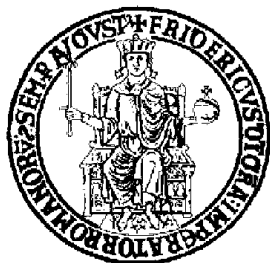


Università degli Studi di Napoli Federico II



Dipartimento di Ingegneria Elettrica e delle Tecnologie dell'Informazione

Classe di Laurea in Ingegneria dell'Informazione, Classe n. L.8

Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica

Elaborato di Laurea

*Elaborazione dei dati da sensori FBG per il monitoraggio di
acceleratori di particelle al CERN*

Relatore:

Prof. Giovanni Breglio

Correlatore:

Dr. Francesco Fienga

Candidato:

Spedding Sara Bennett

Matr. N43/1260

Anno Accademico

2018/2019

Desidero rivolgere un ringraziamento speciale al prof. Breglio, mio relatore, per avermi concesso l'opportunità di far parte di questo progetto ed aver dimostrato fin da subito una grande disponibilità: i suoi suggerimenti sono stati preziosissimi.

Non saranno mai abbastanza le parole per esprimere la mia riconoscenza nei confronti del mio correlatore, il dr. Francesco Fienga, per essere stato per me una guida durante questi mesi. Grazie per esserci stato sempre, risolvendo tempestivamente ogni mio dubbio con estrema pazienza e dispensando ottimi suggerimenti e materiale utile per la stesura della tesi.

Indice

Introduzione	6
Capitolo 1: Tecnologia Fiber Bragg Grating	8
1.1 Le fibre ottiche.....	8
1.2 Sensori in fibra ottica.....	11
1.2.1 Tipologie di sensori a fibra ottica	12
1.3 Il reticolo di Bragg.....	14
1.3.1 Principio di funzionamento	14
1.3.2 Prospettiva storica e tecniche di fabbricazione	17
1.3.3 Tipi di reticolo	20
1.3.4 Effetto dei raggi γ sui reticoli di Bragg	21
1.4 Sensori FBG	22
1.4.1 Applicazioni dei sensori FBG.....	25
Capitolo 2: Sensori FBG nella fisica delle Alte Energie: progetto I-PIPE all'LHC.....	28
2.1 Il Large Hadron Collider	28
2.2 L'esperimento Compact Muon Solenoid.....	31
2.2.1 Perché si rende necessario un continuo monitoraggio e perché la tecnologia FBG.....	33
2.2.2 Sistemi di monitoraggio basati su sensori FBG installati al CMS ...	34
2.2.3 Alcuni esempi di sistemi di monitoraggio FBG al CMS	36
2.3 Progetto I-Pipe	39
2.3.1 Monitoraggio della temperatura	41
2.3.2 Monitoraggio dello strain	43
2.3.3 Lo strain termico apparente	43
2.3.4 Considerazioni sullo shift indotto dalle radiazioni.....	45
Capitolo 3 – Elaborazione dei dati da sensori FBG per il monitoraggio di temperatura di acceleratori di particelle al CERN	47
3.1 Misure di temperatura durante il 2018.....	48
3.2 Fase di Fill	51
3.3 Il fenomeno di <i>beam induced heating</i>	54

3.3.1 Effetti del Beam Induced Heating sull'LHC.....	56
3.4 Misurazioni del <i>Beam Induced Heating</i> durante un set di FILL interessanti	57
Conclusioni	61
Bibliografia	63

Introduzione

Questa tesi si concentra sull'elaborazione di dati raccolti da un sistema di monitoraggio, noto come I-Pipe, che effettua il monitoraggio strutturale e termico di una sezione di un acceleratore di particelle grazie alla tecnologia dei sensori in fibra ottica Fiber Bragg Grating (FBG). La sezione in questione è una parte del condotto (*central beam pipe*, CBP) dell'acceleratore di particelle Large Hadron Collider (LHC), che attraversa il centro del rivelatore di particelle Compact Muon Solenoid (CMS). Il tutto è collocato presso il CERN di Ginevra (l'Organizzazione Europea per la Ricerca Nucleare).

In particolare, questo lavoro di tesi è inserito in un più ampio progetto di ricerca che si pone l'obiettivo di dimostrare l'affidabilità del sistema I-Pipe e sfruttare la posizione unica occupata dai suoi sensori, a diretto contatto con la superficie del CBP, per monitorare lo stato termico della struttura e studiare la correlazione tra gli incrementi di temperatura e i parametri del fascio di particelle.

Il fenomeno di riscaldamento locale della struttura, dovuto all'interazione dei campi RF, generati dal fascio di protoni circolante, con le superfici che lo circondano, va sotto il nome di *Beam Induced RF Heating*.

L'ipotesi è che l'incremento di temperatura, misurato direttamente tramite il sistema I-Pipe, sia correlato alle caratteristiche del fascio ed alla sua interazione Elettro Magnetica con la struttura. In tale prospettiva, in questa tesi è effettuato uno studio preliminare che permetterà di comprendere se tale correlazione sia plausibile e misurabile.

Innanzitutto, verranno illustrate e analizzate le misurazioni di temperatura acquisite durante l'anno 2018 da uno dei sensori di I-Pipe di temperatura posto sul CBP; quello a 50mm dal punto di collisione in CMS (la sezione geometrica centrale del Rivelatore). L'anno di presa dati considerato (2018) è stato l'ultimo anno di operazione dell'LHC, prima che LHC e tutti i sistemi di Rilevazione entrassero in LS2, ovvero due anni di fermo macchina e manutenzione, che si concluderanno, a meno di ritardi, nel gennaio 2021.

Viene quindi studiato l'andamento degli incrementi di temperatura registrati in un set di Fill (diverse tipologie di composizioni di fasci di particelle protoniche che 'girano' in LHC) opportunamente scelti, e si è valutato il legame tra tale andamento e i parametri che caratterizzano i Fill stessi. L'obiettivo è quello di trovare la variabile il cui andamento sia coerente con quello degli incrementi di temperatura e trarne le dovute conclusioni riguardo il rapporto che lega temperatura, potenza dissipata e caratteristica del Fill, attesa nell'ipotesi di *Beam Induced RF Heating*.

La tesi è organizzata come segue:

Nel primo capitolo, dopo un'introduzione alle fibre ottiche e ai sensori fotonici, si farà particolare attenzione alla tecnologia Fiber Bragg Grating descrivendo dettagliatamente il principio di funzionamento dei sensori FBG e come vengono classificati.

Nel secondo capitolo, partendo da una descrizione introduttiva dell'acceleratore di particelle LHC e del rivelatore CMS al CERN, verrà fornita una panoramica dei diversi sottosistemi il cui stato termico e/o strutturale è efficientemente monitorato attraverso sensori FBG. Si darà quindi particolare attenzione e descrizione al sistema I-Pipe.

Il terzo capitolo si concentrerà sull'elaborazione dei dati raccolti dai sensori FBG del sistema di monitoraggio I-Pipe, illustrando i risultati ottenuti;

Le conclusioni, infine, riassumeranno il lavoro svolto in questo elaborato e mostreranno gli interessanti scenari che si aprono di conseguenza.

Capitolo 1: Tecnologia Fiber Bragg Grating

1.1 Le fibre ottiche

Negli ultimi anni, le fibre ottiche costituiscono il principale supporto fisico alla trasmissione e ricezione di informazioni nel campo delle telecomunicazioni. Erano gli anni '60 quando Charles Kao vide il futuro del mondo delle comunicazioni nella tecnologia a fibra ottica [1]. Da allora, è iniziata un'intensa attività di ricerca e sviluppo, dal punto di vista dei materiali e dei sistemi di lavorazione, al punto tale da abbattere, dopo soli 5 anni, il limite del parametro di attenuazione da 20 dB/Km, previsto da Kao stesso, ad appena 0.2 dB/Km. Questo fa sì che oggi i sistemi di comunicazione in fibra ottica consentano una trasmissione di informazione a larga banda, affidabile e praticamente esente da perdite.

Le fibre ottiche sono filamenti di materiale dielettrico trasparente (principalmente vetroso, in alcuni casi polimerico) realizzati in modo tale da poter guidare la luce. Sono concettualmente costituite principalmente da tre strati concentrici: il *core*, il *cladding* e il *buffer*. Generalmente all'esterno della fibra vi è una guaina protettiva detta *jacket* che serve a proteggere la fibra da eventuali danni provocati dall'ambiente esterno, sono poi ulteriormente ricoperte da altre tipologie di strati, in dipendenza dei campi di applicazione (Fig.1.1).

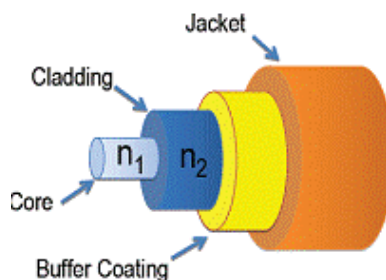


Fig.1.1 – Struttura di una fibra ottica.

Il *core* presenta dimensioni differenti a seconda che si tratti di una fibra monomodale (“single-mode” core di circa 8-10 μm) o fibra multimodale (“multi-mode” core di circa 50 μm), mentre il cladding (in fibre vetrose) si agira fra i 100 μm e i 200 μm .

Supposto che n_1 sia l’indice di rifrazione del core e n_2 quello del cladding, condizione necessaria affinché la luce si propaghi nella fibra confinata all’interno del core, è che n_1 sia maggiore di n_2 . Quando un raggio luminoso attraversa l’interfaccia tra due materiali con indice di rifrazione differente, parte del fascio si riflette nel primo materiale (con indice di rifrazione n_1), mentre l’altra parte viene trasmessa nel secondo materiale (con indice di rifrazione n_2).

Il raggio riflesso segue la legge della riflessione che sancisce che l’angolo di incidenza è pari all’angolo di riflessione.

La legge che descrive, invece, la relazione tra gli angoli di incidenza e rifrazione è la nota legge di Snell (Fig. 1.2):

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2) \quad (1)$$

Dove θ_1 è l’angolo di incidenza e θ_2 è l’angolo di rifrazione.

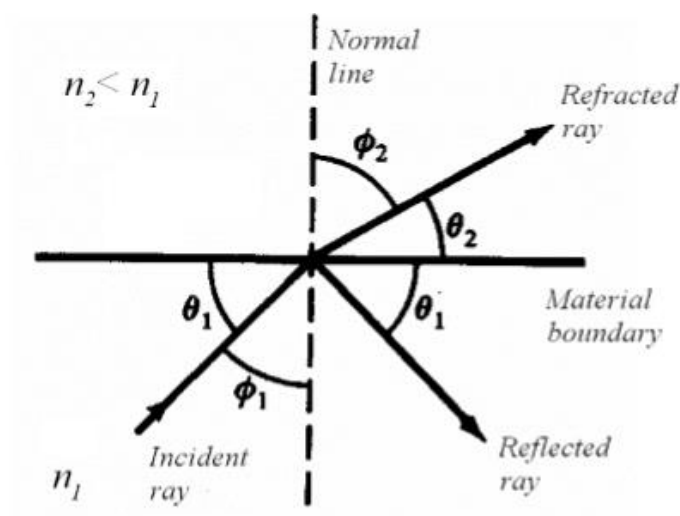


Fig. 1.2 – Legge di Snell.

Con l'aumentare di θ_1 , anche θ_2 aumenta finché raggiunge un valore di 90° . Il valore di θ_1 in corrispondenza del quale $\theta_2=90^\circ$ si dice “angolo critico” e può essere semplicemente ricavato dalla legge di Snell come:

$$\theta_{cr} = \arcsen\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (2)$$

Per $\theta_1 > \theta_{cr}$ avviene il fenomeno della riflessione interna totale (TIR), il quale permette alla luce di propagarsi nel core, rimanendo confinata al suo interno (Fig. 1.3).

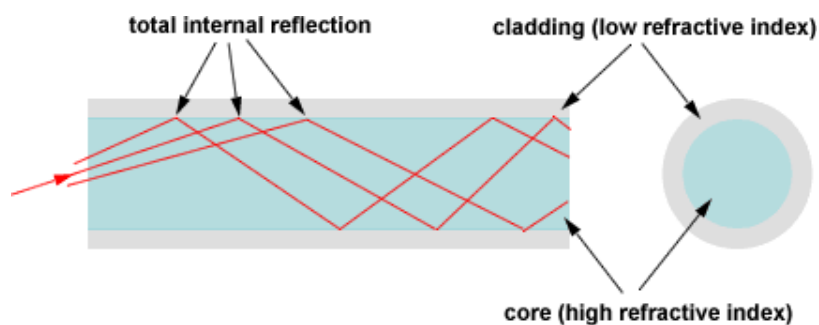


Fig. 1.3 – Fenomeno della riflessione totale.

Considerando un raggio proveniente dall'esterno della fibra, il massimo angolo di incidenza che garantisce che la luce subisca il fenomeno di riflessione totale, si dice “angolo di accettazione θ_a ”. L'insieme di tutte le possibili traiettorie incidenti aventi angolo inferiore o uguale a quello di accettazione prende il nome di “cono di accettazione” che definisce l'Apertura Numerica (Fig.1.4).

Come si può osservare nella Fig. 1.5, qualora il fascio incida con un angolo θ_b inferiore all'angolo di accettazione, il raggio verrà rifratto nel *cladding* e quindi perso.

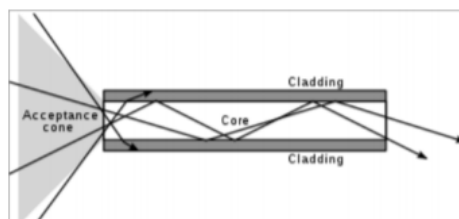


Fig. 1.4 – Cono di accettazione.

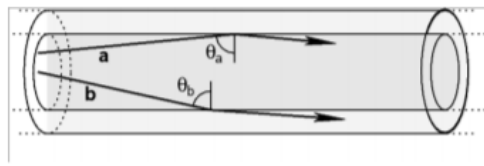


Fig. 1.5- Riflessione interna (a) e Rifrazione esterna (b) per due fasci luminosi incidenti su una fibra ottica.

1.2 Sensori in fibra ottica

La fibra ottica, in quanto mezzo di trasmissione, è soggetta a variazioni geometriche o/e ottiche a seconda della perturbazione alla quale è sottoposta.

Solitamente, nel campo delle telecomunicazioni, si cerca di ridurre al minimo tali effetti al fine di ottenere una trasmissione e una ricezione del segnale il più affidabile possibile. Nel campo dei sensori a fibra ottica (FOS), invece, la sensibilità della fibra alle perturbazioni esterne viene deliberatamente incrementata, di modo che la conseguente variazione della radiazione ottica possa essere usata come misura della perturbazione esterna. Questo ramo della tecnologia a fibra ottica ha presto visto un'intensa attività di ricerca e sviluppo in tutto il mondo, che ha portato alla crescita del nuovo campo dei "Sensori in Fibra Ottica" (FOS).

Lo schema a blocchi di un sensore in fibra ottica è costituito generalmente da una sorgente di luce (Diodo laser, LED, laser), una fibra ottica, un trasduttore e un rivelatore (Fig. 1.6) [2].

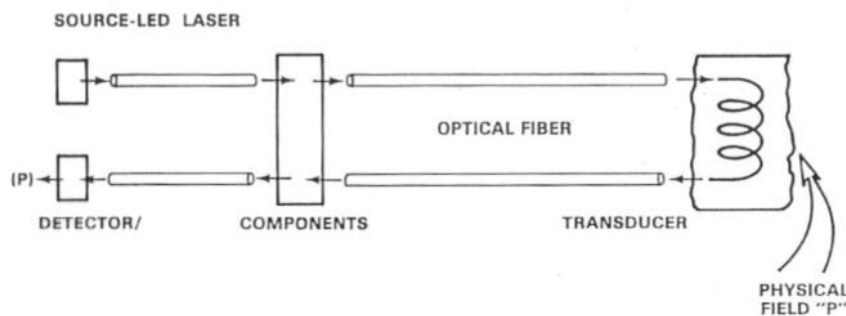


Fig.1.6 – Elementi base di un sensore a fibra ottica.

Il principio di funzionamento di un sensore in fibra ottica è basato sulla modulazione, per mezzo del trasduttore, di uno o più parametri della luce che si propaga nel sistema ottico, come intensità, lunghezza d'onda, polarizzazione o fase, causando una variazione delle caratteristiche del segnale ottico ricevuto dal rivelatore. Quest'ultimo converte la variazione del segnale ottico in un segnale elettrico, rendendolo quindi utilizzabile per elaborazioni successive.

