Curriculum formativo e dell'attività didattica e scientifica di Fabrizio Cei

1) Curriculum formativo

Fabrizio Cei ha conseguito il 2/3/1990 presso l'Università degli studi di Pisa la laurea in Fisica con la votazione di 110 e lode/110 discutendo, sotto la relazione del prof. Carlo Bemporad, la tesi dal titolo:

"Rivelazione di neutrini da collasso stellare gravitazionale nell'esperimento MACRO al Gran Sasso"

Nel dicembre 1990 è risultato vincitore di un posto di Perfezionamento triennale, equipollente al Dottorato di Ricerca, presso la Scuola Normale Superiore di Pisa ed ha conseguito il diploma di Perfezionamento il 20/12/1995 con votazione 70 e lode/70 discutendo con i professori Carlo Bemporad (relatore), Ettore Fiorini e Samoil Bilenky ("referees") la tesi (pubblicata negli Annali della Classe di Scienze della Scuola Normale Superiore) dal titolo:

"Search for neutrinos from stellar gravitational collapse with the MACRO experiment at Gran Sasso"

Nel maggio 1995 è risultato vincitore di una borsa di studio annuale post-doctoral dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare per attività di ricerca presso la sezione di Pisa con decorrenza dal 15/07/1995 e nel maggio 1996 ha ottenuto il rinnovo della suddetta borsa fino al 14/07/1997.

Dal 1° novembre 1997 al 15 marzo 1999 è stato titolare di una posizione post-doctoral di ricerca presso l'Università di Michigan.

Nell'ottobre 1998 è risultato vincitore di un concorso per ricercatore presso l'Università degli Studi di Pisa, Facoltà di Ingegneria, ed ha preso ufficialmente servizio il 16 marzo 1999, ottenendo al termine dei tre anni di prova la conferma in ruolo.

A seguito del conseguimento dell'Abilitazione Scientifica Nazionale per il settore concorsuale 02/A1 nella tornata 2012 ha ottenuto la promozione a professore associato con decorrenza dal 1 Aprile 2015, ruolo che attualmente ricopre.

Ha un'ottima conoscenza della lingua inglese scritta e parlata.

2) Attività didattica

Nel periodo marzo 1999 - dicembre 2016 Fabrizio Cei ha svolto le seguenti attività didattiche:

1) Esercitazioni presso l'Università degli Studi di Pisa di:

- **Fisica Generale I** del primo anno del Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica nell'A.A. 1998-1999;
- **Fisica Generale II** del secondo anno del Corso di Laurea in Ingegneria Informatica nell'A.A. 1999-2000;
- **Fisica Generale I** del primo anno del Corso di Laurea in Ingegneria delle Telecomunicazioni negli A.A. dal 1998-1999 al 2011-2012;
- **Fisica Generale II** del secondo anno del Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica e delle Telecomunicazioni negli A.A. 2015-2016 e 2016-2017.

Per tutti questi corsi è stato membro delle commissioni d'esame.

2) Corsi presso l'Università degli Studi di Pisa di:

- **Metodi di Osservazione e Misure** per il quinto anno (Vecchio Ordinamento) del Corso di Laurea in Ingegneria Elettrica negli anni A.A. dal 2002-2003 al 2004-2005;

- **Complementi di Fisica** per il primo anno della Laurea Specialistica (o terzo anno della Laurea Triennale) in Ingegneria Elettronica negli A.A. dal 2005-2006 al 2009-2010 (introduzione alla meccanica quantistica ed alle applicazioni dei suoi principi al funzionamento dei dispositivi elettronici);

- **Fisica Generale II** per il secondo anno della Laurea Triennale in Ingegneria Chimica ed Elettrica nell'A.A. 2010-2011;

- **Fisica Generale II** per il secondo anno della Laurea Triennale in Ingegneria Elettronica e delle Telecomunicazioni negli A.A. dal 2011-2012 al 2014-2015;

- **Fisica Generale I** per il primo anno della Laurea Triennale in Ingegneria Elettronica e delle Telecomunicazioni negli A.A. a partire dal 2015-2016.

Per tutti questi corsi è (o è stato) presidente delle commissioni d'esame.

3) Ciclo di lezioni monografiche ($8 \div 10$ ore) sulla **Fisica dei neutrini** nell'ambito del Corso di Fisica delle Particelle Elementari II del Corso di Laurea Specialistica in Fisica delle Interazioni Fondamentali negli A.A. dal 2009-2010 al 2013-2014.

Anche per questo corso è membro della commissione d'esame.

È infine membro della commissione d'esame per il corso di Fisica Astroparticellare.

4) Corso di **Complementi di Fisica** presso la Scuola Superiore di Studi Universitari e Perfezionamento S. Anna di Pisa, rivolto agli studenti del primo anno di Ingegneria, negli A.A. dal 2002-2003 al 2016-2017 (approfondimenti di meccanica delle rotazioni, introduzione alla propagazione per onde, termodinamica classica ed elementi di termodinamica statistica).

È stato inoltre relatore delle seguenti tesi di laurea:

- Laurea Specialistica in Scienze Fisiche/Fisica delle Interazioni Fondamentali:

  a) Luca Perrozzi "Metodi di calibrazione e ricostruzione degli eventi nell'esperimento MEG", A.A. 2006-2007 votazione 110 e Lode/110;

  b) Alessio Porcelli "Studio delle sistematiche del calorimetro elettromagnetico dell'esperimento MEG per l'ottimizzazione della ricerca del decadimento $\mu^+ \to e^+\gamma$ con sensibilità a rapporti di decadimento dell'ordine di 10^{-13}" (correlatore insieme al Prof. Alessandro Baldini), A.A. 2009-2010 votazione 106/100;

  c) Tiziano Rovai "Studio delle prestazioni della nuova camera a deriva dell'esperimento MEG", A.A. 2012-2013 votazione 110/110.

- Laurea Triennale in Fisica:

  a) Francesco Fiori "Esplosioni di Supernovæ: rivelazione di neutrini e onde gravitazionali", A.A. 2001-2002;

  b) Nicolino Curalli "Caratterizzazione di un rivelatore a sfere di Bonner per la misura del fondo neutronico nella sala dell'esperimento MEG al Paul Scherrer Institut", A.A. 2003-2004;

  c) Luca Perrozzi "Calibrazione del calorimetro a Xenon liquido con la riga γ da 9 MeV di diseccitazione del ^{58}Ni per l'esperimento MEG", A.A. 2004-2005.

- Laurea Triennale in Ingegneria Elettronica:

  a) Enrico Molinari "Tecnologia della fotorivelazione basata su dispositivi a semiconduttore", A.A. 2009-2010 (correlatore insieme alla Prof. Maria Giuseppina Bisogni ed al Prof. Alessandro Diligenti);

  b) Manlio Maria Puliti "Struttura bande del grafene col metodo del Tight-Binding (T. B. M.)", A.A. 2011-2012 (correlatore insieme al Prof. Massimo Macucci).

3) Partecipazione a progetti di ricerca nazionali e internazionali e ruolo ricoperto

- 1990-2004: Esperimento MACRO, Commissione Scientifica Nazionale 2 dell'INFN, in qualità di Collaboratore con incarico di Associazione INFN (fino al 1997) e di ricerca (dal 1999);
- 1994-2000: Esperimento CHOOZ, Commissione Scientifica Nazionale 2 dell'INFN, in qualità di Collaboratore con incarico di Associazione INFN (fino al 1997) e di ricerca (dal 1999);
- 1999-oggi: Esperimenti MEG e MEGII, Commissione Scientifica Nazionale 1 dell'INFN, in qualità di Collaboratore con incarico di Ricerca INFN;
- 2015-oggi: Esperimento LSPE, Commissione Scientifica Nazionale 2 dell'INFN, in qualità di Collaboratore con incarico di Ricerca INFN;
- 2003-2006: Esperimento MEG, Co-Coordinatore del software e della simulazione;
- 2007-2010 e 2013-2016: Esperimento MEG, Coordinatore italiano dell'analisi;
- PRIN2008: "Calorimetria adronica a doppia lettura", Responsabile locale con mansioni gestionali.

4) Descrizione dettagliata dell'attività di ricerca

Il lavoro di ricerca di Fabrizio Cei è stato svolto nell'ambito del gruppo INFN-Università degli Studi di Pisa che collabora (o ha collaborato) agli esperimenti MACRO, CHOOZ, MEG/MEGII e LSPE.

