

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI GENOVA

SCUOLA POLITECNICA

DIME

Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Energetica, Gestionale e dei
Trasporti



TESI DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA
MECCANICA

**Analisi CFD della circolazione di argon liquido
all'interno del VETO detector di DarkSide-20k**

Autori:

Andrea Carlucci

Matteo Russo

Relatore:

Ch.^{mo} Prof. Joel Guerrero

Correlatori:

Ch.^{mo} Prof. Alessandro Bottaro

Dott. Alessio Caminata

Dott.ssa Gemma Testera

Ottobre 2020

Ai nonni Franco e Serafino
M.R.

A chi mi vuole o mi ha voluto bene
A.C.

Sommario

Oggetto di questa tesi è lo studio della circolazione di argon liquido all'interno del VETO detector di DarkSide-20k, rivelatore di materia oscura attualmente in fase di progetto che verrà realizzato presso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso, da parte della Global Argon Darkmatter Collaboration. L'analisi è stata svolta realizzando simulazioni CFD su un modello CAD del sistema in esame, opportunamente semplificato in modo da mantenere gli elementi più importanti e influenti sul comportamento del fluido. In particolare sono state messe in evidenza le problematiche relative all'interazione dell'argon con i fotorecettori presenti sulle lastre di acrilico costituenti il VETO e con i circuiti dei sensori disposti sulle superfici inferiore e superiore della Time Projection Chamber, tutti dissipanti nel fluido una determinata potenza termica responsabile dell'aumento di temperatura dell'argon liquido. Nei casi analizzati sono emerse criticità legate alle temperature raggiunte dal fluido nell'attraversare la geometria. Queste non dovrebbero risultare troppo elevate per ritenersi compatibili con le condizioni richieste per il corretto funzionamento del VETO detector, il quale prevede che l'argon permanga allo stato liquido nell'intero volume di controllo. I risultati ottenuti hanno permesso di individuare le zone in cui è richiesto un sostanziale miglioramento della circolazione del fluido, affinché la sua temperatura ivi sia tale da non incorrere nel passaggio di stato.

Abstract

The subject of this thesis is the study of liquid argon circulation inside DarkSide-20k VETO detector. DarkSide-20k is a work-in-progress dark matter detector, which is currently being designed by Global Argon Darkmatter Collaboration and meant to be built at Laboratori Nazionali del Gran Sasso. The analysis has been performed by running CFD simulations on a CAD model of the studied system, appropriately simplified in order to preserve the most important and influential elements on the fluid performance. Particularly, we highlighted the problem concerning the interaction between argon, photoreceptors (installed on the VETO acrylic panels) and sensor circuits evenly spread on the upper and lower Time Projection Chamber surfaces. All these components dissipate a thermal power flux to the fluid, which causes the rise of argon's temperature. As far as the analyzed cases are concerned, critical issues related to the temperature reached by the fluid travelling through the geometry emerged. Temperatures, indeed, should not be too high to be considered compatible with the required conditions of a correct operation of the VETO detector, which needs argon to remain liquid in the entire control volume. The obtained results gave us the possibility to identify the zones where a better circulation is needed so that the temperature is not liable to the argon phase change.

Ringraziamenti

Vogliamo dedicare i nostri ringraziamenti comuni a tutti coloro che ci hanno accompagnato durante questo percorso, che purtroppo si è svolto in un periodo ricco di incognite e di difficoltà per tutti. Nonostante la distanza fisica non ci siamo mai sentiti soli. Menzione speciale va al Prof. Guerrero ed al Prof. Bottaro, che ci hanno offerto la possibilità di affrontare un argomento che abbiamo trovato fin da subito appassionante, fornendoci gli strumenti per padroneggiare un software importante e "potente" come ANSYS Fluent. Ringraziamo Alessio e Gemma, che hanno avuto la pazienza di seguirci in un ambito che in parte esula dal nostro corso di studi ma che ci ha introdotto ad una delle caratteristiche intrinseche della ricerca, ossia la sua interdisciplinarietà. Ringraziamo Roberto per i suoi magnifici modelli CAD, forniti sempre con disponibilità e puntualità.

Ringrazio mia madre e mio padre. Questa tesi è anche il frutto del vostro costante sacrificio, del vostro supporto e appoggio. Ringrazio nonna Alba, per avermi amato come solo lei sa fare, con tanto affetto e tanta pastasciutta. Ringrazio mio fratello, il mio migliore amico e sostenitore. Ringrazio Giulia, la mia forza, il mio punto di riferimento e il mio amore. Infine, ringrazio i miei amici e colleghi, primo su tutti Andrea, con cui ho potuto condividere questo bellissimo percorso.

M.R.

Ringrazio i miei genitori, se ho la possibilità di inseguire i miei obiettivi lo devo a loro. Ringrazio i nonni, che mi hanno sempre amato come un figlio. Ringrazio i miei amici, con cui spero, prima o poi, di poter festeggiare. Ringrazio Matteo, con cui è stato un piacere lavorare e che da collega è diventato un grande amico. A me stesso, per l'impegno che dedico ogni giorno a quello che faccio.

A.C.

Indice

Elenco delle figure	IV
Elenco delle tabelle	VII
Simbologia	1
1 Introduzione	3
2 Accenni alla materia oscura	5
2.1 Evidenze scientifiche	5
2.2 La natura particellare della materia oscura	6
3 Il progetto DarkSide	8
3.1 I precursori del DarkSide-20k	8
3.2 Progetti paralleli	9
3.3 Aspetti tecnici del DarkSide-20k	9
3.3.1 Time Projection Chamber ad argon liquido	9
3.3.2 VETO detector	10
3.3.3 Gabbia di Faraday e criostato	13
4 Il metodo di calcolo	14
4.1 Cenni di fluidodinamica computazionale	14
4.2 Equazioni di Navier-Stokes	15
4.3 Il metodo dei volumi finiti	16
4.4 Equazione dell'energia e problema dell'accoppiamento	16
4.5 Modelli di turbolenza	18
4.5.1 RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations)	18
4.5.2 Modello k- ω SST	19
5 Definizione del problema	21
5.1 Geometria	21
5.2 Condizioni al contorno e considerazioni sulla circolazione dell'argon	23
5.3 Condizioni di permanenza dell'argon allo stato liquido	26
5.4 Aspetti qualitativi della mesh	27
6 Simulazioni preliminari	29
6.1 Introduzione	29

6.2	Analisi dei risultati	29
6.3	Considerazioni finali e proposte di soluzione	30
7	Simulazioni con doppio outlet	35
7.1	Modifiche alla geometria	35
7.2	Condizioni al contorno	35
7.3	Analisi dei risultati	36
8	Simulazione con doppio outlet modificato	43
8.1	Modifiche all'outlet dell'IAB	43
8.2	Condizioni al contorno	43
8.3	Analisi dei risultati	43
9	Conclusioni	46
	Bibliografia	48

Elenco delle figure

1.1	Spaccato del DarkSide-20k [7].	4
2.1	Grafico qualitativo della velocità di rotazione di una tipica galassia a spirale in funzione della distanza dal centro. La curva bianca rappresenta l'andamento delle misure sperimentali, la curva rossa è invece la predizione secondo la legge di gravità newtoniana [3].	6
3.1	Sezione del DarkSide-50, si possono osservare le principali parti costitutive: LAr TPC, Liquid Scintillator VETO e Water Cherenkov VETO.	8
3.2	Particolare di un PDM (a) e di una motherboard di SiPMs per la TPC (b).	10
3.3	Disposizione delle motherboards sulla superficie di base della TPC.	11
3.4	Vista in proiezione ortogonale (a) e in prospettiva semplificata (b) della sezione del DS-20k. Risulta evidente la stratificazione del sistema.	12
3.5	In questa immagine è possibile osservare i settori verticali in cui sono divisi i due buffers, con i fogli di separazione ottica colorati in giallo. In azzurro si ha l'acrilico del VETO. La gabbia di Faraday è omessa per semplificare la rappresentazione.	13
5.1	Vista in proiezione ortogonale del modello del VETO detector dal lato dell'IAB (a) e dell'OAB (b). Si noti la disposizione sfalsata delle piastre di acrilico in modo da ottenere separazione ottica tra i due buffers.	22
5.2	Dominio di calcolo al termine delle semplificazioni descritte. Si può notare l'assenza dei sensori SiPMs e della struttura di sostegno in acciaio della TPC.	23
5.3	Vista laterale del settore del VETO detector utilizzato come modello (a) e ingrandimento della parte inferiore, dove sono visibili le spaziature tra le piastre di acrilico(b).	24
5.4	Particolare degli inlets tubolari dell'IAB e dell'OAB.	26
5.5	Diagramma di fase dell'argon [10].	27
5.6	Panoramica (a) e particolare (b) della griglia ottenuta per il modello descritto del VETO detector.	28

6.1	Contorni istantanei di temperatura (a) e velocità (b) ottenuti sul piano considerato a seguito delle simulazioni effettuate con portata di 0.1 kg/s per ciascuno dei due inlets. Si noti che nelle zone a più alta temperatura e velocità (colorate in rosso) i due parametri possono assumere valori superiori al massimo riportato sulle rispettive scale.	31
6.2	Grafico della temperatura massima raggiunta nel settore del VETO detector in funzione del numero di iterazione per il caso a portata di 0.1 kg/s per ciascun inlet. Si può notare come, nonostante il calcolo non sia arrivato a convergenza, la temperatura massima risulti ben al di sopra del limite di 89 K.	32
6.3	Contorni istantanei di temperatura (a) e velocità (b) ottenuti sul piano considerato a seguito delle simulazioni effettuate con portata differenziale di 0.1 kg/s per l'inlet dell'IAB e di 0.05 kg/s per quello dell'OAB.	33
6.4	Grafico della temperatura massima raggiunta nel settore del VETO detector in funzione del numero di iterazione per il caso a portata differenziale di 0.1 kg/s per l'inlet dell'IAB e di 0.05 kg/s per quello dell'OAB. Si può notare come, nonostante il calcolo non sia arrivato a convergenza, la temperatura massima risulti ben al di sopra del limite di 89 K.	34
7.1	Particolare del doppio outlet.	36
7.2	Contorni istantanei di temperatura per i casi a portata di 0.1 kg/s (a) e di 0.05 kg/s (b) ottenuti sul piano mediano del settore del VETO detector. Si noti che nelle zone a più alta temperatura (colorate in rosso) i due parametri possono assumere valori superiori al massimo riportato sulle rispettive scale, pari a 92 K.	38
7.3	Ingrandimento dei contorni istantanei di temperatura per i casi a portata di 0.1 kg/s (a) e di 0.05 kg/s (b) ottenuti sul piano mediano del settore del VETO detector. Il limite superiore della scala è stato spostato a 130 K per evidenziare le zone più critiche, dove la temperatura supera effettivamente il valore di 92 K.	39
7.4	Contorni istantanei di temperatura per i casi a portata di 0.0375 kg/s per inlet (a) e differenziale di pari valore totale (b) ottenuti sul piano mediano del settore del VETO detector. Si noti che nelle zone a più alta temperatura (colorate in rosso) i due parametri possono assumere valori superiori al massimo riportato sulle rispettive scale, pari a 92 K.	40
7.5	Grafico della temperatura massima raggiunta nel settore del VETO detector in funzione del numero di iterazione per il caso a portata differenziale di valore totale pari a 0.075 kg/s.	41
7.6	Grafici della temperatura massima raggiunta nel dominio di calcolo in funzione del numero di iterazione nei casi a portata di 0.1 kg/s per inlet (a) e di 0.05 kg/s per inlet (b). Si noti la scarsa differenza tra i valori cui i due andamenti convergono, nonostante il rapporto tra le portate sia pari a 2:1.	42

8.1	Particolare della nuova configurazione degli outlets. In evidenza l'outlet dell'IAB.	44
8.2	Contorno istantaneo di temperatura ottenuto sul piano mediano del settore di VETO detector per portata differenziale di 0.05 kg/s all'IAB e di 0.025 kg/s all'OAB.	45
8.3	Grafico della temperatura massima raggiunta nel dominio di calcolo in funzione del numero di iterazione nel caso a portata differenziale con doppio outlet modificato.	45

Elenco delle tabelle

9.1	Temperature massime calcolate nel modello del settore del VETO detector per le diverse geometrie e valori di portata. I risultati non hanno significato fisico, in quanto il passaggio di fase del fluido non è stato considerato, bensì evidenziano le capacità di una particolare geometria in fatto di circolazione dell'argon liquido.	47
-----	--	----

Simbologia

Simbolo	Descrizione
p	pressione statica
ρ	densità
\vec{g}	accelerazione gravitazionale
$\vec{\Pi}$	tensore degli sforzi
τ_{ij}	componenti del tensore degli sforzi
μ	viscosità dinamica
e_t	energia totale per unità di massa
q	calore per unità di massa
S_e	termine sorgente dell'equazione dell'energia
S_c	termine sorgente dell'equazione di continuità
S_q	termine sorgente dell'equazione della quantità di moto
α	coefficiente di dilatazione termica
ρ_0	termine costante della densità in Boussinesq
T	temperatura
T_0	temperatura di riferimento
a	variabile generica
\bar{a}	media di a
a'	valore fluttuante di a
k	energia cinetica turbolenta
ϵ	fattore di dissipazione dell'energia cinetica turbolenta per unità di massa
ω	dissipazione turbolenta specifica
ν_t	viscosità turbolenta
C_v	costante di calibrazione

Acronimo	Nome completo
CFD	Computational Fluid Dynamics
TPC	Time Projection Chamber
IAB	Inner Argon Buffer
OAB	Outer Argon Buffer
LAr	Liquid Argon
UAr	Underground Argon
AAr	Atmospheric Argon
CMB	Cosmic Microwave Background
WIMP	Weakly Interactive Massive Particle
PMMA	Polimetilmetacrilato
PDM	PhotoDetector Module
SiPM	Silicon PhotoMultiplier
PMT	PhotoMultiplier Tube
DS-20k	DarkSide-20k
NSE	Navier-Stokes Equations
FVM	Finite Volume Method
PDE	Partial Differential Equations
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes equations
CAD	Computer Aided Design

Capitolo 1

Introduzione

Nell'ambito della comprensione delle leggi che regolano l'evolversi del nostro Universo, una delle ultime frontiere della fisica consiste nella ricerca della materia oscura, la cui teorizzazione deriva dal tentativo di spiegare alcuni fenomeni cosmici che non potrebbero essere descritti sulla base della distribuzione di materia visibile dell'Universo [4]. In questa direzione si sviluppa il progetto *DarkSide-20k*, il quale, in realizzazione presso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso per opera della Global Argon Darkmatter Collaboration, vede la partecipazione di svariati enti e gruppi di ricerca su base internazionale, tra cui l'Università degli Studi di Genova [7].