1.2.1 Tipologie di sensori a fibra ottica

Una prima classificazione dei sensori in fibra ottica si basa sul ruolo che la fibra ottica occupa nel dispositivo: distinguiamo sensori intrinseci ed estrinseci [2],[3].

Nei sensori intrinseci la modulazione di una o più proprietà della luce dovuta al fenomeno fisico da misurare, avviene direttamente nella fibra ottica, dunque essa costituisce anche l'elemento sensibile del dispositivo (Fig. 1.7).

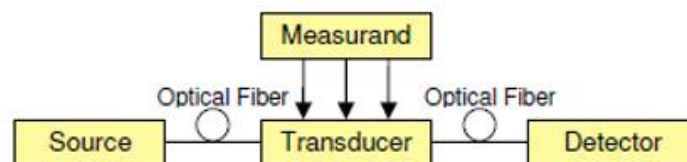


Fig. 1.7 – Sensore intrinseco.

Nei sensori estrinseci (Fig. 1.8), invece, la fibra ottica ha solo la funzione di guidare e trasportare la luce, di solito dalla/alla regione dove il fascio di luce è influenzato dal misurando esterno.



Fig. 1.8 – Sensore estrinseco.

Un'ulteriore classificazione suddivide i sensori in base al loro posizionamento spaziale in distribuiti, quasi- distribuiti e puntuali.

I sensori puntuali permettono, come suggerisce il nome, la misurazione di una particolare grandezza in uno specifico punto. Alternativamente, il misurando può essere definito lungo tutta la lunghezza della fibra: in tal caso si parla di sensori distribuiti. Infine, tra questi due tipi di sensori si collocano i sensori quasi-distribuiti, nei quali solo alcuni tratti della fibra sono sensibili alla grandezza presa in esame.

La Fig. 1.9 schematizza i tre principali tipi di sensori: puntuali (a), distribuiti (b) e quasi-distribuiti (c).

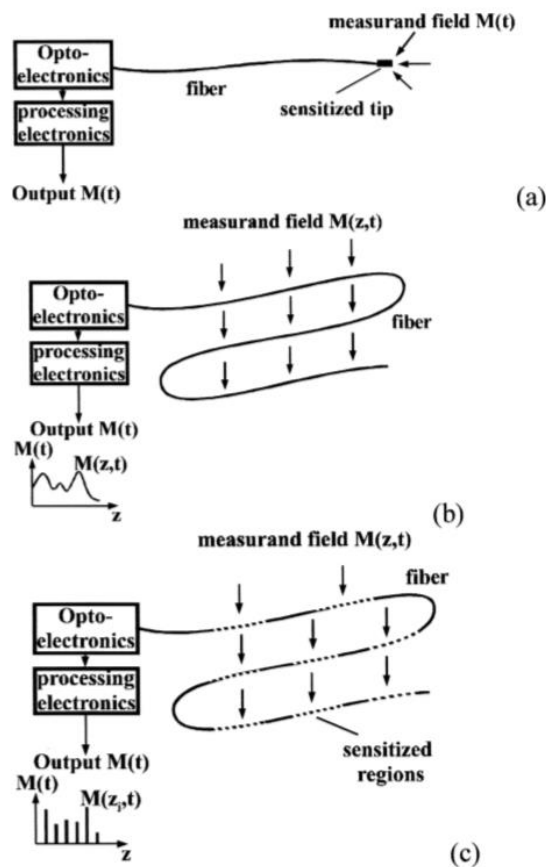


Fig. 1.9 – Illustrazione dei sensori puntuali (a), distribuiti (b) e quasi-distribuiti (c) [3].

Il successo dei sensori in fibra ottica sta nel permettere di effettuare misurazioni in condizioni ostili per le quali i sensori convenzionali non sono adatti: i sensori

in fibra ottica sono infatti immuni alle interferenze elettromagnetiche in quanto non ci sono correnti elettriche che scorrono nel punto di rivelamento, inoltre non trasportando alcun segnale elettrico evitano problemi di folgorazione ed innesco di scintille, rendendo l'uso di questi elementi possibile anche laddove ci sono materiali infiammabili o esplosivi.

Quest'ultimo aspetto è vero per tutti i sistemi in FO e quindi anche vero per una particolare tipologia di sensori: gli Fiber Bragg Grating (FBG o a "Reticolo di Bragg"). Quest'ultimi, possiedono tutti i vantaggi attribuiti ai convenzionali sensori in fibra ottica, ma in aggiunta mostrano un elevato grado di sopravvivenza anche in ambienti ad un'elevata dose di radiazioni: ciò li rende i dispositivi ideali per scopi di monitoraggio nel campo della Fisica ad Alte Energie (HEF).

1.3 Il reticolo di Bragg

1.3.1 Principio di funzionamento

I reticoli di Bragg in fibra (Fiber Bragg Grating, FBG) sono realizzati mediante un'opportuna modulazione locale dell'indice di rifrazione del core di una fibra ottica fotosensibile. Quando il tratto di fibra dove è stato realizzato il reticolo viene illuminato con una sorgente *a larga banda*, esso si comporta come un filtro selettivo in lunghezza d'onda: la luce centrata ad una certa lunghezza d'onda viene riflessa, mentre il restante spettro della luce viene trasmesso lungo la fibra ottica senza subire alterazioni [3],[4].

La caratteristica spettrale di un reticolo di Bragg mostra in riflessione un "picco" centrato alla lunghezza d'onda di Bragg, come in Fig.1.10.

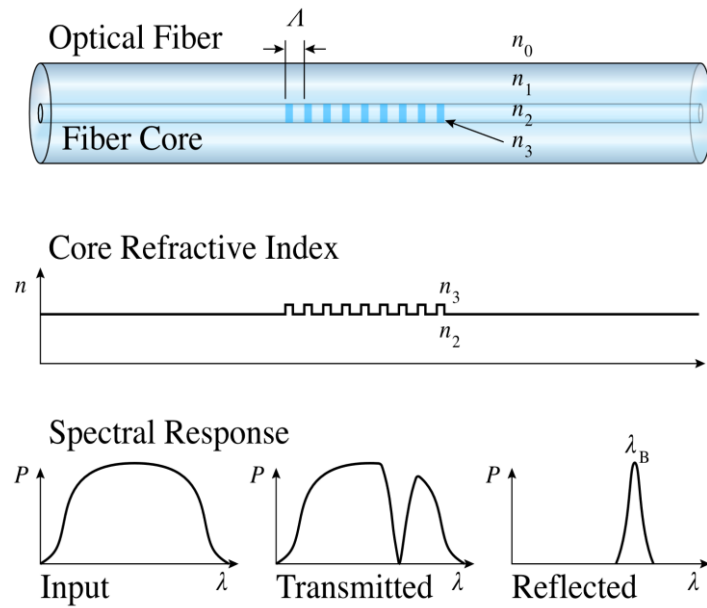


Fig. 1.10 – Illustrazione dello spettro di trasmissione e riflessione di un Reticolo di Bragg.

L'effetto di una radiazione luminosa incidente con un angolo θ_1 su di un reticolo uniforme può essere descritto dall'equazione:

$$n_{co} \sin \theta_2 = n_{co} \sin \theta_1 + m \frac{\lambda}{\Lambda} \quad (3)$$

Dove θ_2 è l'angolo dell'onda rifratta, Λ è il periodo del reticolo, n_{co} è l'indice di rifrazione del core e m è l'intero che determina l'ordine di diffrazione.

Poiché la costante di propagazione del modo è $\beta = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) n_{eff}$, con $n_{eff} = n_{co} \sin \theta$, possiamo riscrivere l'equazione come:

$$\beta_2 = \beta_1 + m \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (4)$$

Per il primo ordine di diffrazione, che di solito caratterizza un reticolo, si ha che $m = -1$. Per un reticolo *short-period*, o semplicemente un reticolo di Bragg, in cui l'accoppiamento si verifica fra modi che viaggiano in direzione opposta, si ha che $\theta_2 = -\theta_1$ e quindi $\beta_2 = -\beta_1$. (Fig. 1.11).

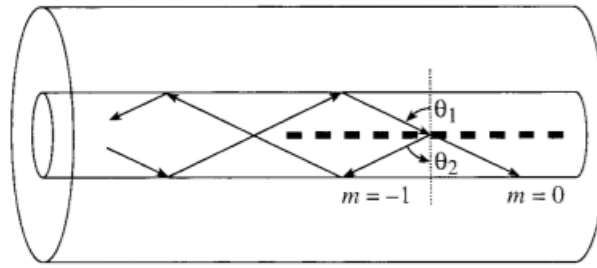


Fig. 1.11 – Illustrazione della riflessione di Bragg per mezzo di un FBG [4].

Inserendo questi dati nell'equazione si ottiene la nota condizione di Bragg [3],[4]:

$$\lambda_B = 2 n_{\text{eff}} \Lambda \quad (5)$$

La lunghezza d'onda centrale della riflessione, detta lunghezza d'onda di Bragg, dipende dall'indice di rifrazione efficace della fibra (n_{eff}) e dal passo o periodo del reticolo (Λ).

Ricorrendo alla teoria dei modi accoppiati, si possono ricavare informazioni quantitative sull'efficienza di diffrazione e sulla dipendenza spettrale dei reticoli. Si ottiene l'espressione della riflettività di un reticolo uniforme [4]:

$$R = \frac{\sinh^2(\kappa L \sqrt{1 - (\frac{\delta}{\kappa})^2})}{(1 - (\frac{\delta}{\kappa})^2) \cosh^2(\kappa L \sqrt{1 - (\frac{\delta}{\kappa})^2}) + (\frac{\delta}{\kappa})^2 \sinh^2(\kappa L \sqrt{1 - (\frac{\delta}{\kappa})^2})} \quad (6)$$

dove:

- κ è noto come “coupling coefficient” o “coefficiente di accoppiamento”. Dipende solo dalla lunghezza d'onda operativa e dall'ampiezza della perturbazione dell'indice di rifrazione Δn ed è dato da $\kappa = (\pi/\lambda) \Delta n$;
- L è la lunghezza del grating.
- $\delta = \frac{2\pi n_{\text{eff}}}{\lambda - \frac{\pi}{\Lambda}}$ è noto come coefficiente di *detuning*.

La riflettività massima si ha in corrispondenza di λ_B ($\delta = 0$) ed è pari a:

$$R_{\text{max}} = \tanh^2(\kappa L) \quad (7)$$

Un altro importante parametro da prendere in considerazione è l'ampiezza (*width*) del *grating*, definita come la distanza tra i primi due minimi dello spettro in riflessione, ed espressa come:

$$\text{width} = \lambda_B \sqrt{\left(\frac{\Delta n}{n_{eff}}\right)^2 + \left(\frac{\lambda_B}{n_{eff} L}\right)^2} \quad (8)$$

In Fig.1.12 si possono osservare tipici spettri in riflessione per *grating* deboli, con il prodotto κL basso, e per *grating* forti, con prodotto κL elevato.

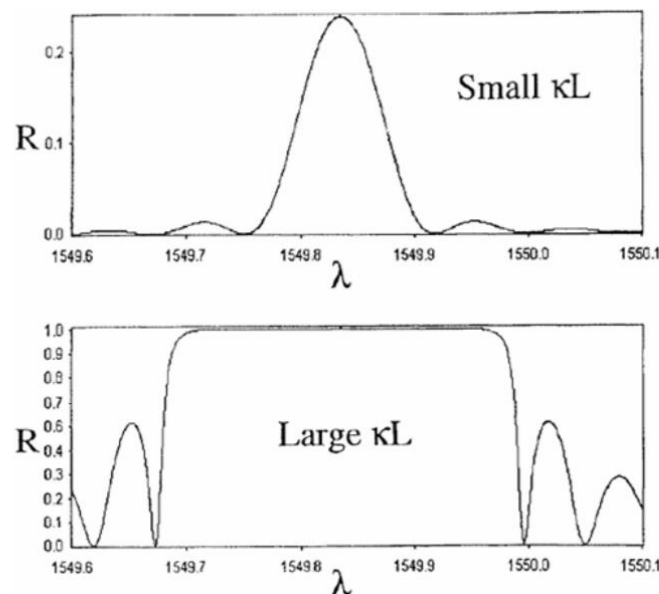


Fig.1.12 – Tipici spettri di riflessione per grating deboli (sopra) e grating forti (sotto).

1.3.2 Prospettiva storica e tecniche di fabbricazione

Il termine “Reticolo di Bragg” deriva dalla nota Legge di Bragg per la quale, William Lawrence Bragg, insieme a suo padre, vinse il premio Nobel nel 1915 [5]. La diffrazione di Bragg si verifica per una radiazione elettromagnetica incidente su un materiale cristallino con lunghezza d'onda dello stesso ordine di grandezza della spaziatura atomica. La legge $n\lambda = 2 d \sin \theta$, nota come Legge

di Bragg, descrive la condizione per la quale i diversi piani del reticolo cristallino separati da una distanza d interferiscono costruttivamente (Fig.1.13).

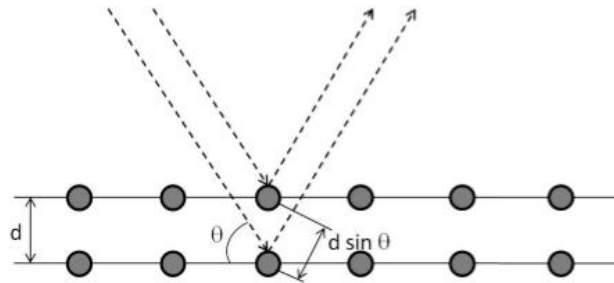
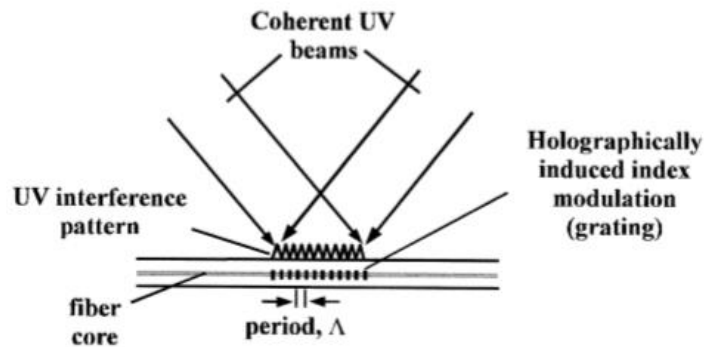


Fig.1.13 – Illustrazione della legge di Bragg.

I primi ad osservare le variazioni dell'indice di rifrazione nelle fibre di silice drogata con Germanio furono Kenneth Hill e i suoi colleghi nel 1978 [2],[6]. Eccitarono una fibra ottica opportunamente drogata con una radiazione laser e osservarono, dopo alcuni minuti, un decadimento nella luce trasmessa. La spiegazione della luce mancante fu che parte della luce si era riflessa e, ritornando indietro, aveva interferito con la luce che si propagava in linea retta, producendo un modello di interferenza. Dopo qualche tempo, quasi tutta la luce inviata nella fibra era stata riflessa: l'incremento della luce retro-riflessa fu associato al fenomeno della "fotosensibilità".

Quasi un decennio dopo, nel 1989, Gerry Meltz e i suoi colleghi dimostrarono l'efficacia della tecnica di scrittura olografica [2],[6]. Essa consiste nel far interferire due fasci UV nel core della fibra per generare un pattern di interferenza sinusoidale (Fig.1.14). Il vantaggio è che si può adattare facilmente l'angolo tra i due fasci in maniera tale da creare reticoli con differenti periodi e quindi FBG a differenti lunghezze d'onda. Nel 1993, Lemaire scoprì inoltre che era possibile incrementare la fotosensibilità tramite un processo noto come "hydrogen loading" che consiste in un trattamento della fibra attraverso idrogeno a bassa temperatura, prima dell'irradiazione.



1.14 – Tecnica di scrittura olografica [3].

Nello stesso anno, al metodo olografico fu affiancata la tecnica nella quale la fibra viene illuminata dal fascio laser attraverso una *phase-mask* (Fig.1.15). Questo metodo ebbe immediatamente successo in quanto è semplice e permette grande ripetibilità. La *phase-mask* divide il fascio laser UV incidente sulla fibra in due fasci di uscita, di ordine +1 e -1. Questi ordini di diffrazione poi interferiscono producendo un pattern di interferenza sinusoidale di intensità modulata. Il periodo del FBG risulta la metà di quello della *phase-mask*. L'unico svantaggio è che ogni *phase-mask* può generare FBG solo per una particolare lunghezza d'onda.

