

L. Bonolis, D. Cocolicchio, *I Premi Nobel 2004 per la Fisica e la teoria della libertà asintotica delle interazioni forti*, Atti del XXV Congresso Nazionale di Storia della Fisica e dell'Astronomia, Milano, 10-12 novembre 2005, (Milano: SISFA, 2008): C04.1-C04.7.

I PREMI NOBEL 2004 PER LA FISICA E LA TEORIA DELLA LIBERTÀ ASINTOTICA DELLE INTERAZIONI FORTI

LUISA BONOLIS, DECIO COCOLICCHIO
 Università della Basilicata, Potenza
 Laboratori Nazionali dell'INFN di Frascati

La comunicazione affronta il dilemma dell'attribuzione della spiegazione del fenomeno della "libertà asintotica" nella teoria delle interazioni forti, oggetto del Premio Nobel per la Fisica 2004. Una storia piena di controversie, errori e contraddizioni, le cui implicazioni sono ancora tutte da esplorare ed in cui è rilevante il contributo dei fisici teorici italiani.

IL PREMIO NOBEL PER LA FISICA 2004

In uno dei rari casi in cui non siano state preferite ricerche sperimentali, il Premio Nobel per la Fisica per il 2004 è stato assegnato a *David Gross*, *Frank Wilczek* e *David Politzer*, riconoscendo il loro contributo alla teoria delle interazioni forti che descrive come i quark siano legati insieme a formare i protoni, i neutroni nonché tutte le altre particelle adroniche subnucleari.

Nella primavera del 1973, *Gross* e *Wilczek* a Princeton, e *Politzer*, indipendentemente a Harvard, con pubblicazioni apparse una [1] di seguito l'altra [2] su *Physical Review Letters*, analizzando le proprietà di alcune classi di Teorie Quantistiche di Campo, hanno contribuito alla soluzione del problema dell'interazione tra i quark che si attraggono sempre più debolmente al decrescere della loro separazione. La giustificazione teorica di questa caratteristica, nota come "libertà asintotica" ("*asymptotic freedom*" in inglese), ha permesso l'affermazione della Quanto-Cromo-Dinamica (QCD) come la teoria corretta della forza nucleare forte, una delle forze fondamentali presenti in Natura. Come vedremo, questa teoria ha molti padri nobili tra cui merita di essere citato *Gerard 't Hooft* che appare aver accennato per primo a un tale risultato durante un commento al termine del seminario di *Kurt Symanzik* nella Conferenza di Marsiglia del giugno 1972 [3]. Tuttavia, i risultati di *'t Hooft* non si diffusero sino a che non furono successivamente pubblicati [4]. In ogni caso, *'t Hooft* già nel 1999 era stato insignito (con *Martin Veltman*) del Premio Nobel per la prova della rinormalizzabilità delle Teorie di Campo à la Yang-Mills.

Al tempo della scoperta, *Wilczek* aveva 21 anni ed era uno studente di Princeton che preparava la sua tesi con la supervisione di *Gross*, che stava cercando di completare la prova che tutti i modelli in Teoria di Campo non riuscissero a descrivere il comportamento asintotico delle interazioni forti [5, 6, 7, 15]. Nella sua illustrazione della scoperta David Gross ha descritto bene la sua sorpresa [15, p. 203]: "Per me la scoperta della libertà asintotica fu totalmente inattesa. Come un ateo che abbia ricevuto un messaggio da un rogo ardente, sono divenuto un convinto credente."

Politzer aveva 23 anni e al termine dei suoi studi a Harvard, alla ricerca di un bel tema per la sua tesi, propose al suo relatore *Sidney Coleman* di volersi dedicare agli effetti quantistici in alcuni promettenti teorie di grande unificazione [8]. Attualmente *Gross* è il Direttore dell'Istituto Kavli di Fisica Teorica (KITP) dell'Università di California a Santa Barbara, *Wilczek* dal 2000 è un professore del MIT di Boston, e dal 1976 *Politzer* è professore di Fisica Teorica al California Institute of Technology (Caltech).