L'esperimento **MACRO** ("Monopole, Astrophysics, Cosmic Ray Observatory", pubblicazione MAC32), la cui acquisizione dati è iniziata nella primavera del 1989 ed è terminata il 19 dicembre 2000, era un osservatorio di grandi dimensioni ($77 \times 12 \times 9$ m^3), a struttura modulare, progettato per la rivelazione di eventi rari nella radiazione cosmica. L'esperimento ha utilizzato le tecniche dei contatori a scintillazione (476 contatori disposti su tre piani orizzontali e quattro verticali, con una massa totale di ≈ 600 tonn di scintillatore liquido), dei tubi a "streamer" e dei rivelatori plastici a "track-etch" ed ha raccolto dati per oltre undici anni in varie configurazioni. Fra gli scopi primari dell'esperimento occorre segnalare la ricerca di monopoli magnetici supermassivi e di altre particelle altamente ionizzanti, la misura del flusso e della distribuzione angolare dei muoni provenienti dal basso, prodotti da interazioni di neutrini atmosferici muonici all'interno della terra, la rivelazione dei neutrini emessi da collassi stellari gravitazionali (supernovæ di tipo II e Ib), la ricerca di sorgenti astrofisiche di neutrini e fotoni di altissima energia e lo studio indiretto della radiazione cosmica primaria attraverso l'osservazione dei muoni secondari di alta energia. Fra i numerosi risultati dell'esperimento è particolarmente rimarchevole la misura del deficit del flusso dei muoni provenienti dal basso rispetto alle previsioni teoriche,

interpretabile come un'evidenza di oscillazioni di neutrini muonici in neutrini di diverso sapore (Pubblicazione di maggior rilievo 1), pubblicazioni MAC14, MAC22, MAC28, MAC31, MAC41).

In questo esperimento il gruppo di Pisa ha progettato e realizzato un sistema di "trigger" per la rivelazione di neutrini emessi da collassi stellari gravitazionali (PHRASE, Pulse Height Recorder And Synchronous Encoder). Durante l'esplosione di una supernova di tipo II o Ib vengono emessi intensi sciami di neutrini di tutti i sapori, con un'energia media di $10 \div 20$ MeV ed un'energia totale di $2 \div 4 \times 10^{53}$ ergs, in un intervallo temporale di circa 10 s. L'osservazione delle proprietà (distribuzione in energia, struttura temporale, composizione in sapore etc.) di questi sciami di neutrini consentirebbe di ricavare importanti informazioni sulla dinamica delle fasi finali dell'evoluzione stellare ed offrirebbe l'opportunità di porre stringenti limiti su proprietà non-standard dei neutrini, quali massa, carica, momento magnetico, vita media, mescolamento fra i sapori ... Gli esperimenti dedicati all'osservazione dei collassi gravitazionali che fanno uso di contatori a scintillazione sono principalmente sensibili a $\bar{\nu}_e$, rivelati tramite la reazione:

$$\bar{\nu}_e \ + \ \mathrm{p} \ \rightarrow \ \mathrm{e}^+ \ + \ \mathrm{n} \tag{1}$$

seguita, con un ritardo medio di ≈ 180 μs, dal processo secondario:

$$\mathrm{n} \ + \ \mathrm{p} \ \rightarrow \ \mathrm{d} \ + \ \gamma_{2.2 \ \mathrm{MeV}} \tag{2}$$

Il circuito PHRASE è stato specificamente concepito per processare segnali di fotomoltiplicatori posti agli estremi di contatori a scintillazione di grandi dimensioni (12 m di lunghezza) e generare una condizione di "trigger" indipendente dalla posizione in cui una particella rilascia la propria energia; questa condizione veniva realizzata compensando elettronicamente l'attenuazione della luce di scintillazione all'interno dei contatori.

La ricerca di neutrini da collasso stellare gravitazionale è stata svolta in due fasi parallele, una "on-line" ed una "off-line". La fase "on-line" è consistita in un monitoraggio continuo della nostra Galassia, basato su un opportuno software che, processando in tempo reale i dati raccolti dal sistema dei contatori a scintillazione, ricostruiva energia, posizione lungo il contatore e tempo di arrivo degli eventi e generava una segnalazione di possibile esplosione di supernova in corrispondenza di anomalie nel numero di conteggi al di sopra di 10 MeV. Tale segnalazione veniva inviata, tramite una rete di computer e linee telefoniche, ai componenti del gruppo di Pisa e parallelamente ad una rete internazionale di rivelatori di collassi stellari gravitazionali (SNEWS), basata su un computer costantemente attivo che cerca coincidenze temporali fra segnalazioni di possibili esplosioni di supernova provenienti da esperimenti diversi (Pubblicazione MAC20). Un'identificazione rapida di un segnale di neutrini emessi da un collasso stellare gravitazionale potrebbe essere utilizzata per allertare gli osservatori astronomici in modo da consentire loro di osservare la luce emessa durante le prime fasi dell'esplosione di una supernova, che contiene informazioni mai raccolte finora sulla dinamica del collasso. Durante l'intero periodo di monitoraggio il sistema predisposto dal gruppo di Pisa ha ricevuto una media di 2-3 segnalazioni al mese, tutte immediatamente riconducibili a fluttuazioni statistiche del fondo dell'esperimento o a malfunzionamenti dell'apparato. L'analisi "off-line" è consistita nello studio della distribuzione temporale ed energetica degli eventi registrati nei contatori a scintillazione, con particolare enfasi alla possibile presenza di accumuli temporali non poissoniani. Le distribuzioni ottenute sono risultate in accordo con le previsioni della statistica di Poisson (Pubblicazione di maggior rilievo 2), pubblicazione MAC5).

Nell'ambito del gruppo di Pisa Fabrizio Cei è stato particolarmente impegnato nell'allestimento dell'apparato, nella simulazione e nell'analisi dei dati, nella misura e nel miglioramento delle prestazioni (risoluzione in posizione, tempo ed energia) dei contatori a scintillazione, nella definizione delle tecniche di calibrazione e nello studio del rumore di fondo, sia di origine fisica,

sia indotto da possibili malfunzionamenti dell'apparato. Il problema della definizione accurata e del frequente controllo della stabilità della scala in energia è assai importante in un esperimento dedicato alla rivelazione di collassi gravitazionali, a causa della rarità dell'evento che si vuole osservare e della necessità di mantenere l'apparato ininterrottamente attivo per almeno 10 anni. La precisa conoscenza della scala in energia è utile per scegliere le soglie di acquisizione, in particolare per il processo (2), in modo da ottenere contemporaneamente una buona efficienza di rivelazione ed un ragionevole rigetto del fondo di radioattività (Pubblicazione MAC1). La scala in energia è stata determinata utilizzando molteplici riferimenti, in particolare raggi cosmici penetranti (che rilasciavano nei contatori a scintillazione ≈ 40 MeV) e radioattività naturale: grazie all'alta risoluzione dei contatori di MACRO è stato infatti possibile individuare nello spettro di radioattività ambientale la riga del ^{208}Tl a 2.614 MeV, che forniva così un punto di calibrazione di bassa energia, senza introdurre sorgenti artificiali γ o β che avrebbero disturbato il normale funzionamento dell'apparato.

La situazione sperimentale nella prima metà degli anni 2000 e le possibili implicazioni per l'astrofisica e la fisica delle particelle derivanti dalla rivelazione dei neutrini emessi da una supernova sono state presentate da Fabrizio Cei in una comunicazione ad invito ad una conferenza internazionale (Pubblicazione di maggior rilievo 3)) e discusse dettagliatamente nel sesto capitolo del libro "*Trends in Experimental High Energy Physics*", editore Jacob R. Stevens (Pubblicazione LIB1).

Parallelamente alla ricerca di collassi stellari gravitazionali il gruppo di Pisa si è dedicato alla ricerca di monopoli magnetici con velocità comprese fra 1.2×10^{-3} e 10^{-1} c. Le caratteristiche dell'emissione di luce negli scintillatori di monopoli magnetici in questo intervallo di velocità sono infatti tali per cui anche un "trigger" basato sulla ricostruzione dell'energia rilasciata nei contatori, come PHRASE, risultava pienamente efficiente (Pubblicazione MAC15). L'informazione temporale e spaziale fornita dai contatori a scintillazione è stata utilizzata per ricostruire la velocità delle particelle traversanti l'apparato e selezionare i possibili candidati di monopolo. Gli eventi sopravvissuti alla selezione in velocità sono stati studiati in dettaglio, per verificare se mostrassero le caratteristiche attese per un monopolo magnetico: in nessun caso l'uscita in luce e la durata dell'impulso sono risultati in accordo con quanto atteso per un monopolo avente velocità eguale a quella misurata (Pubblicazioni PRE1 e PRE2). Con questa analisi è stato ottenuto un limite sul flusso di monopoli magnetici nella nostra Galassia inferiore per un fattore cinque al limite astrofisico di Parker $\Phi < 10^{-15}$ cm^{-2} s^{-1} sr^{-1}. Tale risultato è stato pubblicato in un articolo riassuntivo dei risultati complessivi dell'esperimento nella ricerca di monopoli magnetici, insieme ai limiti basati su altre tecniche; il limite globale di MACRO risulta il migliore al mondo nell'intervallo $10^{-4} < \beta < 0.9$. Fabrizio Cei ha collaborato alla stesura dei programmi di analisi, è stato responsabile dell'analisi di monopolo basata sui dati raccolti con il circuito PHRASE ed è stato membro del gruppo di lavoro della collaborazione MACRO per il calcolo dei limiti sul flusso e la stesura degli articoli riguardanti la ricerca di monopoli magnetici (Pubblicazione di maggior rilievo 4), pubblicazioni MAC17 e MAC33). Durante la fruizione del contratto di ricerca presso University of Michigan Fabrizio Cei ha elaborato un'analisi alternativa, che, utilizzando l'informazione combinata degli scintillatori e dei tubi a "streamer", consentiva di estendere l'intervallo di sensibilità a velocità più alte ($\beta \to 1$). Il vantaggio derivante dall'utilizzo dell'informazione combinata di un "trigger" per la misura dell'energia e del tempo di volo e di un apparato tracciante consisteva in una migliore selezione delle particelle che attraversavano il rivelatore, in una precisa ricostruzione della loro traiettoria ed in un'accurata misura della loro perdita di energia per unità di percorso e della loro velocità. Il risultato complessivo era una drastica diminuzione del fondo dovuto ai raggi cosmici penetranti di alta energia. Con questa tecnica, analizzando circa un anno di dati, è stato ottenuto un limite sul flusso di monopoli

veloci: $\Phi < 2.3 \times 10^{-15}$ cm^{-2} s^{-1} sr^{-1}. Fabrizio Cei ha inoltre collaborato all'allestimento ed ad una prima analisi dei dati di un sistema di WFD a 200 MHz, progettato e realizzato dai fisici americani della collaborazione per la rivelazione di monopoli magnetici di bassa velocità ($\beta \lesssim 10^{-3}$). I dati raccolti con questo sistema sono stati successivamente analizzati in dettaglio ed hanno contribuito significativamente al limite globale ottenuto dall'esperimento.