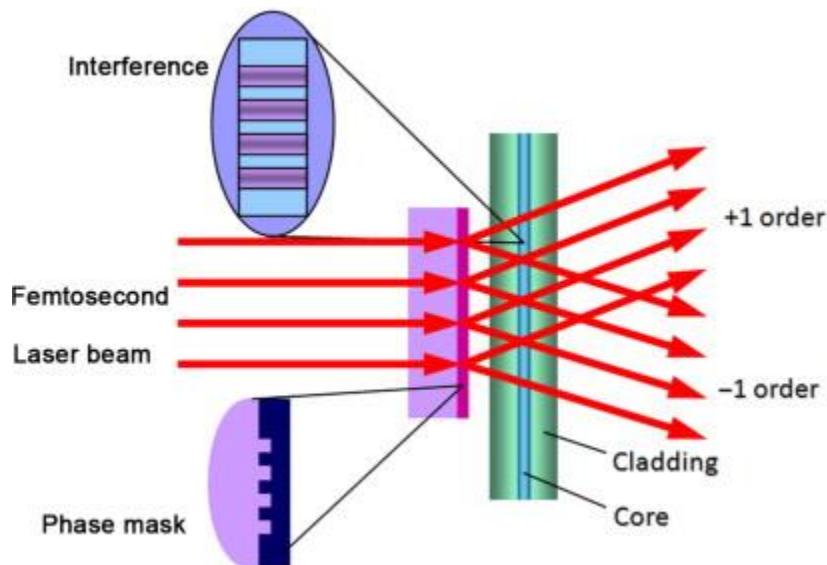


Fig. 1.15 – Rappresentazione schematica della tecnica di scrittura con phase-mask.

La tecnica che fa uso della *phase mask* è diventata la più popolare e uno dei metodi di scrittura più efficienti, grazie anche all'uso di fasci laser a femtosecondi.

L'iscrizione di reticoli tramite fasci laser ad alta intensità a femtosecondi è una delle tecniche più recenti ed innovative. Consiste nell'utilizzare un laser in grado di emettere impulsi dell'ordine dei femtosecondi ($10^{-15}s$), permettendo di focalizzare l'elevata intensità del fascio luminoso sia spazialmente che temporalmente con grande precisione.

Ciò che rende interessante l'iscrizione di reticoli tramite fasci laser a femtosecondi è che fotosensibilità e la tecnica di *hydrogen loading* non sono necessarie. Conseguenza immediata di ciò è che i reticoli possono essere iscritti in fibre di qualsiasi materiale, rendendo questa tecnica una soluzione molto appetibile in ambienti nei quali la dose di radiazione è molto elevata.

1.3.3 Tipi di reticolo

In relazione a quale sorgente laser si utilizzi per la loro scrittura, ultravioletta o infrarossa, i reticoli di Bragg possono essere classificati rispettivamente in reticoli UV e reticoli IR [6].

Nel caso di FBG UV, si sfrutta la proprietà di fotosensibilità della fibra. Una fibra fotosensibile, se opportunamente drogata (es. con Germanio), presenta un aumento dell'indice di rifrazione quando esposta a raggi ultravioletti.

I reticoli di Tipo I si formano in una fibra standard mediante un unico processo di assorbimento di fotoni UV. Mostrano una variazione positiva dell'indice di rifrazione e un decadimento della riflettività che dipende dalla temperatura.

I reticoli di Tipo II sono iscritti in una fibra attraverso un processo di ionizzazione multifotonica, mediante un singolo impulso di una sorgente laser

UV a un'intensità di picco che supera la soglia di danneggiamento della silice. Per questo motivo si dicono "damage gratings". Il Tipo II non presenta perdite per lunghezze d'onda più lunghe di quella di Bragg, mentre, a differenza del Tipo I, le più corte risultano fortemente accoppiate al mantello.

Se un reticolo di tipo I viene ulteriormente esposto ai raggi UV, si forma un reticolo rigenerato che prende il nome di reticolo di tipo IIA. Mostra uno spostamento verso il blu nella caratteristica spettrale, il quale sta ad indicare una variazione negativa dell'indice di rifrazione. I reticoli rigenerati di tipo IA, invece, mostrano un ampio spostamento della lunghezza d'onda verso il rosso.

I reticoli Fs-IR sono indotti da sorgenti laser IR con durata dell'impulso dell'ordine dei femtosecondi e intensità di picco molto elevata. Il fs-laser induce modulazioni locali dell'indice di rifrazione nel core tramite un processo di scrittura *point-by-point*. Il processo è altamente non lineare e dunque praticamente indipendente dal materiale della fibra, rendendo non necessario il drogaggio della fibra. La formazione del reticolo è caratterizzata da un limite per l'intensità di picco dell'impulso: se questo limite viene superato, si formano i reticoli di tipo II-IR, altrimenti di tipo I-IR.

Poiché il sistema di sensori basati sulla fibra a reticolo di Bragg di cui tratta il lavoro di tesi svolto è installato in un ambiente con un altissimo livello di radiazioni, l'acceleratore di particelle LHC, è opportuno osservare il comportamento dei reticoli di Bragg se investiti da raggi gamma.

1.3.4 Effetto dei raggi γ sui reticoli di Bragg

Ricerche recenti suggeriscono che il comportamento del reticolo in fibra sottoposto a raggi gamma differisca a seconda del metodo utilizzato per fabbricarlo.

Il comportamento generale che si può osservare è uno spostamento della lunghezza d'onda di Bragg verso il rosso, con una tendenza di saturazione. L'entità di questo spostamento dipende dalla composizione chimica della fibra e dal metodo di scrittura adoperato.

Ciò che è emerso principalmente è che fibre drogate con Germanio e poi sottoposte alla tecnica di *hydrogen loading* mostrano una sensibilità alle radiazioni maggiore, mentre la pre-irradiazione può aumentare la resistenza alle radiazioni dei reticoli.

I reticoli che mostrano una sensibilità alle radiazioni minore sono quelli fabbricati tramite l'iscrizione con radiazione laser a femtosecondi, il che significa che essi sono buoni candidati per lavorare in ambienti dove la dose di radiazione è molto elevata.

1.4 Sensori FBG

Il fatto che la lunghezza d'onda di Bragg sia strettamente dipendente dal passo del reticolo e dall'indice di rifrazione efficace e vari ogni qualvolta tali parametri si modificano, rende il reticolo di Bragg intrinsecamente un sensore. Un sensore basato sulla tecnologia FBG può misurare la deformazione e conseguentemente gli sforzi delle strutture sulle quali è applicato o integrato al loro interno. La deformazione della struttura, infatti, risulterà automaticamente in una deformazione "geometrica" del reticolo e, dunque, in un cambiamento della lunghezza d'onda riflessa. Inviando un segnale a banda larga, è possibile monitorare la deformazione osservando il segnale riflesso (Fig.1.16). Un particolare punto di forza dell'utilizzo di reticoli di Bragg nella sensoristica è che l'informazione sul parametro incognito è "codificata" come variazione di lunghezza d'onda di picco, quindi non affetta da rumore o da perdita di potenza nella linea. Inoltre, ciò rende i sensori FBG dispositivi ideali per le tecniche di multiplexing a divisione di lunghezza d'onda WDM (Wavelength Division Multiplexing) [2,3]: ad ogni FBG viene assegnata una determinata "sezione"

dello spettro della sorgente a banda larga, consentendo di disporre su una singola fibra un gran numero di sensori e interrogarli contemporaneamente. Come accennato, inoltre, mostrano la straordinaria caratteristica di essere immuni alle radiazioni e alle interferenze elettromagnetiche, consentendo il loro utilizzo negli ambienti più ostici. Grazie a tutte queste peculiarità, a partire dai primi anni '90 l'utilizzo di sensori ottici basati sul reticolo di Bragg è cresciuto notevolmente, fino ad essere utilizzati in molteplici applicazioni.

A partire dall'equazione $\lambda_B = 2 n_{eff} \Lambda$, ricaviamo ora come varia λ_B al variare dei parametri da cui dipende derivando parzialmente l'equazione prima rispetto alla temperatura e poi rispetto alla deformazione.

Derivando parzialmente rispetto alla temperatura, si ottiene:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = 2 n_{eff} \frac{\delta\Lambda}{\delta T} + 2\Lambda \frac{\delta n_{eff}}{\delta T} \quad (9)$$

Da cui, sostituendo,

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = \frac{1}{\Lambda} \frac{\delta\Lambda}{\delta T} \lambda_B + \frac{1}{n_{eff}} \frac{\delta n_{eff}}{\delta T} \lambda_B \quad (10)$$

e, adattando,

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{1}{\Lambda} \frac{\delta\Lambda}{\delta T} \Delta T + \frac{1}{n_{eff}} \frac{\delta n_{eff}}{\delta T} \Delta T \quad (11)$$

Il primo termine dell'equazione (11) rappresenta l'espansione termica della silice (α), mentre il secondo è il coefficiente termo-ottico (ζ), il quale sancisce la dipendenza dell'indice di rifrazione dalla temperatura. Sostituendo, si ha:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \zeta) \Delta T \quad (12)$$

A questo punto eseguiamo lo stesso procedimento per la deformazione.

Derivando l'equazione (5) rispetto alla deformazione, otteniamo:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta L} = 2 n_{eff} \frac{\delta\Lambda}{\delta L} + 2 \Lambda \frac{\delta n_{eff}}{\delta L} \quad (13)$$

Sostituendo e adattando,

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{1}{\Lambda} \frac{\delta\Lambda}{\delta L} \Delta L + \frac{1}{n_{eff}} \frac{\delta n_{eff}}{\delta L} \Delta L \quad (14)$$

Il primo termine nell'equazione (14) rappresenta la deformazione del periodo del reticolo dovuta alla dilatazione della fibra. Supponiamo di avere una fibra di lunghezza L con un FBG iscritto al suo interno. Se applichiamo una tensione sulla fibra di entità ΔL , avremo una deformazione relativa pari $\Delta L/L$. Allo stesso tempo, se il FBG ha una lunghezza L_{FBG} , esso sperimenterà una deformazione pari a $\Delta L_{FBG}/L_{FBG}$, ma, poiché il reticolo è iscritto all'interno della fibra, si ha che $\Delta L_{FBG}/L_{FBG} = \Delta L/L$. Per questo motivo, il primo termine nell'equazione (14) è pari ad un'unità. Il secondo termine è il coefficiente fotoelastico ρ_e , che rappresenta la variazione dell'indice di rifrazione a causa della deformazione. Quando la fibra è sottoposta ad una dilatazione, i due termini dell'equazione (14) producono effetti opposti: uno aumenta la distanza tra le frange del reticolo e quindi aumenta il periodo, l'altro diminuisce l'indice di rifrazione efficace e con esso anche la lunghezza d'onda di Bragg. L'effetto complessivo è l'equazione (15) che mostra lo spostamento di λ_B a causa di una deformazione:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e) \varepsilon_z \quad (15)$$

Dove ε_z è la deformazione longitudinale del reticolo. Combinando (12) e (15) si ottiene infine la sensibilità della lunghezza d'onda di Bragg ad entrambe temperatura e deformazione, governata dall'effetto *termo-elasto-ottico*.

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e) \varepsilon_z + (\alpha + \zeta) \Delta T \quad (16)$$

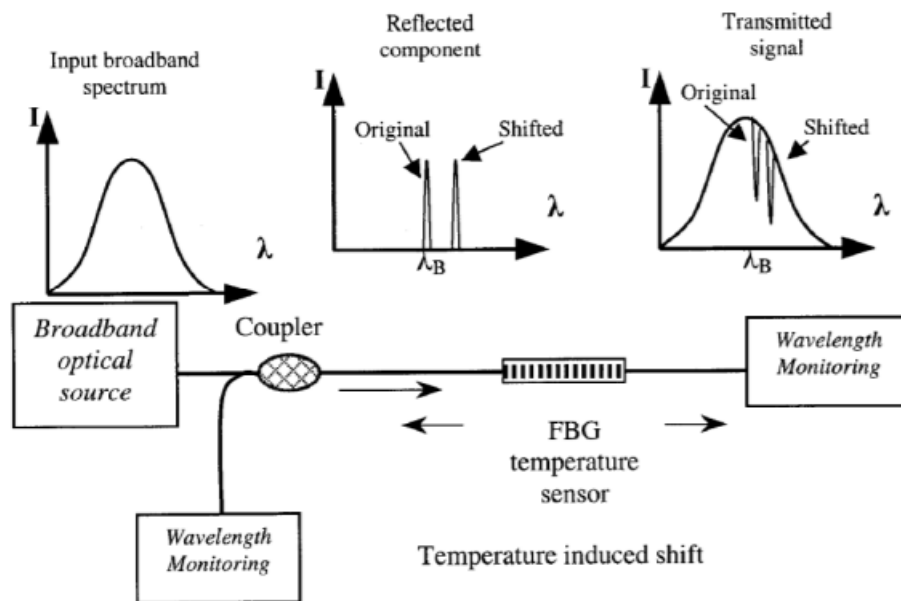


Fig. 1.16 – Principio di funzionamento di un sensore FBG.

1.4.1 Applicazioni dei sensori FBG

I sensori FBG, per le caratteristiche uniche che li contraddistinguono, sono utilizzati in molteplici campi.

Grazie alla loro immunità alla radiazione elettromagnetica, sono utilizzati nel campo dei trasporti su rotaia per valutare i difetti delle linee di contatto integrandoli nei collettori di corrente dei treni e per la misura di vibrazioni sulle rotaie. Nell'ingegneria navale sono utilizzati per valutare lo *strain* dinamico nei punti critici della carena di navi sotto condizioni di carico estreme. Trovano applicazione anche nell'industria mineraria, in particolare nelle trivellazioni per la ricerca di giacimenti di idrocarburi (metano o petrolio), dove la temperatura si aggira intorno ai 150 °C e la pressione tocca 1000 bar.

Nel campo dell'ingegneria civile trovano un vastissimo impiego. Si rivelano estremamente efficienti per il monitoraggio strutturale di edifici come ponti, dighe, viadotti, gallerie, beni architettonici ed opere d'arte. Posizionando i

sensori FBG nei punti critici di ponti o viadotti, ad esempio, si riesce a monitorarli in modo continuativo tramite una lettura remota ed istantanea delle deformazioni per effetto dei carichi mobili e delle variazioni termiche. Si rivelano utili persino per sorvegliare le fessurazioni nelle statue.

Nel settore aerospaziale, per la costruzione di aeromobili e veicoli spaziali, vengono usati in modo esteso materiali compositi in fibra di carbonio rinforzata, in quanto offrono proprietà specifiche superiori rispetto ai materiali convenzionali. Un aspetto importante dei materiali compositi riguarda la difficoltà di rilevare danni al loro interno. Tramite sensori FBG, si è permesso di monitorare tali materiali e anche le prestazioni aerodinamiche degli aeromobili. Inoltre, permettono di studiare le condizioni di operatività di serbatoi criogenici di veicoli spaziali presso la NASA, dove le temperature sono tra i $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ e i $380\text{ }^{\circ}\text{C}$ e dunque i sensori elettronici convenzionali non potrebbero sopravvivervi.

Nel campo delle applicazioni mediche, si sfrutta la bassa invasività dei sensori FBG per effettuare misure di temperatura: sono inseriti in cateteri ed aghi ipodermici nel corso di terapie mediche alternative alla chirurgia come radioterapia; sono inoltre utilizzati per misure di temperatura in dispositivi NMR (Nuclear Magnetic Resonance).

Un campo di applicazione innovativo è quella delle strutture intelligenti, ovvero strutture nei quali vengono inglobati i sensori FBG come strumento autodiagnostico, rendendole capaci di inviare un segnale di *warning* qualora sopraggiungessero dei danni, e riuscendo anche a ripararli automaticamente. Ciò risulta estremamente utile in moltissimi campi, da quello aeronautico a quello medico.

Una delle caratteristiche che rendono straordinari i sensori FBG è la loro capacità di sopravvivere in ambienti ostili con elevate dosi di radiazioni. Da

alcuni anni, si sfrutta questa peculiarità della tecnologia FBG per scopi di monitoraggio sia nelle centrali nucleari che negli acceleratori di particelle.

Questa tesi tratta di un innovativo sistema di monitoraggio basato su sensori FBG installato nell'acceleratore di particelle LHC al CERN, in Svizzera. Sarà prima descritto l'ambiente dell'acceleratore LHC nel quale esso è installato, permettendo di comprendere le condizioni ostili nel quale esso si trova a lavorare, per poi illustrare il sistema stesso e il suo funzionamento.

