erice nel giugno del 1994.

REFERENZE

- [1] The Quantum Theory of the Electron
P.A.M. Dirac, *Proc. Roy. Soc.* A117, 610 (1928);
Quantised Singularities in the Electromagnetic Field
P.A.M. Dirac, *Proc. Roy. Soc.* A133, 60 (1931);
The Principles of Quantum Mechanics
P.A.M. Dirac, (4th edn), Clarendon Press, Oxford (1958).
- [2] *Are Matter and Antimatter Symmetric?*
T.D. Lee. Proceedings of the “Symposium to celebrate the 30th anniversary of the Discovery of Nuclear Antimatter”, L. Maiani and R.A. Ricci (eds), Conference Proceedings 53, page 1, Italian Physical Society, Bologna, Italy (1995).
- [3] *Gruppentheorie und Quantenmechanik*
H. Weyl, 2nd ed., 234 (1931).
- [4] *Unitary Representations of the Inhomogeneous Lorentz Group*
E.P. Wigner, *Ann. Math.*, 40, 149 (1939).
- [5] *Intrinsic Parity of Elementary Particles*
G.C. Wick, E.P. Wigner, and A.S. Wightman, *Phys. Rev.* 88, 101 (1952).
- [6] *Über die Operation der Zeitumkehr in der Quanten-mechanik*
E.P. Wigner, *Gött. Nach.* 546-559 (1931). Here for the first time an anti-unitary symmetry appears.
- [7] E.P. Wigner, *Ann. Math.* 40, 149 (1939).
- [8] J. Schwinger, *Phys. Rev.* 82, 914 (1951).
- [9] *Time Reversal in Field Theory*
J.S. Bell, *Proc. Roy. Soc. (London)* A231, 479-495 (1955).
- [10] *The Positive Electron*
C.D. Anderson, *Phys. Rev.* 43, 491 (1933);
- [11] *Some Photographs of the Tracks of Penetrating Radiation*
P.M.S. Blackett and G.P.S. Occhialini, *Proc. Roy. Soc.* A139, 699 (1933).
- [12] *Observation of Antiprotons*
O. Chamberlain, E. Segrè, C. Wiegand, and T. Ypsilantis, *Physical Review* 100, 947 (1955).
- [13] *Anti-Neutrons Produced from Anti-Protons in Charge Exchange Collisions*
B. Cork, G.R. Lambertson, O. Piccioni, W.A. Wenzel, *Physical Review* 104, 1193 (1957).
- [14] *Observation of Long-Lived Neutral V Particles*
K. Lande, E.T. Booth, J. Impeduglia, L.M. Lederman, and W. Chinowski, *Physical Review* 103, 1901 (1956).
- [15] *From the Yukawa Particle to the QGCW*
A. Zichichi, Opening Lecture of the Symposium for the Centennial Celebration of Hideki Yukawa, Proceedings of the International Nuclear Physics Conference, Tokyo, Japan, (2007).

- [16] *On the Analysis of τ -Meson data and the Nature of the τ -Meson*
 R.H. Dalitz, *Phil. Mag.* 44, 1068 (1953);
Isotopic Spin Changes in τ and θ Decay
 R.H. Dalitz, *Proceedings of the Physical Society* A69, 527 (1956);
Present Status of τ Spin-Parity
 R.H. Dalitz, Proceedings of the “Sixth Annual Rochester Conference on High Energy Nuclear Physics”, Interscience Publishers, Inc., New York, 19 (1956);
 for a detailed record of the events which led to the (θ - τ) puzzle see R.H. Dalitz
 “Kaon Decays to Pions: the τ - θ Problem” in “History of Original Ideas and Basic Discoveries in Particle Physics”, H.B. Newman and T. Ypsilantis (eds), Plenum Press, New York and London, 163 (1994).
- [17] *Question of Parity Conservation in Weak Interactions*
 T.D. Lee and C.N. Yang, *Phys. Rev.* 104, 254 (1956).
- [18] *Experimental Test of Parity Conservation in Beta Decay*
 C.S. Wu, E. Ambler, R.W. Hayward, D.D. Hoppes, *Phys. Rev.* 105, 1413 (1957);
Observation of the Failure of Conservation of Parity and Charge Conjugation in Meson Decays: The Magnetic Moment of the Free Muon
 R. Garwin, L. Lederman, and M. Weinrich, *Phys. Rev.* 105, 1415 (1957);
Nuclear Emulsion Evidence for Parity Non-Conservation in the Decay Chain $\pi^+\mu^+e^+$
 J.J. Friedman and V.L. Telegdi, *Phys. Rev.* 105, 1681 (1957).
- [19] *On the Conservation Laws for Weak Interactions*
 L.D. Landau, *Zh. Éksp. Teor. Fiz.* 32, 405 (1957).
- [20] *Evidence for the 2π Decay of the K_2^0 Meson*
 J. Christenson, J.W. Cronin, V.L. Fitch, and R. Turlay, *Physical Review Letters* 113, 138 (1964).
- [21] *Remarks on Possible Noninvariance under Time Reversal and Charge Conjugation*
 T.D. Lee, R. Oehme, and C.N. Yang, *Physical Review* 106, 340 (1957).
- [22] *Experimental Observation of Antideuteron Production*
 T. Massam, Th. Muller, B. Righini, M. Schneegans, and A. Zichichi, *Nuovo Cimento* 39, 10 (1965).
- [23] *The Roots of LEP and LHC*
 R. Aymar, L. Cifarelli, L. Rossi and M. Vivargent, on the occasion of the 50th Anniversary of CERN. In honour of A. Zichichi in recognition for his important contributions to INFN and Italian Particle Physics and to CERN and European Particle Physics. CERN/DG-2004-306/0 (1 September 2004).