Delle quattro forze fondamentali, la forza nucleare forte è stata, e resta, l'interazione meno compresa e forse più studiata dopo i numerosi risultati sperimentali raccolti allo Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) e parzialmente ai Laboratori Nazionali di Frascati, che confermarono la struttura composita del protone e di tutte le altre particelle adroniche. L'urto ad alte energie di elettroni su protoni per sondare la struttura degli adroni manifestava un comportamento inatteso dei componenti, come se l'energia trasferita ai quark li inducesse a muoversi (o meglio ad acquistare energia ed impulso) come se fossero particelle libere. Prima di questo risultato, ci si attendeva che i quark sollecitati emettessero energia con un rapido smorzamento.

I risultati sperimentali risultarono invece consistenti con la proposta di *Richard Feynman* che i costituenti il protone (da lui chiamati partoni piuttosto che quark ad alte energie divenissero "asintoticamente liberi", non soggetti quasi ad alcuna forza. Qualunque fosse la nomenclatura, si poneva a tutta una generazione di fisici teorici, la delicata questione di descrivere una forza nucleare tanto forte da tenere insieme i quark per formare le particelle ma poco intensa a più piccole distanze da risultare consistente con i risultati degli esperimenti degli acceleratori. Si era diffusa la sensazione che non fosse possibile una descrizione delle interazioni forti nell'ambito della Teoria Quantistica di Campo, malgrado gli enormi successi della Quanto-Elettro-Dinamica (QED) in grado di spiegare le proprietà del "Lamb shift" e del momento magnetico anomalo dell'elettrone, ma che non aveva avuto pratiche applicazioni nella fisica delle particelle elementari ed era impiegata con sempre maggiore sospetto soprattutto da quando Landau aveva osservato che le correzioni quantistiche rendevano inevitabile la presenza di singolarità. A dire il vero, a quel tempo erano già state formulate Teorie Quantistiche di Campo grosso modo rinormalizzabili, seguendo gli ingredienti del prototipo di successo della QED.

La teoria delle perturbazioni, e in generale ogni espansione asintotica, segue una ben precisa procedura:

- calcolo delle correzioni quantistiche di ordine sempre maggiore;
- somma dei termini dello sviluppo perturbativo;
- selezione dei termini divergenti;
- regolarizzazione (isolamento dei termini divergenti);
- rinormalizzazione (eliminazione o cura delle divergenze per mezzo della ridefinizione dei parametri iniziali).

Tale procedura di rinormalizzazione era stata sviluppata con successo per rimuovere le divergenze che nascevano dai calcoli in QED. Grazie a questa procedura di sottrazione, le divergenze possono essere rimosse con una opportuna ridefinizione, di campi, accoppiamenti (cariche e masse). Tuttavia, uno dei problemi più importanti dello sviluppo perturbativo consiste nel provare (in tutta generalità) che i risultati ottenuti in seguito a questa procedura siano indipendenti dalla scelta del gauge e dalle diverse prescrizioni di ridefinizione dei parametri (cariche, accoppiamenti, ...) della teoria. Tali ridefinizioni dei parametri risultarono invarianti per alcune trasformazioni associate a un'operazione grupale nota come "Gruppo di Rinormalizzazione". Le correzioni quantistiche di ordine maggiore inducevano sempre nuove ridefinizioni dei parametri, che (con poche eccezioni) risultavano invarianti per trasformazioni di scala. Le invarianze per trasformazioni di scala per sistemi dinamici sono note da tempo [9] e risalgono alle osservazioni di Galilei [10] se non di Leonardo da Vinci. Nel caso delle interazioni elettromagnetiche ad esempio, la carica elettrica e_0 o, equivalentemente, la

costante di struttura fine $\alpha_0 = \frac{k_0 e_0^2}{\hbar c} = \sqrt{\frac{r_{elettrone}}{r_{atomo}}}$ dove $k_0 = 1/4\pi\epsilon_0$ nel Sistema Internazionale e $k_0 = 1$ nel sistema naturale ($\hbar = 1 = c$). Considerando le correzioni quantistiche all'interazione tra due cariche elettriche avremo che il potenziale di interazione diviene:

$$V_{\text{int}}(r) = \frac{k_0 e^2(r)}{r} = \hbar c \frac{\alpha(r)}{r}$$

Gli effetti quantistici inducono una ridefinizione della carica elettrica in modo che il valore di Eddington $\alpha_0 = \frac{k_0 e_0^2}{\hbar c} = \alpha(m_e) \cong \frac{1}{137}$ prevista a grandi distanze (basse energie dell'ordine della massa dell'elettrone) aumenta sino ad un valore $\alpha = \alpha(M_z) \cong \frac{1}{128}$ a più alte energie, equivalenti alla massa del W^\pm, Z^0 (piccole distanze).

