

## UNA RIVOLUZIONE CULTURALE NEL MONDO DEGLI ACCELERATORI DI PARTICELLE: BRUNO TOUSCHEK E IL PRIMO ANELLO DI COLLISIONE MATERIA-ANTIMATERIA di Luisa Bonolis

*Dopo una breve panoramica sull'evoluzione delle macchine acceleratrici, viene ricostruito il periodo che ha preceduto il memorabile seminario tenuto da Bruno Touschek nei Laboratori di Frascati il 7 marzo 1960, durante il quale il fisico viennese espose le potenzialità innovative dei processi di annichilazione elettrone-positrone. 'idea di AdA, il primo prototipo di collider materia-antimateria, nasceva in contrapposizione al tipo di macchine e alla fisica che all'epoca venivano proposte dal gruppo di Stanford-Princeton guidato da Gerald O'Neill. Il doppio anello elettrone-elettrone degli americani entrerà in funzione quando ormai AdA avrà aperto quella che diverrà la via maestra per una nuova generazione di macchine acceleratrici.*

### LO SVILUPPO DELLE MACCHINE ACCELERATRICI

La crescente comprensione della fisica delle particelle elementari, particolarmente negli ultimi 60 anni circa, è andata di pari passo con l'evoluzione degli acceleratori di alta energia assieme allo sviluppo di adeguati rivelatori.

Nei primi anni del '900 Ernest Rutherford utilizzava particelle alfa provenienti dal decadimento di sorgenti radioattive per bombardare l'idrogeno. Le alfa emesse in modo naturale hanno un'energia di diversi MeV, più alta di quella ottenibile con i vari tipi di generatori elettrostatici ad alta tensione inventati verso la fine del secolo XIX. Come è noto, la sorprendente evidenza di deflessioni a grande angolo subita dalle particelle alfa nell'attraversare la materia indusse Rutherford a ipotizzare l'esistenza del nucleo atomico nel 1911. L'accelerazione di particelle tra due terminali ad alta tensione era stata presa in considerazione, ma all'epoca non veniva considerata competitiva rispetto all'energia di cui erano dotate le particelle alfa provenienti da fonti naturali. Soltanto nei primi anni '30 Cockcroft e Walton inventarono un acceleratore elettrostatico a moltiplicazione di tensione che fu utilizzato per accelerare artificialmente le particelle alfa e studiare il comportamento della materia a livello nucleare. Con questo tipo di acceleratore fu ottenuta la prima trasmutazione di un nucleo, il più antico esempio di una nuova categoria di test per  $E=mc^2$ . Nello stesso periodo l'americano R. J. Van de Graaff inventò un generatore elettrostatico che utilizzava una cinghia in movimento per trasportare cariche ad un terminale che poteva raggiungere circa 10 milioni di volt. Questo tipo di acceleratori

sono tuttora utilizzati come sorgenti di particelle a bassa energia, ma sono inevitabilmente limitati nella loro capacità di produrre alte tensioni. La massima differenza di potenziale ottenibile è determinata dalla condizione che il campo elettrico non superi in alcun punto la rigidità elettrica del mezzo nel quale opera la macchina. Gli acceleratori odierni suppliscono a questo inconveniente attraverso ripetute accelerazioni fra terminali a una tensione di pochi milioni di volt. Tali terminali formano le facce esterne di un cilindro risonante, la cosiddetta cavità a radiofrequenza.

Un'alternativa all'uso dei campi elettrici è quella di fare uso del fatto che le particelle vengono accelerate in un campo magnetico variabile nel tempo come se fossero una corrente nel circuito secondario di un trasformatore. Esistono due possibilità di questo tipo: l'acceleratore circolare, concepito dall'ingegnere elettrico Rolf Wideröe nel 1923-25 e l'acceleratore lineare, sviluppato ugualmente da Wideröe a partire da un'idea dello svedese Gustav Ising nel 1924, che superava il problema della scarica utilizzando una serie di elettrodi cilindrici cavi.

Energie superiori a circa 10 MeV non sono ottenibili per via elettrostatica. Il ciclotrone, inventato da Ernest Lawrence nel 1930, fu la prima macchina a superare tale limite. Utilizzava un campo magnetico per indurre le particelle a curvare e si basava sul ben noto principio che il periodo dell'orbita di particelle cariche non relativistiche costrette a seguire un'orbita circolare in presenza in un campo magnetico uniforme è indipendente dall'energia. Se un campo elettromagnetico oscillante sincrono con la frequenza di rivoluzione viene applicato in una piccola

zona di spazio (*gap* o *intervallo*) all'interno del campo, le particelle guadagnano energia tutte le volte che attraversano l'intervallo e compiono un moto a spirale uscendo fuori dal magnete. Questo accade perché il campo magnetico nel caso dei ciclotroni resta costante.

Ciclotroni sempre più grandi furono costruiti negli anni successivi e fin dall'inizio furono impiegati anche per scopi medici, fornendo isotopi radioattivi per gli ospedali e traccianti biologici per indagini cliniche. Il ciclotrone da 184 pollici di Berkeley, progettato per accelerare il deuterio ad energie superiori ai 100 MeV fu poi destinato alla separazione di isotopi per scopi militari. Tuttora queste macchine vengono utilizzate ovunque, principalmente per applicazioni mediche, industriali e per la fisica nucleare. Tuttavia quando le particelle diventano relativistiche la frequenza orbitale diminuisce limitando anche in questo caso l'energia massima raggiungibile. Un nuovo passo avanti fu fatto durante la guerra, quando D. W. Kerst e R. Serber costruirono il betatrone, un acceleratore per elettroni, il cui principio era stato già delineato da Wideröe e la cui topologia era simile a quella del ciclotrone, ma il fascio di particelle si manteneva in un'orbita circolare a raggio costante, invece di muoversi lungo una spirale. Il principio del ciclotrone falliva per gli elettroni, il cui moto diventa relativistico già ad energie moderate. Per la metà degli anni '40 i betatroni, facevano una notevole concorrenza ai ciclotroni, sorpassandoli in energia e divenendo sempre più grandi. Nonostante ciò, anche i più grandi ciclotroni e betatroni risultavano ancora inadeguati per fare ricerca nel campo della fisica delle particelle. L'energia massima di un betatrone è nettamente limitata dalla radiazione di sincrotrone, emessa dagli elettroni accelerati nell'orbita circolare. Esiste quindi un'energia limite, alla quale l'energia irradiata in un giro eguaglia quella fornita dal campo accelerante. In pratica, è difficile superare l'energia di circa 300 MeV o poco più. Per la loro semplicità di funzionamento e soprattutto per l'alta intensità ottenibile, betatroni con energie massime fino a circa 50 MeV sono oggi largamente usati come sorgenti dei raggi X in impianti di radioterapia. Restava il fatto che a quell'epoca i raggi cosmici costituivano ancora la fonte privilegiata di eventi ad alta energia e fino all'inizio degli anni '50 continuarono a giocare un ruolo

fondamentale rivelando l'esistenza di una gran quantità di nuove particelle, che oltre a formare un vero e proprio "zoo", misero per anni a dura prova le capacità di interpretazione dei fisici teorici.

Un nuovo balzo verso energie ancora maggiori fu reso possibile da nuovi sviluppi concettuali e tecnici. La scoperta del principio del sincrotrone fatta dal fisico australiano Mark Oliphant nel 1943 aveva aperto la strada a una nuova serie di acceleratori circolari. L'uso di un anello magnetico a campo variabile poteva costringere le particelle a muoversi lungo un'orbita a raggio di curvatura costante all'aumentare della loro energia nel corso di accelerazioni successive, impresse da un campo elettrico alternato applicato fra elettrodi cavi coassiali. La scoperta del cosiddetto principio della stabilità di fase, enunciato indipendentemente da E. M. McMillan (1945) e V. I. Veksler (1944) rese superato l'approccio quasi brutale utilizzato fino a quell'epoca per accelerare le particelle. Il principio, che consentiva di ottimizzare al massimo la sincronizzazione tra la fase della radiofrequenza acceleratrice e i tempi di transito dei pacchetti di particelle all'aumentare dell'energia delle particelle, consentì la costruzione di nuovi tipi di macchine, in cui, in linea di principio, le particelle potevano ormai essere accelerate a energie arbitrariamente elevate. Infatti, i primi tentativi di superare la barriera relativistica dei ciclotroni seguirono subito la scoperta della stabilità di fase. I sincrociclotroni che andarono in funzione tra la fine degli anni '40 e i primi anni '50 sia negli USA, che in Europa e in Russia, consentirono un notevole balzo in avanti nelle ricerche fondamentali. A quell'epoca le macchine stavano avviandosi a prendere il sopravvento sulle indagini condotte con tecniche diverse attraverso lo studio dei raggi cosmici.

I primi sincrotroni erano macchine per elettroni, ma verso la fine degli anni '40 furono messi in cantiere negli Stati Uniti grandi protosincrotroni, come il Bevatrone (5/6 GeV) di Berkeley e il Cosmotrone (2.5/3 GeV) di Brookhaven. Queste macchine ponevano gli americani alla frontiera della fisica delle alte energie. L'era dei grandi sincrotroni era iniziata, ma un nuovo fondamentale sviluppo era alle porte.

Il principio del foccheggiamento forte, scoperto indipendentemente da N.

Christofilos e dal gruppo di E. D. Courant, M. S. Livingston e H. S. Snyder nel 1952, rappresentava un nuovo metodo di focalizzare il fascio di particelle attraverso una sequenza alternata di lenti magnetiche convergenti e divergenti che estendeva enormemente il range delle energie ottenibili senza forte dispendio economico. Il principio fu subito applicato al grande protosincrotrone da 10 GeV in costruzione nel neonato CERN di Ginevra, ottenendo allo stesso costo una macchina da 25 GeV.

### L'AVVENTO DEGLI ANELLI DI ACCUMULAZIONE

L'avvento del focheggiamento forte stimolò l'immaginazione dei costruttori di acceleratori. Il gruppo MURA (*Midwestern Universities Research Association*) con sede a Chicago pensò di combinare un campo crescente gradualmente in direzione radiale con il focheggiamento forte. L'idea, proposta nel 1956 quasi contemporaneamente da da K. Symon e D. Kerst, sembrava promettere intensità del fascio ed energie mai raggiunte fino ad allora. Di fatto i cosiddetti acceleratori FFAG (*Fixed Field Alternating Gradient*) non furono mai costruiti, se non in forma di piccoli prototipi. L'*escalation* verso le alte energie era entrata in una fase in cui gruppi di specialisti nella nuova professione di costruire macchine acceleratrici esploravano nuove idee e pensavano al futuro. Nel 1956 Donald Kerst propose di collegare due FFAG in modo da dirigere due fasci di particelle della stessa energia l'uno contro l'altro. Questa circostanza avrebbe fatto sì che due acceleratori da 21.6 MeV sarebbero diventati equivalenti a una singola macchina a bersaglio fisso da 1000 MeV.