Fabrizio Cei ha infine contribuito alla ricerca nei dati di MACRO di particelle a carica frazionaria (LIPs, "Lightly Ionizing Particles"), basata sulla coincidenza spaziale e temporale fra una traccia registrata dal sistema dei tubi a "streamer" ed un basso rilascio di energia nei contatori a scintillazione. Il limite ottenuto sul flusso di particelle a carica frazionaria nei raggi cosmici è $\Phi < 1.5 \times 10^{-15}$ cm^{-2} s^{-1} sr^{-1} (Pubblicazione PRE3).

Fabrizio Cei è coautore di 46 pubblicazioni su riviste internazionali della collaborazione MACRO, ha 4 presentazioni a conferenze internazionali, di cui una ad invito, relative al lavoro svolto in tale esperimento (Pubblicazioni PRE1-PRE4) e due presentazioni alla Società Italiana di Fisica (Pubblicazioni SIF1-SIF2).

L'esperimento **CHOOZ**, la cui acquisizione dati è iniziata nella primavera del 1997 ed è terminata nell'agosto 1998, ha esplorato la possibilità di oscillazioni di neutrino negli intervalli di differenza di masse ed angoli di mescolamento $\Delta m^2 \gtrsim 10^{-3}$ eV^2 e $\sin^2(2\,\theta) > 0.1$ tramite l'eventuale scomparsa di $\bar{\nu}_e$ prodotti da un reattore nucleare. Gli antineutrini venivano rivelati utilizzando un liquido scintillatore drogato con gadolinio. La segnatura dell'evento di $\bar{\nu}_e$ era la reazione (1), seguita dalla termalizzazione e cattura del neutrone ad opera di un nucleo di gadolinio; la luce di scintillazione prodotta dal positrone e dagli elettroni Compton diffusi dai fotoni di diseccitazione del gadolinio ($E_{tot} \approx 8$ MeV) veniva raccolta da 192 fototubi. Una caratteristica fondamentale di CHOOZ era la sua locazione: il rivelatore era infatti situato all'interno di una grotta, con una copertura di ≈ 115 m di roccia, che riduceva il flusso dei raggi cosmici di un fattore ≈ 300 rispetto al corrispondente flusso all'aperto; conseguentemente risultava diminuito a circa 1 evento/giorno il fondo più preoccupante, costituito da neutroni veloci prodotti dai raggi cosmici per spallazione.

Le responsabilità del gruppo di Pisa nell'esperimento CHOOZ sono state lo studio delle caratteristiche dei fotomoltiplicatori, la definizione del loro punto di lavoro, la loro installazione e la loro calibrazione, il progetto e lo sviluppo della logica di "trigger" e l'implementazione di un sistema di acquisizione costituito da 24 schede ADC VME controllate da un processore a rete neurale (CNAPS, pubblicazione CHO2), oltre ovviamente all'analisi dei dati sperimentali. Per la caratterizzazione dei fotomoltiplicatori il gruppo di Pisa ha progettato ed allestito una "test facility" con cui sono state misurate le caratteristiche di 250 fototubi (Pubblicazione CHO1). Fabrizio Cei ha collaborato al progetto ed alla realizzazione della "test facility", occupandosi in particolare del problema della compensazione del campo magnetico terrestre tramite schermi di μ-metal ed una configurazione opportuna di bobine di Helmholtz.

Durante oltre un anno di tempo vivo, con varie potenze del reattore, l'esperimento CHOOZ ha raccolto oltre 2700 eventi di $\bar{\nu}_e$; non è stata osservata alcuna evidenza di oscillazioni $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_x$, al 90 % di livello di confidenza, per $\sin^2(2\,\theta) > 0.1$ e grandi Δm^2 e per $\Delta m^2 > 7 \times 10^{-4}$ eV^2 e grandi $\sin^2(2\,\theta)$. Da questo risultato discende un vincolo molto stretto sull'angolo di mescolamento fra il primo ed il terzo autostato di massa dei neutrini: $\sin^2(2\,\theta_{13}) < 0.11$, che ha costituito per quasi quindici anni il limite mondiale più stringente su questa grandezza (Pubblicazioni di maggior rilievo 5) e 6), pubblicazione CHO3).

È stato inoltre dimostrato che l'asimmetria nella distribuzione della differenza delle posizioni ricostruite del positrone e del neutrone (dovuta al fatto che quest'ultimo è emesso preferenzialmente in avanti) consente di ricostruire la direzione di provenienza dei neutrini all'interno di un cono di $\approx 18°$ di apertura. Questi risultati possono essere estrapolati alla localizzazione della

direzione di provenienza dei neutrini emessi da una supernova ottenendo, a parità di massa del rivelatore, un'accuratezza confrontabile con quella prevista per i rivelatori Čerenkov ad acqua (Pubblicazione di maggior rilievo 7)).

Fabrizio Cei ha partecipato alle misure di radioattività ambientale, livello di contaminazione di radon e campo magnetico (per quest'ultima misura ha personalmente curato la progettazione e realizzazione di un'apparecchiatura a bobina rotante basata sull'induzione elettromagnetica) all'interno della galleria ove era alloggiato l'esperimento, all'allestimento del rivelatore e, come già osservato, alla progettazione e costruzione del sistema di test per i fotomoltiplicatori. Si è poi dedicato alla simulazione dei vari tipi di eventi nell'apparato (neutrini, fotoni, neutroni ...), all'elaborazione di algoritmi per la ricostruzione degli eventi, basati sulla distribuzione della carica raccolta sui fotomoltiplicatori, ed all'analisi dei dati, occupandosi in particolare di raffinamenti nella definizione della scala in energia tramite simulazioni Monte Carlo del contenimento delle particelle nel rivelatore e della saturazione della luce di scintillazione per positroni a fine range.

Fabrizio Cei è coautore delle 6 pubblicazioni su riviste internazionali della collaborazione CHOOZ ed ha una comunicazione su invito alla Società Italiana di Fisica (Pubblicazione SIF3), in cui ha presentato una panoramica degli esperimenti di oscillazioni di neutrino condotti a reattori nucleari fino alla fine degli anni novanta.

L'esperimento **MEG** (Pubblicazione MEG11) al Paul Scherrer Institut (PSI) di Villigen (Svizzera), dedicato alla ricerca del decadimento con violazione del sapore leptonico $\mu^+ \to e^+\gamma$, ha acquisito dati dall'autunno del 2008 all'estate del 2013. Il decadimento $\mu^+ \to e^+\gamma$ è sostanzialmente proibito nel modello standard delle particelle elementari (il rapporto di decadimento, tenendo conto delle oscillazioni di neutrino, è $\sim 10^{-55}$), ma è previsto da un'ampia classe di estensioni di tale modello (in particolare teorie Supersimmetriche di Grande Unificazione) con rapporti di decadimento nell'intervallo $10^{-14} \div 10^{-11}$ rispetto all'usuale decadimento del muone. Un'osservazione di tale evento sarebbe un'evidenza diretta incontrovertibile della necessità di fisica oltre il modello standard, mentre un risultato negativo in questo intervallo di probabilità costituirebbe un forte vincolo sui parametri e gli ulteriori sviluppi degli schemi di estensione del modello. L'evento $\mu^+ \to e^+\gamma$ ha una segnatura molto chiara: un fotone ed un positrone, entrambi con energia $E = m_\mu/2 = 52.83$ MeV, emessi in coincidenza temporale in direzioni opposte. La rivelazione dell'evento richiede quindi la misura del tempo e del quadrimpulso del fotone e del positrone. L'esperimento ha utilizzato il fascio $\pi E5$ del PSI, una linea di fascio continua in grado di fornire oltre $10^8\,\mu^+/s$; il quadrimpulso del positrone veniva misurato da uno spettrometro magnetico equipaggiato con sedici camere a deriva ed un solenoide superconduttore, mentre la corrispondente informazione temporale (oltre ad un'ulteriore informazione direzionale, di minore precisione) era fornita da un sistema di scintillatori plastici ("Timing Counters", TC); l'energia, il tempo ed il punto d'interazione del fotone erano misurati in un calorimetro omogeneo a Xenon liquido (volume ≈ 800 l), scelto per le sue proprietà di elevata densità ed uscita in luce e breve tempo di decadimento della luce di scintillazione.