L'esperimento prevede la costruzione di un rivelatore di materia oscura costituito da due detectors con forma di prismi a base ottagonale, denominati *inner detector* e *VETO detector*, l'uno situato all'interno dell'altro. Il primo di essi è una LAr TPC che viene riempita di argon liquido estremamente puro, privato dell'isotopo Argon-39, mentre il secondo è un guscio di materiale plastico caricato con Gadolinio, inserito tra due strati di argon liquido atmosferico. Entrambi sono circondati da una gabbia di Faraday di medesima forma e l'insieme è inserito in un bagno d'argon all'interno di un criostato ProtoDUNE. DarkSide-20k sfrutta le proprietà di scintillazione degli atomi di argon, che, interagendo con un'eventuale particella di materia oscura, sono in grado di emettere fotoni rilevabili all'interno della TPC tramite sensori [7]. Dall'acquisizione di dati su un periodo di tempo di 10-15 anni, la speranza è quella di ottenere prove concrete dell'esistenza della sfuggente particella [7].

Lo scopo di questa tesi consiste nella modellazione fluidodinamica del processo di ricambio del volume d'argon presente all'esterno della TPC, che dev'essere garantito e ottimizzato al fine di permettere il corretto funzionamento del VETO detector. I test sono stati condotti mediante l'utilizzo del simulatore CFD Ansys FLUENT. Il software, basato sul metodo dei volumi finiti con accuratezza del secondo ordine, permette l'analisi fluidodinamica computazionale di sistemi complessi quali l'oggetto della nostra discussione.

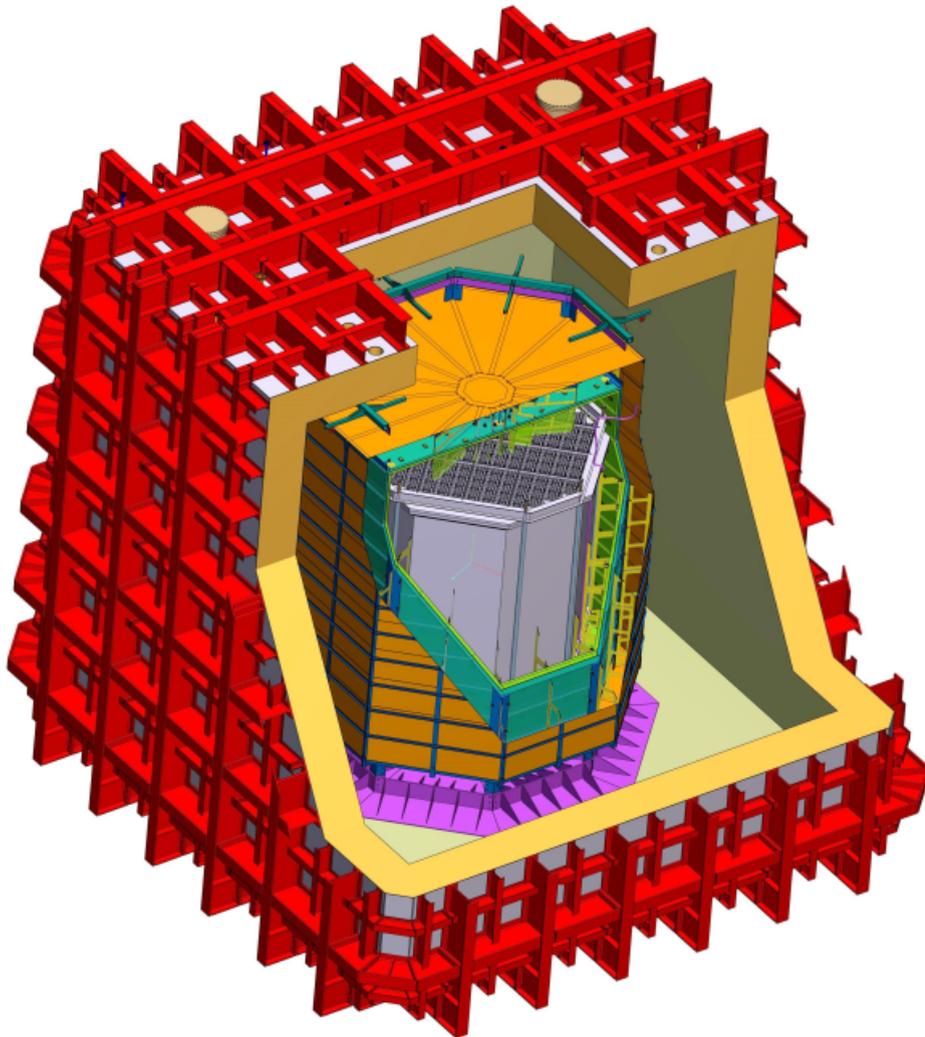


Figura 1.1: Spaccato del DarkSide-20k [7].

Capitolo 2

Accenni alla materia oscura

2.1 Evidenze scientifiche

La teoria dell'esistenza della materia oscura ha mosso i primi passi negli anni '30 del secolo scorso, quando l'astronomo svizzero Fritz Zwicky si accorse di un fatto molto particolare riguardante l'ammasso della Chioma di Berenice, aggregato di galassie largo circa 20 milioni di anni luce e distante indicativamente 350 milioni di anni luce dal nostro pianeta. Zwicky calcolò in modo accurato la distribuzione di velocità e le distanze relative delle galassie dell'ammasso, e, dall'analisi dei dati ottenuti, notò un'importante contraddizione: la massa necessaria a sostenere tali condizioni di moto doveva essere assai superiore alla massa totale misurata basandosi sulla luce emessa dall'ammasso. L'evidente discrepanza portò Zwicky a ipotizzare l'esistenza di una grossa componente in massa di materia non emettente fotoni che per questo definì "oscura" [17, 18]. Inizialmente si pensò di imputare questo fenomeno alla presenza di gas interstellari o polveri, allora non visibili, e la questione rimase in sospeso per anni.

Negli anni '60 e '70 gli astronomi statunitensi Vera Rubin e Kent Ford, misurando in modo sistematico la velocità di rotazione di alcune galassie a spirale, confermarono le osservazioni di Zwicky [12]. In particolare, la curva di rotazione delle galassie in questione, cioè l'andamento della velocità di rotazione dei corpi del sistema astronomico in funzione della distanza dal centro del sistema stesso, calcolata sulla base della legge di gravitazione newtoniana (includendo le masse degli oggetti astronomici visibili), risultava differente dai risultati delle misure sperimentali. Questi ultimi davano prova di un profilo di velocità pressoché costante a partire dal centro della galassia fino a comprendere anche le zone esterne a quella occupata dalla massa visibile, dove sono presenti nubi di idrogeno ionizzato rilevabili grazie alle radiazioni da loro emesse. L'andamento teorico, caratterizzato da un decremento di velocità in funzione della radice della distanza dal centro, si mostra quindi estremamente diverso. Una possibile spiegazione del fenomeno consiste nel considerare le galassie come immerse in un alone di una componente oscura, che si estende molto oltre la massa visibile, con una distribuzione di densità che decresce con il quadrato della distanza dal centro del sistema astronomico. Con lo sviluppo della tecnologia a raggi

X, ideata dall'italiano Riccardo Giacconi nel corso degli anni '60, venne confermato l'effettivo contributo di gas caldi a gran parte della massa mancante, tuttavia i conti risultavano ancora incoerenti: una considerevole quota parte continuava comunque a sfuggire.

Unitamente all'astronomia a raggi X vi è un'altra tecnica che ha fornito una ulteriore prova dell'esistenza della materia oscura, ossia quella della *lente gravitazionale*. Secondo la teoria della Relatività Generale di Einstein, l'attrazione gravitazionale sviluppata da una massa è in grado di deflettere la traiettoria della luce. La validità di tutto ciò fu fornita nel 1919 dall'astrofisico inglese Arthur Eddington, misurando gli scostamenti nella posizione di stelle lontane in condizioni normali e quando la loro luce sfiorava il disco solare. Utilizzando questo procedimento al contrario, ossia misurando la deflessione della luce per calcolare la massa del corpo deflettente, è possibile ripetere i calcoli di Zwicky con maggiore precisione. Combinando i dati ottenuti dalle due tecniche si arriva ad una conclusione univoca: la materia oscura esiste. Si tratta dunque di materia stabile (cioè che non decade) in un intervallo di tempo pari alla durata dell'Universo e che non assorbe ed emette luce ed interagisce solo attraverso la forza gravitazionale. Ulteriori considerazioni portano poi a concludere che materia di questo tipo non è prevista dal modello standard della fisica delle particelle elementari.

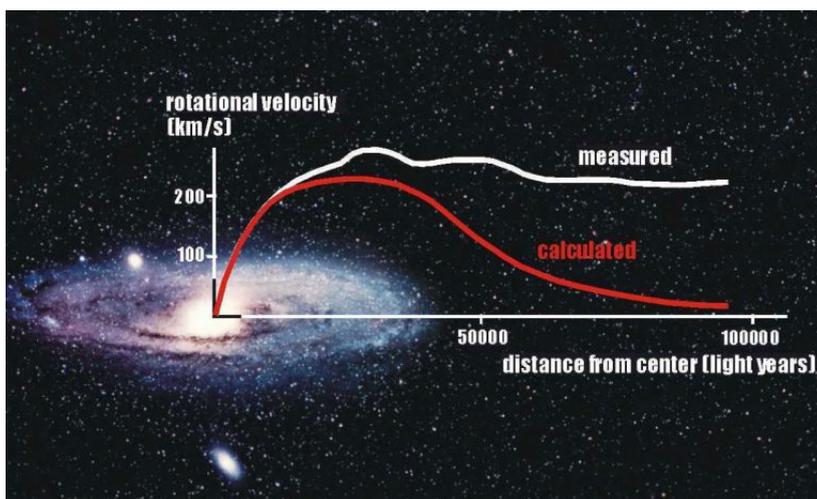


Figura 2.1: Grafico qualitativo della velocità di rotazione di una tipica galassia a spirale in funzione della distanza dal centro. La curva bianca rappresenta l'andamento delle misure sperimentali, la curva rossa è invece la predizione secondo la legge di gravità newtoniana [3].

2.2 La natura particellare della materia oscura

A fronte di numerose evidenze scientifiche sull'esistenza di una nuova particella, ci si interroga su quali possano essere le sue caratteristiche. Innanzitutto l'idea che possa trattarsi effettivamente di una particella nasce da ragioni basate sull'esperienza con la materia ordinaria e con l'efficacia dell'introduzione di nuove particelle nella

risoluzione di problemi fisici (come nel caso del neutrino), insieme a considerazioni di carattere cosmologico basate sullo studio della distribuzione di fluttuazioni di temperatura del CMB (acronimo inglese di fondo cosmico a microonde). Si è arrivati alla conclusione che il contributo della materia oscura in termini di densità di energia dell'Universo corrisponda a circa il 25% del totale, inoltre la materia ordinaria (stelle, pianeti, galassie etc.) costituisce solo circa il 5% del contenuto di materia-energia dell'Universo [9]. Il resto è una forma di energia la cui natura non è ancora nota e sulla quale sono in corso molti studi. I fenomeni osservati, descritti nel paragrafo precedente, suggeriscono che il principale candidato come costituente della materia oscura possa essere una particella elettricamente neutra e massiva, debolmente interagente con la materia ordinaria (WIMP).

Ad oggi i fisici lavorano su tre strade differenti: le prime due tendono alla ricerca delle suddette particelle nelle collisioni ad alta energia fra quark, gluoni ed elettroni oppure nei prodotti del loro decadimento nel cosmo; la terza, probabilmente la più complessa ma anche quella più esaustiva, consiste nel tentativo di individuare interazioni dirette con la materia ordinaria all'interno di rivelatori posti in laboratori sotterranei. Poiché la natura di queste interazioni è ancora ignota, la loro rivelazione risulta molto difficoltosa e necessita di rivelatori sensibili ad un ampio spettro di fenomeni. Allo stesso tempo, bisogna tener presente che potrebbero esistere più particelle di materia oscura con caratteristiche diverse e che quindi due rivelatori differenti diano risultati altrettanto diversi.

All'interno del rivelatore del progetto DarkSide-20k si ricerca l'interazione di particelle di materia oscura con atomi di argon, sotto forma di emissioni di fotoni da captarsi attraverso particolari sensori.

Capitolo 3

Il progetto DarkSide

3.1 I precursori del DarkSide-20k

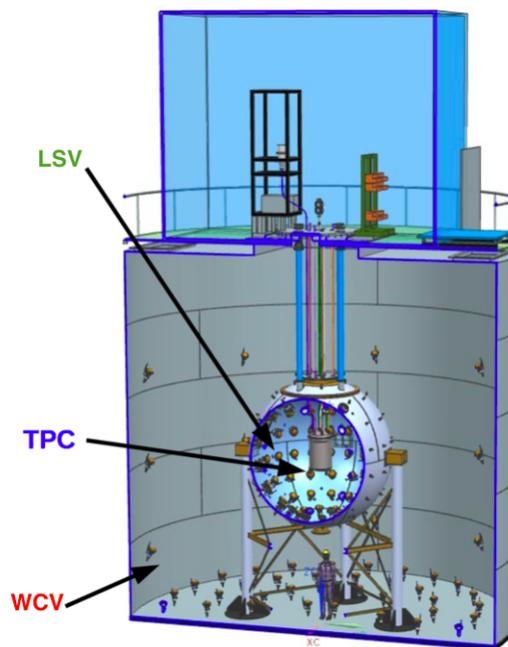


Figura 3.1: Sezione del DarkSide-50, si possono osservare le principali parti costitutive: LAr TPC, Liquid Scintillator VETO e Water Cherenkov VETO.