Già da tempo era apparso infatti chiaro che facendo collidere due fasci uno contro l'altro, tutta la loro energia si rende disponibile all'atto della collisione. Negli acceleratori convenzionali invece, dove le particelle accelerate a una certa energia collidono contro un bersaglio fisso, si dispone di una energia disponibile nel centro di massa che cresce soltanto con la radice quadrata dell'energia dell'acceleratore. Nella collisione la differenza tra l'energia totale e l'energia disponibile nel centro di massa viene "sprecata": è l'energia cinetica del centro di massa (proiettile + particella ferma nel bersaglio), che si conserva nelle reazioni.

Tutta la fisica dipende invece da E, l'energia del moto relativo disponibile appunto nel centro di massa. Questa è l'energia che interessa lo sperimentatore per la produzione di nuovi eventi. La percentuale di spreco cresce con l'energia iniziale delle particelle in moto. L'energia disponibile nel centro di massa per un urto di una particella di energia  $E_0$  contro un bersaglio fermo di massa  $m$  è  $E_{CM} = \sqrt{2mE_0}$ . La frazione utile è perciò soltanto  $\sqrt{\frac{2m}{E_0}}$ , decrescente con  $E_0$ . Il

cosiddetto "vantaggio cinematico" avrebbe consentito un grosso risparmio nell'impianto acceleratore. Wideröe aveva riflettuto a questo concetto durante la guerra, mentre lavorava ad Amburgo alla costruzione del primo betatrone europeo da 15 MeV. A quell'epoca Bruno Touschek, allora ancora studente, aveva iniziato a collaborare con lui a una serie di problemi teorici. Wideröe aveva anche considerato la possibilità che le particelle da far collidere potessero essere accumulate in un anello, anche se all'epoca non era affatto chiaro come si potessero accumulare fasci sufficientemente intensi per ottenere tali collisioni. Aveva addirittura brevettato l'idea, nonostante Touschek gli avesse detto chiaramente che secondo lui la cosa era troppo "ovvia" per essere oggetto di un brevetto. A metà degli anni '50 le idee di Wideröe vennero riscoperte, anche se nessuno menzionava i suoi lavori perché i brevetti erano rimasti segreti fino al 1952.

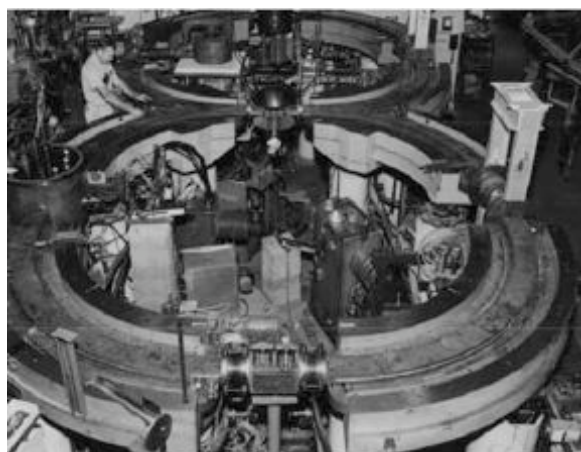
Nel 1956 la prima di una serie di conferenze internazionali sugli acceleratori di alta energia fu tenuta a Ginevra. Kerst ripropose l'idea di usare gli FFAG per accumulare e far collidere protoni. Queste macchine apparivano ai loro occhi come l'unica possibilità aperta al momento per studiare reazioni a livelli di energia dell'ordine del TeV. Queste stesse idee vennero adattate agli elettroni da Gerard O'Neill. Anche lui era interessato alle collisioni protone-protone, ma la costruzione di una macchina per elettroni avrebbe permesso di risolvere una serie di problemi tecnici che per il momento non sarebbe stato possibile superare per una macchina a protoni. Anche lui proponeva una macchina a due anelli, alimentata da un elettrosincrotrone allo scopo di studiare le interazioni elettrone-elettrone a energie nel centro di massa circa 100 volte maggiori di quelle all'epoca disponibili. Queste idee

apparvero nella sezione “Nuove idee di macchine acceleratrici” del convegno di Ginevra e furono riproposte più in dettaglio nel secondo convegno dedicato agli acceleratori di particelle tenuto di nuovo a Ginevra nel settembre del 1959, quando O'Neill espose il progetto ormai in fase di realizzazione di una macchina a doppio anello che avrebbe non soltanto messo in atto l'idea di sfruttare il “vantaggio cinematico” attraverso la collisione di due fasci di particelle accumulate, ma avrebbe consentito di effettuare un test di validità dell'elettrodinamica quantistica a energie molto elevate (ovvero ad alti momenti trasferiti). *Last but not least*, la macchina sarebbe stata un banco di prova in vista della realizzazione dei tanto sospirati collider a protoni. I problemi riguardanti l'accumulazione e la collisione di due fasci di elettroni ad alta intensità furono definitivamente risolti nel 1963, e i risultati sulle collisioni  $e\bar{e}$  furono prodotti nel 1965.<sup>1</sup> A quell'epoca a Novosibirsk stava andando in funzione un collider elettrone-elettrone, VePP-1, la cui costruzione era iniziata nel 1962.

A Ginevra, la prima relazione nella sessione “*The need for new particle accelerators*” era stata tenuta da Wolfgang Panofsky, all'epoca impegnato nella costruzione del gigantesco acceleratore lineare di Stanford da 700 MeV. Parlando del futuro degli acceleratori ad alta energia Panofsky aveva elencato una serie di possibili esperimenti sui limiti di validità dell'elettrodinamica quantistica, un campo della fisica delle particelle elementari dove esperimento e teoria erano in esatto accordo quantitativo nell'ambito dell'intero *range* di energie esplorate fino a quel momento. Acceleratori sempre più potenti e sempre più giganteschi occupavano i sogni dei costruttori di macchine, la cui l'attenzione era rivolta in generale alla possibilità di raggiungere energie molto alte nel centro di massa nella speranza di scoprire nuove particelle e di poterle studiare le proprietà. Le macchine avevano ormai definitivamente spodestato i raggi cosmici e dominavano il settore della ricerca nel campo della fisica fondamentale. Nel corso della sua relazione dedicata

all'utilizzazione dei fasci collidenti dal punto di vista sperimentale L. W. Jones aveva sottolineato che la fisica a energie tra i 10 e i 30 GeV nel centro di massa sembrava ancora lontana e che quindi era possibile che esperimenti e tecniche interessanti da questo punto di vista *non fossero stati ancora concepiti*.

In quello stesso periodo, verso la fine del 1958, il primo elettrosincrotrone italiano era stato completato nei Laboratori Nazionali di Frascati, vicino Roma, e un pieno regime di sperimentazione venne raggiunto nella seconda metà del 1959. Il sincrotrone italiano era una delle tre macchine più potenti al mondo nel suo genere, le altre due si trovavano negli USA, a Cornell e a Caltech. Verso la fine del 1959 il direttore dei laboratori, Giorgio Salvini, promosse una serie di incontri e seminari allo scopo di discutere un programma di sviluppo per entrare in una nuova fase di attività. Nel frattempo, quello stesso autunno, Wolfgang Panofsky tenne un seminario nell'Istituto di Fisica di Roma dove presentava le attività in corso a Stanford. Naturalmente parlò della macchina ad anelli tangenti per elettroni in corso di realizzazione. La proposta di O'Neill certamente combinava due obiettivi importanti: intensità dei fasci e collisione fascio-fascio. Gli elettroni accelerati da un elettrosincrotrone sarebbero stati accumulati nei due anelli, dotati di una comune sezione diritta dove si sarebbero scontrati.



Il collider a doppio anello elettrone-elettrone da 500 MeV costruito a Stanford a partire dal 1959. I risultati sulla verifica dell'elettrodinamica furono pubblicati solo nel 1966.

Lui stesso ammetteva che “Il potenziale fisico della macchina era limitato. L'elettrodinamica quantistica poteva essere effettivamente verificata a distanze

<sup>1</sup> W. C. Berber, B. Gittelman, G. K. O'Neill, and B. Richter, “Test of quantum electrodynamics by electron-electron scattering”, *Phys. Rev. Lett.* **16** (1966) 1127-1130.

ravvicinate mai raggiunte prima, ma soltanto uno o due esperimenti specifici (ricerca di  $e^- + e^- \rightarrow \mu^- + \mu^-$ , per esempio) potevano essere realizzati".<sup>2</sup> In effetti nelle collisioni tra elettroni la carica totale deve conservarsi nei prodotti della reazione e questo pone un limite preciso ai risultati finali. Dopo il seminario seguirono molte discussioni sulla costruzione di macchine e furono fatte a Panofsky diverse domande. Touschek parlò più di una volta.<sup>3</sup> Certamente doveva essere incuriosito da questi temi, ma è ragionevole pensare che i concetti di vantaggio cinematico e accumulazione di particelle non lo colpissero particolarmente, considerando la sua familiarità con queste idee fin dai primordi della sua vita scientifica. "Rispondendo a una domanda, Panofsky menzionò [ma la motivazione resta un po' oscura] che, per verificare il propagatore dell'elettrone (piuttosto che quello del fotone), le collisioni elettrone-positroni sarebbero state particolarmente opportune, attraverso l'osservazione dell'annichilazione in due fotoni, ma che tale sviluppo poteva presentare difficoltà tecniche aggiuntive e che per il momento era stato rimandato"<sup>4</sup> [corsivo mio]. Lo stesso Burton Richter, che all'epoca faceva parte del progetto di costruzione degli anelli tangenti, ha ricordato che certamente l'annichilazione elettrone-positrone offriva una via per studiare l'elettrodinamica quantistica attraverso lo scattering elastico, ma che al momento il gruppo ritenne di "avere già abbastanza problemi nello sviluppo di questa tecnologia per il sistema elettrone-elettrone."<sup>5</sup> Sembra quindi che le collisioni elettrone-positrone siano state menzionate durante la discussione. Non soltanto questo tipo progetto, secondo lo stesso Panofsky, appariva di difficile realizzazione, ma è evidente che il discorso ruotava principalmente intorno alla verifica dell'elettrodinamica. Un tema che certamente

non sollecitava l'interesse di Touschek, come ha sempre ribadito Carlo Bernardini: "Touschek aveva una grande fiducia nella QED"<sup>6</sup> e non riteneva che sarebbero state trovate eclatanti deviazioni rispetto alle verifiche effettuate fino a quel momento. "His boundless enthusiasm for particle-antiparticle collisions was dominated by a sense of perfect and intellectual esthetics, and rivaled only by his contempt for the other and more mundane alternatives of collisions of electron with electrons or of protons with protons being explored at that time for instance by Jerry O'Neill, Andy Sessler and others".<sup>7</sup>

L'esploratore della geometria del microcosmo subatomico, corrispondente a oggetti di dimensioni dell'ordine di  $10^{-15}$  m, era Robert Hofstadter, a Stanford. Con le sue ricerche sui fattori di forma dei nucleoni aveva completato all'epoca un programma di ricostruzione delle strutture del protone e del neutrone utilizzando un acceleratore lineare di elettroni da 500 MeV per eseguire esperimenti di scattering elastico. Tuttavia, come aveva osservato Panofsky nel corso di un convegno tenuto a Ginevra nel 1958, mentre discuteva i limiti dell'elettrodinamica quantistica: "In dealing with e-p scattering we have no formal method for distinguishing nucleon structure and electrodynamics... The ambiguity between nucleon structure and electrodynamic effects can in principle be resolved by e-e scattering experiments"<sup>8</sup>. L'esperimento proposto da O'Neill si giustificava anche alla luce dell'interesse a risolvere questa ambiguità. Infatti, come aveva sottolineato lo stesso Panofsky nel corso della sua relazione alla conferenza di Ginevra del 1958, nel puntualizzare che una discussione sui limiti dell'elettrodinamica e sulla struttura nucleare non avrebbe potuto tenere i due argomenti separati: "We see from the preceding discussion that at this time there exists no direct

<sup>2</sup> B. Richter, "The Rise of Colliding Beams", in L. Brown et al. (a cura di), *The rise of the Standard Model. Particle Physics in the 1960s and 1970s* (Cambridge University Press, 1997) 261-284, p. 268.