Le risoluzioni ottenibili in ciascuna di queste misure sono parametri cruciali per definire la sensibilità dell'esperimento. È infatti necessario fissare, per ciascuna delle grandezze da misurare, una finestra intorno al valore nominale corrispondente ad una data efficienza sul segnale: tanto peggiore è la risoluzione su una variabile, tanto più larga è la corrispondente finestra e tanto maggiore è il fondo residuo, formato da coppie fittizie $e^+\gamma$ che cadono all'interno di queste finestre di accettanza. Le risoluzioni FWHM (Full Width Half Maximum) richieste per raggiungere una sensibilità di 10^{-13} in due anni di acquisizione dati con un fascio di $3 \times 10^7\,\mu^+/s$ arrestati nel bersaglio sono 1 % sull'impulso del positrone, 4 % sull'energia del fotone (entrambe a 52.83 MeV), 20 mrad sull'angolo relativo fotone-positrone e 150 ps sulla differenza temporale fra i due segnali.

Le responsabilità del gruppo di Pisa nell'ambito dell'esperimento sono state: lo sviluppo e l'implementazione del sistema di "trigger", lo sviluppo del calorimetro a Xenon liquido in collaborazione con un gruppo giapponese, lo studio del comportamento dei fotomoltiplicatori a bassa temperatura, l'elaborazione di parte del software per la simulazione e la ricostruzione degli eventi e la determinazione della sensibilità dell'esperimento, lo sviluppo delle tecniche di calibrazione e lo studio dei fondi di sala.

Il comportamento dei fotomoltiplicatori a bassa temperatura è stato studiato tramite un'opportuna "facility" criogenica, installata permanentemente nel laboratorio dell'INFN di Pisa ed equipaggiata con un fotomoltiplicatore di riferimento in posizione fissa, un LED ad intensità variabile, un laser a 337 nm e sorgenti di calibrazione (estraibili) α e γ. Con questo sistema è stato possibile misurare il guadagno dei fotomoltiplicatori e la loro efficienza quantica, studiare la stabilità di comportamento e la risposta dei fotomoltiplicatori in condizioni di fascio intenso ("crowding") e misurarne la risoluzione temporale (Pubblicazione MEG3).

Il sistema di "trigger" è stato progettato per ottenere una frequenza di acquisizione (dovuta al fondo) non superiore a $5 \div 10$ Hz, in corrispondenza di un fascio di 3×10^7 μ^+/s. La selezione degli eventi era basata su una rapida valutazione della direzione e dei tempi di interazione del fotone e del positrone e dell'energia del fotone (Pubblicazioni MEG12, MEG13 e MEG14). Poiché la formazione del segnale nelle camere a deriva richiede un tempo dell'ordine di mezzo microsecondo, il "trigger" utilizzava solo le informazioni del calorimetro e dei TC. Il sistema era formato da tre stadi sequenziali di selezione ed era basato su due differenti tipi di schede, equipaggiate con FPGA (Field Programmable Gate Arrays) accoppiati a Flash ADC a 100 MHz. Due gruppi di schede di primo e secondo tipo operavano indipendentemente sui segnali di fotomoltiplicatore provenienti dal calorimetro e dai TC, fornendo una misura delle grandezze fisiche di interesse; una scheda finale di secondo tipo combinava le informazioni del calorimetro e dei TC e generava il "trigger" se le condizioni prefissate (carica totale maggiore di un valore minimo, differenza temporale all'interno di una finestra etc.) venivano soddisfatte. Il sistema ha operato nell'esperimento per l'intera durata della presa dati; la frequenza di acquisizione ottenuta sperimentalmente è stata di ~ 10 Hz, con un'efficienza sul segnale superiore al 95 %.

Dopo aver collaborato al disegno della scheda di "trigger" di primo tipo, Fabrizio Cei si è prevalentemente dedicato allo studio dei fondi di sala e delle tecniche di calibrazione ed all'elaborazione del software di simulazione ed analisi dei dati, con particolare riferimento alla ricostruzione degli eventi nel calorimetro a Xenon liquido (tesi di Laurea Specialistica Perrozzi e Porcelli, pubblicazione PRE7), ed all'analisi di massima verosimiglianza per la determinazione del limite sperimentale sul decadimento $\mu^+ \to e^+\gamma$.

In un esperimento con un fascio ad altissima intensità i fondi di sala possono essere assai elevati; è quindi necessario misurarli in una configurazione il più possibile simile a quella definitiva e se necessario predisporre opportuni schermaggi per ridurre i loro effetti. Il fondo di neutroni è particolarmente pericoloso, perché i neutroni veloci (alcuni MeV di energia) interagiscono frequentemente nello Xenon liquido tramite reazioni inelastiche ad alta sezione d'urto con produzione di fotoni, inducendo un'illuminazione diffusa all'interno del calorimetro. Il fondo di neutroni è stato misurato più volte con il fascio attivo utilizzando un rivelatore a NaI con la tecnica dell'attivazione neutronica dello Iodio (Pubblicazione MEG5) ed un sistema di sfere di Bonner equipaggiate con uno scintillatore a LiI ed un rivelatore gassoso a ^{3}He per la determinazione dello spettro. Il flusso misurato in condizioni di fascio acceso è di $2 \div 3$ $\mathrm{n\,cm^{-2}\,s^{-1}}$ per la componente termica e < 10 $\mathrm{n\,cm^{-2}\,s^{-1}}$ per la componente non termica, con uno spettro esteso fino ad alcuni MeV. Inserendo un muro di cemento di un metro di spessore in funzione di schermaggio, è stata ottenuta una riduzione del fondo di circa un fattore dieci, sufficiente per

mantenere la contaminazione indotta dai neutroni ad un livello tollerabile. Fabrizio Cei è stato responsabile della progettazione ed esecuzione della misura spettrale ed ha curato sia la parte organizzativa (scelta ed acquisto dei rivelatori e dell'elettronica), sia la calibrazione dell'apparato sperimentale, sia la successiva analisi dei dati tramite programmi di deconvoluzione in parte scritti personalmente ed in parte ottenuti modificando opportunamente dei codici preesistenti per adattarli alle specifiche necessità (tesi di Laurea Triennale Curalli).

Le tecniche di calibrazione rivestono un'importanza particolare in un esperimento di precisione come MEG, la cui sensibilità dipende in maniera cruciale dalle risoluzioni sperimentali. Per misurare la risposta del calorimetro a Xenon liquido a fotoni di circa 50 MeV si utilizza la reazione di scambio carica $\pi^-\mathrm{p} \rightarrow \pi^0\mathrm{n}$, seguita dal decadimento del π^0 in due fotoni. Selezionando fotoni emessi a 180° tramite la coincidenza fra il rivelatore a Xenon liquido ed un calorimetro a cristalli, è possibile isolare i fotoni agli estremi superiore ed inferiore dello spettro energetico del decadimento (rispettivamente 83 e 55 MeV) e misurare una risoluzione FWHM del 5 % a 55 MeV, valore prossimo a quanto richiesto (Pubblicazioni MEG1, MEG4 e MEG20). Questa tecnica di calibrazione, pur essendo in linea di principio la migliore, non è applicabile frequentemente per la necessità di sostituire il bersaglio dell'esperimento (polietilene) con uno ad idrogeno liquido e di cambiare la polarità della linea di fascio da positiva (μ^+) a negativa (π^-). Il gruppo di Pisa ha quindi elaborato una serie di tecniche di calibrazione alternative, di uso molto più frequente, fra cui in particolare l'utilizzo di sorgenti radioattive α installate permanentemente all'interno del rivelatore (Pubblicazione MEG2) e di reazioni nucleari indotte da un acceleratore di protoni Cockroft-Walton su bersagli di Li e Be (Pubblicazione di maggior rilievo 8)) e l'emissione di fotoni da 9 MeV a seguito di catture neutroniche ottenute accoppiando un generatore di neutroni ad un'opportuna combinazione di moderatori di polietilene e fogli di Nickel. Per quest'ultima tecnica Fabrizio Cei ha predisposto il sistema di acquisizione della stazione di test ed i programmi di analisi e simulazione ed ha partecipato all'esecuzione delle misure ed alla relativa analisi dei dati (tesi di Laurea Triennale Perrozzi).

La simulazione dell'esperimento era basata sul pacchetto GEANT3.21 ed includeva una sezione, indipendente dal rivelatore, per la generazione degli eventi $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$, dei possibili rumori di fondo e degli eventi di calibrazione (LED, α, neutroni, reazione di scambio carica ...) ed una sezione, specifica per l'esperimento, che simulava il passaggio delle particelle attraverso i vari rivelatori e studiava la formazione dei segnali. Questa seconda sezione era divisa a sua volta in sottosezioni indipendenti, ciascuna delle quali relativa ad uno degli elementi che costituivano l'apparato (TC, spettrometro, calorimetro ...). Fabrizio Cei, insieme ad un collega giapponese, ha rivestito dal 2003 al 2006 il ruolo di coordinatore e responsabile della simulazione Monte Carlo. In questo periodo il codice di simulazione ha subito notevoli miglioramenti, soprattutto per ciò che concerne la formazione dei segnali nei vari rivelatori, raggiungendo al termine del periodo di analisi un buon accordo con i dati sperimentali.