Prima di descrivere la struttura e il principio di funzionamento del DarkSide-20k, è necessario un breve riepilogo sugli esperimenti che lo hanno preceduto, tutti realizzati presso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso. Gli studi preliminari, eseguiti fra il 2011 e il 2013 su di un piccolo prototipo denominato "DarkSide-10", hanno portato alla costruzione del rivelatore attualmente installato, il DarkSide-50 [1]. In entrambe le denominazioni, così come pure per DarkSide-20k, il numero finale corrisponde circa alla quantità in massa fiduciale di argon liquido contenuto all'interno della TPC. Il DarkSide-50 presenta tre rivelatori posti l'uno dentro l'altro. Quello più interno, di

forma cilindrica, corrisponde proprio alla LAr TPC (liquid argon Time Projection Chamber), che costituisce il cuore del sistema. Essa, riempita di argon ultra puro, è in grado di rilevare la possibile interazione fra gli atomi di argon e un'eventuale particella di materia oscura. All'esterno della TPC si trova il "liquid scintillator VETO", una sfera contenente, oltre alla TPC, ulteriori 30 tonnellate di liquido scintillatore caricato con boro. Lo strato più esterno, infine, di forma cilindrica e riempito con 1000 tonnellate di acqua purificata, è denominato "Water Cherenkov VETO". L'inserimento di questi due rivelatori aggiuntivi risponde alla fondamentale necessità di eliminare il "background": non sono infatti quelle di materia oscura le uniche particelle in grado di interagire con l'argon della TPC, e pertanto bisogna essere certi di poter discriminare tra i vari casi. Nonostante le ottime capacità di eliminazione del background, la sensibilità del DarkSide-50 non può competere con altri esperimenti, quali XENON1T e LUX, che usano lo xenon come elemento rivelatore e che comprendono più grandi masse in analisi[5]. Partendo quindi dai dati fino a quel momento collezionati si è pensato di realizzare un nuovo sistema che coniugasse un'ottima sensibilità con l'efficace eliminazione del background, idea che ha dato origine al progetto DarkSide-20k.

3.2 Progetti paralleli

Parallelamemente alla famiglia *DarkSide* esistono altri progetti che, utilizzando rivelatori non basati sull'argon, hanno l'obiettivo di rivelare la materia oscura in modo diretto. Fra questi citiamo il progetto DAMA, che ha realizzato, fra gli altri, gli apparati DAMA/NaI e il suo successore DAMA/LIBRA, i quali utilizzano come materiale scintillatore lo ioduro di sodio drogato con tallio. I progetti CoGeNT e CDMS, invece, dispongono di rivelatori basati rispettivamente sul germanio e sul silicio. Questi si vanno ad aggiungere ai già citati esperimenti allo xenon, di cui riportiamo i rivelatori XENON1T e LUX (Liquid Underground Xenon). In particolare il primo, progettato a partire dal 2010 e realizzato presso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso, possiede una TPC a doppia fase riempita di xenon alla temperatura di -95°C , ed ha raggiunto livelli di sensibilità mai toccati prima. Una tale varietà di esperimenti riporta alla riflessione precedente: data la natura sostanzialmente ignota delle WIMP, la possibilità di ampliare il campo di misura gioca sicuramente a favore nella ricerca di queste sfuggenti particelle.

3.3 Aspetti tecnici del DarkSide-20k

3.3.1 Time Projection Chamber ad argon liquido

Come già accennato nell'introduzione, il rivelatore DarkSide-20k consta di 4 strutture fondamentali, costruite l'una dentro l'altra (similmente al caso del DarkSide-50) a costituire dei vani dove sarà fatto circolare argon liquido più o meno puro. Procedendo dall'interno all'esterno del sistema, il primo componente che si osserva è una LAr TPC, un rivelatore dalla forma di prisma a base ottagonale di 350 cm di altezza, riempito con 49.7 tonnellate di *underground argon* (UAr), cioè argon estratto dalle

profondità terrestri al riparo da radiazioni cosmiche e dunque a bassissimo contenuto di Ar-39. L'impianto di estrazione Urania è realizzato presso la Kinder Morgan Doe Canyon Facility in Colorado; una volta estratto, l'argon subisce un processo di ulteriore purificazione chimica all'interno di una torre di distillazione criogenica, situata nella miniera di Seruci in Sardegna. E' infatti possibile ottenere la separazione degli isotopi grazie alle minime differenze di volatilità che li caratterizzano, in funzione della variabilità della loro massa. Costruita in PMMA (polimetilmetacrilato) radio-puro in modo da limitare al massimo il background neutronico residuo, la TPC è dotata di sensori che occupano interamente la superficie delle due basi del prisma, posti al di fuori dello strato di acrilico spesso 5 cm. Si tratta di insiemi di

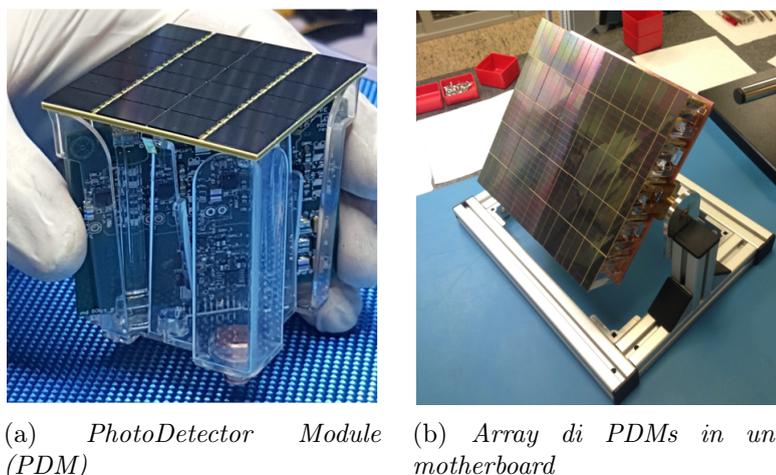


Figura 3.2: Particolare di un PDM (a) e di una motherboard di SiPMs per la TPC (b).

unità fotosensibili di dimensioni $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$, ognuna costituita da un definito numero di SiPMs (silicon photomultipliers), i quali sostituiscono i PMTs (photomultiplier tubes) del DarkSide-50, essendo i primi più efficienti, sensibili in termini di fotorecezione e puliti dal punto di vista della radioattività. In totale, ognuna delle due basi della TPC conta 4140 SiPMs: la loro disposizione definisce le dimensioni del prisma, in modo da ottimizzare la copertura delle due facce con motherboards quadrate e triangolari (rispettivamente denominate SQB e TRB) che raggruppano i singoli sensori. Il volume individuato all'interno del guscio sigillato di PMMA è occupato da UAr che dunque risulta isolato dal resto del sistema. L'argon liquefatto è sfruttato come liquido scintillatore per rilevare, tramite i sensori di cui sopra, eventuali interazioni sotto forma di emissione di fotoni tra esso e particelle target, che diano prova dell'esistenza di queste ultime.

3.3.2 VETO detector

Una delle primarie necessità dei progetti DarkSide è quella di distinguere l'origine di un segnale, cioè se esso sia stato generato realmente dalla materia oscura oppure da qualche disturbo indesiderato. La collocazione a 1400 m di profondità nella Hall C dei Laboratori Nazionali del Gran Sasso permette infatti di ridurre al minimo uno di

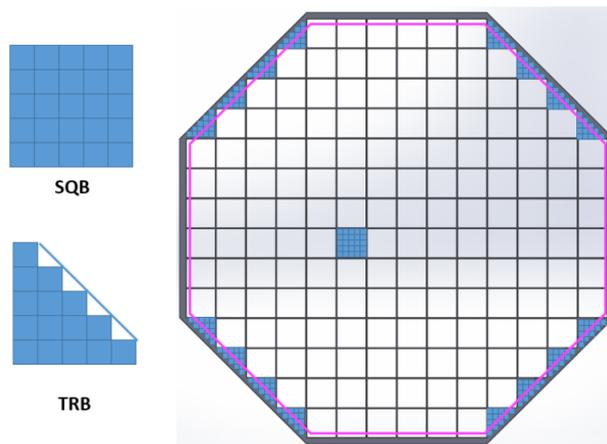
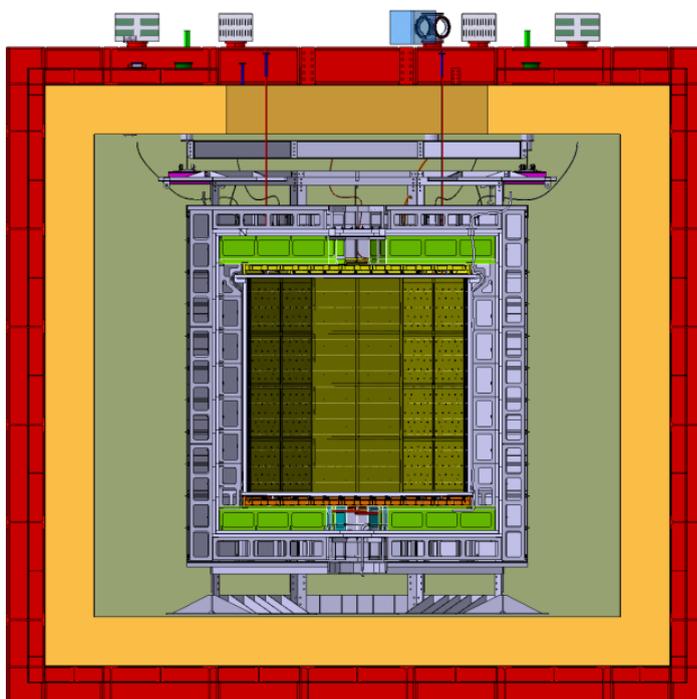


Figura 3.3: Disposizione delle motherboards sulla superficie di base della TPC.

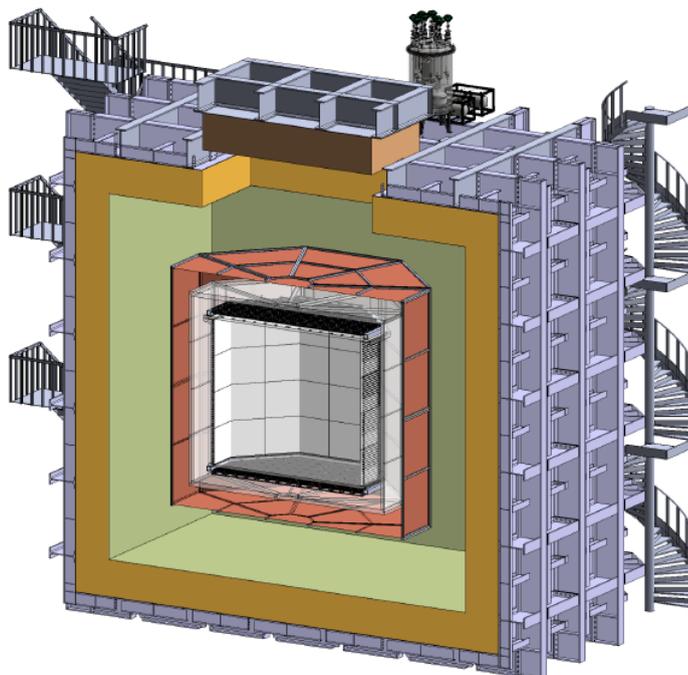
questi disturbi, ossia le radiazioni cosmiche. La scintillazione dell'argon della TPC può essere tuttavia provocata anche dall'interazione con neutroni e la probabilità che ciò avvenga rappresenta il background principale.

Il VETO detector, il quale nasce proprio allo scopo di liberarsi di questo tipo di background, è costituito da tre unità distinte concentriche che circondano la TPC. La più interna, denominata IAB (Inner Argon Buffer) corrisponde ad uno strato spesso 40 cm di argon atmosferico (AAr), non in comunicazione con l'argon purissimo della TPC. Questa è circondata dalla GdA, un guscio ottagonale realizzato tramite un doppio strato di acrilico (PMMA) additivato con gadolinio, il cui spessore complessivo è di 10 cm. Lo strato più esterno, detto OAB (Outer Argon Buffer), analogamente al primo, è costituito da uno strato di AAr di identico spessore. L'acrilico agisce da materiale passivo rallentando un eventuale neutrone, mentre il gadolinio ha la capacità di catturarlo emettendo raggi gamma, i quali provocano la scintillazione dell'argon dei buffers adiacenti. La scintillazione verrà poi rilevata da sensori SiPMs, analoghi a quelli della TPC, che rivestono l'acrilico sia internamente che esternamente: in questo modo si ha la possibilità di rilevare la presenza di un neutrone che può aver già interagito con l'argon della TPC. La doppia scintillazione esclude così la possibilità che a causarla sia stata una WIMP: la duplice interazione di una particella di materia oscura sia con l'argon della TPC che con quello del VETO è un evento così improbabile da poter essere considerato sostanzialmente impossibile.

I volumi di argon, al fine di evitare il sovrapporsi di eventi e per garantire un'adeguata efficienza fotoelettronica, sono divisi in settori verticali otticamente indipendenti; una separazione ottica si realizza anche fra l'argon appartenente ai due diversi buffer. Questi ultimi, sebbene isolati dal punto di vista ottico, non lo sono idraulicamente. Le due porzioni di acrilico dell'elemento mediano del VETO, infatti, non rappresentano singolarmente un pezzo unico, ma vengono realizzate assemblando piastre di dimensioni 1 m x 60 cm x 5 cm. Il montaggio della struttura avviene in condizioni ambiente, mentre a regime tali piastre saranno a contatto con il fluido a temperature assai basse, in quanto il range di permanenza dell'argon allo stato liquido a pressione



(a) *Proiezione ortogonale della sezione del DS-20k*



(b) *Vista in prospettiva della sezione: nella parte più interna la TPC, in trasparente l'acrilico del VETO detector e in rosso la gabbia di Faraday. A circondare il tutto il criostato.*

Figura 3.4: Vista in proiezione ortogonale (a) e in prospettiva semplificata (b) della sezione del DS-20k. Risulta evidente la stratificazione del sistema.

atmosferica varia fra 83.8 K e 87.3 K. Si assisterà pertanto ad un ritiro del materiale che creerà degli interstizi non trascurabili (di circa 5 mm di ampiezza) lungo le zone di giunzione: tale aspetto risulterà rilevante nella simulazione fluidodinamica.