<sup>3</sup> R. Gatto, comunicazione personale, 2 dicembre 2003.

<sup>4</sup> R. Gatto, "Memories of Bruno Touschek", in M. Greco e G. Pancheri (a cura di), *Bruno Touschek Memorial Lectures*, 69-75, p. 71 Frascati Physics Series Vol. XXXIII (2004), INFN-Laboratori Nazionali di Frascati.

<sup>5</sup> B. Richter, "The Rise of Colliding Beams", cit., p. 269.

<sup>6</sup> C. Bernardini, "Bruno Touschek and AdA", in V. Valente ed., *ADONE a milestone on the particle way* (Frascati Physics Series, 1997) 219-225, on p. 4.

<sup>7</sup> C. Rubbia, "The role of Bruno Touschek in the realization of the proton antiproton collider", in M. Greco and G. Pancheri, cit., 57-60, p. 57.

<sup>8</sup> W. K. H. Panofsky, "Nucleon structure - Experimental", in *Proceedings of 1958 Annual International Conference on high Energy Physics at Cern*, a cura di B. Ferretti (Geneva, CERN, 1958) 3-19, p. 3.

*experimental evidence which limits the validity of QED...*"<sup>9</sup>

Touschek sintetizzava questi problemi dicendo che un sistema fisico può essere caratterizzato in modo appropriato investigando la sua "geometria" e la sua "dinamica". Le ricerche sulla dimensione e la forma dei nucleoni, che fin dagli anni trenta si ritenevano dotati di una struttura di dimensioni finite, a differenza dell'elettrone, furono indagate attraverso misure di precisione dello scattering degli elettroni a partire dal 1955. A quell'epoca Hofstadter aveva pubblicato un ampio lavoro che esponeva in dettaglio i risultati delle sue ricerche.<sup>10</sup> Ma l'interesse di Touschek andava piuttosto all'esplorazione della dinamica elementare del microcosmo, che lui riteneva si sarebbe manifestata depositando energia nel vuoto: la successiva rimaterializzazione di questa energia avrebbe mostrato in che modo si generano le strutture materiali. "Nel linguaggio pittoresco di Touschek, il vuoto avrebbe mostrato su quali frequenze preferiva vibrare".<sup>11</sup>

Tutto questo spiega per quale motivo la sua reazione nell'occasione del seminario fu assai netta e si discostò immediatamente dalla linea di ricerca seguita dal gruppo di Stanford, come ha ricordato Nicola Cabibbo: "[dopo il seminario di Panofsky] quasi come commento, Bruno disse: 'Ah, ma perché non fare elettrone-positrone, sicuramente è più interessante perché elettrone e positrone si possono annihilare e poi disse: 'Ma poi è anche più pratico, perché elettrone e positrone possono girare in uno stesso anello e non hanno bisogno di due anelli...'. In quel momento lui tirò fuori la sua profonda conoscenza della fisica e quindi, naturalmente, intuì subito che sarebbe stato meglio avere urti tra particelle in cui tutta l'energia fosse stata disponibile per creare nuove particelle e, dall'altra, la sua conoscenza delle macchine. Bruno, durante la guerra, e immediatamente dopo, aveva lavorato alla costruzione di macchine

acceleratrici, quindi aveva questa doppia capacità e passava dall'una all'altra con la stessa matematica".<sup>12</sup>

Molti anni dopo Touschek esprimerà il suo pensiero a questo proposito in forma lapidaria: "*e<sup>+</sup>e<sup>-</sup> against e<sup>-</sup>e<sup>-</sup>: existence of the annihilation channel*" [corsivo mio]<sup>13</sup>.

Touschek aveva una immagine molto chiara del sistema elettrone-positrone come dotato degli stessi numeri quantici di un bosone neutro, così che ad alte energia avrebbe potuto diventare una sorgente di nuove particelle, particolarmente utile per studiare le interazioni forti e l'elettrodinamica. Touschek diceva: dobbiamo cercare di depositare una grande quantità di energia nel vuoto e eccitarne il maggior numero possibile di modi, a cominciare dalle condizioni iniziali più anonime possibile, cioè dallo stato con carica totale zero, numero leptonic e barionico nulli. La produzione di uno stato di pura radiazione ("fotone virtuale") avrebbe consentito la nascita di qualsiasi particella elettricamente carica, e quindi, disponendo di energia sufficiente, in linea di principio la collisione avrebbe potuto fornire ogni forma di materia possibile. Nelle sue stesse parole, nel consentire "*as clean a separation between strong and electromagnetic interactions as nature will allow*", l'annichilazione particella antiparticella di fatto apriva un ponte tra il mondo dei leptoni (come l'elettrone e il muone) e il mondo degli adroni (come i pioni e i nucleoni).<sup>14</sup> I positroni hanno la stessa massa ma carica opposta rispetto agli elettroni così che "nella sua mente le collisioni elettrone-positrone non erano altro che un modo di realizzare in pratica l'idea di simmetria tra materia e antimateria, nel senso più profondo dell'equazione di Dirac".<sup>15</sup> Un solo anello, quindi, avrebbe consentito lo

<sup>9</sup> W. K. H. Panofsky, "Nucleon structure – Experimental", in *Proceedings of 1958 Annual International Conference on high Energy Physics at Cern*, edited by B. Ferretti (Geneva, Cern, 1958) 3-19, p. 8.

<sup>10</sup> R. Hofstadter, F. Bumiller, and M. R. Yearian, "Electromagnetic Structure of the Proton and Neutron", *Rev. Mod. Phys.* **30**, 482-497 (1958).

<sup>11</sup> C. Bernardini, "AdA e Frascati", in *Quark 2000* (Le Scienze, 1997) 58-65, p. 60.

<sup>12</sup> N. Cabibbo, in E. Agapito e L. Bonolis, film-documentario "*Bruno Touschek e l'arte della fisica*" (MediaScienza e INFN, 2004).

<sup>13</sup> B. Touschek, "*Adone and the polarization of vacuum*" (Archivio Touschek, Dipartimento di Fisica, Università di Roma "La Sapienza", scatola 11, fasc. 3.90).

<sup>14</sup> B. Touschek, "Physics with electron storage rings", in M. Grilli (a cura di), *V International Conference on high energy accelerators*, Frascati September 9-16, 1965, (CNEN, Rome 1966) 263-265, p. 264

<sup>15</sup> C. Rubbia, "*The role of Bruno Touschek in the realization of the proton antiproton collider*", *cit.*, p. 57.

studio di una serie di reazioni prodotte dall'annichilazione degli elettroni e dei positroni. La tecnica dei fasci di collisione, preconizzata da Wideröe e aperta concretamente dai fisici americani, stava entrando in un'era concettualmente del tutto nuova. Fisica delle particelle e scalata alle alte energie stavano stringendo una nuova alleanza, delineando un sentiero nuovo, che ben presto sarebbe diventato una via maestra.

È opinione diffusa che Touschek avesse una passione per le sfide.<sup>16</sup> L'economia dei *colliders* rispetto agli acceleratori a bersagli fisso ha un prezzo: una bassa probabilità di eventi. Quando si invia un fascio su un blocco di materia, praticamente tutte le particelle del fascio hanno la possibilità di collidere contro una delle particelle nel bersaglio per dare un risultato utile. Al contrario, quando due fasci si incrociano bersaglio di ciascun fascio è l'altro fascio, che contiene una densità di materiale confrontabile a un vuoto discreto. Una gran parte dell'abilità consiste quindi nell'aumentare l'intensità di entrambe le correnti circolanti iniettando molti impulsi di particelle nell'anello prima di farle interagire, da cui il nome originario per i collider: "anelli di accumulazione". Questa prima denominazione stava a certificare che il primo problema da affrontare era quello di accumulare particelle nell'anello. Ciò introduceva un nuovo cruciale parametro: la vita media dei fasci; era necessario riuscire a tenerli circolanti per lunghi periodi senza apprezzabile perdita di energia, il che introduceva, d'altra parte, esigenze inedite sulla qualità del vuoto e sulla stabilità della tensione nell'impianto di radiofrequenza destinato all'accelerazione delle particelle. Inoltre, la speciale geometria dei collider richiedeva soluzioni innovative nella progettazione dei rivelatori.

Quindi non è sorprendente che il desiderio di cimentarsi in una sfida del genere potesse rappresentare nella mente di Touschek uno dei motivi principali per avanzare tale proposta. In effetti nessuno aveva mai ancora messo insieme un fascio di positroni di una intensità apprezzabile e lo aveva iniettato in un anello. Vale la pena ricordare che l'antimateria era a quei tempi qualcosa al limite dell'esotico, erano passati appena

cinque anni dall'annuncio della scoperta dell'antiprotone da parte di Chamberlain, Segré e Wiegand e Ypsilantis, i primi due dei quali ebbero il premio Nobel per la fisica per una "manciata" di antiprotoni, mentre ora sarebbe stato necessario ottenere dei fasci altamente collimati, estremamente sottili, che dovessero entrare in collisione in un sistema assai complesso. Per di più tali fasci avrebbero dovuto sopravvivere per ore nella camera da vuoto e avere una alta densità per far sì che la probabilità di collisione fosse non trascurabile nei punti di incontro (supponendo che si sarebbero incontrati). Allo stesso tempo queste preoccupazioni non influenzarono il suo atteggiamento mentale volto a "realizzare l'impossibile e a ...pensare l'impensabile", egli era soprattutto "attratto dalla perfezione e dalla bellezza di una macchina capace di produrre 'un vuoto eccitato'".<sup>17</sup>

Il problema principale, la possibilità di far girare due fasci di particelle di carica opposta in un unico anello per farli scontrare, prese forma con chiarezza nella mente di Touschek attraverso quello che egli considerava un forte argomento di convinzione, che egli manifestava nel suo caratteristico accento viennese, come ha ricordato più tardi Raul Gatto: "Bruno continuava ad insistere sull'invarianza CPT, che avrebbe garantito la stessa orbita per gli elettroni e i positroni nell'anello".<sup>18</sup> Carlo Rubbia ricorda quando la sua voce "risuonava nei corridoi" mentre affermava con vigore che "il positrone e l'elettrone devono incontrarsi grazie al teorema CPT". All'epoca, e finché non fu sperimentalmente dimostrato nel 1964, furono in molti a dubitare che i positroni e gli elettroni, guidati dal campo magnetico, avrebbero viaggiato nell'anello seguendo esattamente la stessa orbita di equilibrio e quindi si sarebbero incontrati periodicamente.<sup>19</sup>

<sup>17</sup> C. Rubbia, "The role of Bruno Touschek in the realization of the proton antiproton collider", *cit.*, p. 58.

