



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI GUGLIELMO MARCONI

FACOLTÀ DI SCIENZE E TECNOLOGIE APPLICATE

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA

ENERGETICA E NUCLEARE

ANALISI TERMICA DEL CALORIMETRO PER L'ESPERIMENTO  
MU2E AL FERMILAB

Relatore:  
Prof. MATTEO MARTINI

Correlatore:  
Ing. ALESSANDRO SAPUTI

Candidato:  
MARCO RICCI  
Matr. N°: STA05895

ANNO ACCADEMICO

2015/2016

# INDICE

<b>Introduzione</b> .....	II
<b>Indice</b> .....	VI
<b>1. L'esperienza Mu2e</b> .....	1
1.1. Il modello standard .....	2
1.2. Violazione del numero leptonico .....	3
1.2.1. Trattazione teorica del CLFV .....	4
1.2.2. Misure precedenti di CLFV .....	5
1.3. L'impianto di accelerazione di Mu2e .....	7
1.4. Sistema di produzione e trasporto per Mu2e .....	13
1.4.1. Production Solenoid .....	15
1.4.2. Transport Solenoid .....	17
1.4.3. Detector Solenoid .....	18
1.5. Produzione e rivelazione degli elettroni in Mu2e .....	20
1.5.1. Muon Stopping Target .....	20
1.5.2. Tracker .....	21
1.5.3. Calorimetro .....	23
<b>2. Il Calorimetro elettromagnetico</b> .....	26
2.1. Requisiti di progetto .....	26
2.2. Condizioni al contorno .....	28
2.2.1. Radiazioni .....	28
2.2.2. Condizione di vuoto .....	30
2.2.3. Campo magnetico .....	30
2.3. Progetto del calorimetro .....	31
2.3.1. Meccanica .....	31
2.3.2. Cristalli e fotosensori .....	40
2.3.3. Componenti elettronici .....	44
2.3.4. Sistema di calibrazione .....	47
2.3.5. Sistemi di raffreddamento .....	49
<b>3. Analisi termica del calorimetro: Termalizzazione</b> .....	54
3.1. Modello matematico .....	55
3.2. Analisi termica all'equilibrio della piastra .....	57
3.2.1. Proprietà dei materiali .....	59
3.2.2. Condizioni iniziali .....	59
3.3. Termalizzazione .....	61
3.3.1. Prima configurazione .....	62
3.3.2. Seconda configurazione .....	64
3.3.3. Terza configurazione .....	65
3.4. Analisi termica all'equilibrio dell'elettronica .....	66
3.4.1. Proprietà dei materiali .....	67
3.4.2. Esito della Simulazione .....	70

<b>4. Analisi termica del calorimetro: Raffreddamento dell'elettronica di front-end</b> .....	73
4.1. La Cella di Peltier.....	74
4.1.1. Principio di funzionamento e caratteristiche .....	74
4.1.2. Scelta tecnologica .....	78
4.1.3. Prove sperimentali .....	79
4.2. Raffreddamento dell'elettronica di front-end mediante cella di Peltier .....	88
4.2.1. Dimensioni e proprietà dei materiali .....	89
4.2.2. Setup del modello matematico .....	91
4.2.3. Esito della simulazione .....	92
4.3. Raffreddamento dell'elettronica di front-end mediante SUVA a bassissima temperatura .....	94
4.4. Raffreddamento dell'elettronica di front-end mediante sistema ibrido SUVA a bassa temperatura e Peltier .....	97
4.5. Contatto termico tra fotosensore e cristallo .....	99
<b>5. Analisi termica del calorimetro: Piastra e fluido refrigerate...</b>	102
5.1. Raffreddamento della piastra .....	104
5.2. Termo-fluidodinamica del SUVA .....	108
5.3. Analisi CFD con Ansys Fluent .....	112
5.3.1. Analisi CFD del circuito 1 .....	114
5.3.2. Analisi CFD del circuito 2 .....	116
5.3.3. Analisi CFD del circuito 3 .....	118
5.4. Perdite di carico .....	119
<b>Conclusioni e prospettive future</b> .....	121
<b>Ringraziamenti</b> .....	124
<b>Appendice A</b> .....	125
<b>Appendice B</b> .....	127
<b>Bibliografia</b> .....	136

## ABSTRACT

Il progetto Mu2e, è un esperimento di nuova fisica che ha come scopo l'osservazione della violazione del numero leptonico nelle particelle cariche (Charged Lepton Flavour Violation, CLFV), il cui effetto non è stato ancora osservato sperimentalmente.