In altre parole la costante di accoppiamento α "si evolve" e si parla di costanti di accoppiamento che evolve o "running coupling constant". Nella teoria perturbativa, niente è più variabile di una costante. Un modo alternativo per ottenere questo risultato alle corte distanze si basa sul fatto che la carica si evolve secondo l'equazione del gruppo di rinormalizzazione. La running coupling constant $\alpha(\tau)$ è fissata dalla

$$\text{cosiddetta funzione beta } \beta[\alpha(\tau)] = \frac{\partial \alpha(\tau)}{\partial \tau} \quad \text{con } \tau = \ln \frac{Q^2}{\mu^2}$$

Introducendo tutte le particelle fondamentali cariche, il calcolo esplicito mostra che $\beta[\alpha(\tau)] = b\alpha^2 + \dots$ con $b = \sum_f \frac{(N_c q_f^2)}{3\pi}$ con $N_c = 1$ oppure 3 a seconda dei contributi legati alle cariche elettriche dei leptoni o dei quark.

Estendere questi risultati allo studio delle interazioni mediate dalle cariche di colore dei quark richiedeva lo sviluppo di una strategia di rinormalizzazione consistente e la risoluzione di molte altre questioni. Ad esempio, ad energie molto alte ci si attende una restaurazione della simmetria chirale, in pratica, ciò equivale a considerare quark senza massa. La novità principale di tali modelli era la natura non-abeliana (à la *Yang-Mills*) delle interazioni. In queste teorie (trascurando effetti anomali) *Gross, Wilczek* [1], *Politzer* [2] (e probabilmente 't Hooft prima di loro) notarono esplicitamente che si può ottenere $\beta(\alpha_s) \propto -b_s \alpha_s^2$. Mostrando che in opportune situazioni, l'accoppiamento forte α_s decresce al crescere dell'energia, si giustifica la libertà asintotica delle interazioni forti. La libertà asintotica in QCD può risultare il risultato di un calcolo senza una spiegazione fisica semplice. Tutto il marchingegno della quantizzazione e della rinormalizzazione delle teorie di gauge cospira contro la possibilità di trovare se non semplice almeno chiaro significato fisico. Una soddisfacente rappresentazione del fenomeno della libertà asintotica risale probabilmente a 't Hooft [11]. L'idea fisica di base considera le parziali analogie con la teoria della conduzione nei metalli, o meglio di un gas di particelle relativistiche soggette a un campo magnetico esterno, prestando particolare attenzione alla dominanza "para-cromomagnetica" nella polarizzabilità dei nucleoni indotta dall'autoaccoppiamento dei gluoni, in quanto mediatori dotati di carica di colore, ed impossibile tra i fotoni in QED. La prevalenza di tale contributo induce una "anti-schermatura" del colore e la libertà asintotica dell'interazione.

IL DILEMMA DELL'ATTRIBUZIONE

Nel fascicolo 26 del volume 30 di *Physical Review Letters* del 25 giugno 1973 apparvero contigue le pubblicazioni di *Gross, Wilczek* [1] e di *Politzer* [2]. Dalla lettura dei due lavori emerge che nel primo si menzionano esplicitamente i risultati dell'altro, mentre

nel secondo si accenna all'altro per aver mostrato "modelli particolari che siano stabili in regime ultravioletto e spontaneamente asimmetrici". Questo squilibrio nelle reciproche citazioni è quantomeno controverso e suggerisce di ricostruire il rapporto tra le due ricerche [5, 6, 7, 8, 12, 13, 14, 15, 17, 20, 21, 22].