Capitolo 2: Sensori FBG nella fisica delle Alte Energie: progetto I-PIPE all'LHC

2.1 Il Large Hadron Collider

Il Large Hadron Collider (LHC) è il più grande e potente acceleratore di particelle mai costruito ed è situato presso il CERN di Ginevra [7]. L'acceleratore è collocato in un tunnel circolare di 27 km di circonferenza, inizialmente scavato per ospitare il Large Electron Positron Collider (LEP), situato a circa 100m sotto la campagna che circonda Ginevra, a cavallo della frontiera franco-svizzera. LHC accelera due fasci di protoni circolanti in senso opposto, ognuno contenuto in un tubo a vuoto, fino a 7 TeV di energia. I due fasci vengono fatti collidere ad un'energia nel centro di massa di 14 TeV, in quattro punti situati lungo la circonferenza dell'acceleratore. In corrispondenza di queste zone di collisione sono stati installati quattro grandi apparati sperimentali: ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus), CMS (Compact Muon Solenoid), LHCb (Large Hadron Collider beauty) ed ALICE (A Large Ion Collider Experiment).

La progettazione del LHC iniziò nel 1994 con l'obiettivo di rispondere ai più grandi quesiti sull'Universo, studiando i più piccoli costituenti della materia e le loro interazioni.

Come la famosa equazione di Einstein $E = mc^2$ afferma, tutta l'energia può essere trasformata in massa e viceversa: all'LHC tale trasformazione avviene ad ogni collisione, comportando la formazione di una cascata di particelle di ogni tipo, sia quelle di cui è composta la materia ordinaria, che altre che esistevano solo immediatamente dopo il Big Bang.

Le particelle viaggiano in un tubo ad estremo vuoto e sono manipolate attraverso delle cavità risonanti e una grande varietà di magneti.

I protoni circolano nell'anello raggruppati in pacchetti, formati attraverso il processo di accelerazione: ogni qualvolta il fascio di particelle attraversa una cavità risonante a radio frequenza (RF), si impossessa di una parte della sua potenza e di conseguenza accelera [8].

I magneti, invece, si occupano di ottimizzare la traiettoria dei fasci. Per far sì che protoni con un'energia di 7 TeV viaggino seguendo una traiettoria circolare, è necessario un campo magnetico di circa 8 T. È chiaro che produrre un campo magnetico così elevato non è possibile con un elettromagnete convenzionale, in quanto ci vorrebbero correnti troppo alte con una conseguente dissipazione di energia termica eccessiva; si è reso quindi necessario l'utilizzo di magneti superconduttori. In particolare, le bobine sono costituite da una lega niobio-titanio, un super conduttore con una temperatura di 9.2 K (-263.9500 °C), portato a tale temperatura tramite un opportuno sistema di raffreddamento.

Ogni fascio è costituito da quasi 3000 pacchetti di particelle e ciascun pacchetto contiene a sua volta circa 10^{11} particelle. All'interno dei rivelatori dei diversi esperimenti, i protoni si scontrano 40 milioni di volte al secondo. Avvengono, nei momenti di massima efficienza della macchina, fino a 25 collisioni tra protoni ogni 25 nanosecondi, cioè circa 10^9 collisioni al secondo.

Prima di raggiungere l'LHC, le particelle sono accelerate da una catena di acceleratori che gradualmente aumentano la loro energia. Tutto inizia semplicemente da una bottiglietta di idrogeno in forma di gas. Gli atomi di idrogeno vengono privati dell'elettrone che orbita attorno al protone, lasciando i protoni "nudi" pronti ad essere infilati nel primo stadio della catena di accelerazione, costituito dall'acceleratore lineare Linac2. Quest'ultimo cede i protoni con un'energia di 50 MeV al primo acceleratore circolare della catena, il Proton Synchrotron booster (PSb), il quale aumenta l'energia fino a 1.4 GeV. Successivamente le particelle sono trasferite al Proton Synchrotron (PS) per essere ulteriormente accelerate fino a 25 GeV. Il fascio viene infine iniettato dal

PS nel Super Proton Synchrotron (SPS) dove l'energia raggiunge 450 GeV, valore con il quale entra nell'LHC [9].

Nella Fig. 2.1 è possibile osservare la struttura dell'acceleratore al CERN:

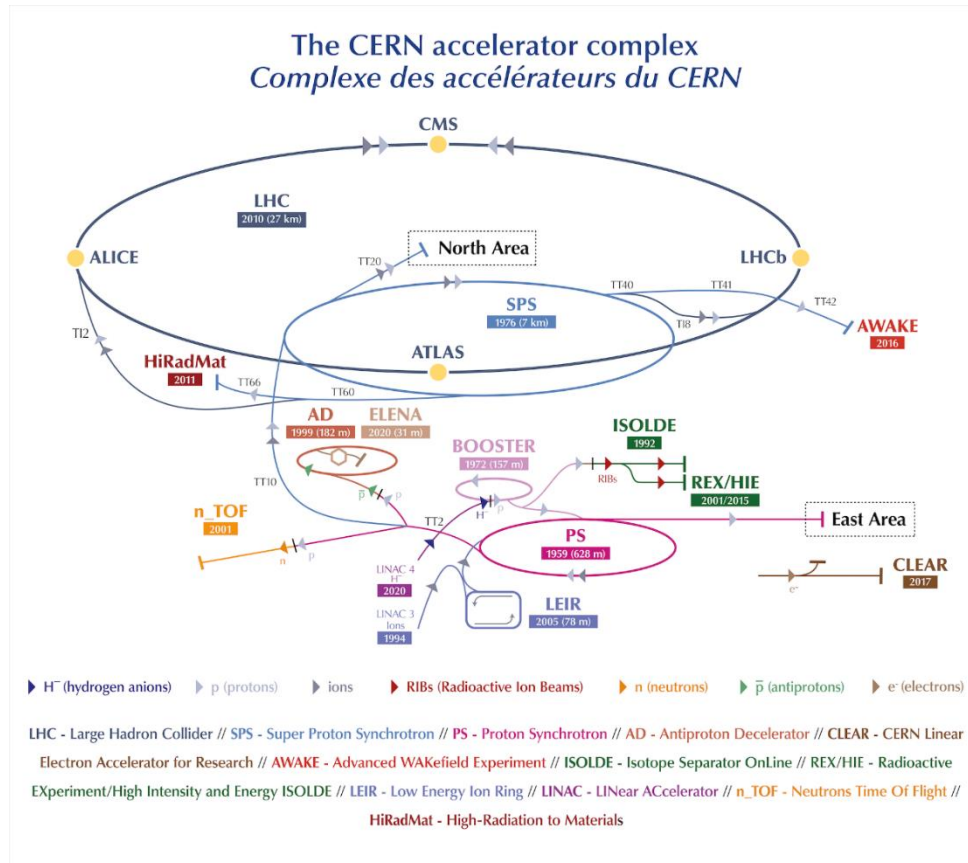


Fig. 2.1 – Complesso degli acceleratori del CERN. ©2020 CERN.

Dopo il processo di accelerazione, i fasci circolano nel LHC per tipicamente da 10 a 20 ore durante le quali vengono portate a collisione (grazie all'azione sui magneti) nei quattro punti di collisione dove sono ubicati gli apparati sperimentali ATLAS, CMS, LHCb e ALICE, ciascuno progettato per un determinato programma di ricerca. Lo scopo principale di questi rivelatori è di identificare le particelle secondarie risultanti dalle collisioni e misurare le loro posizioni nello spazio, le loro cariche, la loro velocità, massa ed energia.

Mentre ALICE si occupa di analizzare le collisioni tra ioni pesanti di modo da studiare le proprietà del plasma quark-gluone, l'LHCb si pone l'obiettivo di comprendere più a fondo l'antisimmetria tra materia e antimateria.

CMS e ATLAS sono invece rivelatori *general-purpose* (di indirizzo generale), progettati per studiare una vasta gamma di fenomeni fisici, dall'approfondire lo studio delle proprietà del Bosone di Higgs a esplorare la fisica nella scala del TeV oltre il Modello Standard. Sono stati progettati per simili scopi, ma con soluzioni tecniche e design differenti di modo tale da completarsi e contribuire insieme a nuove scoperte.

2.2 L'esperimento Compact Muon Solenoid

Il presente lavoro di tesi si inquadra all'interno delle attività della Technical Coordination dell'esperimento CMS [10], ragion per cui l'apparato sperimentale sarà brevemente descritto nel seguito. Il CMS è lungo 21.6 m, ha un diametro di 14.6 m, un peso di 14500 tonnellate, ed è ubicato in una caverna sotterranea a Cessy in Francia, poco oltre il confine da Ginevra (Fig. 2.2).

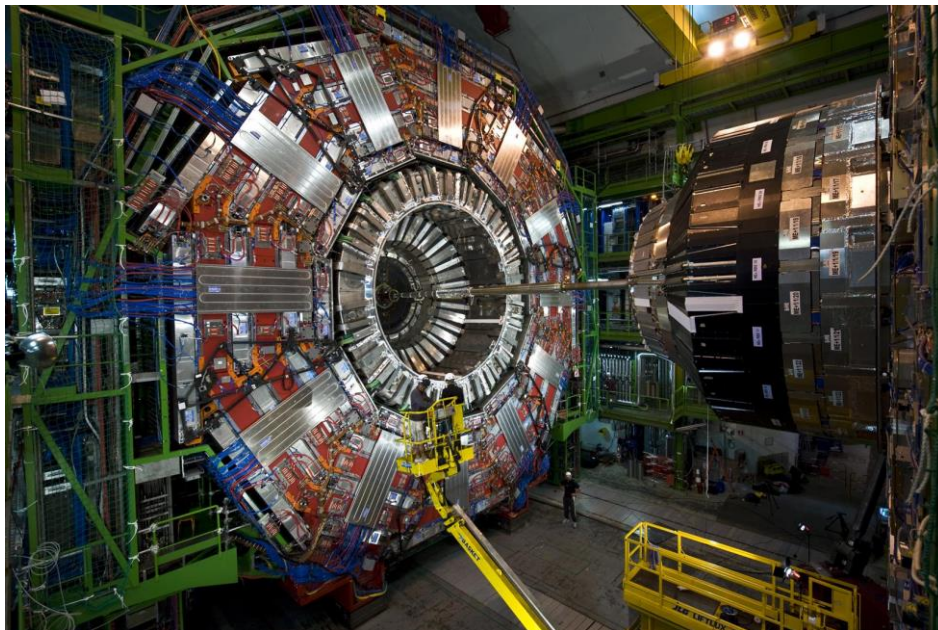


Fig. 2.2 - Vista di una parte del rivelatore CMS. ©2020 CERN.

L'apparato sperimentale di CMS ha una struttura a “scatola cinese”, come mostrato in Fig. 2.3 e i suoi rivelatori sono immersi in un forte campo magnetico di 4T realizzato grazie al più grande solenoide superconduttore mai realizzato al mondo capace di immagazzinare un'energia di 2,4GJ. CMS è stato disegnato per ottenere massima efficienza e precisione nella rivelazione di fotoni, elettroni, muoni, leptoni tau, jet, jet originati da quark b ed energia mancante indice della presenza di particelle neutre elusive. L' apparato è quanto più ermetico possibile e arriva a coprire in angolo fino a circa 1° dalla linea dei fasci. Se pure di grandi dimensioni CMS è un apparato elegantemente compatto. Come tutti i rivelatori, esso è suddiviso in altri “sotto-rivelatori”. Tra questi riconosciamo strumenti di tracking e calorimetri che, rispettivamente, ricostruiscono la traiettoria delle particelle cariche e ne misurano l'energia. Per quanto riguarda i primi, possiamo distinguere tra rivelatori che circondano il punto di collisione e le camere di muoni, che invece si trovano negli strati più esterni. I calorimetri si distinguono in elettromagnetici e adronici. Il calorimetro elettromagnetico (ECAL) misura l'energia di protoni e fotoni che interagiscono tramite la forza elettromagnetica; il calorimetro adronico (HCAL), invece, è stato progettato per misurare adroni prodotti dalle collisioni. Tracciatore, ECAL e HCAL sono racchiusi all'interno del magnete solenoide superconduttore che crea un campo magnetico di 4 T parallelo all'asse dei fasci. Il campo magnetico permette di curvare le particelle cariche, consentendo la misura del loro impulso e del segno della loro carica.

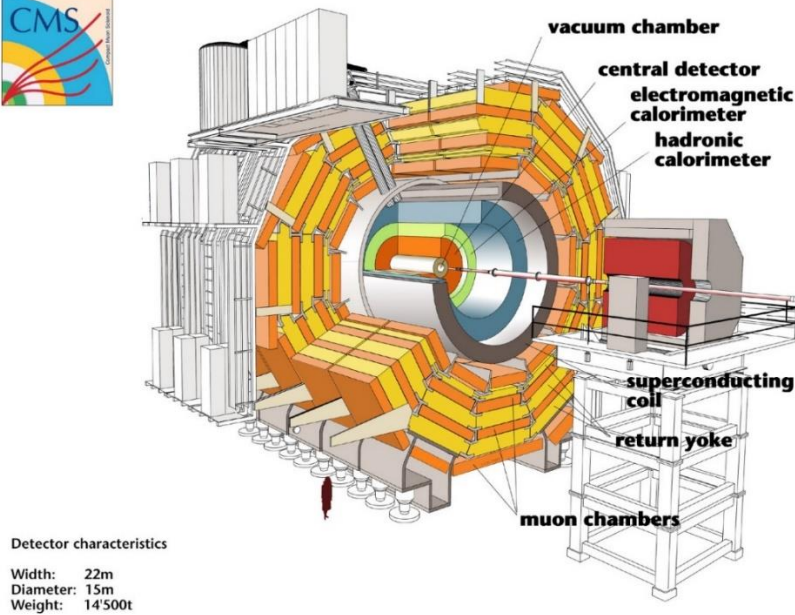


Fig 2.3 - Rappresentazione schematica di CMS che mostra la posizione della CBP (vacuum chamber) all'interno del rivelatore. ©2020 CERN.

2.2.1 Perché si rende necessario un continuo monitoraggio e perché la tecnologia FBG

Come si evince dalla breve descrizione della sua struttura, il CMS è un ambiente molto complesso e, come tale, necessita un continuo monitoraggio di modo da assicurarsi delle condizioni relative a temperatura, umidità, deformazione, campo magnetico e radiazioni dei singoli sottosistemi che lo compongono. In condizioni ostiche come quelle che governano il CMS e in generale tutta la struttura dell'LHC, sensori elettronici convenzionali non sopravvivono a lungo a causa dell'elevato livello di radiazioni e di campo magnetico. La tecnologia Fiber Bragg Grating (FBG) costituisce una soluzione ottimale per tale proposito. Tali sensori, come descritto, posseggono degli straordinari vantaggi rispetto ai sensori elettronici convenzionali o anche altri tipi di sensori in fibra ottica. Di seguito ne ricordiamo alcuni.

- Sono resistenti alle radiazioni ionizzanti presenti nei laboratori di fisica delle alte energie durante il funzionamento degli apparati sperimentali.

- I sensori FBG sono piccoli (delle dimensioni longitudinali di qualche mm e trasversali di circa 125 μm), leggeri e poco invasivi e permettono rilevazioni locali.
- Immunità alle interferenze elettromagnetiche
- La risposta del sensore agli *strain* meccanici e alle variazioni di temperatura cui è sottoposto viene codificata in una grandezza spettrale (la lunghezza d'onda di Bragg λ_B). Ne risulta che la risposta del sensore è assoluta ed autoreferenziale e non dipende da:
 - rumori ambientali o fluttuazioni di potenza nella sorgente luminosa (si misura λ_B che è indipendente da fluttuazioni dell'intensità luminosa),
 - attenuazioni di intensità luminosa lungo la fibra ottica (ad esempio dovute a giunzioni non ottimali della fibra).
- Ideali per *multiplexing* e quindi per creare reti di sensori. Decine di sensori (con lunghezze d'onda di Bragg λ_B diverse tra loro) possono infatti essere disposti in serie lungo una medesima fibra ottica.
- Esistono soluzioni commerciali che li rendono disponibili a prezzi ragionevoli.