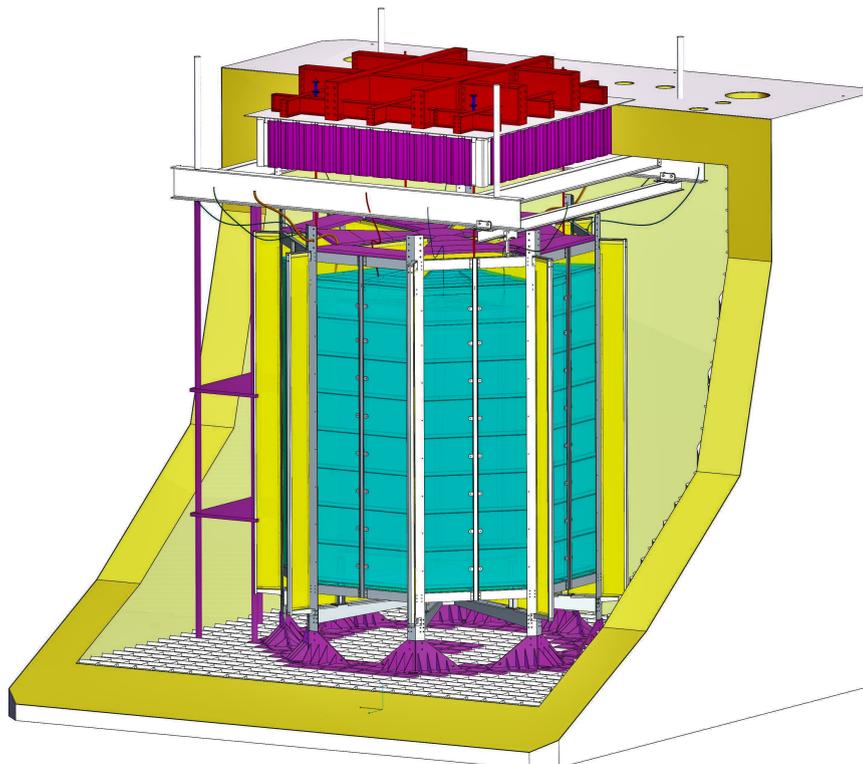


Figura 3.5: In questa immagine è possibile osservare i settori verticali in cui sono divisi i due buffers, con i fogli di separazione ottica colorati in giallo. In azzurro si ha l'acrilico del VETO. La gabbia di Faraday è omessa per semplificare la rappresentazione.

3.3.3 Gabbia di Faraday e criostato

L'OAB è circondato esternamente da una gabbia di Faraday in rame a base ottagonale, il cui scopo è quello di isolare elettronicamente e otticamente il VETO detector dall'esterno. Essa tuttavia permette la comunicazione fluida (a causa di elementi di giunzione non a tenuta stagna) fra l'argon dei buffers e quello che si trova all'interno dell'ultimo componente, un criostato della forma di prisma a base quadrata (simile al ProtoDUNE già installato ai laboratori del CERN) che circonda tutti gli altri elementi del DarkSide-20k. L'argon in esso contenuto, proveniente dal VETO tramite un condotto che mette in comunicazione i due componenti, si trova per lo più allo stato liquido, ma vi è anche un battente di argon gassoso che si accumula nella porzione superiore, al di sopra della gabbia di Faraday. Questa componente gassosa, la quale viene estratta per il processo di purificazione e reinserita poi in fase liquida nella porzione inferiore del VETO, si forma a causa del calore generato dai sensori che viene dissipato dal criostato stesso [5].

Capitolo 4

Il metodo di calcolo

4.1 Cenni di fluidodinamica computazionale

L'analisi di un sistema complesso dal punto di vista fluidodinamico, quale l'oggetto della nostra discussione, può essere svolta secondo strade differenti, ma non tutte percorribili agevolmente.

Risolvere in modo analitico un problema simile è, di fatto, ad oggi impossibile: quelle che governano il comportamento di un fluido, con determinate condizioni al contorno, sono equazioni differenziali alle derivate parziali non lineari, risolvibili analiticamente solo in casi di semplici condizioni di moto e geometrie. Si tratta delle note equazioni di Navier-Stokes, un sistema di tre equazioni di bilancio di massa (continuità), quantità di moto (la quale si divide a sua volta in tre equazioni secondo il sistema di coordinate utilizzato) ed energia.

Una seconda possibilità consiste nell'effettuare prove sperimentali su un prototipo, ma ciò provoca un consistente aumento dei costi vista pure la necessità di implementare il sistema di acquisizione dati.

Un'alternativa efficace, al giorno d'oggi assai diffusa per risolvere questo tipo di problemi ingegneristici, risiede proprio nella fluidodinamica computazionale. In tal senso opera il software Ansys FLUENT, il cui funzionamento è basato sul metodo dei volumi finiti: il dominio di calcolo è discretizzato in un numero finito di celle, ognuna adiacente all'altra e le equazioni vengono risolte per la singola cella ricorrendo ad interpolazioni ed approssimazioni sugli integrali di superficie e di volume, in modo da ottenere un insieme di equazioni algebriche risolvibili. Chiaramente si ottiene una soluzione non esatta ma, se è possibile operare con celle di dimensioni minime, la differenza tra realtà e modello diventa irrilevante. La qualità della soluzione quindi dipende dalla finezza della *mesh*, ovvero la griglia con cui viene suddiviso il dominio di partenza.

4.2 Equazioni di Navier-Stokes

Le equazioni di Navier-Stokes (NSE) rappresentano uno strumento indispensabile per modellare il comportamento di un fluido newtoniano (la cui viscosità non dipende dallo sforzo di taglio), che, almeno a livello macroscopico, possa essere considerato continuo. Esse derivano da un bilancio della quantità di moto su un volume di controllo arbitrario, il quale dà origine all'equazione di Cauchy, che, in forma vettoriale si presenta come segue:

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\vec{u}\vec{u}) \right] = \rho \vec{g} + \vec{\nabla} \cdot \vec{\Pi} \quad (4.1)$$

dove

- ρ rappresenta la densità del fluido;
- \vec{g} rappresenta il vettore accelerazione gravitazionale;
- $\vec{u} = (u, v, z)$ è il vettore velocità del fluido;
- $\vec{\Pi} = \{\sigma_{ij}\}$ è il tensore degli sforzi.

Combinando questa equazione con l'equazione di continuità per un fluido comprimibile

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (4.2)$$

si ottiene un sistema di 10 incognite (ρ , le componenti della velocità e le componenti indipendenti del tensore degli sforzi) e 4 equazioni, che quindi non è risolvibile. Per poter disporre delle altre 6 equazioni che permettano di risolvere il sistema, è necessario aggiungere delle equazioni costitutive per $\vec{\Pi}$ che mettano in relazione le diverse incognite del sistema. Operando in tal senso, si scompongono le componenti di $\vec{\Pi}$ come segue:

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \mu\tau_{ij}$$

dove p è la pressione e τ_{ij} sono le componenti del tensore di sforzo viscoso. In esse compare anche il termine μ , ovvero la viscosità dinamica del fluido.

Benché si sia aggiunta una nuova incognita p , tramite questa scrittura si possono introdurre altre equazioni costitutive che permettono di scrivere τ_{ij} in funzione delle componenti del vettore velocità, ottenendo:

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

Con il sistema completo, possiamo ora riarrangiare quest'ultima equazione con la (4.1) e, svolgendo alcuni ulteriori passaggi, si può finalmente giungere alle equazioni della quantità di moto, che, scritte per un fluido incomprimibile, si presentano come segue:

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho(\vec{u} \cdot \nabla)\vec{u} = -\vec{\nabla} p + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{u} \quad (4.3)$$

Utilizzando tali equazioni unitamente all'equazione di continuità, la quale per un flusso tridimensionale ed incomprimibile può essere semplificata nella forma $\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0$, possiamo ottenere un sottosistema di 4 equazioni in 4 incognite [6]. La risoluzione di tale sistema (con le dovute condizioni al contorno), permetterebbe di calcolare punto per punto 4 grandezze fluidodinamiche di particolare interesse, ossia la pressione del fluido e le tre componenti della sua velocità.

Come accennato in precedenza, una soluzione analitica può essere ricavata solo nel caso di semplici geometrie, e quindi per un numero ben ristretto di applicazioni.

4.3 Il metodo dei volumi finiti

L'innovazione tecnologia nel campo dei calcolatori informatici ha permesso lo sviluppo di metodi di soluzione approssimata a tali sistemi di equazioni alle derivate parziali (PDE). La modellazione numerica è oggi un potente strumento in grado di ridurre gli ingenti costi di progetto e prototipo di un sistema fisico da realizzare, consentendo di eseguire una simulazione sufficientemente realistica dello stesso. La determinazione dell'andamento di una variabile di interesse all'interno di un volume di controllo, che sfrutti un metodo numerico al continuo, richiede la discretizzazione di quest'ultimo in un numero finito di celle: si tratta di volumi contigui di dimensioni finite che costituiscono una partizione del dominio di calcolo. Il metodo dei volumi finiti (FVM) si basa su questo principio per risolvere in modo approssimato le PDE che governano il comportamento del fluido in esame. In ogni cella le equazioni vengono risolte in forma integrale, con riferimento a variabili definite nei nodi della griglia che caratterizza il volume di controllo discretizzato, tramite un processo iterativo svolto dal calcolatore a partire da condizioni iniziali plausibilmente vicine alla soluzione finale. Come detto sopra, la bontà della soluzione ottenuta dipende fortemente dalla qualità della partizione effettuata (*mesh*), pertanto è necessario, come primo passo in una simulazione CFD, definirne correttamente le caratteristiche al fine di ottenere risultati validi [6]. Il software Ansys FLUENT è dotato di un proprio ambiente per la generazione della griglia, processo che verrà discusso nel seguito di questa tesi.

4.4 Equazione dell'energia e problema dell'accoppiamento

Il sistema oggetto del nostro studio prevede l'interazione tra l'argon liquido circolante nel VETO detector e i sensori SiPMs. Questi (ed altri componenti del rivelatore) costituiscono delle sorgenti di calore, data la vigente dissipazione di energia per effetto Joule nei conduttori al loro interno. Ciò si traduce in uno scambio termico tra i sensori e il fluido, la cui considerazione risulta di fondamentale importanza ai fini della determinazione del comportamento dell'argon: in prossimità delle sorgenti termiche, nel fluido si generano gradienti di temperatura che danno luogo a variazioni locali di densità, portando a condizioni di galleggiamento delle zone di liquido a più alta temperatura. Il gradiente di velocità, così costituito, determina un meccanismo

di convezione naturale che, essendo l'argon dei due buffer caratterizzato da velocità non nulla, si somma ad uno scambio termico per convezione forzata. Risulta quindi evidente come non si possa prescindere dalla conoscenza della temperatura del fluido e, pertanto, dalla considerazione del bilancio di energia totale.

La formulazione dell'equazione di bilancio di energia totale parte dall'applicazione, al sistema in esame, del primo principio della termodinamica, che afferma che una variazione nel tempo di energia totale del sistema è data dalla somma della potenza delle forze agenti sul sistema e del flusso netto di energia termica trasmessa al sistema stesso [16]. Si perviene al seguente risultato:

$$\frac{\partial(\rho e_t)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e_t \vec{u}) = \nabla \cdot q - \nabla \cdot (\rho \vec{u}) + (\vec{\Pi} \cdot \nabla) \cdot \vec{u} + S_e \quad (4.4)$$

dove S_e è un termine sorgente che nel caso del nostro modello contiene la gravità che attiva il termine di galleggiamento. Come per le NSE, la (4.4) non può essere analiticamente risolta a meno di approssimazioni più o meno forti. Per problemi analoghi a quello oggetto della nostra discussione, dove il moto del fluido è governato anche da gradienti di temperatura e quindi da convezione naturale, può risultare efficace l'approssimazione introdotta da Joseph Valentin Boussinesq per flussi non isotermi. Essa consiste nel considerare la variazione di densità esclusivamente nel termine di galleggiamento delle NSE, ovvero $\rho \vec{g}$, considerando la densità come somma di un termine costante e di uno variabile linearmente con la temperatura:

$$\rho = \rho_0 - \alpha \rho_0 (T - T_0) \quad (4.5)$$

Con tali considerazioni, la (4.3) diventa:

$$\rho_0 \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho_0 (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\vec{\nabla} p + (\rho_0 + \Delta \rho) \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{u} \quad (4.6)$$

da cui, sostituendo con la (4.5):

$$\rho_0 \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho_0 (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\vec{\nabla} p + \rho_0 \vec{g} - \alpha \rho_0 (T - T_0) \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{u} \quad (4.7)$$

Tale approssimazione risulta valida in tutti quei casi in cui $\Delta \rho \ll \rho_0$ e il gradiente di temperatura sia sufficientemente limitato [8, 15].

Nell'ambito delle simulazioni fluidodinamiche effettuate con Ansys FLUENT, l'approssimazione di Boussinesq è stata utilizzata esclusivamente per semplici modelli provvisori del VETO detector da noi realizzati, sulla base di lavori precedentemente svolti da altri gruppi di ricerca. A tal proposito si citano gli studi di circolazione di LAr governata da convezione naturale all'interno del MicroBooNe Cryostat e dei DUNE Detectors, in collaborazione con il Fermilab [11, 14]. Per i casi più complessi e più rappresentativi del sistema reale, con riferimento ai risultati ottenuti dalle simulazioni svolte sui modelli sopra citati, è stato deciso di impostare l'ipotesi di flusso incomprimibile, quindi a densità costante, con termine di galleggiamento attivo. Tale scelta è stata dettata da valutazioni preventive circa l'effettiva influenza della convezione naturale sul moto dell'argon e l'entità del gradiente di temperatura, che, in assenza di riferimenti sul reale comportamento del fluido, potrebbe risultare troppo grande per considerare accettabile l'approssimazione di Boussinesq.