La strada di *David Gross* verso la libertà asintotica era cominciata quando era studente a Berkeley, all'epoca in cui la teoria dei campi non sembrava giustificare le proprietà delle interazioni forti [7, p. 209]. Gli esperimenti sugli urti profondamente anelastici che secondo *James Bjorken* fornivano l'evidenza di costituenti elementari poco interagenti all'interno degli adroni [28, p. 56], avevano colpito profondamente *Gross*. Tuttavia il modello a partoni, non lo convinceva e nel 1970 raggiungendo Princeton, dove *Curtis Callan* e *Kurt Symanzik* stavano studiando le proprietà delle equazioni del gruppo di rinormalizzazione, si convinse che [7, p. 212-214]: "[...] solo una teoria non-interagente potesse giustificare l'invarianza esatta di scala". Sembra che solo verso la fine del 1972, *Gross* decise di concentrarsi su questo problema "per provare che ogni teoria di campo locale non era il contesto appropriato per interpretare le interazioni forti". Il piano di lavoro che si prefisse era duplice, mostrare innanzitutto che la "stabilità ultravioletta", l'annullarsi dell'accoppiamento efficace a corte distanze, in pratica la libertà asintotica, fosse necessaria per interpretare il fenomeno dell'invarianza di scala. In secondo luogo intendeva "mostrare che non ci fossero modelli non-interagenti in teoria di campo che fossero asintoticamente liberi". Nella primavera del 1973, *Callan* e *Gross* verificarono il primo aspetto [19]: "approfondendo un'idea di *Giorgio Parisi* [23] per tutte le teorie di campo rinormalizzabili, con l'eccezione delle teorie di gauge non-Abeliane" à la Yang-Mills. Nel frattempo *Frank Wilczek* aveva cominciato a collaborare con *Gross* [7, p. 202]. La libertà asintotica era diventata l'argomento della tesi di *Wilczek*, che lavorò con *Gross* su questo problema nel corso dell'autunno del 1972. Alla fine di dicembre apparve un *preprint* di *Symanzik* in cui si presentava una teoria asintoticamente libera, ma instabile, e tuttavia il lavoro si concludeva con una frase del tipo: "[...] sarebbe davvero interessante sapere se le teorie di gauge di Yang-Mills siano asintoticamente libere". Come lo stesso *Wilczek* ha raccontato: "Io ne fui terrorizzato. Vidi la mia tesi andare in fumo." [12, p. 419]. Nell'estate del 1972 il problema attrasse anche *David Politzer*, un allievo di *Sidney Coleman* ad Harvard che durante l'anno sabbatico di *Coleman* a Princeton, si propose di verificare se "il gruppo di rinormalizzazione potesse chiarire la stabilità delle teorie di Yang-Mills [...]. Il primo passo ovviamente era determinare la loro funzione beta" [8, p. 853].

Intanto, dal 19 al 23 giugno 1972, *Chris Korthas-Altes* aveva organizzato un convegno a Marsiglia sul tema della rinormalizzazione dei campi di Yang-Mills e le applicazioni nella fisica delle particelle elementari, nel corso del quale *Kurt Symanzik* presentò la necessità di una teoria di campo con una funzione beta negativa per giustificare il fenomeno dell'invarianza di scala di *Bjorken* [16]. *Gerald 't Hooft*, anche lui tra gli speakers [18], ha raccontato che al termine del seminario di *Symanzik*, fece notare come le teorie di gauge non abeliane avessero questa caratteristica e propose una espressione per la funzione β che in notazione moderna sarebbe del tipo

$$\beta(g^2) = \frac{1}{16\pi^2} \left(-\frac{11}{3}C_1 + \frac{1}{6}C_2N_{\text{scalar}} + \frac{2}{3}C_3N_{\text{fermion}} \right),$$