L'esperimento verrà realizzato presso il Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab) di Batavia (Chicago), nello stato del Illinois (USA). I lavori di costruzione, allo stato attuale, sono iniziati con la realizzazione dell'edificio principale mentre, l'impianto di rivelazione sperimentale, è in avanzata fase di progettazione e la sua costruzione è prevista per il 2017, con fine lavori ed inizio della presa dati prevista per il 2019.

L'impianto di rivelazione delle particelle è costituito da due strumenti: il tracker ed il calorimetro elettromagnetico. La misura combinata delle proprietà delle particelle da parte di questi due rivelatori consentirà l'identificazione dei potenziali eventi di CLFV ma, soprattutto, permetterà di identificare ed eliminare i fondi, cioè gli eventi non di segnale che possono simulare gli eventi attesi, inficiando la misura.

Il mio lavoro di tesi si è concentrato sullo studio di alcuni aspetti salienti nella progettazione del calorimetro.

Il calorimetro elettromagnetico è uno strumento composto da una parte sensibile alle particelle e da sistemi di supporto. I componenti di rivelazione scelti per Mu2e si suddividono in cristalli scintillanti e fotosensori al silicio. I cristalli, permettono la conversione dell'energia delle particelle in emissioni di luce e, a loro volta, i sensori leggono le emissioni di luce misurandone il tempo di arrivo, l'intensità e la posizione. I sistemi di supporto, si suddividono in componenti meccanici, sistema di raffreddamento e schede elettroniche. Il sistema di raffreddamento permette al calorimetro di dissipare il calore prodotto dalla strumentazione e, molto importante, ridurre la temperatura dei fotosensori per aumentare il loro guadagno. Allo stesso modo, le schede elettroniche permettono la gestione dei segnali di comando e delle informazioni provenienti dal sensore. L'ingegnerizzazione di questi sistemi complessi, ma al tempo stesso semplici se visti singolarmente, necessita di studi ed analisi specifiche che permettono, all'intero sistema, di garantire le prestazioni richieste dai requisiti di progetto, nonché, mantenere le condizioni di utilizzo ottimali per un determinato lasso temporale.

Lo studio del sistema di raffreddamento del calorimetro di Mu2e, oggetto di questo lavoro, mira a valutare le soluzioni ingegneristiche adottate, affinché esse permettano di garantire le prestazioni richieste dal progetto. Inoltre, il sistema di raffreddamento deve essere dotato di una certa affidabilità e flessibilità operativa in modo da poterlo adattare alle condizioni di presa dati che possono variare nel tempo a causa dell'invecchiamento dei

componenti e ai danni da radiazione. Tale problematica risulta ancora più evidente tenendo presente che l'intero rivelatore sarà ospitato in un criostato in condizioni di vuoto, rendendo così impossibile una manutenzione straordinaria a causa dei lunghi tempi di stop necessari per tale operazione.

Il lavoro di tesi è stato svolto presso i Laboratori Nazionali di Fisica Nucleare di Frascati (LNF-INFN), a stretto contatto sia con i fisici che con gli ingegneri del centro ricerche italiano. Inoltre, grazie al presente lavoro, si è potuto partecipare a due meeting presso il Fermilab di Batavia (Chicago) e collaborare attivamente sia con gli ingegneri del centro americano, per l'integrazione del calorimetro, sia con i ricercatori del California Institute of Technology (Caltech), per il raffreddamento dei suoi fotosensori.