2.2.2 Sistemi di monitoraggio basati su sensori FBG installati al CMS

L'installazione in CMS di diversi sistemi di monitoraggio basati sulla tecnologia FBG è iniziata nel 2009 [11]. Dal 2009 al 2013, durante la fase Run1 dell'LHC, circa 200 sensori FBG sia di deformazione che di temperatura sono stati attivi 24 ore su 24, 7 giorni su 7. Nel corso del *Long Shutdown* (LS1), dal 2013 al 2015, durante il quale l'LHC si è fermato per permettere la manutenzione e l'aggiornamento delle macchine e degli esperimenti, il sistema di monitoraggio si è ulteriormente espanso fino ad arrivare a circa 1000 sensori FBG. In particolare, durante LS1 è stato progettato e installato il sistema di monitoraggio denominato I-Pipe, grazie al quale è stato reso possibile per la

prima volta il monitoraggio diretto sia termico che strutturale della *Central Beam Pipe* (CBP) [12], al cuore della zona di interazione tra particelle. L'insieme dei sistemi di monitoraggio a fibra ottica installati a CMS è identificato dall'acronimo FOS4CMS (Fiber Optic Sensors for CMS). Per i sistemi FOS4CMS si è scelto di utilizzare l'architettura di interrogazione WDM al fine di massimizzare il numero di sensori interrogabili con una singola fibra. In logica WDM, un certo numero di sensori può essere interrogato contemporaneamente, sfruttando le loro diversità spettrali: poiché ogni FBG riflette una porzione della luce incidente, mettendo sulla stessa fibra una serie di reticoli in serie, lo strumento leggerà uno spettro in riflessione composto dalle lunghezze d'onda centrali di ciascun reticolo. Come spiegato in precedenza, il numero di sensori interrogabili in WDM dipende dalla banda della sorgente e dallo shift massimo che possono avere le lunghezze d'onde di picco dei sensori FBG. Il sistema di interrogazione utilizzato per gestire i sensori di FOS4CMS è costituito da cinque interrogatori Micron Optics SM 225 [13].

A titolo di esempio, in Fig. 2.4 è riportato lo spettro di uno dei sistemi di monitoraggio installati a CMS. Nello specifico si tratta del monitoraggio della temperatura dei rivelatori RPC costituito da 29 sensori FBG posizionati lungo un'unica fibra.

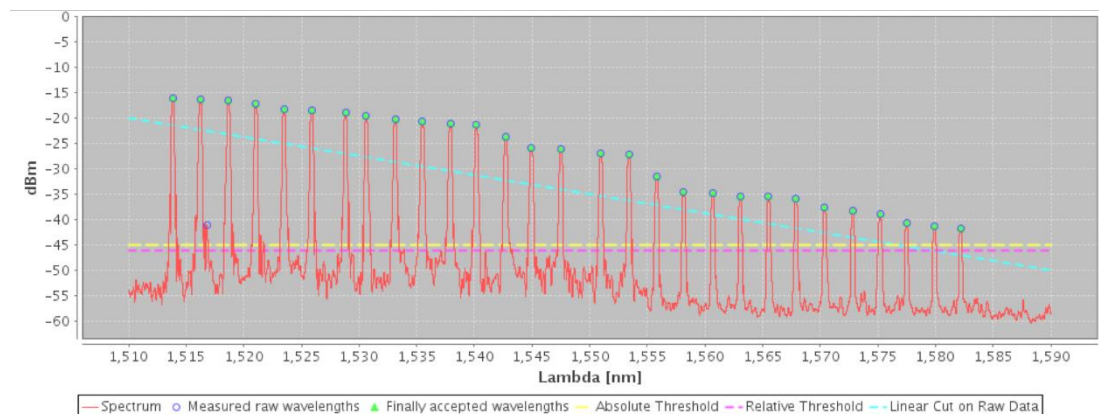


Fig. 2.4 – Spettro del sistema di monitoraggio della temperatura dei rivelatori RPC.

Le fibre ottiche installate sulle varie parti del rivelatore CMS e all'interno della caverna sperimentale (Underground Experimental Cavern, UXC) sono guidate verso la Underground Service Cavern (USC) circa 120m lontano dai sensori. È una delle caverne gemelle dell'esperimento CMS, isolata dai pericoli di radiazione dalla UXC che ospita il rivelatore stesso. Il fatto che sia protetta dalle radiazioni, la rende sempre accessibile anche durante i periodi di funzionamento di LHC.

Il sistema di interrogazione FOS4CMS è equipaggiato con un'interfaccia ethernet e i dati acquisiti vengono salvati in un database e sono disponibili in tempo reale nella sala controllo dell'esperimento CMS.

2.2.3 Alcuni esempi di sistemi di monitoraggio FBG al CMS

Prima di illustrare il sistema I-Pipe, osserviamo alcuni esempi di sistemi di monitoraggio basati su sensori FBG utilizzati nell'ambito del CMS [14].

La Underground Experimental Cavern necessita di un continuo monitoraggio della temperatura al fine di individuare eventuali gradienti termici che potrebbero influire sulle prestazioni del rivelatore CMS. Il sistema di monitoraggio consta di 60 sensori FBG realizzati su una singola fibra ottica single-mode lunga 2 km. In Fig. 2.5 è mostrato il percorso della fibra all'interno di UXC e sono evidenziati i punti di misura. Questo sistema è stato installato nel 2009 ed è tutt'ora attivo.

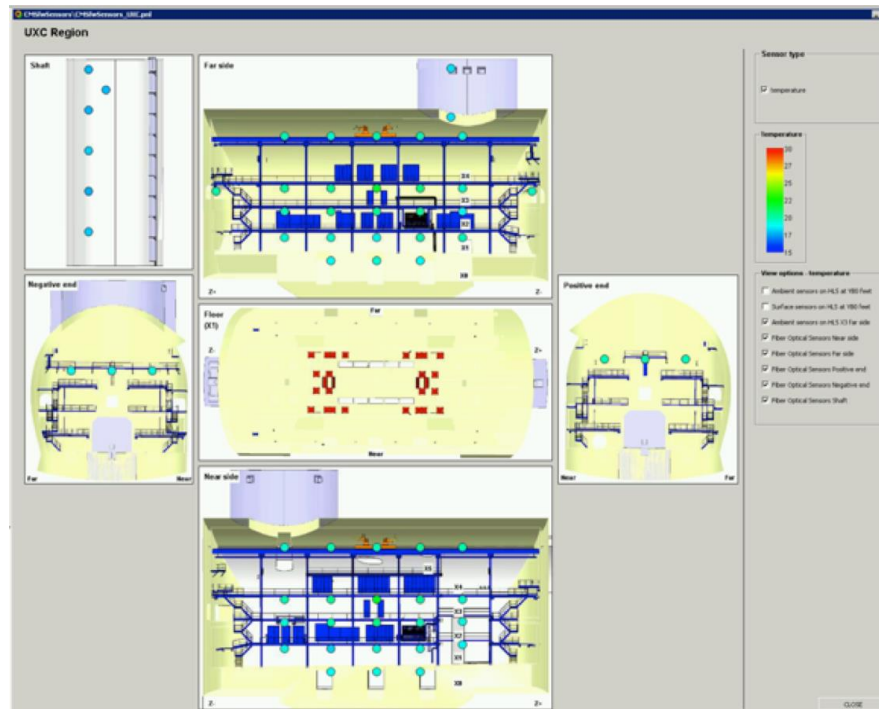


Fig 2.5 - Vista del pannello di controllo del sistema FOS4CMS in cui è mostrato il layout del sistema di monitoraggio di temperatura installato nella Underground Experimental Cavern (UXC).

All'interno di FOS4CMS il monitoraggio non si limita solo alla temperatura, ma sono presenti anche sensori di deformazioni strutturali, di umidità e sono attualmente allo studio soluzioni innovative per il monitoraggio delle radiazioni ionizzanti con sensori in fibra ottica.

Un esempio sono i 35 sensori FBG installati per il monitoraggio strutturale dell'*External Yoke* (Fig. 2.6): 25 di deformazione e 10 di temperatura per compensazione.

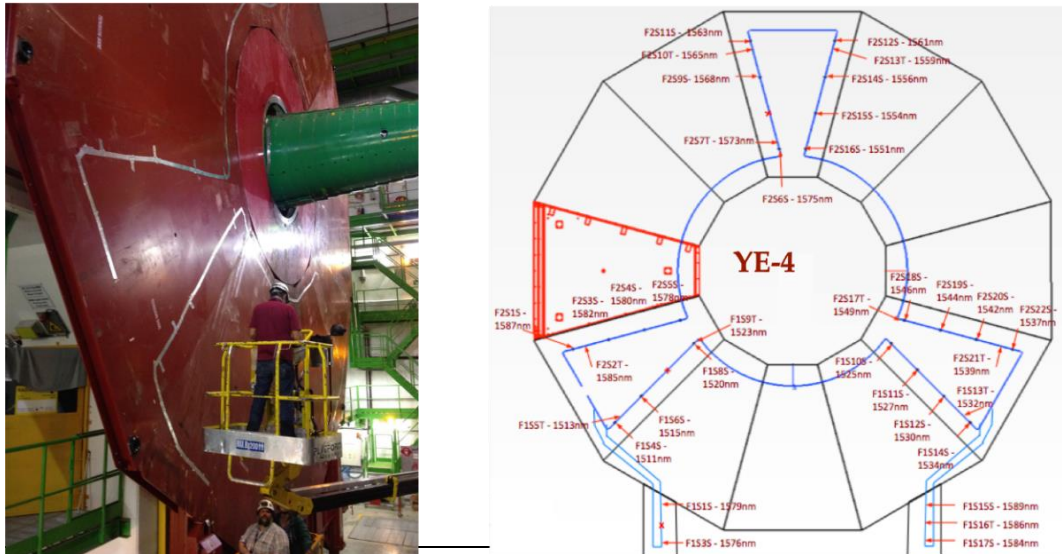


Fig.2.6 – Foto e Schematico del sistema di monitoraggio strutturale e di temperatura installato sul YE-4 disk.

Il sistema *CMS Beam Radiation Monitoring* (BRM) è composto da sei diversi sottosistemi che monitorano le condizioni del fascio e il campo di radiazione all'interno e intorno al CMS. Il compito del BRM è quello di fornire il monitoraggio del campo di radiazione indotta dal fascio all'interno della caverna UXC e delle sezioni rettilinee adiacenti, e di fornire una diagnosi rapida in tempo reale delle condizioni del fascio e avviare procedure di protezione dall'avvento di condizioni pericolose per il rivelatore CMS. Durante LS1 si è equipaggiato tale sistema di un sistema di monitoraggio della temperatura con un totale di 80 sensori FBG.

Dal 2011, è stata sviluppata una nuova generazione di sensori ottici sempre basati sulla tecnologia FBG per il monitoraggio dell'umidità relativa. Dopo una prima fase di ricerca e sviluppo, un sistema completo di 72 termoigrometri in fibra ottica, formato da sensori di temperatura FBG e sensori di umidità relativa FBG, è stato installato a partire dalla fine del 2013 nelle aree critiche del Tracker di CMS per un monitoraggio termo-igrometrico costante al fine di tenere sotto controllo il *dewpoint*.

2.3 Progetto I-Pipe

Il sistema I-Pipe è un innovativo sistema di monitoraggio costituito da sensori FBG che, per la prima volta, monitora a contatto diretto un tratto del LHC, nello specifico il *Central Beam Pipe* (CBP) del CMS, ossia dove avvengono le collisioni protone-protone. È stato installato durante il *Long Shutdown* LS1 avvenuto dal 2013 al 2015 [11]. La foto in Fig. 2.6 mostra la posizione che occupa il *beam pipe* nel rivelatore CMS, mentre lo schematico in Fig. 2.7 mostra la struttura del *beam pipe* e permette di collocare il CBP al suo interno.

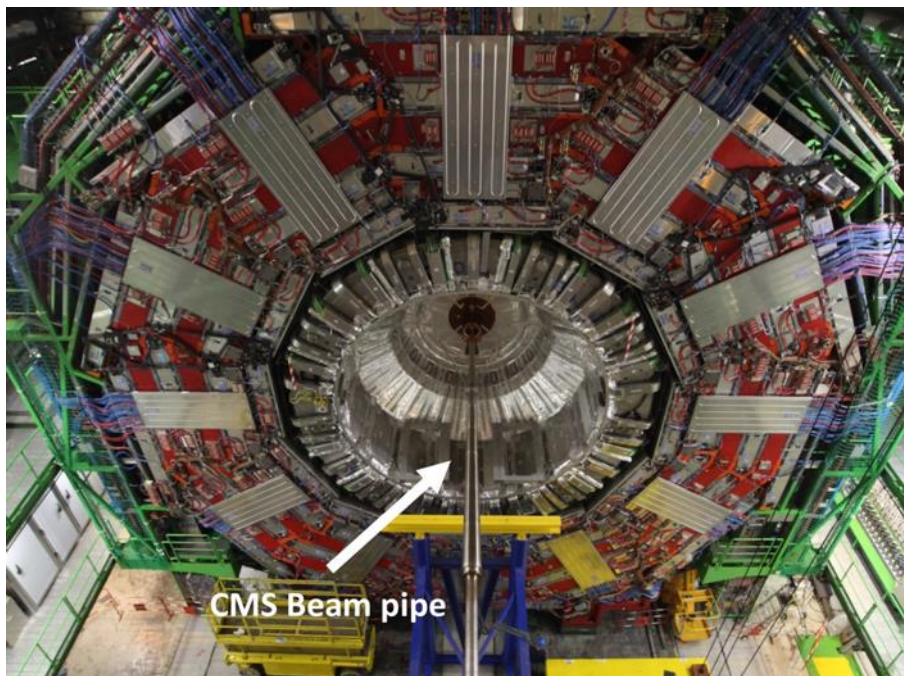


Fig 2.6 Vista del rivelatore CMS con evidenziata la posizione della camera a vuoto del fascio (beam pipe).

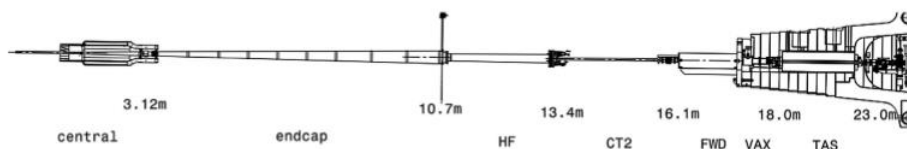


Fig.2.7 – Struttura del CMS Beam Pipe intero [11].

Il CBP deve sottostare ad una condizione estrema di vuoto (fino a 10^{-13} atm) e, allo stesso tempo, non deve interferire con le particelle derivanti dalle collisioni.

Per soddisfare queste condizioni, è costruito con un tubo di Berillio lungo 3 m, saldato alle 2 estremità con due sezioni coniche di alluminio, ciascuna lunga 1.57 m. La camera di Be ha un diametro di 45mm e le sue pareti hanno uno spessore pari 0.8mm. Le due sezioni di Al hanno uno spessore di 0.8mm e un diametro pari a 65mm.

Il sistema di monitoraggio del sistema appena descritto deve in primo luogo essere in grado di funzionare in presenza di radiazioni ionizzanti. In aggiunta, deve presentare un layout semplice, la possibilità di *multiplexing* e non deve interferire elettro magneticamente con i rivelatori di particelle. Il sistema I-Pipe, essendo costituito da sensori in fibra a reticolo di Bragg, soddisfa ampiamente tali requisiti.

Il sistema è costituito da 4 fibre 28SMF di diametro pari a 200 μm (*core-cladding-buffer*) posizionate longitudinalmente lungo le posizioni cardinali della sezione trasversa del CBP. Su ciascuna delle fibre sono installati 16 sensori FBG: 7 incollati sulla superficie esterna del CBP per misurare deformazioni strutturali, 9 non incollati ma in contatto termico con la struttura, che fungono da sensori di temperatura e per la compensazione termica dei sensori di deformazione (Fig. 2.8).

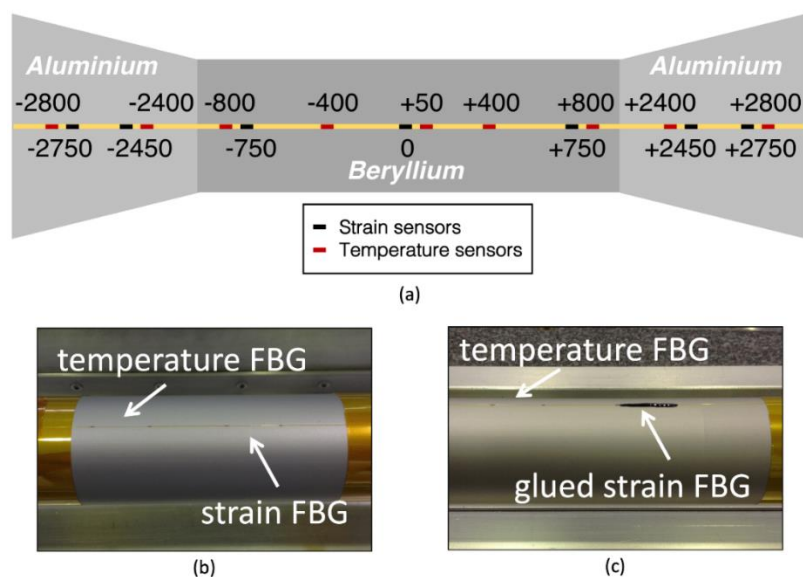


Fig 2.8 Schematico del sistema i-pipe. Le quote in mm si riferiscono alle distanze dei sensori dal centro della Central Beam Pipe. Le foto mostrano il dettaglio dei sensori di temperatura (b) e di deformazione (c) [11].