4.5 Modelli di turbolenza

4.5.1 RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations)

Una delle tecniche più utilizzate per risolvere le equazioni di un moto turbolento, ideata da Osborne Reynolds, prevede la mediazione di tali equazioni in un certo intervallo di tempo. Quest'ultimo, affinché il metodo abbia senso, deve essere sufficientemente piccolo rispetto ai tempi caratteristici del fenomeno che si sta studiando, ma più grande dei tempi legati, invece, ai fenomeni di turbolenza. Tale approccio, di tipo statistico, presuppone che le quantità medie determinate siano sufficienti ad una risoluzione del problema, le quali, richiedendo un numero di celle inferiore rispetto al caso completo, permettono una riduzione considerevole della pesantezza di calcolo. Il flusso turbolento viene considerato come sovrapposizione di un moto medio e di un moto fluttuante nel tempo, pertanto ogni variabile in gioco può essere scritta nel modo seguente:

$$a = \bar{a} + a' \quad (4.8)$$

dove:

- $\bar{a} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} a dt$ rappresenta la quantità media
- a' rappresenta il valore fluttuante

Il valore medio rispetto al tempo della componente fluttuante a' , espresso come $\bar{a}' = \frac{\int_{t_0}^{t_0+\Delta t} a' dt}{\Delta t}$, risulta tendere a 0 per valori grandi di Δt . Si scrivono per comodità le NSE in forma indiciale:

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_{x_i} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \right) \quad (4.9)$$

Applicando ora la scomposizione appena introdotta si ottiene:

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = \rho \bar{g}_{x_i} + \frac{\partial [-\bar{p} \delta_{i,j} + \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u'_i u'_j}]}{\partial x_j} \quad (4.10)$$

Il tensore $\overline{\rho u'_i u'_j}$, noto come "sforzo di Reynolds", rappresenta l'effetto del trasporto turbolento sul flusso. Visto che la media del prodotto di due termini fluttuanti non è nulla (nulla è invece la media del prodotto di un termine fluttuante per un termine medio), si apre una problematica nella risoluzione del sistema, che altrimenti potrebbe essere chiuso con i soli valori medi delle variabili. Data la non linearità di tale termine, una soluzione analitica non è possibile: si rende pertanto necessaria l'adozione di modelli turbolenti che possano chiudere tali equazioni, portando ad una soluzione caratterizzata da approssimazioni ragionevoli. Queste ultime tipicamente esprimono lo sforzo di Reynolds come:

$$\overline{\rho u'_i u'_j} = \rho v_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4.11)$$

dove v_t rappresenta la viscosità turbolenta, la cui determinazione a livello locale è affidata a modelli introdotti nel prossimo paragrafo.

4.5.2 Modello k- ω SST

Il modello turbolento utilizzato nelle simulazioni è stato il modello k- ω Shear Stress Transport. Esso nasce dall'unione dei modelli k- ω e k- ϵ , sfruttando così l'efficacia del primo vicino alla parete e del secondo lontano da essa. Il modello k- ϵ , infatti, presenta una singolarità nella zona dello strato limite, ma, allontanandosi, si dimostra più adatto in quanto risulta meno sensibile alle condizioni della corrente esterna [2]. Entrambi si basano su due equazioni alle derivate parziali per due variabili: nel caso del modello k- ϵ esse sono appunto le variabili k e ϵ , rappresentanti rispettivamente l'energia cinetica turbolenta e il fattore di dissipazione dell'energia cinetica turbolenta per unità di massa, mentre nel modello k- ω la funzione ϵ è sostituita dalla dissipazione turbolenta specifica ω [13]. Il modello k- ϵ esprime la viscosità turbolenta v_t come:

$$v_t = \rho C_v \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4.12)$$

dove C_v è la costante di calibrazione.

Nel caso del modello k- ω essa risulta invece:

$$v_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (4.13)$$

dove la già citata variabile ω è definita come:

$$\omega = \frac{\epsilon}{C_v k} \quad (4.14)$$

Il modello finale, che come accennato unisce i due modelli appena citati, si compone delle due seguenti equazioni:

- Equazione per la variabile k:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P - \beta^* \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} [(v + \sigma_\omega v_t) \frac{\partial k}{\partial x_j}] \quad (4.15)$$

- Mentre, per quanto riguarda la variabile ω , si ha:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{\gamma}{v_t} P - \beta^* \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} [(v + \sigma_\omega v_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j}] + 2(1 - F_1) \frac{\sigma_\omega^2}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (4.16)$$

Dove: $P = 2v_t S^2$, dove $S = \sqrt{S_{ij} S_{ij}}$ e $S_{ij} = \frac{1}{2} (\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i})$

La funzione F_1 , invece, assumendo valore 1 vicino alla parete e valore nullo lontano da quest'ultima, permette di attivare rispettivamente i modelli k- ω e k- ϵ . La soluzione delle equazioni porterà infine ad una determinazione del valore locale della viscosità turbolenta, permettendo, così, la chiusura del sistema delle RANS.

In definitiva, il nostro modello prevede la risoluzione, tramite il software Ansys FLUENT, del seguente sistema di equazioni mediate alla Reynolds, generalizzate per un fluido comprimibile (si precisa che nel nostro caso la densità ρ è costante) e scritte per comodità in notazione indiciale:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho} \bar{u}_j + \bar{\rho}' u'_j)}{\partial x_j} + S_c = 0 \\
 \frac{\partial(\bar{\rho} \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial[\mu(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}) - \bar{\rho} u'_i u'_j]}{\partial x_j} + S_q \\
 \frac{\partial(\bar{\rho} c_p \bar{T})}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho} c_p \bar{T} \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \bar{u}'_j \frac{\partial \bar{p}'}{\partial x_j} + \frac{\partial(k \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} - \bar{\rho} c_p \bar{T}' u'_j)}{\partial x_j} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + S_e \\
 \frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P - \beta^* \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} [(v + \sigma_\omega v_t) \frac{\partial k}{\partial x_j}] \\
 \frac{\partial \omega}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{\gamma}{v_t} P - \beta^* \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} [(v + \sigma_\omega v_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j}] + 2(1 - F_1) \frac{\sigma_\omega^2}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}
 \end{array} \right. \quad (4.17)$$

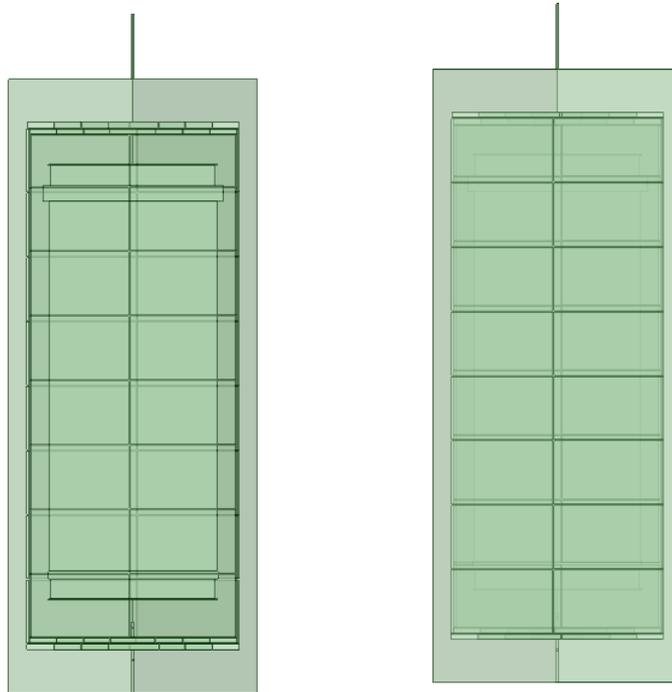
Capitolo 5

Definizione del problema

5.1 Geometria

Il primo passo per lo studio del comportamento dell'argon liquido all'interno del VETO detector è costruire un appropriato modello CAD del sistema tramite supporto informatico. A partire dal disegno fornitoci dai responsabili del progetto, si è proceduto con la rimozione dei componenti la cui presenza si riteneva influenzasse in modo trascurabile il moto dell'argon. Mantenerli all'interno del modello avrebbe significato l'inevitabile infittirsi della mesh e, di conseguenza, un importante aumento dei tempi di calcolo. Il disegno è stato dunque privato delle cornici a supporto dei pannelli divisorii presenti tra due settori adiacenti e della struttura in profilati d'acciaio che sostiene la TPC. I sensori SiPMs presenti sulle lastre di acrilico del VETO, sporgenti verso i relativi buffers di argon di circa 20 mm, sono stati eliminati dal modello: il loro ingente numero e la loro uniforme disposizione sulle parti interna ed esterna del VETO detector hanno portato a considerare come sorgente di calore l'intera superficie rivolta verso l'IAB o l'OAB di ogni piastra di PMMA. Inoltre, sono state inserite due superfici piane ottagonali ai limiti superiori e inferiori della TPC, in modo da semplificarne la geometria che altrimenti sarebbe risultata molto complessa (data la presenza dei circuiti dei sensori SiPMs che si affacciano verso l'interno della camera).

Particolarmente problematica si è rivelata la questione della spaziatura a freddo tra le lastre di acrilico del VETO. Come accennato in precedenza, esse vengono incollate a temperatura ambiente e successivamente portate alla temperatura cui l'argon permane allo stato liquido nelle condizioni di pressione vigenti nel sistema. Il loro raffreddamento ne provoca la contrazione e, conseguentemente, l'ampliamento delle fessurazioni già presenti (a causa di una adesione imperfetta) in corrispondenza delle zone di giunzione tra due piastre vicine o il formarsi di nuove. Si stima che, in esercizio, tra le lastre si creino interstizi di larghezza superiore ai 10 mm, attraverso i quali il fluido è in grado di transitare, andando ad occupare anche la zona compresa tra i due gusci di acrilico. In quanto punti di ristagno o di impedimento alla corretta circolazione dell'argon, questi spazi devono essere adeguatamente rappresentati nel modello. Il processo di generazione della mesh ha evidenziato come spaziare ogni



(a) *Vista frontale del lato dell'IAB del modello.* (b) *Vista frontale del lato dell'OAB del modello.*

Figura 5.1: Vista in proiezione ortogonale del modello del VETO detector dal lato dell'IAB (a) e dell'OAB (b). Si noti la disposizione sfalsata delle piastre di acrilico in modo da ottenere separazione ottica tra i due buffers.

lastra da quella adiacente (mantenendo inalterate le dimensioni esterne del guscio di acrilico per non modificare la profondità dei due buffer di argon) di 10 mm portasse ad un numero di celle troppo elevato per avere tempi di calcolo ragionevoli. Il problema è stato risolto aumentando tale valore a 12 mm, concordemente al fatto che, a freddo, gli interstizi potrebbero essere più ampi di quanto stimato.

Terminata questa prima fase di pulizia, la simmetria ottagonale del sistema ha permesso un'ulteriore semplificazione del modello: si è deciso di considerare uno solo degli otto settori del sistema, ipotizzando che il fluido si comportasse in modo analogo anche nei rimanenti. A conclusione di tali operazioni il dominio di calcolo risulta essere il volume di fluido circolante in un settore del VETO detector, ottenuto dalla sezione del modello semplificato con due semipiani passanti per l'asse di simmetria verticale del sistema e con angolo di diedro di 45° . Il fluido viene immesso nella parte inferiore del volume di controllo da due inlets tubolari (uno per l'IAB e uno per l'OAB), circola nei due buffers (comunicanti tramite gli interstizi tra le piastre di acrilico) e fuoriesce dalla parte superiore attraverso un unico outlet circolare cui si affaccia esclusivamente l'OAB.

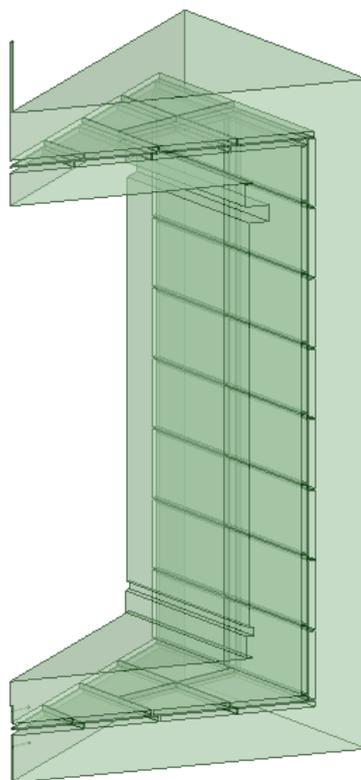


Figura 5.2: Dominio di calcolo al termine delle semplificazioni descritte. Si può notare l'assenza dei sensori SiPMs e della struttura di sostegno in acciaio della TPC.

5.2 Condizioni al contorno e considerazioni sulla circolazione dell'argon

Una delle principali problematiche legate alla circolazione dell'argon riguarda la possibilità che quest'ultimo si scaldi eccessivamente a causa del calore emesso dai sensori SiPMs, presenti sia sulle facce inferiore e superiore della TPC, che sui pannelli di acrilico. In particolare, i due piani della TPC dotati di sensori possiedono 4120 SiPMs ciascuno, ognuna delle quali emette 200 mW di calore. Si può pertanto concludere che ogni piano dissipi circa 824 W. Per quanto riguarda i pannelli del VETO, invece, si hanno 2000 SiPMs sulla superficie interna, mentre 1000 sono i SiPMs posti sulla superficie esterna. Il calore da qui emesso, perciò, viene dissipato rispettivamente nel buffer interno ed in quello esterno del VETO.