<sup>18</sup> R. Gatto, comunicazione personale, 2 dicembre 2003.

<sup>19</sup> "I can tell that during the work with AdA the main contributions that our group received from the accelerator community consisted in demonstrations of the impossibility for it to work" (C. Bernardini, "Ada: the smallest e+e- ring", in M. De Maria, M. Grilli, F. Sebastiani (a cura di), *The Restructuring of physical sciences in Europe and the United States*,

<sup>16</sup> R. Gatto (comunicazione personale, 24 novembre 2004) e G. Corazza, in "Bruno Touschek e l'arte della fisica", *cit.*

Dopo il seminario di Panofsky le discussioni sulle possibilità concrete della fisica  $e^+e^-$  circolarono a Roma e a Frascati. La miglior dimostrazione di quanto furono accolte immediatamente con favore dai teorici romani le idee di Touschek su ciò che si sarebbe dovuto esplorare, furono i lavori stimolati da queste discussioni che apparvero molto presto, all'inizio del 1960. Il primo, scritto da Laurie Brown e Francesco Calogero, arrivò alla rivista *Physical Review Letters* il 5 febbraio 1960, calcolava gli effetti del fattore di forma del pione sul propagatore del fotone.<sup>20</sup> Il secondo fu inviato da Raul Gatto e Nicola Cabibbo alla stessa rivista il 17 febbraio. Nel lavoro "*Pion Form Factors from possible high-energy Electron-Positron Experiments*" gli autori esordivano: "*Recent technical developments showing the feasibility of colliding beam experiments make it appealing to think of possible direct measurements of the photon-pion vertices through processes of the sort  $e^+e^- \rightarrow n$  pions*".<sup>21</sup> Gatto ha ricordato come il lavoro fosse stato inviato alla rivista "con una debole speranza che sarebbe stato accettato".<sup>22</sup>

Alla fine dell'articolo, nel menzionare i processi di annichilazione in coppie di muoni o in due o più pioni, Brown e Calogero avevano sottolineato che "*while the positron-electron experiment appear to be the most promising for elucidating the pion form factor, electron-electron experiments will probably be done first...*".<sup>23</sup>

Nella primavera del 1960, all'epoca in cui era comparso l'articolo, sembrava che nessuno avrebbe osato pensare a elettroni e positroni circolanti in un singolo anello. Eppure il seme dell'idea stava già germogliando nella testa di Touschek, in attesa dell'opportunità di spuntare fuori come una proposta concreta.

1945-1960 (World Scientific, Singapore, 1989) 444-448, p. 445.

<sup>20</sup> L. M. Brown e F. Calogero, "*Effects of pion-pion interaction in electromagnetic processes*", *Phys. Rev. Lett.* 4 (1960), 315-317.

<sup>21</sup> N. Cabibbo e R. Gatto, "*Pion Form Factors from Possible High-Energy Electron-Positron Experiments*", *Physical Review Letters* 4 (6) 1960, 313-314.

<sup>22</sup> R. Gatto, comunicazione personale, 24 novembre 2003.

<sup>23</sup> L. M. Brown e F. Calogero, "*Effects of pion-pion interaction in electromagnetic processes*", *Phys. Rev. Lett.* 4 (6), 1960 (ricevuto il 5 febbraio) 315-317, p. 317.

L'opportunità si presentò di lì a poco.

### ADA, UN'IDEA IMPENSABILE

Diverse proposte e bozze di progetto erano state presentate a Frascati per acceleratori convenzionali a elettroni e a protoni, i "protonisti" continuavano con le loro eterne critiche contro la scelta di un elettrosincrotrone. La maggior parte dei fisici del settore non era propensa a sperimentare con elettroni, perché era molto diffusa l'idea che i fotoni fossero strumenti molto meno efficienti rispetto ai protoni per produrre particelle interagenti attraverso la forza forte. Ma la scelta fatta a suo tempo di una macchina per elettroni intendeva essere complementare al progetto che all'epoca stava prendendo forma al CERN. Le macchine acceleratrici necessitavano ormai di investimenti sempre crescenti, ben al di là delle possibilità dei singoli laboratori o delle singole nazioni. Nel clima creato dalle nuove scoperte e nel fervore della ricostruzione dell'Europa dopo i disastri delle due guerre mondiali, 14 nazioni europee (tra cui l'Italia era stata una delle più attive, particolarmente nella persona di Edoardo Amaldi) avevano fondato nel 1954 il Consiglio Europeo per la Ricerca Nucleare, prendendo la decisione di costruire un grande laboratorio comune. per rispondere alla sfida posta dalle nuove particelle e tenere il passo con Stati Uniti e Unione Sovietica.

Come lo stesso Touschek ha commentato, la scelta di costruire un elettrosincrotrone italiano era stata "una scelta coraggiosa se confrontata con la tendenza generale dei fisici che all'epoca erano orientati alla produzione di macchine a protoni". A questo proposito Touschek citava quelli che riteneva essere due motivi alla base dell'opinione di Gilberto Bernardini, principale promotore di quella iniziativa: "Il primo era quello che non si dovesse entrare in competizione con uno sforzo europeo: ci si sarebbe trovati in una posizione perdente fin dall'inizio, entrando nella lizza quando il programma era ormai in stato avanzato. La seconda ragione è più vaga e posso solo descrivere qual'era, secondo me, il pensiero di Bernardini: che la fisica con gli elettroni è 'più pura' della fisica con protoni...gli elettroni non si immischiano negli affari nucleari...I protoni sono una ricca sorgente di eventi, difficili da interpretare, perché i testimoni sono troppo coinvolti. Gli



elettroni, nell'osservare gentilmente i loro obiettivi, raramente producono eventi spettacolari, ma ciò che producono è più facilmente interpretabile".<sup>24</sup> A quell'epoca le idee di Touschek erano in effetti contrarie alle tendenze più diffuse. Lo spettacolare progresso della fisica delle alte energie avvenuto negli anni cinquanta era principalmente dovuto alla realizzazione di grandi acceleratori a protoni come il Cosmotrone (3 GeV, 1952, Brookhaven), il Bevatrone (6.2 GeV, 1954, Berkeley), e il Protosincrotrone del CERN (28 GeV), che stava appunto andando in funzione all'epoca di queste vicende.

D'altra parte, ciò che ancora non si sapeva è che i protoni sono oggetti complessi, costituiti da tre quark tenuti insieme da gluoni. Nella collisione con altri adroni l'interazione è dominata dalla forza forte, ed è difficile individuare quale dei quark o gluoni ha preso parte all'interazione. La mancanza di comprensione dell'organizzazione della materia a questi livelli ultimi rendeva oltremodo difficile l'interpretazione dei risultati. Inoltre, i quark che interagiscono trasportano soltanto una frazione dell'energia totale impartita dagli acceleratori, così che molta energia risulta sprecata. Gli elettroni, essendo puntiformi, assicurano che tutta l'energia venga messa in gioco nel produrre le particelle che interessano.



Montaggio della ciambella dell'Elettrosincrotrone nei Laboratori Nazionali di Frascati (Cortesia Archivio FotoVideo LNF)

Alla fine del '59 il sincrotrone lavorava ormai a pieno regime di sperimentazione "Allo stesso tempo, tuttavia – osservava Touschek – si manifestavano nuove preoccupazioni. In tutto il mondo nuove e più grandi macchine venivano progettate e costruite e si riteneva che se Frascati voleva tenersi al passo bisognava costruire qualcosa di più nuovo e di più grande".<sup>25</sup> Il miglior modo per sviluppare nuove idee e ambizioni per i laboratori si riteneva fosse la creazione di un gruppo teorico locale. Racconta Touschek: "Fui invitato a una riunione in cui venne discussa questa idea e sembrava anche che io fossi stato prescelto per dirigere questo gruppo. L'idea non mi piaceva. Sapeva di quello che in Germania si chiamava "il teorico di casa" ("*Haustheoretiker*"), un animale addomesticato, che vende se stesso e il poco cervello che gli resta a una istituzione sperimentale alla quale deve risultare 'utile'. Credo che i teorici siano naturalmente inclini a non essere utili: questo sottrae loro la libertà. Il teorico di casa si deve concentrare su ciò che succede nella sua istituzione, ma è già difficile avere un'idea in fisica teorica perfino di fronte alla vasta scelta di risultati sperimentali a livello mondiale. Temevo – e questa era una paura del tutto personale e forse ingiustificata – di finire con l'aver il compito di provare dal punto di vista sperimentale che a Frascati gli sforzi e il denaro fossero spesi bene; in breve il ruolo di un' 'Anticassandra', che predice il passato (e non il futuro) e che è ottimista (e non pessimista) a questo riguardo. Tuttavia, ero attratto dalla possibilità di imparare come una grande impresa come Frascati lavorava ed ero particolarmente affascinato dall'idea di avere alcuni contatti con gli aspetti tecnologici dei servizi, con le tecniche (vuoto, radiofrequenza, magneti, elio liquido e i vari meccanismi di controllo) necessari al lavoro di questa grande macchina. All'epoca mi sentivo piuttosto esaurito da un'overdose di lavoro che avevo cercato di fare nel campo più astratto della ricerca teorica: la discussione delle simmetrie che si era aperta con la scoperta della violazione di una di esse, la parità, da parte di Lee e Yang. Per questo volevo tirarmi fuori dalle nuvole e tornare con i piedi per terra, toccare cose

<sup>24</sup> B. Touschek, "Ada and Adone are storage rings" (Archivio Touschek, scatola 11, fascicolo 3.92.4) p. 5.

<sup>25</sup> B. Touschek, "A Brief Outline of the Story of AdA", note per una conferenza tenuta all'Accademia dei Lincei il 24-5-74 (Archivio Touschek, scatola 11, fasc. 92.5) p. 3.

(purché non fossero ad alta tensione) e smontarle, tornare a ciò che ritenevo di capire davvero: la fisica elementare".<sup>26</sup>

Con questo stato d'animo Touschek partecipava a una riunione indetta a Frascati il 17 febbraio 1960,<sup>27</sup> dedicata al programma di costituzione di un gruppo di teorici a Frascati. Fu il primo a prendere la parola, come riportato dal verbale: "Leggendo gli appunti delle precedenti riunioni egli [Touschek] ha avuto l'impressione di qualche incertezza circa l'attività futura di Frascati: egli ha quindi cercato di pensare ad una 'meta futura'.<sup>28</sup> Ricorda che quando fu deciso di costruire una macchina per elettroni, ciò avvenne perché le ricerche di elettrodinamica si fanno meglio con gli elettroni...Ora una esperienza che veramente vale la pena di fare, una esperienza che sarebbe veramente di punta, e che sarebbe capace di attirare i teorici a Frascati (non solo lui, ma anche Gatto e certamente altri) sarebbe un'esperienza intesa allo studio dell'urto elettrone-positrone".<sup>29</sup> Il miglior modo per realizzare al più presto questa esperienza sarebbe stato, secondo Touschek, una riconversione del sincrotrone, "con opportuni miglioramenti e modifiche". All'intervento seguì una discussione. Giorgio Ghigo fece subito notare che quella via non sembrava percorribile, mentre invece sarebbe stato più semplice costruire una macchina *ad hoc*, da 250 MeV. La discussione andò avanti animatamente sugli aspetti riguardanti la costituzione del gruppo di teorici, quando Touschek ribadì che la prospettiva di avere un rapporto costante con i Laboratori avrebbe avuto senso soltanto nel caso si fosse decisa la costruzione di nuove macchine. A questo punto Giorgio Salvini invitava Touschek a discutere la sua proposta "col gruppo macchina".