Il software di ricostruzione degli eventi utilizzava un ambiente (ROME), elaborato da membri della collaborazione, scritto in C++ e basato sul pacchetto ROOT. In questo ambiente la programmazione risulta molto semplice anche per utenti non esperti in quanto l'ambiente stesso, in fase di compilazione del codice, provvede alla definizione ed alla consistenza interna delle strutture tipiche del C++ (classi, ineritanze ...), lasciando all'utente il solo compito di implementazione degli algoritmi (Pubblicazione di maggior rilievo 9)).

Fabrizio Cei si è inizialmente dedicato all'elaborazione di un gruppo di routines ("tasks") per la calibrazione e la ricostruzione degli eventi nel calorimetro a Xenon liquido basate sull'informazione di carica e tempo fornita dai fotomoltiplicatori. In un secondo tempo ha elaborato un codice per l'analisi di massima verosimiglianza dei dati dell'esperimento che, partendo dalle distribuzioni di probabilità (PDF) in energia del fotone e del positrone ed in angolo e tempo

relativo fra fotone e positrone applica l'algoritmo di Feldman e Cousins per determinare la curva di livello di confidenza (e quindi i limiti inferiore e superiore, ad un livello di confidenza prefissato) sul numero di eventi di segnale osservati nell'esperimento. Questa tecnica è particolarmente efficiente in un esperimento come MEG in quanto le distribuzioni degli eventi derivanti dal fondo accidentale (dominante !) sono misurate sperimentalmente; ha inoltre il vantaggio, rispetto ad una tecnica di analisi basata sul numero di conteggi in una finestra di segnale ("cut and count"), di non essere influenzata da effetti di bordo. Il codice, scritto in C++, utilizza un proprio database ed una propria libreria di funzioni per la definizione delle PDF, che vengono aggiornati ogni volta che i dati vengono ri-analizzati utilizzando calibrazioni più accurate. Questo codice verrà utilizzato anche nell'analisi dei dati raccolti con la nuova versione dell'esperimento (MEGII, vedi in seguito), in quanto gli algoritmi su cui è basato sono immediatamente adattabili ad un nuovo rivelatore, pur di sostituire opportunamente le PDF.

Dall'autunno 2007 all'estate 2010 e dal 2013 al 2016 Fabrizio Cei ha rivestito il ruolo di coordinatore italiano dell'analisi dell'esperimento. In questo periodo sono stati analizzati in dettaglio i dati raccolti nel 2008 e nel 2009 e sono state definite le procedure per il trattamento interno dei dati e per la pubblicazione dei risultati su riviste ed a conferenze internazionali. Le analisi di massima verosimiglianza svolte indipendentemente dal gruppo italiano e da quello giapponese (ciascuno con un proprio codice) sono risultate in buon accordo per tutti i periodi di presa dati. I risultati dei soli dati 2008 (Pubblicazione MEG6) e la combinazione dei dati 2009 e 2010 sono stati pubblicati su riviste internazionali e mostrati a prestigiose conferenze (Pubblicazione di maggior rilievo 10), pubblicazioni PRE9 e PRE10). In qualità di coordinatore del software e dell'analisi Fabrizio Cei ha ripetutamente illustrato la struttura del software stesso ed i risultati dell'esperimento alla Commissione Scientifica Nazionale I dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare. Nel 2013 l'esperimento MEG ha pubblicato un nuovo limite superiore sul rapporto di decadimento:

$$\frac{\mu^+ \to e^+ + \gamma}{\mu^+ \to e^+ + \nu_{\mathrm{e}} + \bar{\nu}_\mu} < 5.7 \times 10^{-13} \tag{3}$$

che migliorava il limite precedente ottenuto da MEG nel 2011 di un fattore quattro e risultava venti volte più stringente del miglior limite esistente prima che MEG entrasse in funzione (Pubblicazione di maggior rilievo 11), pubblicazioni PRE11 e PRE12).

Durante gli anni dal 2012 al 2015 sono stati compiuti ulteriori importanti progressi nelle procedure di analisi, quali l'elaborazione di tecniche per tenere in conto la progressiva deformazione del bersaglio e l'identificazione di eventi in cui il bersaglio di arresto dei muoni viene attraversato due volte dal positrone emesso nel decadimento, creando una "traccia mancante" che altera la misura temporale, e di eventi in cui il positrone annichila in volo con un elettrone dell'apparato, producendo fotoni di alta energia. Il campione dei dati è stato quindi interamente processato da zero, includendo i dati raccolti nel 2012 e 2013 e raggiungendo una statistica circa doppia di quella utilizzata per il risultato (3). L'analisi completa dei dati sperimentali dal 2009 al 2013 ha consentito alla collaborazione di determinare il limite finale dell'esperimento MEG, fase 1:

$$\frac{\mu^+ \to e^+ + \gamma}{\mu^+ \to e^+ + \nu_{\mathrm{e}} + \bar{\nu}_\mu} < 4.2 \times 10^{-13} \tag{4}$$

con un ulteriore miglioramento di un fattor 1.5 (Pubblicazione di maggior rilievo 13) e pubblicazione MEG15). La partecipazione di Fabrizio Cei a questa analisi finale è avvenuta in qualità di coordinatore dell'analisi e di membro di un editorial board composto da due fisici italiani e due giapponesi per la scrittura dell'articolo finale riepilogativo di tutti i risultati dell'esperimento MEG. Nello stesso periodo Fabrizio Cei ha ccordinato un'analisi finalizzata alla misura della polarizzazione residua dei muoni nell'apparato, tramite l'asimmetria avanti-dietro in funzione

dell'energia della distribuzione angolare dei positroni emessi nel decadimento del muone. Questa misura è risultata in buon accordo con le previsioni teoriche basate sul modello standard e sullo studio dei processi di depolarizzazione nell'apparato (Pubblicazione di maggior rilievo 14) e pubblicazione MEG 22); il valore misurato ($P_\mu = -0.86$) costituisce un input sperimentale per i programmi di analisi finalizzati alla ricerca del decadimento $\mu^+ \to e^+\gamma$. L'esperimento MEG ha inoltre misurato per la prima volta il decadimento radiativo dei muoni ad alta statistica in un fascio altamente polarizzato nella regione di energia vicina a quella dei limiti cinematici del decadimento $\mu^+ \to e^+\gamma$ (Pubblicazione MEG23).

L'esperienza guadagnata analizzando i dati raccolti nella prima fase di MEG ha spinto la collaborazione ad una revisione critica delle caratteristiche dell'apparato ed all'elaborazione di una proposta di upgrade dell'esperimento (MEGII) che è stata approvata dal PSI nel 2013 e che prevede sostanziali miglioramenti in tutti i sottorivelatori dell'apparato sperimentale, finalizzati ad ottenere più elevate risoluzioni ed all'utilizzo di un fascio di muoni più intenso (Pubblicazione VAR1). In particolare, nel sistema tracciante l'attuale sistema di camere a deriva sarà sostituito da una nuova camera a volume unico, nel contatore a scintillazione per la misura del tempo le barre di scintillatore liquido verranno rimpiazzate da una matrice di piastrelle lette da SiPM (Silicon Photomultiplier) e nel calorimetro a Xenon liquido l'accettanza verrà aumentata con un nuovo disegno delle pareti laterali ed i fotomoltiplicatori della faccia d'ingresso del fotone saranno anch'essi sostituiti da SiPM di minori dimensioni per assicurare una maggiore granularità. Nella scrittura della proposta Fabrizio Cei è stato uno dei responsabili della sezione dedicata alla sensibilità sperimentale ottenibile: in due anni di acquisizione dati del nuovo rivelatore si prevede di raggiungere una sensibilità di 4×10^{-14} sul rapporto di decadimento $\mu^+ \to e^+\gamma$, guadagnando un ordine di grandezza rispetto alla sensibilità finale raggiunta da MEG fase 1.

Oltre alle modifiche sul sistema di trigger necessarie per le nuove esigenze di MEGII il gruppo di Pisa ha la responsabilità (insieme al gruppo INFN di Lecce) del progetto e della costruzione della nuova camera a deriva, che è attualmente in fase di avanzato allestimento nei laboratori della sezione INFN di Pisa a S.Piero a Grado (Pubblicazione MEG17). Le risoluzioni previste per la nuova camera e la resistenza all'invecchiamento della miscela di gas sono state misurate sperimentalmente tramite prototipi di varie dimensioni (Pubblicazioni MEG18, MEG19 e MEG21), risultando in accordo con le richieste sperimentali; è inoltre in fase di sviluppo un ulteriore sistema di calibrazione, specificamente destinato al sistema di tracciatura e basato sulla diffusione Mott di un fascio monocromatico di positroni (Pubblicazione MEG16).