Benché si tenga conto della possibilità che una certa quota parte di argon evapori (all'interno del criostato è infatti presente un battente gassoso), un eccessivo processo di ebollizione potrebbe creare diversi problemi riguardanti la fisica del sistema. È pertanto opportuno limitare questo fenomeno garantendo un riscaldamento non

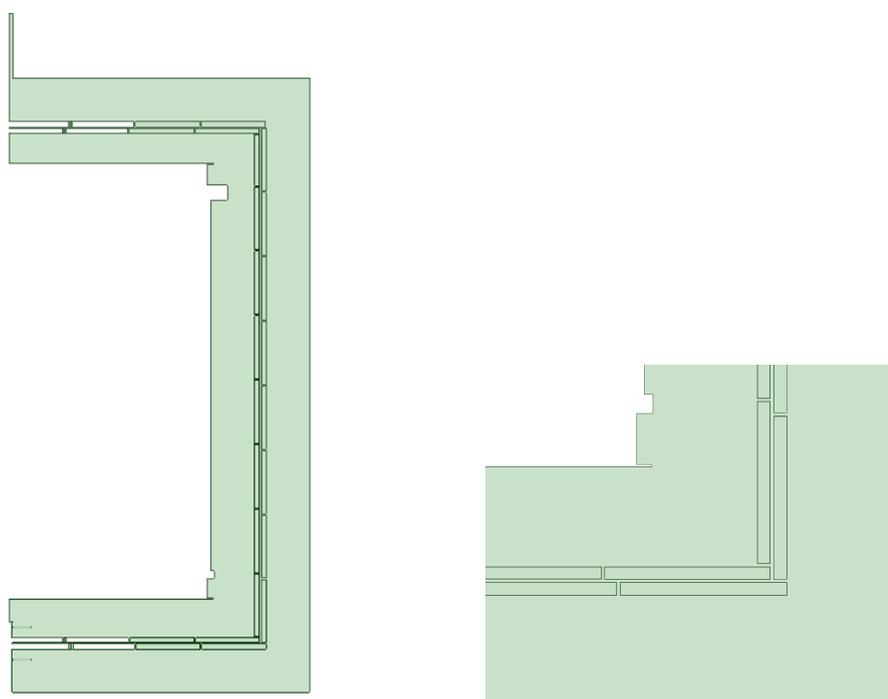
(a) *Vista laterale del modello.*(b) *Particolare della parte inferiore del settore.*

Figura 5.3: Vista laterale del settore del VETO detector utilizzato come modello (a) e ingrandimento della parte inferiore, dove sono visibili le spaziature tra le piastre di acrilico(b).

eccessivo dell'argon stesso. Nel primo modello realizzato si è preferito non riprodurre i singoli sensori, ma si è immaginato che tutta la superficie emettesse calore uniformemente: è stata fatta questa scelta sia per quanto riguarda le superfici della TPC, sia per quanto riguarda i pannelli di acrilico. Tale approssimazione è vicina al vero per i piani della TPC, dove i sensori si presentano ad alta densità, mentre è più grossolana circa i pannelli di acrilico. Essa, tuttavia, ha dato la possibilità di aver un'idea della temperatura raggiunta dall'argon pur trascurandone l'esatta distribuzione spaziale, ma alleggerendone, allo stesso tempo, il calcolo. Dopo aver determinato l'area delle varie superfici e calcolato la potenza termica totale emessa da queste ultime, si è diviso il secondo risultato per il primo ottenendo la potenza termica per unità di superficie. Tale dato è stato inserito come condizione al contorno termica delle named selections comprendenti i componenti appena citati, classificati come "wall".

I valori utilizzati sono stati i seguenti:

- 71.13 W/m^2 per entrambi i piani della TPC
- 1.436 W/m^2 per la superficie esterna dei pannelli di acrilico
- 3.061 W/m^2 per la superficie interna dei pannelli di acrilico

Come già accennato, l'argon viene immesso dal basso tramite due inlet tubolari, ognuno relativo ad uno dei due buffer. Le rispettive condizioni al contorno riguardavano sia la temperatura di ingresso del fluido, impostata ad 88 K, che la portata. Quest'ultimo dato si è dimostrato estremamente delicato, in quanto è in grado di influenzare in modo evidente il surriscaldamento dell'argon. Già a livello intuitivo si può affermare che più è elevata la portata, più efficiente sarà la dissipazione di calore ad opera dell'argon stesso. Il suo valore, tuttavia, soggiace a dei limiti legati al sistema: l'argon estratto dal criostato deve essere depurato da organi appositi, i quali possono svolgere il loro compito solo entro un valore massimo di portata. Questo importate dato sarà perciò oggetto di uno studio parametrico. Si precisa, infine, che i due inlets potranno avere portate differenziali, il che potrebbe essere utile nel caso uno dei due buffers presenti una circolazione peggiore dell'altro. La forma dell'inlet, in un primo momento tubolare, potrà essere soggetta a modifiche qualora le simulazioni mostrino che essa non sia adatta ad una circolazione efficiente.

Per quanto riguarda la gabbia di Faraday, la quale delimita esternamente il volume di controllo oggetto dello studio, essa è stata considerata come una parete adiabatica. Benchè il rame, come noto, sia un ottimo conduttore termico, si è preferito mantenere questa approssimazione in quanto le differenze di temperatura assunte dall'argon, sia all'interno dei buffers del VETO, che del criostato, assumono valori molto bassi. Per fare un esempio, l'argon contenuto all'interno del criostato, oggetto di altri studi e non analizzato nella presente tesi, varia la propria temperatura di circa 1 K fra le condizioni d'ingresso (88 K come l'argon immesso nei buffers) e le condizioni di uscita. Dato che pure l'argon contenuto nel buffer esterno, nel caso di una circolazione efficiente, non varia la propria temperatura in modo considerevole, viene limitato lo scambio termico con l'argon del criostato, e si è quindi preferito evitare le complicazioni che un modello comprendente la conduzione attraverso la gabbia di Faraday avrebbe comportato.

Condizione analoga è stata imposta per le pareti interne al VETO, le quali corrispondono alla superficie laterale esterna della TPC (si ricorda che le superfici inferiore e superiore di quest'ultima sono invece considerate come sorgenti termiche). In questo caso la condizione di adiabaticità è molto più vicina al vero, in quanto la TPC è costituita di polimetilmetacrilato, scarso conduttore termico.

Per quanto riguarda l'outlet, che dal buffer esterno permette all'argon di raggiungere il criostato, si sono solamente impostate delle condizioni di pressione, ipotizzate, almeno in un primo momento, atmosferiche.

Nel primo modello, la fuoriuscita dell'argon tramite l'outlet avviene unicamente dall'OAB, mentre lo scambio di fluido fra l'IAB e l'OAB è affidato soltanto alle fessure presenti nei pannelli di acrilico. Qualora, al termine dello studio parametrico, risulti che la circolazione dell'IAB sia difficoltosa se non per portate eccessivamente alte, si potrà aggiungere un secondo outlet che prelevi argon anche dall'IAB.

Ultima condizione al contorno riguarda le superfici laterali dello spicchio, che, nel caso reale, sarebbero rappresentate dai fogli per la separazione ottica dei settori del

VETO, attraverso i quali l'argon è in grado di transitare verso i settori adiacenti. Tale componente di moto è stata tuttavia trascurata perché ritenuta poco influente sulle caratteristiche generali della circolazione del fluido. È stata impostata, pertanto, la condizione di parete solida ("wall") adiabatica.

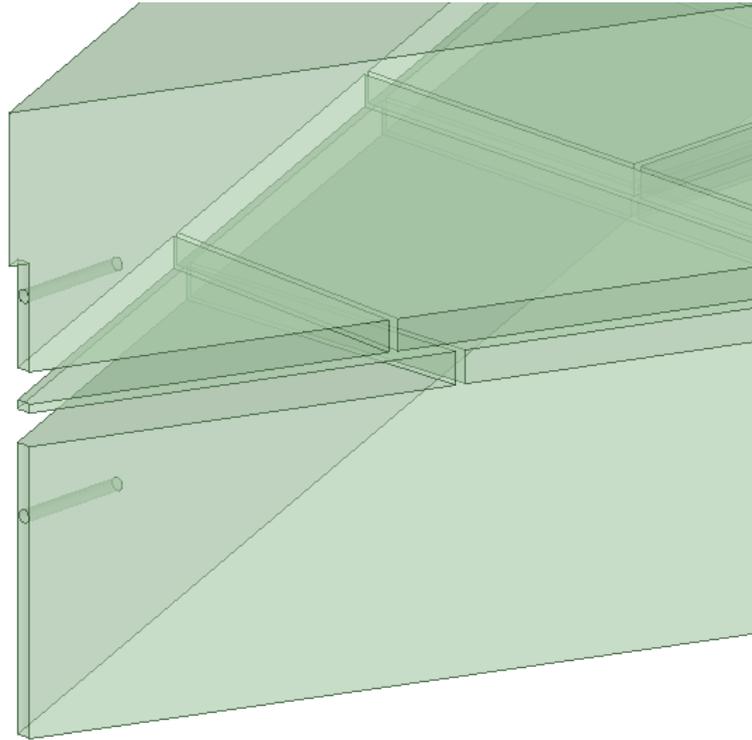


Figura 5.4: Particolare degli inlets tubolari dell'IAB e dell'OAB.

5.3 Condizioni di permanenza dell'argon allo stato liquido

Dopo aver descritto una delle principali problematiche relative alla circolazione dell'argon liquido, ossia la possibilità che esso evapori, è necessario indagare tale questione sotto un criterio più quantitativo. Ciò risulta fondamentale in quanto le simulazioni effettuate non sono in grado di modellare il passaggio di fase da liquido a gassoso: l'argon, pertanto, continua a comportarsi come liquido anche oltre la temperatura che, alle condizioni in esame, porterebbe all'ebollizione. L'implementazione di questo aspetto avrebbe complicato pesantemente le simulazioni, e si è così preferito non includerlo nel modello. Visto che l'argon non dà di per sé alcun segnale dell'inizio del cambio di fase, risulta quindi evidente la necessità di individuare un valore massimo di temperatura da non superare.

Per determinare tale valore si è utilizzato il diagramma di fase dell'argon di figura 5.1. La pressione che si riscontra nel punto più elevato della gabbia di Faraday sarà

la somma della pressione al pelo libero, supposta atmosferica, e della componente idrostatica dovuta all'argon presente nel criostato. Considerando la densità dell'argon liquido $\rho_{lar} = 1395 \text{ kg/m}^3$ e l'altezza della colonna fluida $h = 90 \text{ cm}$, la pressione presente nella porzione superiore dell'OAB risulta essere: $p = p_{atm} + \rho gh = 1,136 \text{ bar}$. Partendo da questo valore, il grafico mostra come la temperatura di ebollizione si attesti a circa 89 K. Questo dato è particolarmente cautelativo, in quanto, oltre ad aver assunto minima l'altezza della colonna di fluido al di sopra della gabbia di Faraday (compresa al vero fra i 90 e i 100 cm) ed escluso la presenza di sovrappressioni, esso rispecchia un valore di pressione piuttosto basso, ossia quello riscontrabile nello strato più elevato dell'OAB. Nelle restanti porzioni dei buffers, una pressione più elevata dovuta alla maggiore altezza della colonna fluida rappresenterà un ostacolo maggiore all'ebollizione.

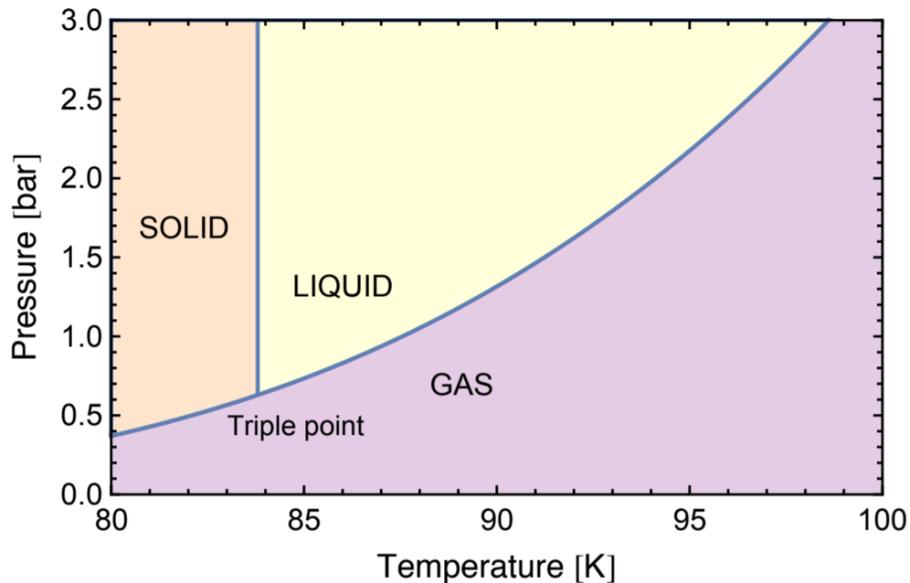
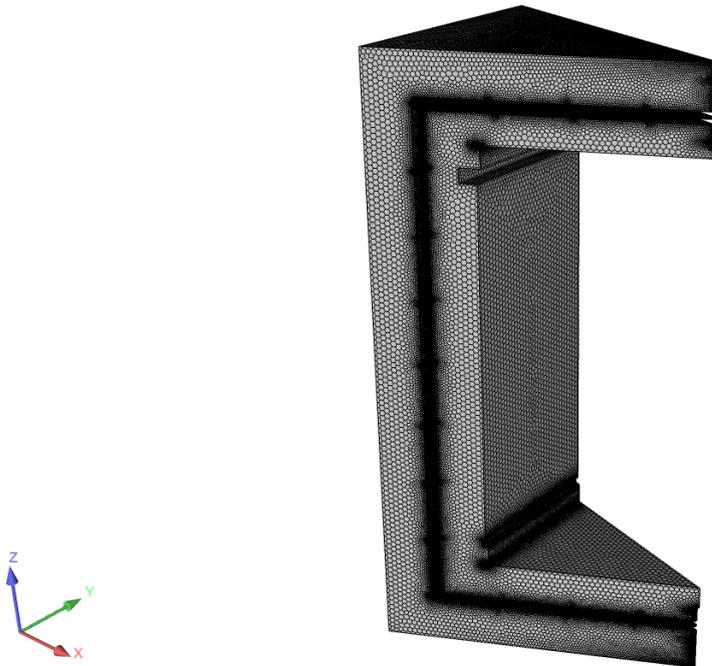


Figura 5.5: Diagramma di fase dell'argon [10].