Fra le carte di Bruno Touschek conservate nell'archivio del Dipartimento di Fisica dell'Università "La Sapienza", a Roma, si trova un quaderno etichettato come "Q. L. AdA (quaderno di laboratorio)" nel catalogo

delle carte di Bruno Touschek,<sup>30</sup> sulla cui copertina compare la sigla SR, ovvero le iniziali di Storage Ring, scritta con una matita rossa, presumibilmente da Touschek. La data in prima pagina è 18 febbraio 1960, ovvero il giorno successivo alla riunione di Frascati, nel corso della quale Touschek aveva manifestato le sue idee. Appare quindi evidente che tale quaderno, che si spinge almeno fino al 25 febbraio, costituisce la prima testimonianza esplicita delle riflessioni di Touschek sull'argomento, la prima esplorazione concreta delle sue intuizioni teoriche.<sup>31</sup> Nella prima pagina, dove annota subito "State of affairs. Discussed plan with Ghigo", compare la formula per la luminosità dell'anello ("Basic formula"), il fattore di proporzionalità tra le intensità dei fasci e il numero di eventi rilevanti prodotti per unità di tempo. Touschek mostra che i parametri a disposizione sono plausibili per ottenere risultati. Nella seconda pagina Touschek annota "Chiedere a Gatto e Cabibbo" per invitarli a calcolare le probabilità dei processi di annichilazione. Nelle pagine successive Touschek affronta il problema della valutazione quantitativa della vita dei fasci calcolando la vita di un elettrone a seconda della pressione del gas residuo nella camera a vuoto. Per avere fasci accumulati per qualche decina di ore bisognava creare una camera in cui la pressione non superasse  $10^{-12}$  atomsfere. Una grossa sfida per quell'epoca. Per la luminosità gli interessa il numero di particelle che si possono accumulare in una vita media e inoltre si chiede a che velocità si sarebbero potute iniettare nuove particelle nell'anello. Il 23 febbraio inizia ad occuparsi del problema dell'iniezione, che nel seguito si presenterà particolarmente spinoso. Studia gli effetti di radiazione, che hanno un ruolo dominante, e analizza la stabilità di fase, cioè il raggruppamento in corti pacchetti degli elettroni e dei positroni lungo l'orbita, eseguendo ovunque accurati calcoli numerici.

Il 7 marzo, a Frascati, ebbe luogo uno storico seminario in cui Touschek illustrava le potenzialità dei processi di annichilazione elettrone-positrone. Il pubblico pendeva dalle sue labbra e fu conquistato dall'eleganza dei

<sup>26</sup> "Ada and Adone are storage rings", *cit*, p. 7.

<sup>27</sup> Una descrizione di ciò che accadde nel corso della riunione è presente nel verbale della medesima.

<sup>28</sup> L'espressione riportata nel verbale è tra virgolette, si può quindi ritenere che fosse una citazione fedele dell'espressione originale usata da Touschek.

<sup>29</sup> Verbale della riunione, p. 1

<sup>30</sup> G. Battimelli, M. De Maria, G. Paoloni, *Le carte di Bruno Touschek*, Archivi degli scienziati dell'Università di Roma "La Sapienza", Vol. I.

<sup>31</sup> B. Touschek, "Q. L. AdA (quaderno di laboratorio)" (Archivio Touschek, scatola 11, fasc. 3.88).

suoi ragionamenti. La speranza era quella che l'urto tra materia e antimateria elettronica, nel generare energia elettromagnetica, avrebbe attivato il vuoto in uno dei suoi modi caratteristici permettendo la rimaterializzazione di nuove particelle: una nuova coppia elettrone-positrone, ma anche un'altra qualsiasi coppia di particelle cariche con carica elettrica opposta, per esempio una coppia di mesoni  $\mu$  o  $\pi$  o  $K$ . Disponendo di elettroni e positroni abbastanza energetici per creare le masse di queste particelle finali della reazione, in base alla ben nota equivalenza relativistica tra massa ed energia, si supponeva perfino che potessero comparire particelle nuove, del tutto inaspettate. In ogni caso, anche disponendo di energia relativamente modesta (dell'ordine delle centinaia di MeV) questa sarebbe stata un'energia disponibile a creare particelle finali di gran lunga superiore a quella ottenibile mediante gli acceleratori convenzionali, come il sincrotrone di Frascati.

Il progetto venne varato nel giro di pochi giorni con il nome AdA (Anello di Accumulazione).

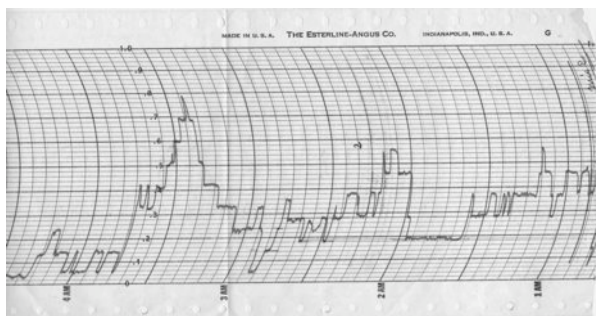


AdA sul suo supporto mobile nei Laboratori di Frascati (Cortesia Archivio FotoVideo, LNF)

Gli ingranaggi della burocrazia amministrativa si muovevano molto più rapidamente a quell'epoca. Felice Ippolito, segretario generale del CNEN, da cui dipendevano i Laboratori di Frascati, si adoperò perché il finanziamento fosse disponibile in tempi brevissimi. Consultato da Salvini Gilberto Bernardini espresse subito un'opinione molto favorevole alla costruzione dell'anello, "contribuendo così ad una rapida decisione con il suo prestigio e con la sua autorità di promotore della precedente impresa del sincrotrone".<sup>32</sup> Nel giro di una settimana partì l'ordine per il magnete: il 14 marzo, in un incontro cui parteciparono F. Amman, C. Bernardini, N. Cabibbo, R. Gatto, G. Ghigo, G. Salvini e B. Touschek, si decise di costruire una macchina sperimentale in cui iniettare elettroni e positroni a un'energia massima di 250 MeV, cui fu dato il nome di AdA (Anello di Accumulazione) e per la quale inizialmente furono stanziati 8 milioni di lire. Al disegno e alla costruzione della macchina si dedicheranno Carlo Bernardini, Gianfranco Corazza (figura chiave per le soluzioni di difficili problemi del vuoto), Giorgio Ghigo, nonché i servizi tecnici dei Laboratori Nazionali di Frascati e, naturalmente, lo stesso Touschek. In poco meno di un anno AdA fu costruita e installata nella sala del sincrotrone, che doveva fare da iniettore di elettroni e positroni. Grazie alla "luce di sincrotrone" emessa dalle particelle cariche relativistiche in moto su un'orbita circolare, era possibile addirittura osservare un singolo elettrone a occhio nudo attraverso l'oblò con cui si osservava l'interno della camera a vuoto, lo stesso a cui veniva abboccato il fotomoltiplicatore che forniva un grafico della luce raccolta, in cui ogni "scalino" rappresentava un nuovo elettrone del fascio accumulato. Gli elettroni, o i positroni, vivevano in orbita diverse ore prima di soccombere a un urto accidentale. Una pompa al titanio assicurava ormai dei vuoti decisamente inediti per quell'epoca, grazie anche alla perizia di Gianfranco Corazza. Tuttavia l'elettrosincrotrone di Frascati come iniettore di elettroni e positroni risultò inefficiente, di conseguenza le intensità dei fasci prodotti lasciavano a desiderare e quando si presentò la possibilità di utilizzare un acceleratore lineare, con i suoi impulsi di

<sup>32</sup> C. Bernardini, "Storia dell'anello AdA", *Il Nuovo Saggiatore* 6 (1986) 23-33.

elettroni brevi e intensi, si decise di trasferire AdA in Francia, a Orsay.



Registrazione del fototubo con i gradini che corrispondono al singolo elettrone che entra o esce da AdA (Collezione privata Carlo Bernardini).

Dopo un avventuroso viaggio in camion attraverso le Alpi, con le pompe in funzione per mantenere pulita la camera da vuoto, la macchina fu installata nella "salle de cible 500 MeV" nell'estate del 1963. L'intensità raggiunta fu tale da mettere ben presto in evidenza l'esistenza di un effetto dovuto a collisioni interne a ciascun pacchetto a cause del quale la vita media del fascio di elettroni e positroni crollava a poche ore per circa  $3 \times 10^7$  particelle, mentre arrivava a circa 50 ore con circa 10.000 particelle. La situazione in un primo momento sembrò disperata. Quello che successivamente venne denominato "effetto Touschek", particolarmente drammatico alle piccole dimensioni di AdA, fu curato almeno in parte e il gruppo, a cui si erano ormai aggiunti Ubaldo Bizzarri, Ruggero Querzoli, Giuseppe Di Giugno, insieme ai francesi Pierre Marin e Jacques Haïssinski, proseguì il lavoro verso la sospirata verifica che avrebbe fornito la prova che i due fasci di elettroni e positroni si incontravano come previsto. Dei tre processi fondamentali che si pensava di produrre e osservare fu studiata solo l'annichilazione di coppie elettrone-positrone in due fotoni. L'osservazione delle interazioni tra elettroni e positroni si basò sull'osservazione dei raggi  $\gamma$  prodotti dalla *bremstrahlung*.<sup>33</sup> La produzione di coppie di muoni e di pioni non fu possibile a causa della bassa intensità dei fasci, ma il piccolo prototipo AdA aveva dimostrato che

questo tipo di acceleratori era fattibile, mettendo a segno una tappa fondamentale nella storia della fisica delle particelle e delle alte energie.<sup>34</sup>

## VERSO IL FUTURO

La comunità di Frascati non aveva mai dubitato del peso delle idee di Touschek. Fin dalla primavera del 1960 un piccolo gruppo per lo studio di un anello per elettroni e positroni ad alta energia era stato formato da Fernando Amman, che avrebbe diretto la costruzione di questo anello di accumulazione da 1.5 GeV, la cui proposta fu presentata nel dicembre di quello stesso anno, nel corso dell'incontro annuale dell'INFN. Il 9 novembre Touschek, a sua volta, aveva preparato una bozza di progetto riguardante la fisica da fare con questa macchina, dove assumeva che "gli esperimenti in cui ci sono soltanto due particelle nello stato finale sono più facili da interpretare. Esistono 16 reazioni di questo tipo..." dichiarava Touschek che concludeva la breve discussione osservando che "se il lavoro attualmente in atto su AdA si mostra promettente (ne sapremo di più nel febbraio 1961), lo sviluppo di Adone è da considerarsi obbligatorio".<sup>35</sup>

Il 27 gennaio 1961, F. Amman, C. Bernardini, R. Gatto, G. Ghigo e B. Touschek presentarono la nota interna "Storage ring for electrons and positrons 'ADONE'" (N° 68 dei Laboratori Nazionali di Frascati). Nel febbraio 1961 fu formalmente costituito un gruppo di studio con il compito di preparare una prima stima della fattibilità e dei costi di tale progetto. Nel corso del 1961 i problemi principali considerati furono: produzione e accumulazione dei positroni, interazione fascio-fascio, smorzamento delle oscillazioni in una struttura a focheggiamento forte, aspetti tecnici come il vuoto e l'inflettore pulsato. Alla fine del 1961 venne deciso il progetto generale dell'iniettore per la produzione di positroni, mentre gli esperimenti sulla produzione di positroni sarebbero stati effettuati in collaborazione

<sup>33</sup> C. Bernardini, G.F. Corazza, G. Di Giugno, J. Haïssinski, P. Marin, R. Querzoli, B. Touschek, "Measurements of the Rate of Interaction between Stored Electrons and Positrons", *Il Nuovo Cimento* **34** (1964), 1473-1493.