Per l'esperimento MEGII Fabrizio Cei ha elaborato un codice di "pattern recognition" da applicare ai dati della nuova camera. Il problema del pattern recognition per MEGII è molto più complesso che per la prima fase di MEG, a causa dell'aumentata intensità del fascio (oltre un fattore 2 in più nel numero di muoni arrestati sul bersaglio) e del gran numero di misure sperimentali fornite da una camera di 2 m di lunghezza, equipaggiata con 1300 fili di segnale. Il numero medio di hits previsto dalle simulazioni è varie centinaia, con decine di tracce di positroni sovrapposte. Il codice utilizza la tecnica dell'incrocio dei fili e la possibilità di disporre di una rozza ($\sigma_z \sim 10$ cm) misura della coordinata longitudinale dell'hit nel filo (basata sulla divisione di carica agli estremi) per formare dei segmenti di traccia, rigettando hits troppo distanti dallo sviluppo della traccia stessa. Successivamente vengono eliminati i segmenti duplicati, sommati opportunamente quelli formati da hits molto vicini spazialmente e selezionati quelli corrispondenti a varie porzioni di traccia; infine si cerca di riunire in un unico segmento due o più segmenti appartenenti a diverse sezioni di traccia e di recuperare alcuni hits non assegnati. Il codice è in fase di continuo sviluppo e verrà utilizzato come strumento di preselezione rapida di hits e segmenti di traccia da fornire ad un algoritmo basato sul filtro di Kalman per la ricostruzione completa delle tracce.

Fabrizio Cei è coautore delle 23 pubblicazioni su riviste internazionali della collaborazione MEG, ha 6 presentazioni a conferenze internazionali relative al lavoro svolto su tale progetto e 2 presentazioni su invito a conferenze internazionali (Pubblicazioni PRE6 e PRE9) in cui ha illustrato una panoramica delle ricerche di violazione del sapore leptonico nei vari canali. È infine coautore di un articolo di rassegna sulla ricerca di violazione del sapore leptonico pubblicato nel 2014 nella monografia "*Neutrino Masses and Oscillations*" della rivista "*Advances in High Energy Physics*" (Pubblicazione di maggior rilievo 12)).

L'esperimento **LSPE** (**L**arge **S**cale **P**olarization **E**xplorer), condotto in collaborazione fra INFN ed Agenza Spaziale Italiana (ASI), si propone di misurare i modi B di polarizzazione della radiazione cosmica di fondo tramite un rivelatore, posizionato su un pallone, da inviare per un volo di circa 30 giorni nella notte artica. Una misura ad alta precisione dei modi B di polarizzazione a grandi scale angolari consentirebbe di determinare il contributo a tali modi proveniente da onde gravitazionali primordiali. Il rivelatore sarà costituito da due sottorivelatori indipendenti, STRIP e SWIPE: il primo è una matrice di polarimetri coerenti, il cui scopo principale è la misura della radiazione di bassa frequenza, mentre il secondo è una matrice di polarimetri bolometrici per la misura della polarizzazione della polvere galattica e delle radiazione di fondo cosmico. Nell'ambito di questo esperimento il gruppo di Pisa è impegnato nello sviluppo dei sensori bolometrici e di filtri LC superconduttori ad alto Q da impiegare nel rivelatore SWIPE (quest'ultimo lavoro è condotto in collaborazione con la sezione INFN di Genova e con il laboratorio NEST di Pisa, Pubblicazioni LSPE1 e LSPE2). L' attività di Fabrizio Cei nel progetto è consistita per ora nel partecipare ad uno studio di simulazione degli effetti dei raggi cosmici carichi sul rivelatore, basato su un codice astrofisico di uso generale (PLANETOCOSMICS), interfacciato con GEANT4 per la simulazione dell'esperimento.

Fabrizio Cei è stato inoltre responsabile locale con mansioni di gestione delle risorse del PRIN2008 "Sviluppo di elementi sensibili a fibre ed elettronica dedicata per calorimetri adronici a doppia lettura", il cui scopo era la realizzazione di un sistema calorimetrico in grado di discriminare le componenti veloci (Ćerenkov), lente (scintillazione prodotta da particelle cariche) ed ancora più lente (scintillazione prodotta da neutroni tramite frammentazione nucleare) del segnale generato in un calorimetro da uno sciame adronico. Questa attività è in stretta sinergia con le tecnologie in uso in MEG ed in altri esperimenti (Pubblicazione PRI1).

Firma

Pisa, 1 Maggio 2017

Elenco delle pubblicazioni di maggior rilievo di Fabrizio Cei

- 1) MACRO Collaboration *"Measurements of atmospheric neutrino oscillations, global analysis of the data collected with the MACRO detector"*, Eur. Phys. J. **C36**, (2004), 323-339
- 2) MACRO Collaboration *"Search for stellar gravitational collapses with the MACRO detector"*, Eur. Phys. J. **C37**, (2004), 265
- 3) Fabrizio Cei *"Neutrinos from Supernovæ: experimental status"*, invited talk given at 2nd International Workshop on Matter, Anti-Matter and Dark Matter, Trento (Italia), 29-30 October 2001, published in Int. Journal of Mod. Phys. A **17**, (2002), 1765-1777
- 4) MACRO Collaboration *"Final results of magnetic monopole searches with the MACRO experiment"*, Eur. Phys. J. **C25**, (2002), 511
- 5) CHOOZ Collaboration *"Limits on Neutrino Oscillations from the CHOOZ Experiment"*, Phys. Lett. **B466**, (1999), 415-430
- 6) CHOOZ Collaboration *"Search for neutrino oscillations on a long base-line at the CHOOZ nuclear power station"*, Eur. Phys. J. **C27**, (2003), 331
- 7) CHOOZ Collaboration *"Determination of neutrino incoming direction in the CHOOZ experiment and Supernova explosion location by scintillator detectors"*, Phys. Rev. **D61**, (1999), 012001
- 8) J. Adam et al. *"Calibration and monitoring of the MEG experiment by a proton beam from a Cockroft-Walton accelerator"*, NIM **A641**, (2011), 19-32
- 9) P. Cattaneo et al. *"The architecture of MEG simulation and analysis software"*, Eur. Phys. J. Plus, **126**, (2011), 60
- 10) J. Adam et al. *"New Limit on the Lepton-Flavor-Violating Decay $\mu^+ \to e^+\gamma$."*, Phys. Rev. Lett. **107**, (2011), 171801
- 11) J. Adam et al. *"New constraint on the existence of the $\mu \to e\gamma$ decay."*, Phys. Rev. Lett. **110**, (2013), 201801
- 12) Fabrizio Cei and Donato Nicoló *"Lepton Flavour Violation Experiments"*, in *"Advances in High Energy Physics"*, Vol. 2014, (2014), Article Id 282915, 31 pages
- 13) A.M. Baldini et al. (MEG Collaboration) *"Search for the lepton flavour violating decay $\mu^+ \to e^+\gamma$ with the full dataset of the MEG experiment "*, Eur. Phys. J. **C76**, (2016), 434
- 14) A.M. Baldini et al. (MEG Collaboration) *"Muon polarization in the MEG experiment: predictions and measurements "*, Eur. Phys. J. **C76**, (2016), 223

Elenco completo delle pubblicazioni di Fabrizio Cei

1. Pubblicazioni su Riviste della collaborazione MACRO.

- MAC1) A. Baldini et al. *"The Use of the Reaction $^9Be(\alpha,\gamma n)^{12}C$ to Determine the Energy Scale and the Efficiency of Stellar Collapse Neutrino Detectors"*, NIM **A305**, (1991), 475-483
- MAC2) MACRO Collaboration *"Arrival Time Distributions of Very High Energy Cosmic Ray Muons in MACRO"*, Nucl. Phys. **B370**, (1992), 432-444
- MAC3) MACRO Collaboration *"Study of the Ultra High Energy Primary Cosmic Ray Composition with the MACRO Experiment"*, Phys. Rev. **D46**, (1992), 895
- MAC4) MACRO Collaboration *"Measurement of the Decoherence Function with the MACRO Detector at Gran Sasso"*, Phys. Rev. **D46**, (1992), 4836-4845
- MAC5) MACRO Collaboration *"Search for Neutrino Burst from Collapsing Stars with the MACRO Detector"*, Astroparticle Phys. **1**, (1992), 11-25
- MAC6) MACRO Collaboration *"Search for Nuclearites Using the MACRO Detector"*, Phys. Rev. Lett. **69**, (1992), 1860-1863
- MAC7) MACRO Collaboration *"First Supermodule of the MACRO Detector at Gran Sasso"*, NIM **A324**, (1993), 337-362
- MAC8) MACRO Collaboration *"Muon Astronomy with the MACRO Detector"*, Ap. J. **412**, (1993), 301-311
- MAC9) MACRO Collaboration *"Search for Slowly Moving Magnetic Monopoles with the MACRO Detector"*, Phys. Rev. Lett. **72**, (1994), 608-612
- MAC10) MACRO and GRACE Collaboration *"Coincident Observation of Air Čerenkov Light by a Surface Array and Muon Bundles by a Deep Underground Detector"*, Phys. Rev. **D50**, (1994), 3046-3058
- MAC11) MACRO and EAS-TOP Collaboration *"Study of the Primary Cosmic Ray Composition Around the Knee of the Energy Spectrum"*, Phys. Lett. **B337**, (1994), 376-382
- MAC12) MACRO Collaboration *"Vertical muon intensity measured with MACRO at the Gran Sasso Laboratory"*, Phys. Rev. **D52**, (1995), 3793-3802
- MAC13) MACRO Collaboration *"Performance of the MACRO Streamer Tube System in the Search for Magnetic Monopoles"*, Astropart. Phys. **4**, (1995), 33-43
- MAC14) MACRO Collaboration *"Atmospheric Neutrino Flux Measurement Using Upgoing Muons"*, Phys. Lett. **B357**, (1995), 481-486
- MAC15) MACRO Collaboration *"The performance of MACRO liquid scintillator in the search for magnetic monopoles with $10^{-3} < \beta < 1$ "*, Astropart. Phys. **6**, (1997), 113-128
- MAC16) MACRO Collaboration *"Seasonal Variations in the Underground Muon Intensity as seen by MACRO"*, Astropart. Phys. **7**, (1997), 109-124