Una volta installati i sensori FBG sul *beam pipe*, e aver integrato quest'ultimo nel rivelatore CMS, a fine 2014, è stata effettuata la procedura di *bakeout*. Il *bakeout* consiste nel riscaldare le camere a vuoto, con un ciclo termico ottimizzato che raggiunge la temperatura massima di 250 °C, di modo tale da rimuovere eventuali impurità dalla parete interna dei tubi e rendere le condizioni del vuoto ottimali. L'espansione termica conseguente ha causato un allungamento globale del BP comportando la rottura delle fibre in alcuni punti, compromettendo l'affidabilità di alcuni dei sensori. Alla fine dell'intera procedura di installazione, 40 sensori su 64 sono risultati idonei. Il sistema è in acquisizione da gennaio 2015 e i dati sono integrati negli schermi della sala controllo di CMS in modo da consentire agli operatori di verificare le condizioni termiche e strutturale della CBP durante le fasi di presa dati e manutenzione.

2.3.1 Monitoraggio della temperatura

I sensori I-Pipe, per la prima volta, hanno dato alla comunità del CERN la possibilità di monitorare con misure dirette, a contatto, le dinamiche termiche

di un tratto del LHC durante le fasi di operazione della macchina. Trattandosi della CBP dell'esperimento CMS, le dinamiche termiche sono influenzate anche dalle modalità operative del rivelatore.

È stato analizzato il profilo termico del BP in 4 anni del CMS in operazione (2015, 2016, 2017, 2018). Sono stati individuati 4 principali intervalli di temperatura che corrispondono a 4 diverse configurazioni del rivelatore CMS:

- Temperatura ambiente: quando il rivelatore è aperto e le schede elettroniche all'interno del volume centrale della BP sono spente;
- +10 °C: quando il rivelatore è chiuso, ma le schede elettroniche e il sistema di raffreddamento sono spenti;
- Tra 0 °C e -10 °C: quando il rivelatore è chiuso, le schede elettroniche sono accese e il raffreddamento è acceso;
- -10 °C: quando il rivelatore è chiuso, le schede elettroniche sono in standby e il raffreddamento è acceso.

Il profilo termico del *Beam Pipe*, corrispondente alle 4 condizioni operative del rivelatore CMS durante il 2018, è illustrata nella Fig 2.9.

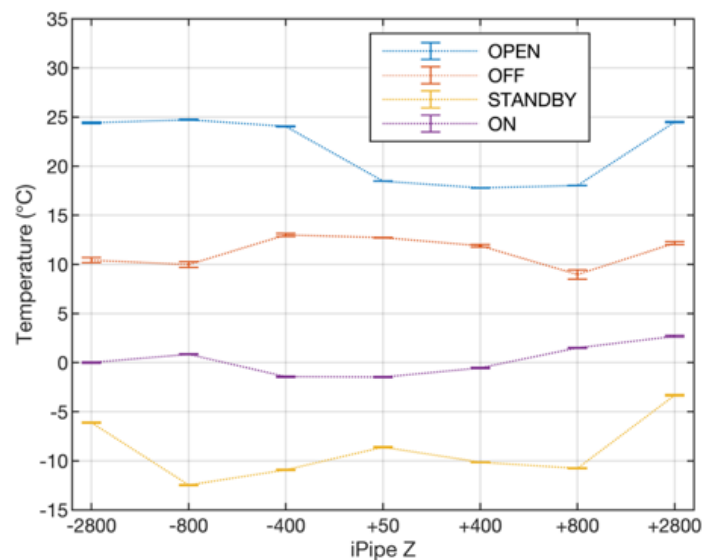


Fig. 2.9 – Profilo termico del BP relativo ai diversi stati operativi del rivelatore CMS durante il 2018 [11].

2.3.2 Monitoraggio dello strain

Come già illustrato nel capitolo precedente, la sensibilità del reticolo è governata dalle proprietà elastiche, elasto-ottiche e termo-ottiche della fibra e dalla natura della deformazione alla quale la struttura ospitante è soggetta. La lunghezza d'onda di Bragg, in accordo con l'equazione (5), si modifica a causa di dilatazioni o compressioni del reticolo e cambiamenti dell'indice di rifrazione efficace. L'entità dello *shift* della lunghezza d'onda si può esprimere come:

$$\frac{\delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left(\frac{n^2}{2}\right) [p_{11}\epsilon_1 + p_{12}(\epsilon_1 + \epsilon_2)] \quad (15)$$

Dove le deformazioni sono rappresentate da ϵ_1 e ϵ_2 , rispettivamente lungo e trasverso l'asse della fibra. Se la deformazione è omogenea e isotropica, allora l'equazione si semplifica come:

$$\frac{\delta\lambda_B}{\lambda_B} = [1 - p_e]\epsilon \approx 0.78\epsilon \quad (16)$$

Dove p_e esprime i contributi fotoelastici come funzione dei coefficienti di *Poisson* e *Pockel* ed è definito come:

$$p_e = \left(\frac{n^2}{2}\right) [p_{12} - \mu(p_{11} + p_{12})] \quad (17)$$

2.3.3 Lo strain termico apparente

Quando si desidera misurare l'effetto delle deformazioni strutturali, per ogni sensore FBG di deformazione, viene inserito un sensore FBG di temperatura adiacente che funge da compensatore. Questo espediente permette di compensare l'effetto di *strain* termico apparente. Vedremo ora in cosa consiste tale effetto.

Consideriamo l'equazione che descrive come varia la lunghezza d'onda con la temperatura e la deformazione (14):

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e)\varepsilon_z + (\alpha + \zeta) \Delta T \quad (14)$$

La deformazione ε_z è somma di una componente meccanica (ε_m) e una termica “apparente” (ε_T), causata dalla variazione di temperatura, e si può quindi scrivere come: $\varepsilon = \varepsilon_m + \varepsilon_T$, con $\varepsilon_T = \alpha \Delta T$ e α coefficiente di dilatazione termica del materiale.

Sostituendo tali equazioni in (14), si ottiene:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e) (\varepsilon_m + \alpha \Delta T) + (\alpha + \zeta) \Delta T \quad (18)$$

Nel caso in cui un reticolo di Bragg sia esposto solo a variazioni di temperatura e ad uno sforzo nullo ($\varepsilon_m = 0$), il segnale del sensore FBG cambia solo al variare della temperatura. In questo caso l' α è il coefficiente di espansione termica della fibra $\alpha = \alpha_{glass} = 0.55 \cdot 10^{-6}/K$.

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e) \alpha_{glass} \Delta T + (\alpha + \zeta) \Delta T \quad (19)$$

Se, invece, si intende misurare la sola deformazione, accade che in ogni caso la temperatura sortirà un effetto sulla lunghezza d'onda di Bragg e risulta difficile distinguere se la variazione sia dovuta all'uno o all'altro effetto o ad entrambi.

Di conseguenza, la soluzione adottata è quella di posizionare un sensore FBG soggetto alla stessa temperatura, ma protetto dalle deformazioni, sulla stessa fibra, di modo da compensare l'effetto di *strain* termico apparente. I sensori di temperatura I-Pipe sono stati installati in modo tale da risultare *strain-free* e utilizzabili per tale proposito.

Nella Fig. 2.10 si può osservare un confronto tra il comportamento di un sensore di deformazione e uno di temperatura adiacente durante una rampa magnetica. È evidente che, mentre quello di deformazione mostra una variazione della lunghezza d'onda in corrispondenza della rampa, quello di temperatura resta

invariato, testimoniando l'efficacia dell'utilizzo di un sensore di temperatura come compensatore per quello di deformazione adiacente.

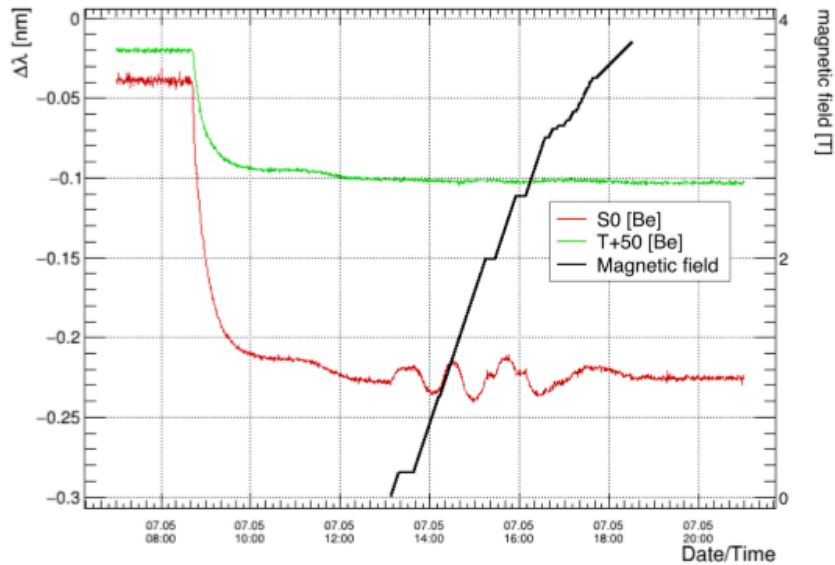


Fig. 2.10 – Illustrazione della variazione di lunghezza d'onda di uno dei sensori i-Pipe di deformazione nel punto di impatto, S0 (rosso), e il sensore di temperatura adiacente, T+50 (verde), durante una rampa magnetica verificatasi il 5 luglio 2015 [14].

Le misurazioni dello *strain* si sono rivelate uno strumento determinante per verificare che l'integrità del CMS non fosse compromessa dalle oscillazioni del CBP: si è concluso, infatti, che il *beam pipe* si muove, ma entro i margini di sicurezza, non costituendo alcun pericolo per i rivelatori circostanti.

2.3.4 Considerazioni sullo shift indotto dalle radiazioni

Oltre a temperatura e deformazione, il sistema ha permesso di monitorare anche gli effetti delle radiazioni. L'intensità della radiazione ionizzante durante un intervallo di tempo è correlata con la luminosità fornita. La luminosità è un parametro fondamentale di un acceleratore, in quanto indicatore delle sue prestazioni: è proporzionale al numero di collisioni che avvengono in un determinato lasso di tempo, quindi misura l'abilità dell'acceleratore di produrre il numero di interazioni richieste.

Le fibre I-Pipe, essendo in contatto diretto con la camera a vuoto, sono esposte alle radiazioni risultanti dalle collisioni protone-protone e dunque costituiscono il rivelatore più vicino al punto di impatto.

Come già menzionato nel primo capitolo, l'effetto delle radiazioni sui reticoli di Bragg è quello di provocare uno *shift* della lunghezza d'onda di Bragg. Nel caso del sistema I-Pipe, sono stati utilizzati dei particolari sensori FBG "scritti" con il laser al femtosecondo. Questa classe di FBG, denominata f-FBG, esibisce una spiccata resistenza alle radiazioni. Difatti, i sensori del sistema I-Pipe non hanno esibito effetti indesiderati dovuti all'esposizione alle radiazioni nei quattro anni di funzionamento del LHC.

In conclusione, il sistema I-Pipe monitora efficientemente il CBP, consentendo di mantenere stabile il suo profilo termico e strutturale.

Capitolo 3 – Elaborazione dei dati da sensori FBG per il monitoraggio di temperatura di acceleratori di particelle al CERN

Il sistema I-Pipe è un innovativo sistema di monitoraggio basato sulla tecnologia FBG, installato sul *Central Beam Pipe* nel rivelatore CMS, parte dell'acceleratore LHC al CERN, Ginevra, Svizzera.

Il *Central Beam Pipe* (CBP) è una sezione fondamentale sia del rivelatore CMS che dell'acceleratore LHC in quanto costituisce il punto di impatto dove si verificano le collisioni tra protoni. Deve sottostare a condizioni estreme di vuoto, e allo stesso tempo non interferire con le particelle derivanti dalle collisioni; inoltre, la dose di radiazione che caratterizza l'ambiente nel quale si trova è estremamente elevata. Per soddisfare queste condizioni, la CBP è costituita da un tubo di Berillio, lungo 3 m, saldato alle 2 estremità con due sezioni coniche di alluminio, ciascuna lunga 1.57 m. La canna di Be ha un diametro di 45mm e le sue pareti hanno uno spessore pari 0.8mm. Le due sezioni di Al hanno uno spessore di 0.8mm e un diametro pari a 65mm (Fig. 3.1).

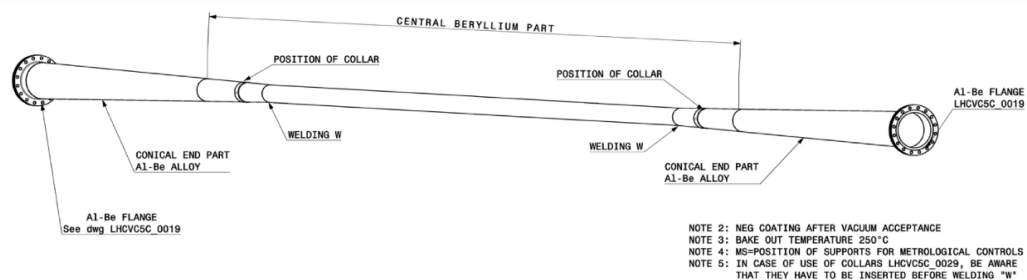


Fig. 3.1 – Illustrazione tecnica del CBP.

Il sistema I-Pipe, installato durante il *Long Shutdown* LS1, avvenuto dal 2013 al 2015, è in presa dati dal 2015 acquisendo 24 ore su 24, 7 giorni su 7, informazioni sia sulla temperatura che sulle deformazioni della struttura, garantendo un monitoraggio continuo ed efficace. Inoltre, grazie alla posizione unica di tale sistema, a diretto contatto con la superficie esterna del CBP, si è

reso possibile misurare gli effetti termici di un fenomeno che rappresenta uno dei limiti principali all'incremento della luminosità (e quindi delle prestazioni) dell'LHC: il *Beam RF induced heating*, ovvero un surriscaldamento locale dovuto all'incrementarsi dell'intensità del fascio. L'obiettivo finale è ottenere un monitoraggio affidabile di tale fenomeno, facendo in modo che la struttura invii un segnale di *warning* qualora si verifici un surriscaldamento indesiderato potenzialmente dannoso.

3.1 Misure di temperatura durante il 2018

Il sistema I-Pipe è costituito da 4 fibre 28SMF, su ciascuna delle quali sono installati 16 sensori FBG: 7 incollati sulla superficie esterna del CBP per misurare deformazioni strutturali, 9 non incollati ma in contatto termico con la struttura, che fungono da sensori di temperatura e da compensatori termici. In questa trattazione sono illustrati i dati raccolti dal sensore T+50, il quale si trova nella sezione di Berillio del CBP a 50mm dal punto di impatto (per visualizzarlo sul CBP fare riferimento alla Fig. 2.8).

Nella Fig. 3.2 sono illustrati i dati raccolti dal sensore nel corso del 2018. Si prende in considerazione l'anno 2018 in quanto costituisce l'ultimo anno di operazione dell'LHC prima di entrare nell'LS2, nel gennaio 2021. In questi due anni il sistema è rimasto attivo, ma senza produrre dati interessanti per la nostra trattazione in quanto il fascio durante la manutenzione non è presente.

Sull'asse delle ascisse sono riportate la data e l'ora, mentre sull'asse delle ordinate la temperatura in gradi Celsius. È bene notare che è stato necessario effettuare un allineamento dei tempi dell'LHC (tipicamente in UTC) e del sistema I-Pipe e si è scelto per l'asse dei tempi il fuso orario dell'Europa Centrale (CEST), il cui *time offset* è UTC+2.