<sup>34</sup> Per un racconto dettagliato si veda in particolare C. Bernardini, "AdA: The First Electron-Positron Collider", *Physics in Perspective* **6** (2004) 156-183.

<sup>35</sup> B. Touschek, "ADONE - a Draft proposal for a colliding beam experiment" (Archivio Touschek, scatola 12, fascicolo 3.95.3).

con Saclay. Una prima approssimazione dell'interazione fascio-fascio fu studiata e presentata alla conferenza di Brookhaven. Lo smorzamento in strutture a focheggiamento forte fu chiarito completamente.<sup>36</sup> Il "progetto Adone" partì formalmente all'inizio del 1962.

Nell'autunno del 1960 Gatto propose a Cabibbo di studiare in dettaglio la fisica delle collisioni elettrone-positrone. "Nel fare questo lavoro - ha ricordato Cabibbo - abbiamo avuto l'esperienza stimolante di espanderci nel vuoto: per alcuni anni gli unici lavori teorici sulla fisica  $e^+e^-$  furono quelli prodotti a Roma o a Frascati".<sup>37</sup> Era la dimostrazione più eclatante della assoluta novità dell'impresa avviata da Touschek. I risultati di questo studio preliminare furono riassunti in un primo lavoro inviato il 2 febbraio 1961 alla rivista *Il Nuovo Cimento*.<sup>38</sup> Un universo fisico completamente nuovo stava per essere esplorato, le cui potenzialità sarebbero state di lì a poco mostrate dal famoso articolo soprannominato la "Bibbia" nei circoli di Frascati<sup>39</sup>: *"Electron-positron collisions could probe the structure of known hadrons: not only the form factors of pions and nucleons, but also those of kaons and hyperons, as well as those of multihadron states. One could also probe exotic form factors, such as those of the  $\pi_0 \rightarrow \gamma\gamma$  and of the  $\Sigma_0 \rightarrow \Lambda_0 + \gamma$  transitions". An intriguing result was obtained for the production of neutral K mesons: because of the C=-1 initial state, only the  $K_L^-$   $K_S$  combination would appear in the final state"*. Questa osservazione sarebbe stata alla base dei successivi studi sulla violazione di CP e delle future B-factory. "I risultati di questa esplorazione confermarono al di là dei sogni più estremi le intuizioni di Bruno Touschek", ha ricordato più tardi Nicola Cabibbo, che ha anche osservato come "Nel fare questo lavoro avemmo l'esilarante esperienza di espanderci nel vuoto: per un

po' di anni gli unici lavori teorici sulla fisica  $e^+e^-$  furono quelli provenienti da Roma o da Frascati".<sup>40</sup>

Nel giugno 1965 una conferenza internazionale sulle interazioni con elettroni e fotoni ad alta energia ebbe luogo ad Amburgo. In quella occasione Gatto presentò una edizione aggiornata della "Bibbia".<sup>41</sup> Ormai la fisica  $e^+e^-$  stava mostrando pienamente la sua potenzialità e semplicità intrinseca.

Robert R. Wilson aprì le sue osservazioni conclusive con un aneddoto riguardante Pauli e Otto Stern che risaliva ai primi anni '30, quando Stern stava misurando il momento magnetico del protone nel limite di bassi momenti trasferiti. Sembra che Pauli seguisse la questione con grande interesse personale: tuttavia non faceva che ripetere "Lascia perdere questa sciocchezza! Non può esserci altro che un possibile risultato della tua misura, cioè troverai che il momento magnetico è esattamente un magnetone nucleare, quindi perché non lasci questa roba noiosa a un fisico di calibro minore e non ti occupi di qualcosa di veramente interessante!" A questo punto Wilson osservò che un mucchio di cose, come la "molteplicità dei risultati della fotoproduzione" lo avevano lasciato piuttosto freddo. E concludeva la conferenza sottolineando che "Un'era del tutto nuovo sembra che si stia aprendo nella fisica dell'elettrone. Secondo me i veri pionieri di questi sviluppi sono, oltre alla gente di Stanford, i nostri amici italiani. Con grande stile hanno marciato in testa, prima con la loro brillante concezione e costruzione della piccola macchina AdA in tempi così brevi e, inoltre, con l'incredibile coraggio e perizia che hanno dimostrato nel proseguire con Adone...Ma è un campo altamente competitivo e altri laboratori sono all'opera...Personalmente sono convinto che gli anelli di accumulazione estenderanno la nostra visione dei processi con elettroni incommensurabilmente oltre quello che è possibile fare con gli acceleratori convenzionali. La fisica che si contempla

<sup>36</sup> Questo resoconto sommario è contenuto in un breve promemoria su Adone inviato da Amman a G. K. O'Neill il 18 marzo 1966. Secondo quanto dichiarato da Amman conteneva "ciò che è difficile trovare negli articoli pubblicati" (F. Amman, collezione privata).

<sup>37</sup> N. Cabibbo, "e<sup>+</sup>e<sup>-</sup> Physics - a View from Frascati in 1960's", in V. Valente, *cit.*, p. 221.

<sup>38</sup> N. Cabibbo e R. Gatto, "Theoretical Discussion of Possible Experiments with Electron-Positron Colliding Beams", *Il Nuovo Cimento* **20** (1961), 185-193.

<sup>39</sup> N. Cabibbo e R. Gatto, "Electron-Positron Colliding Beam Experiments", *Phys. Rev.* **124** (1961), 1577-1595.

<sup>40</sup> Cabibbo, "e<sup>+</sup>e<sup>-</sup> Physics - a view from Frascati in 1960's", *cit.*, p. 221.

<sup>41</sup> (R. Gatto, "Theoretical aspects of Colliding Beam Experiments", in G. Höhler, G. Kramer, U. Meyer-Berkhout (a cura di), *Proceedings of the International Symposium on Electron and Photon Interactions at High Energies*, Vol 1, Hamburg, June 8-12, 1965 (Deutsche Physikalische Gesellschaft e. V., Hamburg, 1965) 106-137.

attraverso questi apparati è così pura e così bella in confronto a ciò che si sta facendo al momento che a malapena riesco a contenere il mio entusiasmo per questo campo meraviglioso. Spero che molti di quei giovani che stanno misurando cose prosaiche nel campo della fotoproduzione mi permettano di emulare Pauli consigliandoli di desistere e raggiungere prima possibile il più vicino anello di accumulazione".<sup>42</sup>

### L'EREDITÀ DI BRUNO TOUSCHEK

I primi risultati interessanti sulla via aperta da Touschek vennero da ACO, un anello per elettroni e positroni da 450 MeV per fascio costruito nel laboratorio di Orsay e VEPP II, una macchina ad anelli tangenti per elettroni e positroni da 700 MeV costruita a Novosibirsk sotto la guida di Andreij M. Budker, entrambe completate nel 1966 e i cui primi risultati furono inviati per la pubblicazione nel 1967. Ben presto divenne chiaro che l'accurata definizione in energia è una caratteristica peculiare dei fasci di elettroni e positroni, caratteristica che consentiva lo studio delle risonanze strette e della loro forma. Fu così possibile osservare la produzione di coppie di pioni e di studiare le risonanze  $\rho$ ,  $\omega$  e  $\phi$  con una precisione mai raggiunta prima con gli esperimenti a bersaglio fisso. Queste macchine consentirono di chiarire un ben definito dominio della fisica delle particelle: le interazioni elettromagnetiche degli adroni e le proprietà dei mesoni vettoriali insieme alla loro importanza nel comportamento di tipo adronico del fotone descritto dal cosiddetto modello della "vector dominance". Ma le sorprese erano appena all'inizio.

La costruzione di Adone subì molti ritardi a causa di vicende di varia natura, sia di carattere tecnico sia di carattere politico, come la vicenda Ippolito e la conseguente crisi del CNEN, ma anche la contestazione studentesca con i suoi contraccolpi universitari. Soltanto verso la fine del 1969, a quasi nove anni di distanza dalla proposta di progetto, Adone cominciò a produrre i primi risultati scientifici, che peraltro ebbero un

enorme impatto sulla comunità dei fisici delle alte energie perché le sezioni d'urto per la produzione multiadronica risultarono molto più grandi di quanto ci si aspettasse oltre 1.2 GeV di energia.



L'anello Adone nei Laboratori Nazionali di Frascati (Cortesia Archivio FotoVideo, LNF).

I risultati ottenuti a Frascati erano in stretta relazione con gli esperimenti di scattering anelastico di elettroni su protoni osservati a Stanford con SLAC, l'acceleratore lineare per elettroni, che mostravano un picco nella sezione d'urto anche per angoli molto grandi (1969). Una delle prime analisi fu quella di J. D. Bjorken, secondo cui il comportamento osservato mostrava che ad un certo livello energetico,  $q^2$  (il momento trasferito nell'urto) e l'energia trasferita divenivano correlati, nonostante fossero solitamente considerati variabili fra loro indipendenti. Questo fenomeno, detto 'scaling', per cui ad ogni aumento di  $q^2$  vi era un aumento dell'energia che compensava il loro rapporto, poteva avere a che fare con l'ipotetica struttura interna degli adroni. L'8 dicembre 1970 Wolfgang Panofsky scriveva a Marcello Conversi: "We are all very excited about the progress of Frascati ring and its relationship to the SLAC deep inelastic scattering. We think that these results probably will open up some of the most fundamental ideas in physics today and time will tell whether the parton idea will be the only surviving explanation."<sup>43</sup>

Nonostante il fatto che l'idea dei partoni fosse da molti considerata quasi un'ingenuità

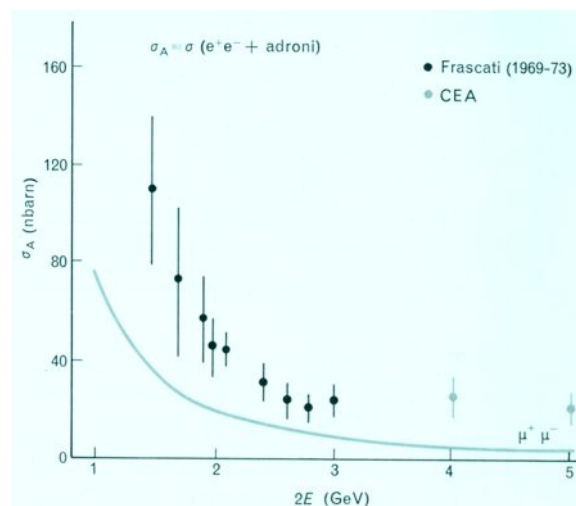
<sup>42</sup> R. Wilson, "Closing Remarks", *Proceedings of the International Symposium on Electron and Photon Interactions at High Energies*, Vol 1, Hamburg, June 8-12, 1965 (Deutsche Physikalische Gesellschaft e. V., Hamburg, 1965).