Nella prima parte del lavoro di tesi vengono descritti gli studi di stabilizzazione termica che sono stati effettuati sulla piastra posteriore e sull'elettronica di front-end del calorimetro elettromagnetico. In dettaglio, per la piastra vengono descritte tre diverse configurazioni di termalizzazione mostrando, inoltre, i risultati dell'analisi mediante l'utilizzo del modulo Steady State Thermal del software ANSYS. I risultati degli studi evidenziano come sono necessari due circuiti di raffreddamento, collocati lungo il raggio interno ed esterno della piastra, affinché quest'ultima sia mantenuta ad una temperatura prossima a quella ambiente (20°C) e, soprattutto, sia ridotto, il più possibile, il gradiente di temperatura generato lungo la sua superficie.

Riguardo l'elettronica di front-end vengono mostrati due studi di termalizzazione del fotosensore per verificare la temperatura raggiunta da quest'ultimo cambiando il materiale del guscio di supporto. Dallo studio si evince che, anche impiegando materiali plastici, è possibile mantenere il fotosensore ad una temperatura prossima a quella ambientale.

Nella seconda parte del lavoro di tesi viene studiato il sistema di raffreddamento dell'elettronica di front-end e della piastra posteriore a seguito della necessità di aumentare le prestazioni in lettura dei fotosensori al silicio del calorimetro. Per l'elettronica di front-end sono state proposte tre diverse configurazioni con le relative analisi mediante il modulo Steady State Thermal: raffreddamento con moduli termoelettrici, con refrigerante a bassa temperatura ed un raffreddamento ibrido che impiega entrambe le soluzioni. Inoltre, per verificare il modello matematico che simula l'effetto Peltier dei moduli termoelettrici, sono state condotte delle prove sperimentali su questi ultimi in accoppiamento ad un fotosensore APD.

Analizzata l'elettronica di front-end, il passo successivo è stato quello di ridisegnare il circuito di raffreddamento della piastra posteriore per garantire che tutti i componenti elettronici sono mantenuti, il più possibile, alla stessa temperatura. Per far ciò, dati i parametri iniziali di pressione e temperatura, è stato effettuato uno studio termico del refrigerante nei circuiti

di raffreddamento, per ottenere quindi, l'influenza che ha quest'ultimo sulla piastra posteriore. Il risultato dell'analisi, condotta impiegando il modulo CFX di ANSYS, ha stimato un gradiente di temperatura di circa un grado centigrado. Per completare l'analisi dei circuiti di raffreddamento è stato realizzato uno studio fluidodinamico del refrigerante impiegando il modulo FLUENT di ANSYS, dal quale si evincono le perdite di carico, le condizioni di moto del fluido e le pressioni raggiunte.

Terminato il lavoro di tesi, grazie agli studi condotti il progetto del calorimetro ha subito numerosi cambiamenti, soprattutto riguardo l'elettronica di front-end, la piastra ed il sistema di raffreddamento. L'utilizzo delle celle di Peltier per il raffreddamento localizzato del fotosensore è stato scartato a causa della complessità nella gestione e della loro inaffidabilità. Pertanto si è optato per un raffreddamento passivo che utilizza un liquido refrigerante a bassa temperatura. Questa scelta ha comportato una riprogettazione del supporto dell'elettronica di front-end e della piastra posteriore per ridurre rispettivamente la resistenza termica e l'irraggiamento. Data la necessità di portare i fotosensori ad una temperatura di -5 gradi, la collaborazione Mu2e ha approvato inoltre la realizzazione di un cooling station indipendente per il calorimetro.