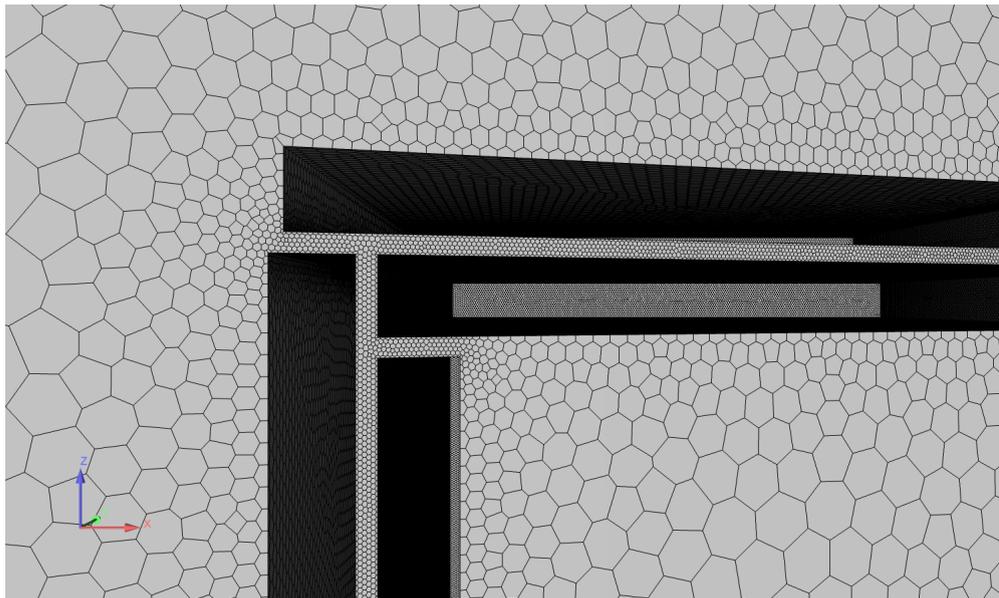
5.4 Aspetti qualitativi della mesh

La fase di generazione della mesh ha definito gran parte delle problematiche relative alle semplificazioni da effettuare nella geometria. Il modello finale è, infatti, il risultato di numerosi tentativi di creazione di una griglia tale da avere un numero complessivo di celle sufficientemente limitato ma che comunque permettesse una buona risoluzione del moto di argon all'interno degli spazi più angusti tra piastre di acrilico adiacenti. La scelta di disporre in queste zone di un numero minimo di tre celle lungo la dimensione inferiore di ogni gap ha portato alla necessità di sovradimensionare tali interstizi rispetto a quanto stimato in fase di progettazione: risultava impossibile garantire la condizione descritta mantenendo le spaziature a valori di 5 mm, come presenti sul disegno fornitoci, senza incorrere nella generazione

di una mesh troppo fitta. Aumentando il dato a 12 mm è stato possibile limitare il numero di celle a circa 75 milioni, delle quali una quantità prossima al 70% sono contenute nei gaps.



(a) *Panoramica della mesh.*



(b) *Particolare delle celle presso i gaps.*

Figura 5.6: Panoramica (a) e particolare (b) della griglia ottenuta per il modello descritto del VETO detector.

Capitolo 6

Simulazioni preliminari

6.1 Introduzione

Le simulazioni che si andranno a descrivere in questo capitolo sono state eseguite utilizzando la geometria introdotta nel paragrafo 5.1. Si tratta di uno studio parametrico sulla portata: le varie simulazioni, perciò, differiscono fra loro solamente per questo ultimo dato, mentre tutte le altre condizioni al contorno sono state mantenute costanti. I due inlet, i quali immettono l'argon rispettivamente nell'IAB e nell'OAB, sono stati considerati in modo separato, affinché i loro valori di portata potessero essere indipendenti. Nelle prime quattro simulazioni si è impostato una portata uguale per entrambi gli inlets, con valori di 0.02 kg/s, 0.05 kg/s, 0.08 kg/s e 0.1 kg/s ciascuno. Nelle restanti due, invece, si è impostata una portata differenziale: portata di 0.1 kg/s per l'IAB e 0.05 kg/s per l'OAB nella prima e 0.05 kg/s per l'IAB e 0.025 kg/s per l'OAB nella seconda. Tali valori risultano essere molto superiori alla portata che si era immaginata a priori, la quale si attestava a 0.1 kg/s per l'intero sistema, e non per un singolo spicchio a cui invece si riferiscono i dati utilizzati per le simulazioni. La scelta deriva dalla considerazione che, in base ai risultati di una simulazione pilota eseguita per testare il modello, la portata di 0.1 kg/s sarebbe risultata assolutamente inaccettabile.

Per le simulazioni che hanno mostrato i risultati migliori saranno riportati i contorni di temperatura e di velocità riferiti ad un piano verticale che seziona lo spicchio in due parti simmetriche, e verrà inoltre riportato il grafico della temperatura massima all'interno dello spicchio in funzione del numero di iterazione.

6.2 Analisi dei risultati

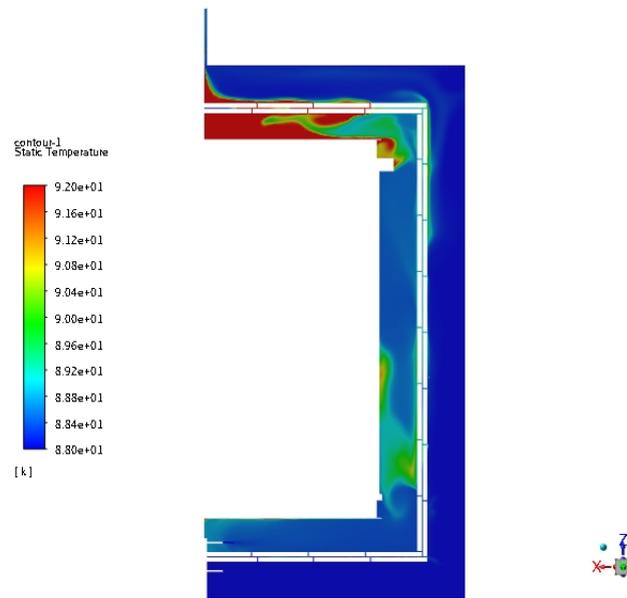
L'esito di questa prima campagna di simulazioni ha essenzialmente mostrato l'incapacità dell'attuale geometria di smaltire in modo adeguato il calore proveniente dalle sorgenti, fornendo tuttavia informazioni utili per individuare le zone critiche. Considerando le simulazioni con portata identica per entrambi gli inlets, perfino il valore di 0.1 kg/s si è rivelato non sufficiente, con temperature massime del fluido

che superavano abbondantemente gli 89 K, arrivando addirittura a 250 K. Portate inferiori producevano temperature ancora più alte e quindi assolutamente inaccettabili. La zona che subisce il surriscaldamento più evidente risulta essere la porzione superiore dell'IAB. Ciò è dovuto al fatto che i valori di portata sono in ogni caso molto piccoli rispetto alla quantità totale di argon contenuta nei buffers, e pertanto, eccetto che nelle zone immediatamente adiacenti agli inlets, le velocità si attestano a valori prossimi allo zero, lasciando quindi tempo all'argon di scaldarsi. Nella realtà, come già anticipato in precedenza, ciò si traduce nell'ebollizione di rilevanti quantità di argon, rendendo di fatto il sistema incompatibile con gli obiettivi di progetto. Per quanto riguarda le restanti porzioni dell'IAB si hanno invece dei risultati accettabili, e stessa cosa si può dire dell'OAB. Quest'ultimo, infatti, mostra dei valori di temperatura non eccessivamente alti nemmeno nella sua porzione superiore, in quanto l'outlet, prelevando argon proprio da esso, aiuta il fluido a defluire in modo più efficiente. Quanto detto può essere visualizzato nella figura 6.1, che mostra i contorni di temperatura e velocità istantanee riferite al caso con portata 0,1 kg/s. Non si possiedono dei contorni con i valori mediati in quanto tutte le simulazioni effettuate non sono arrivate a convergenza, ma sono state arrestate qualora la temperatura apparisse divergere oppure attestarsi ad un valore costante e superiore ai 100 K. La ragione di tale scelta è stata la necessità di non allungare troppo le tempistiche dove l'esito della simulazione fosse ormai già chiaro.

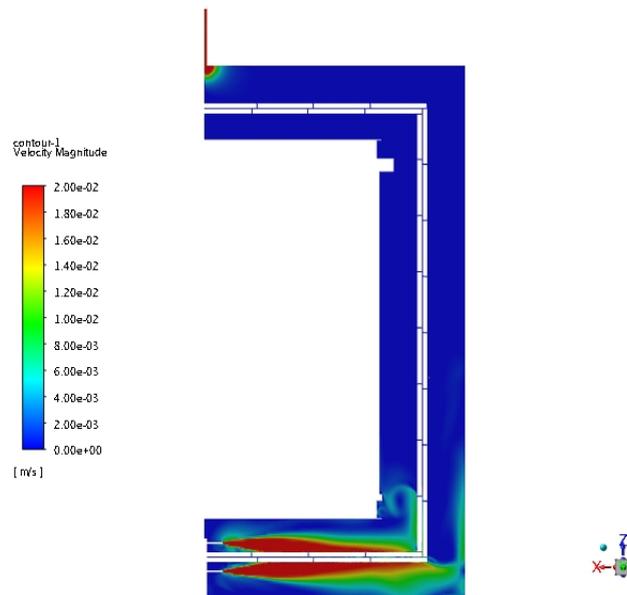
La dissimmetria fra il comportamento dei due buffers era già stata in realtà evidenziata nella simulazione pilota. Al fine di tentare di porre rimedio alla criticità dell'IAB senza modificare la geometria del sistema, si era così deciso di realizzare anche delle simulazioni caratterizzate da portata differenziale, in cui l'inlet interno immettesse una quantità doppia di argon nell'unità di tempo rispetto a quello esterno. Come previsto, i risultati sono decisamente migliori rispetto alle simulazioni precedenti: la maggior portata, infatti, fa sì che la pressione statica dell'argon dell'IAB sia leggermente maggiore rispetto a quella dell'OAB (non si sono riportati i contorni di pressione in quanto le differenze risultano comunque troppo piccole per essere apprezzate), inducendo l'argon a circolare verso quest'ultimo attraverso le fessure fra i pannelli di acrilico. Nonostante questo, tuttavia, anche nel caso con portate maggiori, i cui contorni istantanei sono riportati in figura 6.3, l'argon raggiunge delle temperature ancora molto superiori alla soglia di 89 K.

6.3 Considerazioni finali e proposte di soluzione

Come accennato in precedenza, i risultati ottenuti dalle sei simulazioni appena descritte mostrano criticità nella porzione superiore dell'Inner Argon Buffer. L'attuale geometria non risulta adeguata all'ottimale circolazione dell'argon liquido al suo interno e al corretto smaltimento della potenza termica dissipata dai diversi componenti del sistema: in tutti i casi si nota il costituirsi di una zona di ristagno dove l'argon raggiunge temperature superiori a quella di ebollizione (nelle condizioni di pressione vigenti), che nel prototipo potrebbero determinare la formazione di bolle di argon allo stato gassoso.



(a) Contorno istantaneo di temperatura sul piano mediano del settore.



(b) Contorno istantaneo di velocità sul piano mediano del settore.

Figura 6.1: Contorni istantanei di temperatura (a) e velocità (b) ottenuti sul piano considerato a seguito delle simulazioni effettuate con portata di 0.1 kg/s per ciascuno dei due inlets. Si noti che nelle zone a più alta temperatura e velocità (colorate in rosso) i due parametri possono assumere valori superiori al massimo riportato sulle rispettive scale.