<sup>43</sup> W. K. H. Panofsky a Marcello Conversi, 8 dicembre 1970 (Archivio Conversi, Dipartimento di Fisica, Università di Roma La Sapienza, scatola 38).

rispetto ad altri approcci più “sostanziosi” come quello di Schwinger-Weinberg, i dati ottenuti inaspettatamente dalle due parti dell’Atlantico sembravano proprio rappresentare il segnale che l’interno dei nucleoni è costituito da strutture puntiformi, così che la sezione d’urto elettrone-nucleo risultava molto più grande rispetto a quella attesa nell’assunzione di una materia nucleare estesa. Il modello a “partoni” proposto da Feynman non specificava quale fosse la natura di queste strutture puntiformi, alcuni li identificavano con i quark, proposti da Gell-Mann e Zweig nel 1964, ma prima che la teoria delle interazioni forti, la cromodinamica quantistica fosse sviluppata, risultava piuttosto difficile rendere compatibile il comportamento da “particelle libere” dei quark interagenti con gli elettroni, con l’esistenza di una interazione forte nello stato finale del processo, tale da rendere conto del fatto che i quark liberi non erano stati osservati in laboratorio. In ogni caso queste entità erano considerate dai più una sorta di costruzione matematica. La scoperta della “libertà asintotica” da parte di David Gross, Frank Wilczek e David Politzer nel 1973, spiegò il comportamento paradossale dei quark, confinati all’interno degli adroni da una forza tanto forte da formare particelle come i mesoni e i nucleoni (“schiavitù infrarossa”), ma poco intensa a più piccole distanze il che risultava consistente con i risultati degli esperimenti.

Nel frattempo gli anelli di collisione a elettroni e positroni stavano diventando uno dei più potenti strumenti della moderna fisica delle alte energie. I risultati di Adone fornivano una ulteriore spinta alla costruzione dell’anello SPEAR (2x4.2 GeV) per elettroni e positroni a Stanford. L’esistenza di due picchi nella sezione d’urto fu interpretata come due stati eccitati del mesone  $\rho$ , inoltre, nell’intervallo di energia fra 2 e 3 GeV, il rapporto,  $R$ , tra le sezioni d’urto della produzione multiadronica e delle coppie di muoni apparve essere quasi costante, circa 2. All’epoca in cui furono ottenuti i dati di Adone, i risultati dei calcoli teorici rappresentavano una seria sfida al modello a partoni basato sui 3 quark  $u$ ,  $s$ ,  $d$  (*up*, *down* e *strange*) che forniva un valore  $R=2/3$ , un valore molto al di sotto dei dati ottenuti a Cambridge (USA) con un anello di accumulazione per elettroni convertito in un anello  $e^+e^-$ , come osservava all’epoca H. L. Lynch: “*The suggestion of introducing three*

*different kinds of quarks having colour allows one to triple R. This is a big help and such a result would satisfy all the Frascati data*”.<sup>44</sup> Infatti, il valore sperimentale fornito da Adone risultava circa 2 e questo è esattamente il valore predetto dal modello a quark dei partoni, con tre quark “colorati”  $u$ ,  $d$  e  $s$ .

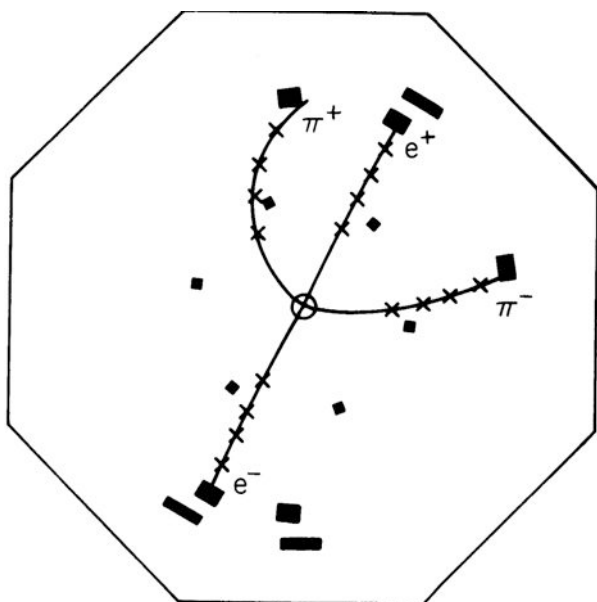


Sezione d’urto totale  $s_A$  per la produzione adronica. Sintesi dei risultati ottenuti a Frascati dal gruppo di Adone. Confronto di  $s_A$  a 4 e 5 GeV con  $s_m$ , la sezione d’urto per la produzione di  $m^+m^-$ . A posteriori appare del tutto evidente che il valore della sezione d’urto totale risulta in buon accordo con l’ipotesi di quark “colorati”.

La cosiddetta “*R crisis*” si avviò a soluzione con l’entrata in funzione, nella primavera del 1972, dell’anello SPEAR per elettroni e positroni il cui programma sperimentale portò alla famosa “rivoluzione di novembre” con la scoperta della particella  $J/\Psi$ . Nel 1973 un gruppo guidato da Burton Richter a SLAC, iniziò a misurare  $R$  per energie crescenti di 100 in 100 MeV nell’intervallo tra 1.2 e 2.4 GeV. I risultati mostravano che  $R$  continuava a crescere linearmente al di sopra dei 2 GeV. Nell’autunno del 1974 una nuova analisi dei dati di SPEAR mostrava l’esistenza di un valore insolitamente alto di  $R$  all’altezza di circa 3.1 GeV. Un picco nella rilevazione della frequenza di interazioni di annichilazione fra elettroni e positroni si presentava in

<sup>44</sup> H. L. Lynch, “Summary of  $e^+e^-$  colliding beam experiments”, AIP Conference, Series Editor: Hugh C. Wolfe, Number 14, Particle and fields subseries No. 6, “Particles and Fields – 1973”, a cura di H. H. Bingham, M. Davier, G. R. Lynch, American Institute of Physics, New York, 1973, p. 53.

corrispondenza al livello di energia necessaria alla creazione della particella, una particella dalla vita tanto breve da presentarsi agli occhi dei ricercatori come una risonanza molto stretta: la larghezza del picco (50 KeV) è inversamente proporzionale alla vita media della particella come prescrive la meccanica quantistica. Incredibilmente, lo stesso risultato era stato riscontrato nello stesso periodo in un esperimento del tutto diverso guidato da Sam Ting, che lavorava alla ricerca di altre risonanze vettoriali del tipo  $\rho$ ,  $\omega$ ,  $\phi$ . La strategia era quella di cercare dei picchi nella distribuzione dell'energia totale delle coppie  $e^+ e^-$  prodotte in collisioni adroniche. Anche loro trovarono un picco a 3.1 GeV in corrispondenza della collisione tra protoni e berillio.



Due nomi furono proposti per la risonanza trovata a Brookhaven e a Stanford,  $J$  e  $Y$ , così che alla fine fu adottato il nome  $J/\Psi$ .

La  $J/\Psi$  aveva una vita media circa mille volte più lunga delle risonanze fino ad allora prodotte nei laboratori, una proprietà che andava spiegata dal punto di vista teorico. L'esistenza di tre quark sembrava aver dato una spiegazione definitiva al mondo delle particelle, ma nel 1970, per spiegare l'assenza di certi tipi di disintegrazioni dei mesoni  $K$  neutri, Sheldon Glashow, John Iliopoulos e Luciano Maiani proposero il cosiddetto "meccanismo GIM", che si basava sull'ipotesi dell'esistenza di un quarto tipo di quark, chiamato quark  $c$  (per *charm*). Questo lavoro affondava le sue radici in un fondamentale contributo di Nicola Cabibbo del 1963, che

aveva messo in evidenza un fenomeno nuovo, il "mescolamento dei quark", strettamente connesso alla natura quantistica delle particelle elementari. Inoltre, nel 1973 M. Kobayashi e T. Maskawa osservavano che la presenza di un'altra coppia di quark denominati  $b$  (per *beauty*) e  $t$  (per *top*) avrebbe permesso di migliorare ulteriormente lo schema teorico che si andava formando per descrivere il mondo dei costituenti elementari della materia.

A queste previsioni teoriche seguirono anni di entusiasmanti scoperte sperimentali. Infatti, nel 1974, i due gruppi indipendenti, guidati da Samuel Ting a Brookhaven e da Burton Richter a Stanford, osservavano appunto la particella  $J/\Psi$  identificabile con uno stato composto del quark *charm* con il suo antiquark. Questa scoperta del tutto inaspettata, che fruttò ai suoi autori il premio Nobel, era stata fatta a un livello di energia inaccessibile ai fasci di Adone per soli 50 MeV. Forzando la macchina la risonanza fu vista anche a Frascati. Touschek fu preso da un terribile sconforto, ma nessuno avrebbe potuto prevedere che la scelta fatta a suo tempo per l'energia massima di Adone avrebbe penalizzato in modo così crudele proprio i pionieri della linea che aveva portato a questa conquista, escludendoli dal diventare protagonisti di una svolta tanto fondamentale. Lo smacco risultava tanto più amaro se si pensa che nel 1966 un gruppo di Frascati aveva proposto di fare una esplorazione sistematica della zona da 1.5 a 3.0 GeV alla ricerca di "risonanze vettoriali strette", in occasione del Convegno sugli anelli di accumulazione tenuto nel settembre di quell'anno a Saclay.<sup>45</sup> L'idea era di utilizzare contatori a grande angolo e un dispositivo per esplorare l'energia suddividendola in bande da 50 MeV ciascuna. La motivazione per questa indagine nasceva proprio dalla considerazione che in una macchina come Adone l'energia delle particelle è estremamente definita, entro qualche KeV, e quindi una risonanza molto stretta sarebbe potuta sfuggire esplorando gradini di ampiezza di soli 10 MeV. In caso di conteggio anomalo, apparati più efficienti sarebbero stati impiegati per esaminare la zona in modo più raffinato. Tuttavia coloro che utilizzavano la macchina non erano

<sup>45</sup> B. Bartoli et al., *Proceedings of the International Symposium on electron and Positron Storage Rings*, Saclay, 26-30 settembre 1966.



affatto d'accordo sulla procedura di modificare di volta in volta l'energia dell'anello per effettuare questa esplorazione e in ogni caso certamente tale indagine non si sarebbe spinta al di sopra dell'energia massima ottenibile con Adone.