## BIBLIOGRAFIA

- Ahmad, S. and all. *Phys Rev.*, D38, 2102 (1988).
- Aubert, B. and et al. The BABAR Detector. *Nuclear instruments and Meth.*, 479, 1 (2002), 1-116.
- Bartoszek, L. and all. *Mu2e Technical Design Report*. Fermi National Accelerator, Batavia, 2014.
- Bertl, Wilhelm H. and all. A search for  $\mu$ -e conversion in muonic gold. *The European Physical Journal, C*, 47 (2006), 337-346.
- Campbell, Joe C. and Et al. Recent Advances in Telecommunications Avalanche Photodiodes. *The Journal of Lightwave Technology*, Volume 25, Issue 1 (january 2007), 109-121.
- Celata, Gian Piero. *Corso di Termofluidodinamica*. Università degli Studi Guglielmo Marconi, Roma, 2010.
- Collaboration, ATLAS. Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC. *Physics Letters B*, 716, 1 (Settembre 2012), 1-29.
- Dohmen, C. and all. *Phys. Lett.*, B317, 631 (1993).
- Feng, Jonathan and Trodden, Mark. Il lato oscuro dell'universo. *Le Scienze*, 509 (2011), 34-41.
- Fermilab. The Tevatron: 28 years of discovery and innovation. 2012. [www.fnal.gov/pub/tevatron/index.html](http://www.fnal.gov/pub/tevatron/index.html).
- Gonis, Antonios and Butler, William H. *Multiple Scattering in Solids*. Springer, 1999.
- Hajkaj, Ergys. *Sviluppo di un sistema di test automatizzato per fotosensori per il calorimetro elettromagnetico dell'esperimento Mu2e di Fermilab*. 2014.
- Hamamatsu. *handbook APD and MPPC*. [http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/e03\\_handbook\\_si\\_apd\\_mppc.pdf](http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/e03_handbook_si_apd_mppc.pdf).

Hitlin, David G. *Readout of the fast 220nm component of BaF2 scintillation light with a fast APD*. 07/2015.

Lazarek, GM and Black, SH. Evaporative heat transfer, pressure drop and critical heat flux in a small vertical tube with R-113. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 25, 7 (1982), 945– 960.

Lewis, Roland W., Nithiarasu, P., and Seetharamu, K. N. *Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow*. John Wiley & Sons, Chichester, 2004.

MEG Collaboration. *Latest results of MEG and status of MEG-II*. INFN, Roma, 2014.

MEG Collaboration. New Constraint on the Existence of the  $\mu^+ \rightarrow e + \gamma$  Decay. *Physical Review Letters*, 110, 20 (2013).

Mehendale et al. Fluid Flow and Heat Transfer at Micro- and Meso- Scales With Application to Heat Exchanger Design. *Applied Mechanical Review*, 53, 7 (July 2000), 175-193.

OPERA Collaboration. Observation of a first  $\nu\tau$  candidate event in the OPERA experiment in the CNGS beam. *Physics Letters B*, 691, 3 (July 2010), 138-145.

Pasciuto, Daniele. *Design of the cooling system of the Mu2e electromagnetic calorimeter at Fermi National*. Università degli Studi di Pisa, Pisa, 2015.

Pezzullo, Gianantonio and Echenard, Bertrand. *Study of the radiation dose and neutron flux on the calorimeter*. Mu2e collaboration, 2015.

Saputi, Alessandro. *A crystal calorimeter for Mu2e experiment*. Mu2e Collaboration, 06/2015.

Sarra, Ivano. *Calorimeter interfaces*. 10/2015.

Schotanus, P., Dorenbos, P., Van Eijk, C.W.E., and Lamfers, H.J. Suppression of the slow scintillation light output of BaF2 crystals by La3+ doping. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 281, 1 (August 1989), 162-166.



Segrè, Emilio. *Nuclei e particelle*. Zanichelli, 1982.

Shinetsusilicone. 2015.

[http://www.shinetsusilicone-global.com/catalog/pdf/rtv\\_e.pdf](http://www.shinetsusilicone-global.com/catalog/pdf/rtv_e.pdf).

Soletti, Stefano Roberto. *Study of requirements and performances of the electromagnetic calorimeter for the Mu2e experiment at Fermilab*. 2014.

Steinberger, J. and Wolfe, H. *Phys. Rev.*, 100, 1490 (1955).

TEC Microsystems. *Thermoelectric Coolers Basics*. 18/12/2015.

[http://www.tec-microsystems.com/EN/Intro\\_Thermoelectric\\_Coolers.html](http://www.tec-microsystems.com/EN/Intro_Thermoelectric_Coolers.html).

Western Michigan University. *ANSYS Thermoelectric Generator (TEG) Tutorial*.

<http://homepages.wmich.edu/~leehs/ME539/TEG%20Tutorial.pdf>.

Zienkiewicz, O. C. and Taylor, R. L. *The Finite Element Method - The Basis, vol. I*. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000.