Monitorando le variazioni della lunghezza d'onda caratteristica dei reticoli di Bragg, si ottengono informazioni riguardo le variazioni di temperatura che coinvolgono la struttura. Per ottenere la temperatura a partire dalle lunghezze d'onda registrate, occorre un'operazione di calibrazione. In tal caso, si è reso necessario utilizzare una funzione di calibrazione costituita da due rette, come discusso nella Tesi di Dottorato “Innovative application of fiber optic sensors in high energy physics experiments” [14]. All'aumentare della temperatura il sensore esibisce un comportamento lineare ma la pendenza della retta cambia quando $\lambda_B > 1552$. Questo comportamento è riconducibile agli effetti indesiderati, in termini di tensioni residue, dei danni subiti dalle fibre durante la fase di *bakeout*. Le rette di calibrazione sono state ricavate empiricamente sfruttando i sensori di temperatura del Pixel *detector*, il rivelatore di vertice che avvolge il CBP: confrontando la dinamica della λ_B del sensore I-Pipe e la temperatura misurata da un sensore di riferimento del Pixel vicino in condizioni di temperatura note, sono state stimate le costanti di calibrazione. Una prima retta di calibrazione ha permesso di calibrare le lunghezze d'onda di valore inferiore a 1552 nm, mentre le lunghezze d'onda con valore superiore sono state calibrate tramite una seconda retta. Le due rette sono, rispettivamente:

$$\text{Temperatura} = 31.1537 * \text{Lambda} - 48339.2 \quad \text{se } \lambda_B > 1552$$

$$\text{Temperatura} = 109.443 * \text{Lambda} - 169845 \quad \text{se } \lambda_B < 1552$$

Nel grafico in Fig. 3.2 sono evidenziate le principali operazioni che hanno coinvolto il CBP durante l'anno 2018. Le fasi di Technical Stop e Machine Development, indicate rispettivamente con i colori verde scuro e blu, si ripetono periodicamente e sono fasi nelle quali si procede alla manutenzione e all'aggiornamento delle macchine. All'inizio, quando il rivelatore è in manutenzione durante l'arresto tecnico (TS) sul CBP si registra una temperatura ambiente. La temperatura intorno ai 10 °C corrisponde alla situazione in cui il rivelatore è chiuso e le schede elettroniche e il sistema di raffreddamento del

Pixel *detector* sono spenti. Tra 0 °C e -10 °C il rivelatore è chiuso, mentre le schede elettroniche e il sistema di raffreddamento del Pixel *detector* sono accesi; infine quando il rivelatore è chiuso, le schede elettroniche sono in standby e il sistema di raffreddamento è acceso, si registra una temperatura pari a -10 °C.

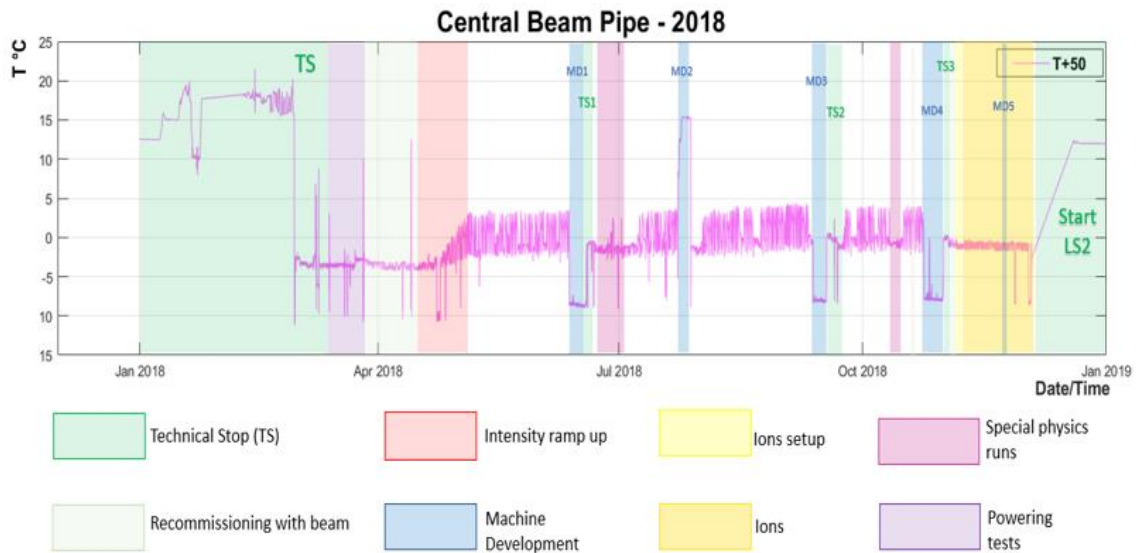


Fig.3.2 – Profilo di temperatura del *Central Beam Pipe* durante il 2018, registrato dal sensore T+50.

È interessante soffermarsi sul periodo che va sotto il nome di *Intensity Ramp Up* (dal 27/04 al 13/05): si tratta di una rampa in quanto durante questa fase si susseguono una serie di *Fill*, ovvero iniezioni di fasci di protoni all'interno dell'acceleratore LHC, con intensità che variano gradualmente (Fig. 3.3).

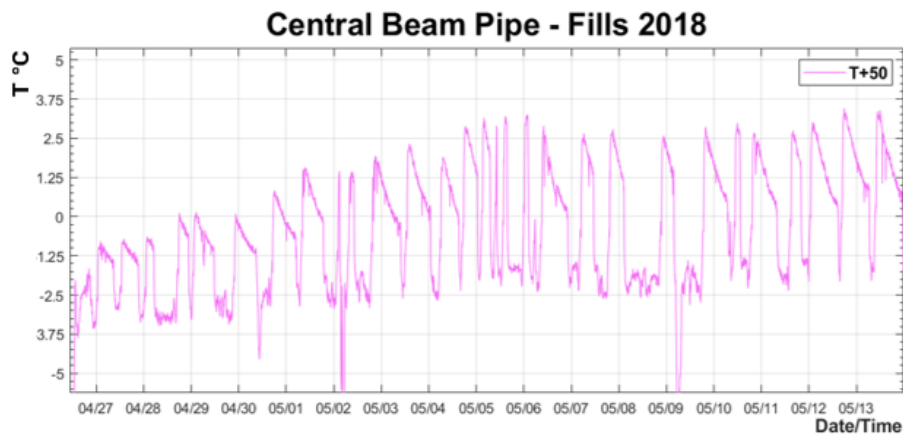


Fig.3.3 – Dinamica della temperatura misurata dal sensore T+50 durante il periodo di *Intensity Ramp Up*.

3.2 Fase di Fill

Per comprendere in cosa consiste la fase di Fill, ricordiamo che i fasci di protoni, dopo aver attraversato la catena di acceleratori del CERN (come descritto nel paragrafo 2.1 e illustrato nella Fig. 2.1), vengono iniettati nel LHC, dove subiscono un ulteriore processo di accelerazione di modo tale da raggiungere l'energia richiesta per le collisioni, pari a 6,5 TeV. All'interno del LHC i fasci circolano, in verso opposto, in due *beam pipes* (BPs). Il fascio in un *pipe* circola in senso orario, mentre il fascio nell'altra *pipe* circola in senso antiorario. I due fasci viaggiano per molte ore all'interno dei BPs dell'LHC in condizioni operative normali e vengono portati a collisione all'interno dei 4 rivelatori, ALICE, ATLAS, CMS e LHCb, dove l'energia totale raggiunge nel punto di impatto 13 TeV. Ogni fase di Fill è una sequenza di azioni che devono essere eseguite rigorosamente in ordine per garantire una transizione efficiente da uno stato della macchina all'altro. Per una trattazione esaustiva delle fasi che caratterizzano il ciclo dell'acceleratore LHC si può fare riferimento a [15], ma per la trattazione che segue è importante conoscere alcuni passaggi fondamentali:

- **INJECTION PROBE BEAM:** Prima di iniettare il fascio ad intensità elevata, si inietta un fascio di prova, attraverso il quale si controllano i diversi sottosistemi dell'acceleratore. L'obiettivo è ottenere una circolazione sicura e di una determinata durata.
- **INJECTION SETUP BEAM:** durante l'iniezione del fascio di prova, si possono effettuare delle misurazioni con una precisione molto limitata. Per ottenere misurazioni più precise, viene adoperato un fascio di setup, il quale ha le sembianze del fascio ad alta intensità che lo seguirà, ma con un numero inferiore di pacchetti.

- INJECTION PHYSICS BEAM: arrivati a questo punto, la macchina è stata ottimizzata. Si è dimostrata in grado di far circolare un fascio con durata appropriata ed è pronta ad accettare intensità più elevate.
- PREPARE RAMP: iniezione completata, preparazione per la rampa.
- RAMP: pronto per la rampa, o rampa in corso, o immediato post-rampa.
- FLAT TOP: rampa terminate – controlli precompressione.
- SQUEEZE: preparazione per la compressione: i fasci vengono perfezionati e focalizzati sui quattro punti di intersezione nell’LHC, e gli esperimenti registreranno le collisioni.
- ADJUST: preparazione per le collisioni o regolazione dei fasci in seguito alla compressione.
- STABLE BEAMS: Condizioni stabili delle collisioni negli esperimenti: l’LHC funziona senza intoppi, i fasci si comportano come previsto e gli esperimenti possono iniziare a registrare i dati.
- BEAM DUMP: in questa modalità viene richiesto ed effettuato il “dump”, o scarico, del fascio.
- RAMP DOWN: in seguito al *dump* del fascio, si verifica un *ramp down* che caratterizza il termine della fase di Fill.

Il comportamento termico del CBP del CMS durante un tipico Fill, registrato dal sensore T+50, è illustrato nella Fig. 3.4. Per ottenere questo risultato, il database in cui sono archiviati i dati dei I-Pipe è stato unito a un database LHC apposito in cui tutte le informazioni sui Fill vengono archiviate durante le operazioni LHC. È evidente che, mentre l’LHC sta eseguendo le operazioni iniziali, in corrispondenza della rampa, la temperatura del CBP aumenta bruscamente; una volta che l’intensità del fascio raggiunge il valore di 10^{11} protoni, la temperatura si stabilizza, per poi iniziare a decrescere con l’inizio delle collisioni. Ciascuna collisione causa la perdita di alcuni protoni per cui,

ricordando che nel CBP avvengono circa 10^9 collisioni al secondo, si giustifica l'andamento decrescente della temperatura. Una volta che il fascio non è più nelle condizioni di subire ulteriori collisioni ed è necessario sostituirlo, viene generato un segnale di warning, e avviene il cosiddetto *Dump* del fascio.

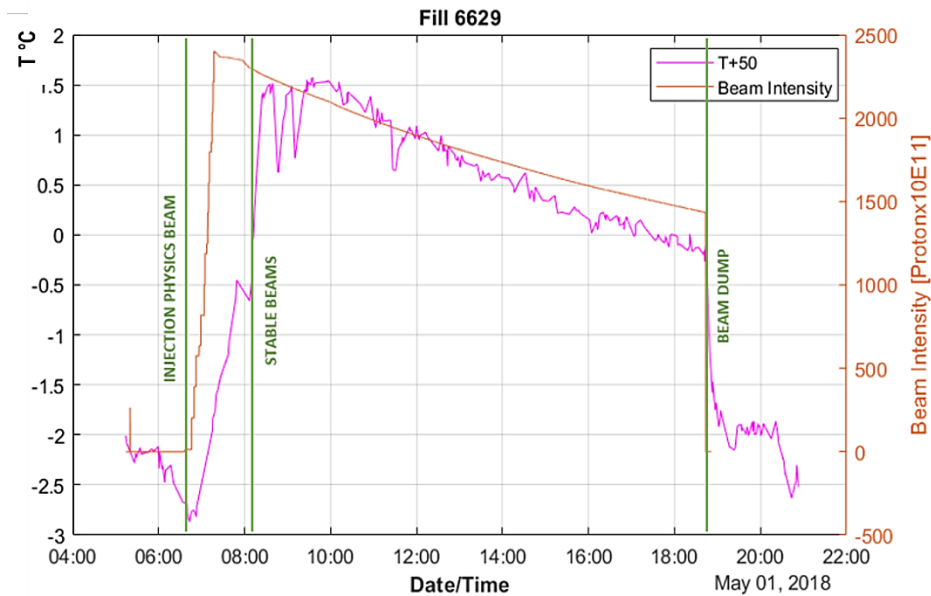


Fig.3.4 – Illustrazione del Fill 6629 registrato dal sensore T+50.

Effettuando una messa a fuoco sull'incremento di temperatura nella parte sinistra della Fig. 3.4, si può notare che vi sono due rampe: una dovuta alla sola presenza del fascio, che termina nel momento in cui il fascio si stabilizza con un'intensità di 10^{11} protoni, un'altra dovuta all'intensità del fascio che aumenta.

Essendo il rivelatore in standby e non verificandosi ancora collisioni tra particelle, l'incremento di temperatura registrato non può che essere associato alla sola presenza del fascio che circola nell'acceleratore. Tale fenomeno prende il nome di “Beam Induced Heating” [16].

3.3 Il fenomeno di *beam induced heating*

Il fenomeno di *beam induced heating* consiste nel verificarsi di un surriscaldamento locale dovuto all'aumento dell'intensità del fascio di particelle circolante nell'acceleratore.

Quando l'intensità del fascio aumenta, esso non può più essere considerato un insieme di particelle non interagenti tra loro, le particelle non sono più soggette alla sola forza di Lorentz esercitata dai magneti e dalle cavità risonanti presenti lungo il tragitto: interagiscono tra loro e interagiscono con tutto ciò che le circonda, generando campi elettromagnetici che prendono il nome di *wake fields* (campi "scia"). Questi campi influenzano il moto delle particelle comportando perdite di energia, instabilità del fascio, o effetti secondari indesiderati secondari come, appunto, il *beam induced heating*. Gli effetti dei campi elettromagnetici generati dall'interazione tra il fascio e l'ambiente circostante sul fascio stesso sono descritti equivalentemente dai *wake fields* nel dominio del tempo e dalle impedenze nel dominio della frequenza [17,18].

Una particella sorgente q_0 , muovendosi lungo la lunghezza L di un dispositivo, lascia dietro di sé dei campi elettromagnetici (da ciò deriva il nome di campi "scia") esercitando una forza su una carica di prova q , posta a una certa distanza z da essa (Fig. 3.5). L'integrale della forza lungo L definisce la *wake function* e la sua trasformata di Fourier prende il nome di impedenza. Si assume che le particelle q e q_0 viaggino alla stessa velocità $v = \beta c$ (con β fattore relativistico e c velocità della luce). L'idea di trattare l'ambiente di un acceleratore deriva dal fatto che permittività, permeabilità e conduttività del materiale dipendono generalmente dalla frequenza. *Wake functions* e impedenze, quindi, descrivono essenzialmente la perdita di energia da parte di un pacchetto di cariche che viaggia attraverso una struttura.

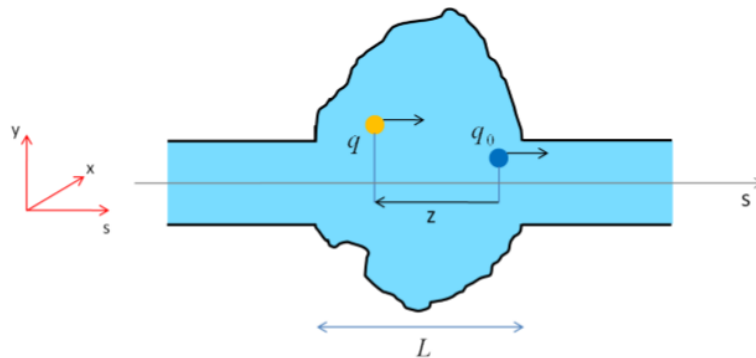


Fig. 3.5 – Dispositivo di sezione trasversale arbitraria lungo un acceleratore

Questa energia elettromagnetica può sia essere dispersa dissipandosi nel materiale con perdite circostante, provocando di conseguenza un surriscaldamento locale – il *beam induced heating*, appunto – oppure potrebbe accadere che continui ad oscillare senza smorzamento a causa di superfici PEC (Perfect Electric Conductor), rischiando di essere trasmessa alle particelle successive, comportando instabilità nel fascio.

La situazione appena osservata riguarda l'effetto del campo elettromagnetico generato da una singola particella sorgente; per ottenere la risposta ad un pacchetto di cariche, basterà effettuare la convoluzione tra funzione scia e la densità di carica del pacchetto, ottenendo ciò che viene chiamato potenziale “scia”. Applicando il teorema della convoluzione, nel dominio di Fourier, si ottiene l'impedenza di accoppiamento del fascio come rapporto tra trasformata di Fourier del potenziale scia e la trasformata di Fourier della densità di carica.

Per determinare la perdita di potenza, correlata direttamente con il fenomeno di *beam induced heating*, basterà moltiplicare la perdita di energia per la frequenza di rivoluzione delle particelle che viaggiano nell'acceleratore.

La potenza dissipata è sempre proporzionale al quadrato del numero di particelle per pacchetto. Può risultare, poi, lineare con il numero di pacchetti, quando questi sono indipendenti, cioè l'effetto di un *wake field* sul fascio svanisce prima dell'arrivo del prossimo (*broadband impedance*), oppure può essere

proporzionale al quadrato del numero di pacchetti, quando il tempo di decadimento del *wake field* è più lungo del tempo che intercorre tra i pacchetti (*narrowband impedance*).