così che, nel caso di SU(2), 11 generi di fermioni sarebbero stati necessari per cancellare il contributo dei bosoni mediatori vettoriali ($C_1=2$, $C_3=1$) [21, p. 193]. "Symanzik mi disse che secondo lui avevo fatto un errore di segno, ma se avevo ragione dovevo pubblicare, perché era importante, se non lo avessi fatto qualcun altro lo avrebbe fatto. Sapevo di non aver fatto errori di segno (l'origine delle differenze di segno era evidente nei calcoli). [...] a parte Symanzik, le mie osservazioni non furono affatto notate" ricorda ancora *'t Hooft*. Quest'ultimo ribadisce di aver rilevato già nel 1972 il comportamento di *scaling* delle teorie di gauge non-abeliane, asserendo di averlo taciuto nel timore di indirizzare ricerche concorrenti,

tranne un cenno all'argomento fatto a *Veltman*, il quale lo convinse che il loro lavoro sulla gravità quantistica in quel momento era ben più importante.

IL CONTRIBUTO DEI TEORICI ITALIANI

I risultati di Gross, Wilczek [1] e Politzer [2] definirono gli elementi base di quella che progressivamente divenne la Quanto-Cromo-Dinamica (QCD): la teoria di gauge non-Abeliana alla Yang-Mills delle interazioni forti basata su quark colorati. La teoria si è detto ha una lunga genealogia che parte dal modello formulato da Han-Nambu e Jona-Lasinio, stranamente una delle poche citazioni presenti in comune nei due lavori [1, 2]. L'interpretazione della libertà asintotica rappresenta una delle novità più interessanti dopo i numerosi risultati sperimentali della fisica delle interazioni forti negli anni 1960, soprattutto consistente con gli inattesi risultati sperimentali degli urti fortemente anelastici ("deep inelastic scattering") di elettroni con protoni. Gli inattesi risultati di Stanford per l'urto anelastico tra elettroni e nucleoni avevano evidenziato la struttura più profonda degli adroni. Il nucleone mostrava cioè una crosta gelatinosa esterna ed all'interno dei solidi costituenti elementari di spin $1/2$ e carica elettrica frazionaria. Questi partoni dinamici sembravano confermare la rappresentazione statica del modello a quark dotati di colore. Questi risultati vennero parzialmente confermati dallo studio della produzione adronica dalle collisioni elettrone-positrone promosse da *Bruno Touschek* con la costruzione prima di ADA e poi di Adone presso i Laboratori Nazionali di Frascati. Un nuovo pionieristico punto di vista, derivante dalla teoria dei campi e promosso sempre da *Bruno Touschek*, ricorreva all'interpretazione del vuoto come dielettrico in un crogiuolo di interazioni indotte da processi di polarizzazione [27]. Questo approccio fu determinante negli sviluppi di *Nicola Cabibbo* e *Raul Gatto* di inquadrare tali problematiche nell'ambito formale della teoria di campo. A Roma, *Cabibbo* aveva fornito un contributo fondamentale alla comprensione delle interazioni deboli ed alla loro relazione con le interazioni forti mostrando l'unitarietà e la parte predominante (proporzionale al famoso angolo di Cabibbo) nelle correnti adroniche effettive. *Raul Gatto* prima a Padova, poi a Roma, in seguito a Ginevra, aveva indotto una generazione di teorici (*Sergio Ferrara*, *Aurelio Grillo*, *Massimo Testa* e soprattutto *Giorgio Parisi*) ad indagare le analogie fra i risultati del gruppo conforme nelle transizioni di fase e l'invarianza di scala del gruppo di rinormalizzazione nella fisica delle alte energie. Dalla lettura dei lavori di Gross, Wilczek [1] e di Politzer [2] emerge immediatamente il contributo fondamentale delle ricerche di *Parisi*. Gross e Wilczek [1] citano esplicitamente un suo influente risultato allora non ancora pubblicato [23]. Nella sua relazione per il conferimento del Premio Nobel, Politzer [8, p. 855] riconosce che *Giorgio Parisi* "ebbe un'influenza determinante" sulle sue ricerche e nel contempo riconosce la profonda influenza di *Nicola Cabibbo* "autore di un contributo determinante per la comprensione del legame tra interazioni deboli e forti". L'attività di *Cabibbo* e *Gatto* ispirò anche le ricerche di *Guido Altarelli* e *Luciano Maiani* che cercarono di sviluppare una descrizione in termini di campi quantizzati capace di riprodurre le predizioni dell'approccio fenomenologico di *Bjorken* e di quello qualitativo di *Feynman*, che avevano trovato conferma sperimentale nei risultati di SLAC sullo scattering altamente anelastico di elettroni su protoni [24], e di determinare la teoria in grado di riprodurre la parziale invarianza di scala osservato per le funzioni di struttura che descrivono cinematicamente il processo. Questo studio rappresenta il lavoro teorico preparatorio indispensabile per riportare la teoria delle interazioni forti nell'ambito della teoria quantistica dei campi. Una volta stabilita la QCD, *Altarelli* e *Maiani* furono poi tra i primi a usare la nuova teoria per ottenere importanti predizioni. Infatti già nel 1974 pubblicarono un lavoro che è rimasto fondamentale per la teoria dei processi deboli non leptonici [25] (ottenuti indipendentemente da *M. K. Gaillard* e *B. W. Lee*). L'approccio, fondato sullo sviluppo operatoriale ed il calcolo dei coefficienti dell'espansione in teoria delle perturbazioni, è ancora oggi il metodo usato nell'analisi