- MAC17) MACRO Collaboration *"Magnetic Monopole Search with the MACRO Detector at Gran Sasso"*, Phys. Lett. **B406**, (1997), 249-255
- MAC18) MACRO Collaboration *"High Energy Cosmic Ray Physics with the MACRO Detector at Gran Sasso: Part I. Analysis Methods and Experimental Results"*, Phys. Rev. **D56**, (1997), 1407-1417
- MAC19) MACRO Collaboration *"High Energy Cosmic Ray Physics with the MACRO Detector at Gran Sasso: Part II. Primary Spectra and Composition"*, Phys. Rev. **D56**, (1997), 1418-1436
- MAC20) MACRO Collaboration *"Real Time Supernova Neutrino Burst Detection with MACRO"*, Astropart. Phys. **8**, (1998), 123
- MAC21) MACRO Collaboration *"The Observation of the Upgoing Charged Particles produced by High Energy Muons in Underground Detectors"*, Astropart. Phys. **9**, (1998), 105
- MAC22) MACRO Collaboration *"Measurement of the Atmospheric Neutrino-Induced Upgoing Muon Flux using MACRO"*, Phys. Lett. **B434**, (1998), 451-457
- MAC23) MACRO Collaboration *"Measurement of the Energy Spectrum of Underground Muons at Gran Sasso with a Transition Radiation Detector"*, Astropart. Phys. **10**, (1999), 11-20
- MAC24) MACRO Collaboration *"Observation of the Shadowing of Cosmic Rays by the Moon using a Deep Underground Detector"*, Phys. Rev. **D59**, (1999), 012003
- MAC25) MACRO Collaboration *"Limits on Dark Matter WIMPs using upward-going Muons in the MACRO Detector"*, Phys. Rev. **D60**, (1999), 082002
- MAC26) MACRO Collaboration *"High Statistics Measurement of the Underground Muon Pair Separation at Gran Sasso"*, Phys. Rev. **D60**, (1999), 032001
- MAC27) MACRO Collaboration *"Nuclearite Search with the MACRO Detector at Gran Sasso"*, Europhys. J. **C13**, (2000), 453
- MAC28) MACRO Collaboration *"Low energy atmospheric muon neutrinos in MACRO"*, Phys. Lett. **B478**, (2000), 5
- MAC29) MACRO Collaboration *"Search for lightly ionizing particles with the MACRO detector"*, Phys. Rev. **D62**, (2000), 052003
- MAC30) MACRO Collaboration *"Neutrino astronomy with the MACRO detector"*, Astrophys. J. **546**, (2001), 1038
- MAC31) MACRO Collaboration *"Matter effects in upward-going muons and sterile neutrino oscillations"*, Phys. Lett. **B517**, (2001), 59
- MAC32) MACRO Collaboration *"The MACRO detector at Gran Sasso"*, NIM **A486**, (2002), 663-707
- MAC33) MACRO Collaboration *"A combined analysis technique for the search for fast magnetic monopoles with the MACRO detector"*, Astropart. Phys. **18**, (2002), 27

- MAC34) MACRO Collaboration *"Search for diffuse neutrino flux from astrophysical sources with MACRO"*, Astropart. Phys. **19**, (2003), 1
- MAC35) MACRO Collaboration *"Search for cosmic ray sources using muons detected by the MACRO experiment"*, Astropart. Phys. **18**, (2003), 615
- MAC36) MACRO Collaboration *"Muon energy estimate through multiple scattering with the MACRO detector"*, NIM **A492**, (2002), 376
- MAC37) MACRO Collaboration *"Final results of magnetic monopole searches with the MACRO experiment"*, Eur. Phys. J. **C25**, (2002), 511
- MAC38) MACRO Collaboration *"Search for nucleon decays induced by GUT magnetic monopoles with the MACRO experiment"*, Eur. Phys. J. **C26**, (2002), 163
- MAC39) MACRO Collaboration *"Measurement of the residual energy of muons in the Gran Sasso laboratories"*, Astropart. Phys. **19**, (2003), 313
- MAC40) MACRO Collaboration *"Search for the sidereal and solar diurnal modulations in the total MACRO muon data set"*, Phys. Rev. **D67**, (2003), 042002
- MAC41) MACRO Collaboration *"Atmospheric neutrino oscillations from upward throughgoing muon multiple scattering in MACRO"*, Phys. Lett. **B566**, (2003), 35
- MAC42) MACRO Collaboration *"Moon and Sun shadowing effect in the MACRO detector "*, Astropart. Phys. **20**, (2003), 145
- MAC43) EAS-TOP and MACRO Collaborations *"The cosmic ray primary composition between* 10^{15} *and* 10^{16} *eV from Extensive Air Showers electromagnetic and TeV muon data"*, Astropart. Phys. **21**, (2004), 641
- MAC44) EAS-TOP and MACRO Collaborations *"The cosmic ray proton, helium and CNO fluxes in the 100 TeV energy region from TeV muons and EAS atmospheric Cherenkov light observations of MACRO and EAS-TOP"*, Astropart. Phys. **21**, (2004), 223
- MAC45) MACRO Collaboration *"Measurements of atmospheric neutrino oscillations, global analysis of the data collected with the MACRO detector"*, Eur. Phys. J. **C36**, (2004), 357-373
- MAC46) MACRO Collaboration *"Search for stellar gravitational collapses with the MACRO detector"*, Eur. Phys. J. **C37**, (2004), 265

2. Articoli della Collaborazione CHOOZ.

- CHO1) A. Baldini et al. *"The photomultiplier test facility for the reactor neutrino oscillation experiment CHOOZ and the measurement of* 250 *EMI 9356KA B53* $8''$ *photomultipliers "*, NIM **A372**, (1996), 207-221
- CHO2) A. Baldini et al. *"The neural-network-based second-level trigger developed for the CHOOZ experiment"*, NIM **A389**, (1997), 141-145
- CHO3) CHOOZ Collaboration *"Initial Results from the CHOOZ Long Baseline Reactor Neutrino Oscillation Experiment"*, Phys. Lett. **B420**, (1998), 397-404

- CHO4) CHOOZ Collaboration *"Limits on Neutrino Oscillations from the CHOOZ Experiment"*, Phys. Lett. **B466**, (1999), 415-430
- CHO5) CHOOZ Collaboration *"Determination of neutrino incoming direction in the CHOOZ experiment and Supernova explosion location by scintillator detectors"*, Phys. Rev. **D61**, (1999), 12001
- CHO6) CHOOZ Collaboration *"Search for neutrino oscillations on a long base-line at the CHOOZ nuclear power station"*, Eur. Phys. J. **C27**, (2003), 331

3. Articoli della collaborazione MEG.

- MEG1) A. Baldini et al. *"Absorption of scintillation light in a 100 l liquid xenon gamma ray detector and expected detector performance."*, NIM **A545**, (2005), 753-764
- MEG2) A. Baldini et al. *"A radioactive point-source lattice for calibrating and monitoring the liquid xenon calorimeter of the MEG experiment."*, NIM **A565**, (2006), 589-598
- MEG3) A. Baldini et al. *"A cryogenic facility for testing the PMTs of the MEG liquid xenon calorimeter."*, NIM **A566**, (2006), 294-301
- MEG4) A. Baldini et al. *"Liquid xenon scintillation calorimetry and Xe optical properties."*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation **13**, (2006), 547-555
- MEG5) A. Baldini et al. *"A NaI activation method for the measurement of the weak thermal neutron field around the MEG experiment."*, NIM **A570**, (2007), 561-564
- MEG6) J. Adam et al. *"A limit for the $\mu \to e\gamma$ decay from the MEG experiment."*, Nucl. Phys. **B834**, (2010), 1-12
- MEG7) J. Adam et al. *"New Limit on the Lepton-Flavor-Violating Decay $\mu^+ \to e^+\gamma$."*, Phys. Rev. Lett. **107**, (2011), 171801-1-171801-5
- MEG8) P. Cattaneo et al. *"The architecture of MEG simulation and analysis software"*, Eur. Phys. J. Plus, **126**, (2011), 60-1-60-12
- MEG9) J. Adam et al. *"Calibration and monitoring of the MEG experiment by a proton beam from a Cockroft-Walton accelerator"*, NIM **A641**, (2011), 19-32
- MEG10) J. Adam et al. *"New constraint on the existence of the $\mu \to e\gamma$ decay."*, Phys. Rev. Lett. **110**, (2013), 201801
- MEG11) J. Adam et al. *"The MEG detector for the $\mu^+ \to e^+\gamma$ decay search."*, Eur. Phys. J. C**73**, (2013), 2365
- MEG12) L. Galli et al. *"An FPGA-based trigger system for the search of $\mu^+ \to e^+\gamma$ decay in the MEG experiment."*, JINST **8**, (2013), P01008
- MEG13) L. Galli et al. *"Operation and Performances of the trigger system of the MEG experiment."*, JINST **9**, (2014), P04022
- MEG14) A. Baldini et al. *"An FPGA-based trigger for the phase II of the MEG experiment "*, Nucl. Instr. and Meth. **824**, (2016), 326