Nel giro di poco tempo un nuovo notevole risultato venne dalle collisioni  $e^+e^-$  a SPEAR. Un gruppo guidato da M. Perl produsse un nuovo leptone, il  $\tau$ . Una scoperta piena di conseguenze. In effetti il quark  $c$  ipotizzato dal meccanismo GIM aveva completato con il quark  $s$  un doppietto simile a quello formato da  $up$  e  $down$ . Questo aspetto di simmetria era particolarmente soddisfacente: poiché, come era noto già da tempo, l'elettrone ed il muone sono associati a due neutrini diversi, il neutrino elettronico ( $\nu_e$ ) e neutrino muonico ( $\nu_\mu$ ), le due coppie di quark ( $u-d$ ,  $c-s$ ) costituivano un complesso esattamente simmetrico alle due coppie di leptoni ( $\nu_e-e$ ,  $\nu_\mu-\mu$ ). Per mantenere la simmetria tra quark e leptoni sarebbe stato necessario, a questo punto, un terzo doppietto di leptoni in parallelo all'altra ipotizzata coppia di quark, *beauty* e *top*. La scoperta del  $\tau$  e lo studio delle sue proprietà di disintegrazione indicavano infatti che anche questo nuovo leptone doveva avere un suo proprio neutrino,  $\nu_\tau$  diverso da  $\nu_e$  e da  $\nu_\mu$ , portando a tre i doppietti leptonici e dando credibilità alla teoria di tre doppietti di quark. Nel 1976 un gruppo guidato da L. Lederman osservava a FermiLab le prime particelle composte dal quark *beauty*. Nel 1979 CESR (2x8GeV), a Cornell, confermò l'esistenza di due risonanze strette già osservate con DORIS (2x5 GeV) a 9.4 e 10 GeV, interpretate come stati legati del quark *beauty* e del suo antiquark e ne trovò un'altra a 10.4 GeV. Anche la macchina PETRA (2x19 GeV), che cominciò ad operare ad Amburgo nel 1978, produsse interessanti risultati nelle collisioni  $e^+e^-$  con produzione di quark e antiquark e successiva frammentazione in getti adronici. La caccia al quark *top*, che ha una massa pari a circa 176 volte la massa del protone, si è conclusa solo nel 1994 al FermiLab presso Chicago, dove, nel 1987 era entrato in funzione il Tevatron, un collisore protone-antiprotone che attualmente realizza l'energia maggiore al mondo.

Il trionfo delle macchine  $e^+e^-$  si era andato nel frattempo evolvendo verso una importante estensione del concetto di collisione materia-antimateria, con la costruzione di *colliders* per protoni. Nel 1971,

il CERN aveva realizzato il primo anello di collisione con fasci di protoni (Intersecting Storage Ring, ISR).

Lo stesso Carlo Rubbia ha raccontato che l'idea di trasformare un acceleratore convenzionale in un collider protone-antiprotone risale ai tardi anni '60, quando i gruppi italiani stavano prendendo in considerazione due alternative come passo successivo per gli acceleratori su base nazionale. Una di queste era un protosincrotrone convenzionale da 80 GeV, e la seconda era un collider protone-antiprotone da 160 GeV basato sul concetto di "raffreddamento" del fascio sviluppato da Budker per gli elettroni nel 1966 (e indipendentemente da S. van der Meer nel 1968), un metodo che consentiva di concentrare i fasci prima di immetterli nella camera a vuoto dell'anello. Generalmente si ritiene che l'idea di trasformare un acceleratore convenzionale in un collider protone-antiprotone sia stata sviluppata da Carlo Rubbia e dai suoi collaboratori nei tardi anni settanta allo scopo di osservare la produzione dei bosoni intermedi. In realtà l'idea risaliva a circa dieci anni prima e aveva avuto origine in Italia, come ha raccontato lo stesso Rubbia, in un periodo in cui si ragionava ancora in termini di una base nazionale per un prossimo grande acceleratore. Le alternative erano due: un protosincrotrone convenzionale da 80 GeV, e un collider protone-antiprotone, basato sul "raffreddamento" di Budker: *"I remember I had a long discussion with Bruno on what one should do next. Clearly in his and in our mind at the time the proton-antiproton option was the logical continuation of the ADA-Adone line". Rubbia, Giorgio Ghigo, and Touschek even planned "to borrow from CERN the 'electron analogue' of the ISR, at that time left unused...What was lacking – and that we were prepared to provide – was the real interest in proceeding with the studies and the courage to take these things seriously"*. The whole matter ended mainly because of the general decision to concentrate all European efforts on the construction of SPS, so that national project had to be sacrificed.<sup>46</sup>

Nel 1981 il Super Proto Sincrotrone del CERN veniva adattato per realizzare un anello di collisione protone-antiprotone (la

<sup>46</sup> C. Rubbia, "The role of Bruno Touschek in the realization of the proton antiproton collider", *cit*, p. 59.

macchina  $Sp\bar{p}S$ ) con cui sono stati osservati per la prima volta i mediatori delle interazioni deboli, le particelle W e Z. Una realizzazione che è stata riconosciuta con il premio Nobel a Carlo Rubbia e Simon Van der Meer, nel 1983.

La linea elettrone-positrone culminò, alla fine degli anni '80, con la macchina LEP, il grande anello di collisione elettrone-positrone del CERN, realizzato in un tunnel sotterraneo di 27 km di circonferenza, uno strumento scientifico di grande potenza e precisione. Subito dopo, nel 1991, entrò in funzione ad Amburgo DESY, un collider per elettroni da 26 GeV e protoni da 820 GeV. Questa asimmetria nell'energia dei fasci consentiva lo studio di particolari aspetti nei risultati della collisione.

Al CERN è attualmente in costruzione avanzata un collisore protone-protone, il Large Hadron Collider (LHC), che realizzerà tra breve un vero e proprio balzo in avanti, con un'energia pari a 14000 volte l'energia corrispondente alla massa del protone, circa 7 volte superiore a quella del Tevatron, i cui obiettivi principali sono la ricerca del bosone di Higgs e di segnali concreti dell'esistenza di una fisica oltre il Modello standard, come le particelle supersimmetriche.

La sfida delle alte energie è quindi ancora aperta. Tuttavia, alla luce di ciò che è seguito alla rivoluzione culturale innescata da Bruno Touschek, appare assai sorprendente il giudizio espresso recentemente dallo stesso Burton Richter, uno dei protagonisti di questa avventura: *"In my opinion, AdA was a scientific curiosity that contributed little of any significance to the development of colliding beams (there is one exception; a beam-loss mechanism now called the Touschek effect was discovered)..."*<sup>47</sup>

Tale affermazione è forse in parte spiegabile nell'ambito del profondo *gap* culturale esistente fra il pensiero scientifico di Touschek e la filosofia generale dei costruttori di macchine acceleratrici dell'epoca.

---

<sup>47</sup> B. Richter, *"The Rise of Colliding Beams"*, in L. Brown et al. (eds.), *The rise of the Standard Model. Particle Physics in the 1960s and 1970s* (Cambridge University Press, 1997) 261-284, p. 269.

**BIBLIOGRAFIA**

- E. Amaldi, *The Bruno Touschek legacy*, CERN 81-19 (Geneva, 1981)
- C. Bernardini, "AdA: the smallest  $e^+e^-$  ring", in M. De Maria, M. Grilli, F. Sebastiani (a cura di), *The Restructuring of physical sciences in Europe and the United States, 1945-1960* (World Scientific, Singapore, 1989) 444-448
- "From the Frascati Electron Synchrotron to Adone", in C. Bacci et al. (a cura di), *Present and Future of Collider Physics*, (SIF, Bologna 1991) 3-15
- C. Bernardini, "Bruno Touschek and AdA, in V. Valente (a cura di), *Adone a Milestone on the Particle Way*, Frascati Physics Series (Frascati 1997) 1-21
- E. Picasso, "Electron-positron storage rings from AdA to LEP", in G. Isidori (a cura di), *Bruno Touschek and the birth of  $e^+e^-$  physics*, Frascati Physics Series (Frascati 1999) 39-50
- C. Bernardini, "AdA: The First Electron-Positron Collider", *Physics in Perspective* 6 (2004) 156-183
- E. Paris, "Lords of the ring: The fight to build the first U.S. electron-positron collider", *Historical Studies of Physical Sciences* 31/2, 2001, 355-380
- M. S. Livingston and J. P. Blewett, *Particle Accelerators* (McGraw-Hill, New York 1962)
- M. Sands, "The making of an accelerator physicist", in L.M. Brown, M. Dresden, L. Hoddeson (a cura di), *Pion to Quarks*, Cambridge University Press, New York 1989, 149-161.
- L. Brown et al. (a cura di), *The rise of the Standard Model. Particle Physics in the 1960s and 1970s* (Cambridge University Press, 1997)
- G. Battimelli (a cura di), *L'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare. Storia di una comunità di ricerca* (Laterza, Roma, 2001)
- M. De Maria, M. Grilli, F. Sebastiani (a cura di), *The Restructuring of physical sciences in Europe and the United States, 1945-1960* (World Scientific, Singapore 1989)
- P. Waloschek (a cura di), *The Infancy of Particle Accelerators. Life and Work of Rolf Wideröe* (Vieweg, 1994, Braunschweig/Wiesbaden) basato sui manoscritti e sulle lettere di Wideröe.
- G. Paoloni (a cura di), *Energia, ambiente, innovazione: dal Cnrn all'Enea* (Laterza, 1992)
- M. Greco and G. Pancheri (a cura di), *Bruno Touschek Memorial Lectures*, Frascati Physics Series Vol. XXXIII, (2004), INFN-Laboratori Nazionali di Frascati
- C. Pellegrini and A. M. Sessler, *The Development of Colliders* (AIP Press, New York 1995)

**LUISA BONOLIS**

Autrice di vari lavori sulla storia della fisica del Novecento, ha pubblicato una biografia di Ettore Majorana (*Le Scienze*, 2002), ha curato con C. Bernardini il volume *Enrico Fermi: his work and legacy*<sup>2</sup> (*Società Italiana di Fisica & Springer Verlag*, 2004) e ha realizzato una serie di lunghe interviste raccolte nel volume *Fisici italiani del tempo presente*.

Storie di vita e di pensiero<sup>2</sup> curato con M. G. Melchionni (*Marsilio*, 2003). Con il regista E. Agapito ha realizzato il lungometraggio *Bruno Touschek e l'arte della fisica*<sup>2</sup> (*MediaScienza e INFN*, 2004).

**Contatti:**

[luisa.bonolis@roma1.infn.it](mailto:luisa.bonolis@roma1.infn.it)