dei processi deboli non leptonici. Una menzione particolare merita il contributo di *Giuliano Preparata*, prematuramente scomparso nel 2000, che con *Richard Brandt* studiò lo sviluppo operatoriale ad alti momenti trasferiti caratteristici degli urti profondamente anelastici, in cui si mostrò che le leggi di scala di Bjorken corrispondono al comportamento più semplice immaginabile, quello della teoria libera. Riuscendo così a capire perché il modello a partoni di *Feynman* funzionasse. Questa interpretazione della libertà asintotica in funzione della dinamica dei partoni, la cui natura era riconducibile a quella statica dei quark [26, p. 76].

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare Giorgio Parisi per aver attirato la loro attenzione su questo tema e per l'attenta rilettura del testo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Gross, David J.; Wilczek Frank (1973). "Ultraviolet Behavior of Non-abelian Gauge Theories", *Physical Review Letters*, 1973, 30: 1343-1346. Ricevuto il 27 aprile 1973, apparso nel fascicolo n. 26 del 25 giugno 1973.
- [2] Politzer, H. David (1973). "Reliable Perturbative Results for Strong Interactions?", *Physical Review Letters* 30 (1973) 1346-1349. Ricevuto il 3 maggio 1973, apparso nel fascicolo n. 26 del 25 giugno 1973.
- [3] Korthals-Altes C. P. (a cura di) (1974), *Proceedings of the Marseille Conference, Colloquium on Renormalization of Yang-Mills Fields and Applications to Particle Physics, 19-23 June 1972* (Marsiglia: CNRS, 1974).
- [4] 't Hooft Gerard (1973). "The Dimensional Regularization and the Renormalization Group", *Nuclear Physics* 1973, B61: 455-468; 't Hooft Gerard (1973). "An Algorithm for the Poles at Dimension Four in the Dimensional Regularization Procedure", *Nuclear Physics*, 1973, B62: 444-460.
- [5] Gross David J. (2005). Nobel Lecture: "The Discovery of Asymptotic Freedom and the Emergence of QCD", *Reviews of Modern Physics*, 2005, 77: 837-849.
- [6] Wilczek, Frank (2005). Nobel Lecture: "Asymptotic Freedom: From Paradox to Paradigm", *Reviews of Modern Physics*, 2005, 77: 857-870.
- [7] Gross, David, (1997). "Asymptotic Freedom and the Emergence of QCD", [29]: 199-232.
- [8] Politzer H. David (2005). Nobel Lecture: "The Dilemma of Attribution", *Reviews of Modern Physics*, 2005, 77 : 851-856.
- [9] Jackiw, R. (1972), "Introducing Scale Symmetry", *Physics Today*, 1972, 25: 23-27.
- [10] Peterson, M. A. (2002). "Galileo Discovery of Scaling Laws, *American Journal of Physics*, 2002, 7: 575-580; Greenberger, D. M. (1978). "Esoteric Elementary Particle Phenomena in Undergraduate Physics – Spontaneous Symmetry Breaking and Scale Invariance", *American Journal of Physics*, 1978, 46: 394-398.
- [11] Hughes, R. J. (1980), "Some Comments on Asymptotic Freedom", *Physics Letters*, 1980, B97: 246-248; Hughes, R. J. (1981). "More Comments on Asymptotic Freedom", *Nuclear Physics*, 1981, B186: 376-396; Nielsen, N. K. (1981). "Asymptotic Freedom as a Spin effect", *American Journal of Physics*, 1981, 49: 1171-1178.
- [12] Crease, R. P.; Mann, C. C. (1987); *Alla ricerca dell'uno*, (Milano: Arnoldo Mondadori Editore, 1987).
- [13] Pickering, A. (1984). *Constructing Quarks: A Sociological History of Particle Physics* (Chicago: University of Chicago Press, 1984).
- [14] 't Hooft, Gerard (1999). "When was Asymptotic Freedom Discovered? or The Rehabilitation of Quantum Field Theory" (Talk delivered at the QCD Euroconference 98 on Quantum Chromodynamics, Montpellier, France, 2-8 July 1998), *Nuclear Physics*, 1999, B74 (Proc. Suppl.): 413-425.
- [15] Gross, D. (2004). "Asymptotic Freedom and QCD—a Historical Perspective", *Nuclear Physics*, 2004, B135 (Proc. Suppl.): 193–211.
- [16] Symanzik, K. (1974). "On theories with Massless Particles," [3].