- MEG15) A.M. Baldini et al. (MEG Collaboration) *"Search for the lepton flavour violating decay $\mu^+ \to e^+\gamma$ with the full dataset of the MEG experiment "*, Eur. Phys. J. **C76**, (2016), 434

- MEG16) G. Rutar et al. *"A dedicated calibration tool for the MEG and MEG II positron spectrometer "*, Nucl. Instr. and Meth. **824**, (2016), 575

- MEG17) A. Baldini et al. *"A new cylindrical drift chamber for the MEG II experiment "*, Nucl. Instr. and Meth. **824**, (2016), 589

- MEG18) M. Venturini et al. *"Ageing tests for the MEG II drift chamber "*, Nucl. Instr. and Meth. **824**, (2016), 592

- MEG19) M. Venturini et al. *"MEG II drift chamber characterization with the silicon based cosmic ray tracker at INFN Pisa "*, Nucl. Instr. and Meth. **824**, (2016), 595

- MEG20) G. Signorelli et al. *"A liquid hydrogen target for the calibration of the MEG and MEG II liquid xenon calorimeter "*, Nucl. Instr. and Meth. **824**, (2016), 713

- MEG21) A. Baldini et al. *"Single-hit resolution measurement with MEG II drift chamber prototypes "*, Journal of Instrumentation **11**, (2016), P07011

- MEG22) A.M. Baldini et al. (MEG Collaboration) *"Muon polarization in the MEG experiment: predictions and measurements "*, Eur. Phys. J. **C76**, (2016), 223

- MEG23) A.M. Baldini et al. (MEG Collaboration) *"Measurement of the radiative decay of polarized muons in the MEG experiment "*, Eur. Phys. J. **C76**, (2016), 108

4. Presentazioni personali a Congressi Internazionali con proceedings pubblicati.

- PRE1) Fabrizio Cei for The MACRO Collaboration *"Search for supermassive magnetic monopoles with the MACRO detector at the Gran Sasso laboratory"*, Proceedings of the International Workshop on Theoretical and Phenomenological Aspects of Underground Physics (TAUP97), Laboratori Nazionali del Gran Sasso, Assergi (Italy) (1997), Nucl. Phys. (Proc. Suppl.) **B70**, (1999), 466

- PRE2) Fabrizio Cei for The MACRO Collaboration *"Search for Rare Particles with the MACRO detector"*, Proceedings of the International Conference on High Energy Physics (ICHEP98), Vancouver B.C. (Canada) (1998); hep-ex/9810012

- PRE3) Fabrizio Cei for The MACRO Collaboration *"Search for Lightly Ionizing Particles with the MACRO detector"*, Proceedings of the 27th International Cosmic Ray Conference (ICRC2001), Hamburg (Germany) (2001)

- PRE4) Fabrizio Cei *"Neutrinos from supernovæ: experimental status"*, invited talk given at 2nd International Workshop on Matter, Anti-Matter and Dark Matter, Trento (Italia), 29-30 Ottobre 2001, Int. Journal of Mod. Phys. A **17**, (2002), 1765-1777; hep-ex/0202043

- PRE5) Fabrizio Cei for the MEG Collaboration *"The MEG experiment at PSI"*, Proceedings of the XV IFAE, Lecce (Italia), 22-26 Aprile 2003 pagg. 121-125

- PRE6) Fabrizio Cei for The MEG Collaboration *"Lepton Flavour Violation: present and future Experiments"*, Proceedings of the International High Intensity Frontier Workshop HIF05, La Biodola, Isola d'Elba (Italy) 28/05-01/06 2005, Nucl. Phys. (Proc. Suppl.) **B154**, (2006), 62

- PRE7) Fabrizio Cei for the MEG Collaboration *"The Liquid Xenon Calorimeter of the MEG Experiment"*, Proceedings of the XVIII IFAE, Pavia (Italia), 19-21 Aprile 2006 pagg. 121-125

- PRE8) Fabrizio Cei for the MEG Collaboration *"The MEG experiment at PSI"*, Proceedings of the NOW2008 Workshop, Conca Specchiulla (Otranto), Lecce (Italia), 6-13 settembre 2008, Nucl. Phys. (Proc. Suppl.) **B188**, (2009), 309

- PRE9) Fabrizio Cei for the MEG Collaboration *"Lepton flavour violation experiments in LHC era"*, Proceedings of the PASCOS2010 Workshop, Valencia (Spagna), 19-23 luglio 2010, J. Phys. Conf. Ser. **259**, (2010), 012010

- PRE10) Fabrizio Cei for the MEG Collaboration *"Status and perspectives of the MEG experiment"*, Proceedings of the XXIVrd Rencontres de Blois, Blois (France) 27 maggio - 1 giugno, 2012 Editori L. Celnikier, J. Dumarchez, B. Klima and J. Tran Thanh Van The Gioi Publishers

- PRE11) Fabrizio Cei for the MEG Collaboration *"Latest results of the MEG experiment"*, Proceedings of the European Physical Society Conference of High Energy Physics, EPS-HEP 2013, Stockholm (Sweden) 18 - 24 luglio 2013, PoS (EPS-HEP2013) 333 (2014)

- PRE12) Fabrizio Cei for the MEG Collaboration *"Status and perspectives of the MEG experiment "*, Proceedings of Workshop on Flavour changing and conserving processes (FCCP2015), Anacapri (Italy) 10 - 12 settembre 2015, EPJ Web of Conferences **118**, (2016), 01004

5. Presentazioni personali alla Società Italiana di Fisica.

- SIF1) Fabrizio Cei per la Collaborazione MACRO *"Ricerca di neutrini da collasso stellare gravitazionale con il rivelatore MACRO"*, LXXIX Congresso Nazionale SIF, Udine 27 Settembre - 2 Ottobre 1993

- SIF2) Fabrizio Cei per la Collaborazione MACRO *"Ricerca di sciami di neutrini da collasso stellare gravitazionale con il rivelatore MACRO"*, LXXX Congresso Nazionale SIF, Lecce 26 Settembre - 1 Ottobre 1994

- SIF3) Fabrizio Cei per la Collaborazione CHOOZ *"Recenti risultati degli esperimenti di oscillazioni di neutrini a reattori nucleari"* (comunicazione ad invito), LXXXIV Congresso Nazionale SIF, Salerno 28 Settembre - 2 Ottobre 1998

6. Capitoli di libro.

- LIB1) Fabrizio Cei *"Supernova Neutrino Detection: Experimental Status and Perspectives"*, in *"Trends in Experimental High Energy Physics"*, Chapter 6, Pagg. 209-260, Editor Jacob R. Stevens, Nova Science Publishers, Inc. (2005), ISBN 1-59454-350-X

7. Articoli di rassegna.

- REV1) Fabrizio Cei and Donato Nicoló *"Lepton Flavour Violation Experiments"*, in *"Advances in High Energy Physics"*, Vol. 2014, (2014), Article Id 282915, 31 pages

8. Presentazioni personali a Congressi Internazionali senza proceedings.

- ALT1) Fabrizio Cei for the MEG Collaboration *"Search for $\mu \to e\gamma$ decay"*, Fermilab Proton Driver Workshop, Fermi National Accelerator Laboratory, 6-9 Ottobre 2004, available at
  http://www-td.fnal.gov/projects/PD/PhysicsIncludes/Workshop/index.html
- ALT2) Fabrizio Cei for the MEG Collaboration *"Search for lepton flavour violation in experiments using muon beams"*, International Workshop on Exploring the Impact of New Neutrino Beams, Trento (Italia), 18 - 22 Ottobre 2004, available at
  http://newbeams.in2p3.fr/talks.html
- ALT3) Fabrizio Cei for the MEG Collaboration *"Lepton Flavour Violation Searches in the muon system. Present status and future perspectives"*, Workshop on Tau-Charm at High Luminosity, La Biodola, Isola d'Elba (Italia), 26 - 31 Maggio 2013, available at
  https://agenda.infn.it/conferenceOtherViews.py?confId=6193&view=standard

9. Articoli PRIN 2008.

- PRI1) N. Akchurin et al. *"The electromagnetic performance of the RD52 fiber calorimeter"*, NIM **A735**, (2014), 130-144

10. Articoli della collaborazione LSPE.

- LSPE1) G. Signorelli et al. *"A 16 channel frequency-domain-modulation readout system with custom superconducting LC filters for the SWIPE instrument of the balloon-borne LSPE experiment "*, Nucl. Instr. and Meth. **824**, (2016), 184
- LSPE2) D. Vaccaro et al. *"The FDM readout system for the TES bolometers of the SWIPE instrument on the balloon-borne LSPE experiment "*, Proceedings of SPIE **9914**, (2016), UNSP 99143C

11. Altre pubblicazioni.

- VAR1) A.M. Baldini et al. (MEG Collaboration) *"MEG Upgrade Proposal "*, arXiv:1301.7225.