In generale, dato un fascio composto da M pacchetti equi-spaziati e equi-popolati con N_b protoni che viaggiano in una sezione dell'LHC di impedenza longitudinale Z_{long} , la potenza dissipata si esprime come:

$$P_{loss} = 2 (eMN_b f_{rev})^2 (\sum_{p=1}^{\infty} Re[Z_{long}(2\pi p M f_{rev})] Powerspectrum(2\pi p M f_{rev})) \quad (20)$$

Dove $Powerspectrum(f)$ ci dice la dimensione del pacchetto ed ha un significativo effetto sulla P_{loss} , f_{rev} è la frequenza di rivoluzione, e è la carica del protone.

3.3.1 Effetti del Beam Induced Heating sull'LHC

Il *beam induced heating* costituisce uno dei principali limiti alle prestazioni dell'LHC e nel corso degli anni ha comportato danni a diverse sezioni della macchina. L'articolo [19] espone dettagliatamente le problematiche riscontrate tra il 2011 e il 2012 all'LHC a causa di questo fenomeno, tra cui gravi danni alle strutture, ritardi e *beam dumps* non voluti. Sono descritte inoltre le azioni intraprese durante il primo Long Shutdown (LS1 2013-2014) per risolvere i problemi esistenti e prevenirne di nuovi. Tra queste, il monitoraggio continuo della temperatura si è rivelato uno strumento essenziale per tenere sotto controllo il *Beam Induced Heating*. A causa dell'ostilità dell'ambiente, non sempre le sonde elettroniche riescono a garantire le prestazioni migliori; pertanto, un sistema in fibra ottica rappresenta un'ottima soluzione per garantire un monitoraggio continuo ed affidabile. Nel paragrafo che segue sarà illustrato come i sensori FBG installati sul *Central Beam Pipe* riescono a misurare incrementi di temperatura dovuti alla presenza del fascio. Il CBP, essendo un

segmento cilindrico privo di cavità, non subisce un abbondante surriscaldamento, ma analizzare piccoli incrementi fornisce importanti informazioni riguardo la sensibilità e l'affidabilità del sistema, potenzialmente valide anche per misure di incrementi di temperatura maggiori.

3.4 Misurazioni del *Beam Induced Heating* durante un set di FILL interessanti

Nell'ottica del fenomeno appena descritto, è interessante osservare il comportamento del CBP durante un set di Fill scelti. I dati sono stati raccolti da un sensore che si trova a 50 mm dal punto di impatto tra il 27/04 e il 13/05 del 2018, periodo corrispondente alla rampa osservata precedentemente nel grafico di Fig 3.3 (*Intensity Ramp Up*). Nella Tab. 3.1 sono elencate le principali caratteristiche dei Fill studiati.

Fill	Start Time	End Time	Beam 1 Bunches (M)	Beam 2 Bunches (M)	Beam 1 Intensity [E11]	Beam 2 Intensity [E11]	Number of Protons x Bunch (Nb) [E11]
6617	27/04/2018 11:23	27/04/2018 23:28	987	987	1187,557	1224,893	1.2032
6621	29/04/2018 00:48	29/04/2018 13:46	1227	1227	1516,236	1564,538	1.2357
6624	29/04/2018 20:21	30/04/2018 11:10	1227	1227	1467,143	1538,284	1.1957
6628	30/04/2018 15:34	01/05/2018 05:14	1551	1551	1893,377	1954,338	1.2207
6629	01/05/2018 05:14	01/05/2018 18:51	1887	1887	2301,070	2359,633	1.2194
6638	02/05/2018 16:41	03/05/2018 11:57	2175	2175	2501,810	2571,601	1.1503
6640	04/05/2018 02:58	04/05/2018 16:21	2460	2460	2580,361	2642,268	1.0489
6648	06/05/2018 05:58	07/05/2018 00:18	2556	2556	2790,041	2812,350	1.0916
6675	12/05/2018 14:59	13/05/2018 08:40	2556	2556	2918,431	2971,915	1.1418

Tab.3.1 – Tabella con le principali caratteristiche dei Fill analizzati.

Nel grafico in Fig. 3.7 sull'asse delle ascisse sono riportati i Fill che si sono susseguiti nel corso dell'*Intensity Ramp Up*, mentre sull'asse delle ordinate è riportato lo scostamento di temperatura corrispondente (ΔT °C) registrato tra la

fase di INJECTION PROBE BEAM e la fase di STABLE BEAMS. Sul secondo asse delle ordinate è riportato il prodotto del numero di pacchetti (M) per il numero di protoni costituenti il pacchetto al quadrato (N_b^2) per ciascun Fill. L'andamento dell'incremento di temperatura risulta coerente con quello della variabile pari a $M * N_b^2$. Ciò vuol dire che esso varia linearmente con il numero di pacchetti (M) e proporzionalmente al quadrato del numero di protoni per pacchetto (N_b). Prima di giungere a tale conclusione, è stato confrontato l'andamento della temperatura con quello del solo numero di pacchetti (M) o della sola intensità (N_b), concludendo che così facendo si perdono importanti informazioni (Fig. 3.6).

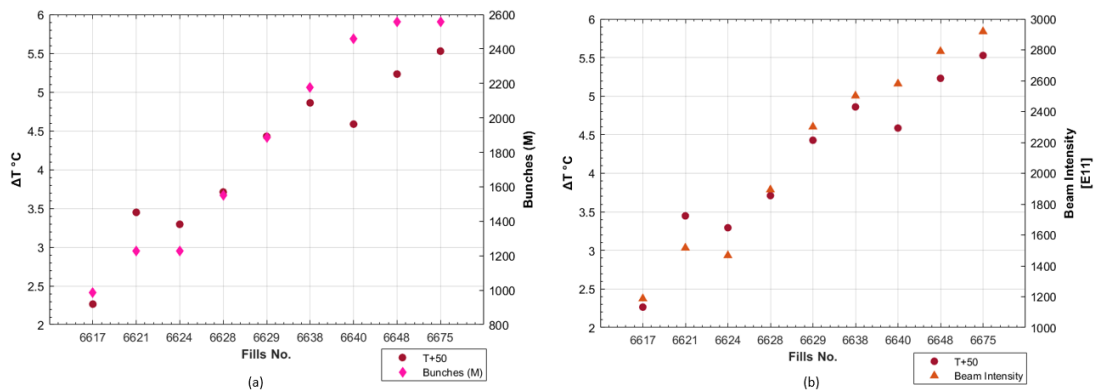


Fig. 3.6 - Andamento dell'incremento di temperatura registrato dal sensore T+50 tra le fasi di INJECTION PROBE BEAM e STABLE BEAMS durante un set di Fill scelti nel 2018, confrontato con l'andamento del numero di pacchetti costituenti il fascio (a) e dell'intensità del fascio (b).

Esaminando la Tab. 3.1, si può notare che il Fill 6624 presenta lo stesso numero di pacchetti (M) del Fill 6621, ma un valore di (N_b) inferiore; ciò influisce sull'incremento di temperatura comportandone una riduzione. Allo stesso modo, il fatto che il numero di pacchetti nella transizione dal Fill 6638 al Fill 6640 sia aumentato, avrebbe potuto portare alla conclusione che l'incremento di temperatura seguisse la stessa tendenza, ma in verità ciò non avviene perché il numero di protoni per pacchetto del Fill 6640 è inferiore rispetto a quello del Fill 6638.

In conclusione, l'andamento della variabile $M * N_b^2$ risulta il più coerente con quello della della temperatura, in quanto tiene conto sia della variazione del numero di pacchetti tra un Fill e l'altro, che dell'intensità del fascio.

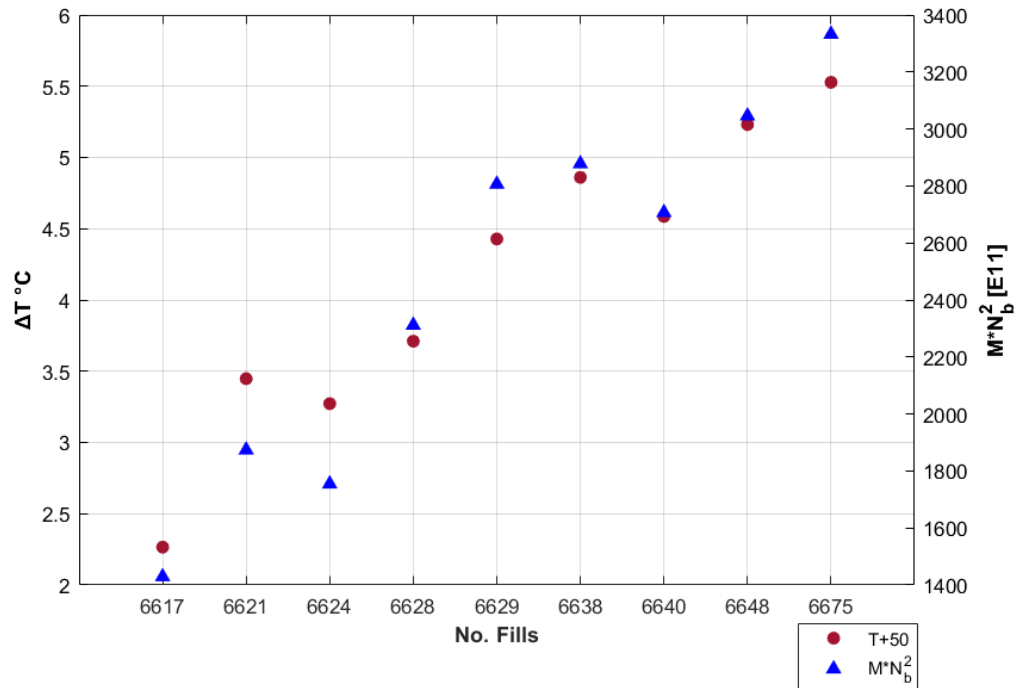


Fig. 3.7 – Andamento dell'incremento di temperatura registrato dal sensore T+50 tra le fasi di INJECTION PROBE BEAM e STABLE BEAMS durante un set di Fill scelti nel 2018. confrontato con l'andamento della variabile $M * N_b^2$.

Nella Tab. 3.2 sono esposti i valori della variabile per ciascun Fill con gli incrementi di temperatura corrispondenti.

Fill	$N_b^2 * M$ [E11]	ΔT °C
6617	1429	2.265
6621	1874	3.448
6624	1754	3.272
6628	2311	3.710
6629	2806	4.428
6638	2878	4.860
6640	2707	4.586
6648	3046	5.231
6675	3332	5.527

Tab 3.2 – Tabella contenente i valori di $N_b^2 * M$ e ΔT °C per ciascun Fill.

La relazione che intercorre tra ΔT (°C) e $M * N_b^2$ si spiega grazie alla diretta correlazione tra l'incremento di temperatura e la potenza dissipata: osservando la formula (20), si vede chiaramente che la P_{loss} è sempre proporzionale a N_b^2 , e poi può variare linearmente con M o con M^2 ; in tal caso risulta proporzionale ad M , confermando che ci troviamo nel caso di *broadband impedance*. I risultati ottenuti risultano quindi compatibili con la trattazione teorica.

Conclusioni

Il presente lavoro di tesi si è focalizzato sull'elaborazione di dati di temperatura raccolti nel 2018 da un sistema di sensori FBG, noto come I-Pipe, installato sul Central Beam Pipe (CBP) che è posto al centro del rivelatore CMS, parte dell'acceleratore di particelle LHC al CERN, in Svizzera.

È noto dalla letteratura che l'iniezione del fascio di protoni all'interno dell'acceleratore comporta un riscaldamento locale della struttura nella quale circola: tale fenomeno è conosciuto come *Beam Induced RF Heating* (BIH). La fase che inizia con l'iniezione del fascio all'interno dell'acceleratore LHC e termina con lo "scarico" di esso per passare all'iniezione del fascio successivo, prende il nome di Fill. Nell'ottica di studiare il fenomeno di BIH e stabilire se sia possibile una correlazione tra temperatura e potenza dissipata, si è scelto un set di Fill tra il 27/04/2018 e il 13/05/2018 e si è valutato per ciascun Fill l'incremento di temperatura corrispondente. Ciascun incremento è stato valutato effettuando la differenza tra la temperatura registrata al momento dell'iniezione del fascio, e quella misurata in corrispondenza della sua stabilizzazione. Una volta determinati gli incrementi, si è prima osservata la correlazione dell'andamento di essi con quello del numero di pacchetti costituenti il fascio di particelle (M) e successivamente con quello del numero di protoni costituenti ciascun pacchetto (N_b). In entrambi i casi, l'andamento non è risultato del tutto coerente in quanto vi erano alcune informazioni mancanti. Se da un lato l'aumento del numero di pacchetti tra un Fill e il successivo sembrava suggerire un aumento di temperatura, la diminuzione del numero di protoni per pacchetto (N_b) influiva sul suo valore, causandone invece un decremento.

Queste considerazioni hanno permesso di concludere che l'andamento degli incrementi di temperatura dipende in realtà da entrambe le variabili; in

particolare, nel caso del CBP di CMS risulta essere correlata linearmente con la variabile $M * N_b^2$, come previsto dalla teoria del *Beam Induced RF Heating*.

Il risultato del presente lavoro di tesi si inserisce in una collaborazione tra l'Università degli Studi di Napoli Federico II, l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) e il CERN che ha l'obiettivo di dimostrare l'affidabilità del sistema I-Pipe come sistema di misura diretta degli effetti termici del *Beam Induced RF Heating*. I risultati ottenuti con il presente lavoro di tesi hanno contribuito al raggiungimento di tale obiettivo, dimostrando che effettivamente vi è una diretta correlazione tra gli incrementi di temperatura misurati dai sensori I-Pipe e i parametri del fascio di particelle che circola in LHC.

Bibliografia

- [1] J. Hecht, 1999, *City of Light: the story of Fiber Optics*, Oxford University Press.
- [2] MicronOptics, *Optical Fiber Sensors Guide Fundamentals & Applications*.
- [3] K.T.V. Grattan, Dr. T. Sun, 2000, *Fiber optic sensor technology: an overview*, Sensors and actuators 82, pp. 40-61.
- [4] T. Erdogan, 1997, *Fiber Grating Spectra*, Journal Of Lightwave Technology, Vol. 15, No. 8.
- [5] S. J. Mihailov, 2012, *Fiber bragg grating sensors for harsh environments*, Sensors.
- [6] A. Cusano, A. Cutolo, J. Albert, 2011, *Fiber bragg grating sensors: recent advancements, industrial applications and market exploitation*, Bentham Science Publishers.
- [7] L. Evans and P. Bryant, 2008, *LHC Machine*, JINST, vol. 3, p. S08001.
- [8] “[http://www.cern.ch/.](http://www.cern.ch/)”, consultato il 15/03/2020.
- [9] S. Myers, *The engineering needed for particle physics*, CERN, doi:10.1098/rsta.2011.0053.
- [10] CMS Collaboration, 2008, *The CMS Experiment at the CERN LHC*”, JINST, vol. 3, p. S08004.
- [11] F. Fienga *et al.*, *A fiber optic sensors monitoring system for the central beam pipe of the CMS experiment*, Optics and laser technology 120 (2019) 105650, Elsevier Journal, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.105650>.

- [12] A. Ball, 2011, *Beampipe design/approval/procurement*, Pix meeting, CERN.
- [13] “<http://www.micronoptics.com/>.”, consultato il 30/03/2020.
- [14] F. Fienga, *Innovative application of fiber optic sensors in high energy physics experiments*, tesi Ph.D, Università degli Studi di Napoli, Maggio 2017.
- [15] M. Lamont, R. Alemany, and S. Page, 2007, *Functional specification LHC Modes*, vol. LHC-OP-ES-0005. CERN.
- [16] F. Fienga *et al.*, *Ipipe: An Innovative Fiber Optic Monitoring System For Beam Induced Heating On Accelerator Pipes*, 9th International Particle Accelerator Conference, IPAC2018, Vancouver, BC, Canada, JACoW Publishing, doi:10.18429/JACoW-IPAC2018-WEPAL01.
- [17] L. Palumbo, V.G. Vaccaro, M. Zobov, *Wake Fields And Impedance*, 1994, INFN, SIS – Pubblicazioni.
- [18] C. Zannini, *Electromagnetic Simulation of CERN accelerator Components and Experimental Applications.*, Ph.D thesis, CERN, 2013-03-11.
- [19] B. Salvant *et al.*, *Beam Induced Rf Heating In LHC In 2015*, Proceedings of IPAC2016, Busan, Korea.