- [17] Susskind, L. (1977). "Quark Confinement", [29]: 233-242.
- [18] 't Hooft, G.; Veltman, M.J.C. (1974). "Example of a Gauge Field Theory", [3]; 1-38; preprint CERN-TH 1571, 17 Ottobre 1972.
- [19] Callan, C. G.; Gross, D. J. (1973), "Bjorken Scaling in Quantum Field Theory", *Physical Review*, 1973, D8: 4383-4394.
- [20] Gross, David J. (1999). "Twenty Five Years of Asymptotic Freedom", (Talk delivered at the QCD Euroconference 98 on Quantum Chromodynamics, Montpellier, France, 2-8 July 1998) *Nuclear Physics*, 1999, (Proc. Suppl.) 74: 426-446.
- [21] Hooft, G. 't (1997). "Renormalization of Gauge Theories", [29]: 179-198.
- [22] Intervista con G. Parisi in Bonolis, L.; Melchionni, M. G., (2003) (a cura di), *Fisici italiani del tempo presente* (Venezia: Marsilio, 2003): 293-335.
- [23] Parisi, G. (1973). "Deep Inelastic Scattering in a Field Theory with Computable Large-Momenta Behavior", *Lettere al Nuovo Cimento*, 1973, 7: 84-88.
- [24] Altarelli, G.; Maiani, L. (1972), "Hadron multiplicities in a scaling model for e+e-annihilation", *Physics Letters*, 1972, 41B: 480- 484; "Deep inelastic processes in ladder models", *Nuclear Physics*, 1973, B51: 509-534; "Deep-inelastic one-particle inclusive processes in the parton model", *Nuclear Physics*, 1973, B56 477-460.
- [25] Altarelli, G., Maiani, L. (1974). "Octet enhancement of non-leptonic weak interactions in asymptotically free gauge theories", *Physics Letters*, 1974, 52B: 351-354.
- [26] Preparata, G. (2002). *Dai quark ai cristalli* (Torino: Bollati Boringhieri, 2002).
- [27] Bonolis, L., "Bruno Touschek vs Machine Builders. AdA, the first matter-antimatter collider", *La Rivista del Nuovo Cimento*, 2006.
- [28] Bjorken, J. D. (1969). "Current Algebra at Small Distances," in Steinberger, J. (a cura di) (1969). *Proceedings of the International School of Physics 'Enrico Fermi', Course XLI* (New York: Academic Press, 1969): 55-81.
- [29] Hoddeson, L.; Brown, L.; Riordan, M.; Dresden, M. (a cura di) (1997). *The Rise of the Standard Model*, (Cambridge University Press, 1997).