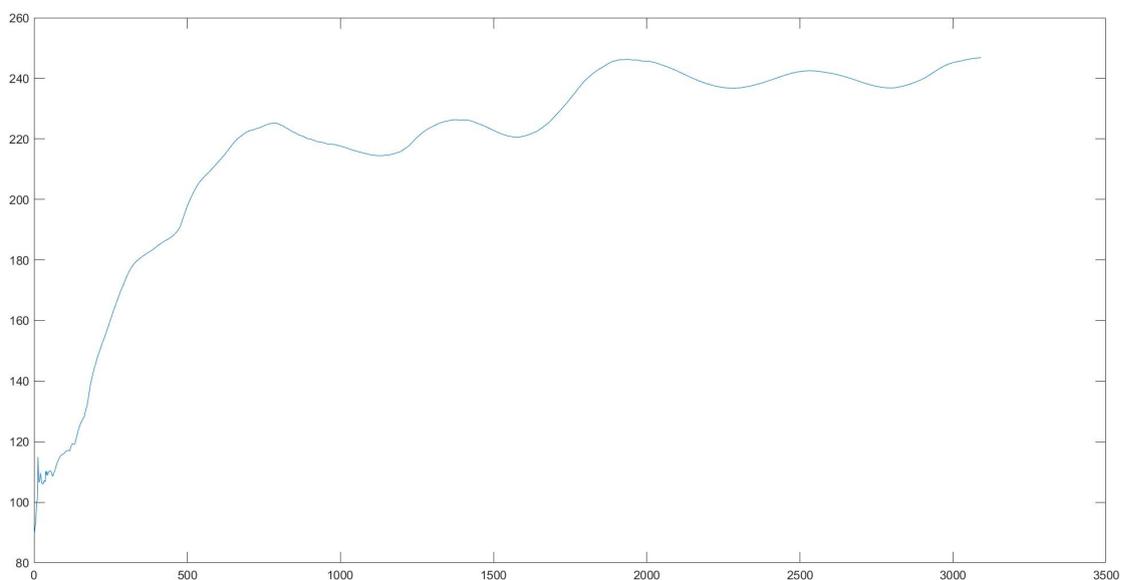
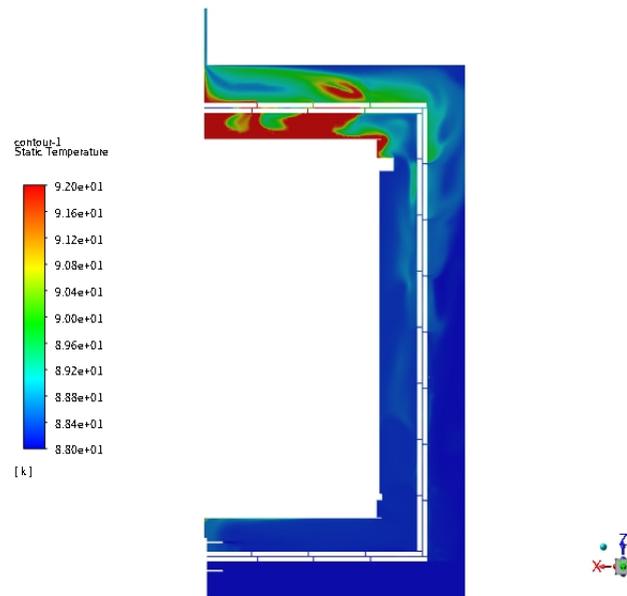
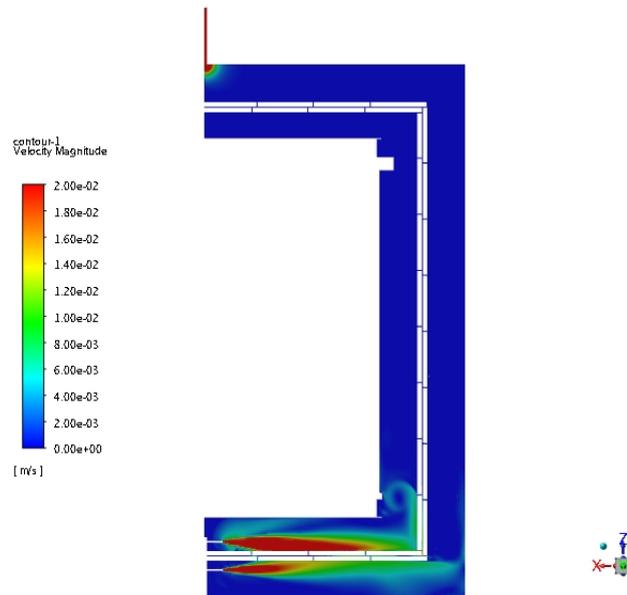


Figura 6.2: Grafico della temperatura massima raggiunta nel settore del VETO detector in funzione del numero di iterazione per il caso a portata di 0.1 kg/s per ciascun inlet. Si può notare come, nonostante il calcolo non sia arrivato a convergenza, la temperatura massima risulti ben al di sopra del limite di 89 K.

La presenza del singolo condotto di outlet nella parte alta dell'OAB favorisce l'evacuazione del fluido relativamente al solo buffer cui esso si affaccia, permettendo al campo di velocità di assumere un'intensità leggermente maggiore. Ciò ha portato a considerare la possibilità di operare modifiche alla geometria finora utilizzata partendo dai risultati positivi ottenuti per l'Outer Argon Buffer. Si è perciò pensato di inserire un secondo outlet che prelevasse argon anche dall'Inner Argon Buffer, favorendo quindi la circolazione nella zona critica. Dopo aver implementato tali modifiche alla geometria, è stata eseguita una nuova campagna di prove i cui risultati saranno discussi nel seguente capitolo.



(a) Contorno istantaneo di temperatura sul piano mediano del settore.



(b) Contorno istantaneo di velocità sul piano mediano del settore.

Figura 6.3: Contorni istantanei di temperatura (a) e velocità (b) ottenuti sul piano considerato a seguito delle simulazioni effettuate con portata differenziale di 0.1 kg/s per l'inlet dell'IAB e di 0.05 kg/s per quello dell'OAB.

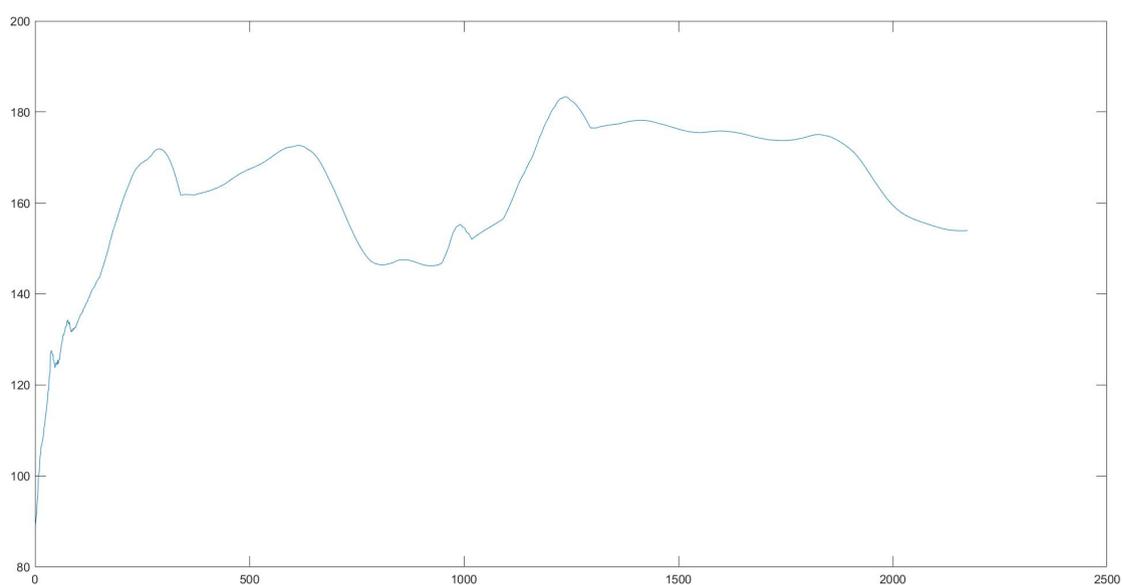


Figura 6.4: Grafico della temperatura massima raggiunta nel settore del VETO detector in funzione del numero di iterazione per il caso a portata differenziale di 0.1 kg/s per l'inlet dell'IAB e di 0.05 kg/s per quello dell'OAB. Si può notare come, nonostante il calcolo non sia arrivato a convergenza, la temperatura massima risulti ben al di sopra del limite di 89 K.

Capitolo 7

Simulazioni con doppio outlet

7.1 Modifiche alla geometria

Al fine di migliorare la circolazione dell'argon nell'IAB, come anticipato nel capitolo precedente, si è pensato di aggiungere un secondo outlet che permettesse al fluido lì contenuto di uscire dal VETO senza dover prima raggiungere l'OAB tramite le fessure fra i pannelli di acrilico. La geometria è quindi rimasta invariata rispetto alle simulazioni precedenti se non per questo particolare: se prima l'argon fuoriusciva dall'OAB tramite un piccolo tubo verticale posto al centro della superficie ottagonale superiore della gabbia di Faraday, adesso questo tubo presenta una lunghezza maggiore in modo da arrivare fino all'IAB. Da esso poi si diramano due ulteriori tubicini disposti radialmente (quindi ortogonali al tubo verticale), ognuno relativo ad uno dei due buffers. L'argon, quindi, transita attraverso i tubicini radiali per poi confluire nel tubo principale verticale da cui ha modo di uscire all'esterno del VETO (si veda figura 7.1). Tale configurazione si presenta perciò molto simile a quella degli inlets, da cui si è preso spunto. Essa risulta in ogni caso modificabile qualora le simulazioni mostrino delle criticità.

7.2 Condizioni al contorno

Analoghe considerazioni possono essere fatte per le condizioni al contorno delle nuove simulazioni: sono state imposti i medesimi flussi termici e caratteristiche di parete alle superfici di interesse menzionate al paragrafo 5.2, con le sole differenze riguardanti i nuovi outlets e valori di portata agli inlets. In particolare, è stato effettuato un ulteriore studio parametrico della portata, avente, per ogni caso, valori di 0.0375 kg/s, 0.05 kg/s, 0.1 kg/s per ciascuno dei due inlets, in aggiunta ad una simulazione con portata differenziale di 0.05 kg/s all'IAB e di 0.025 kg/s all'OAB.

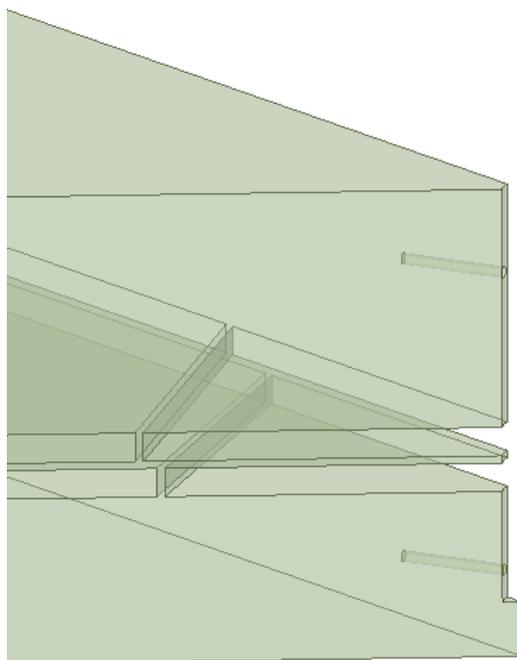


Figura 7.1: Particolare del doppio outlet.

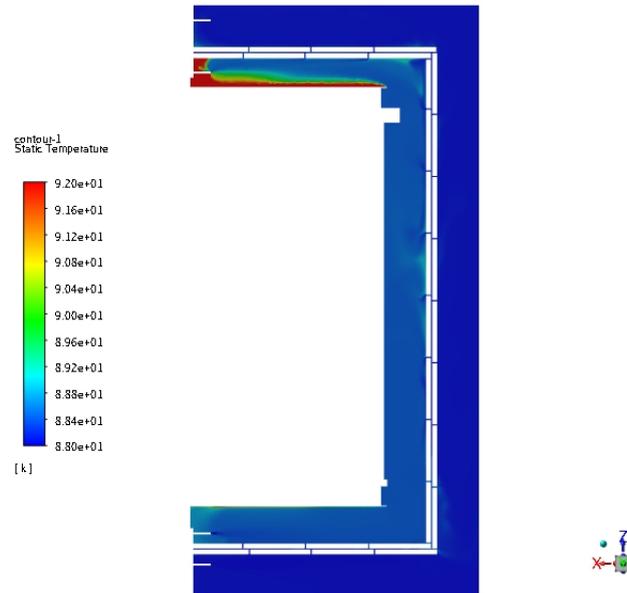
7.3 Analisi dei risultati

Lo studio con geometria modificata ha nuovamente messo in evidenza criticità nel sistema, pur con dei significativi miglioramenti. La configurazione del doppio outlet ha permesso un miglior smaltimento del calore scambiato dai sensori al fluido: i risultati mostrano temperature massime comprese entro i 130 K nel caso a portata totale minore, contro i 250 K raggiunti con le simulazioni precedenti. Tale valore di temperatura risulta comunque non compatibile con le condizioni operative dell'argon desiderate, che in una situazione tale non potrebbe permanere allo stato liquido.

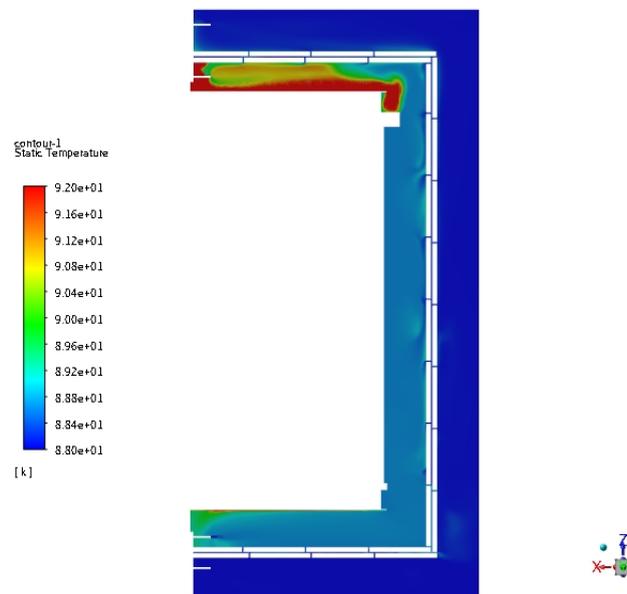
I contorni ottenuti dalla fase di postprocessing hanno, in generale, confermato quanto osservato con la vecchia geometria, ovvero la necessità di facilitare la circolazione dell'argon nei pressi della porzione superiore dell'IAB. Particolarmente interessante si è rivelato il confronto tra il caso a portata di 0.05 kg/s per inlet e quello a portata di 0.1 kg/s per inlet: nonostante la portata della seconda situazione sia doppia, la temperatura massima all'interno del dominio di calcolo risulta inferiore di soli 3 K circa, e viene raggiunta in entrambi i casi nello strato di fluido immediatamente a contatto con le sorgenti della TPC. Nel valutare le differenze tra i casi a portata di 0.0375 kg/s per inlet e a portata differenziale di uguale valore totale, è stato possibile notare come le prestazioni del sistema a portata differenziale, dal punto di vista dello smaltimento del calore, siano nettamente superiori e paragonabili a quelle dei casi a portata maggiore. Inoltre, l'outlet attuale, costituito da tubi orizzontali che si

immergono in direzione radiale nei due buffers di argon, può essere ulteriormente migliorato in modo da favorire l'ingresso del fluido al suo interno, per evitare la formazione di zone di ristagno attorno ai condotti citati.

Le precedenti osservazioni hanno portato alla decisione di apportare ulteriori modifiche alla geometria degli outlets e di considerare il sistema a portata differenziale come quello ottimale sotto diversi aspetti.

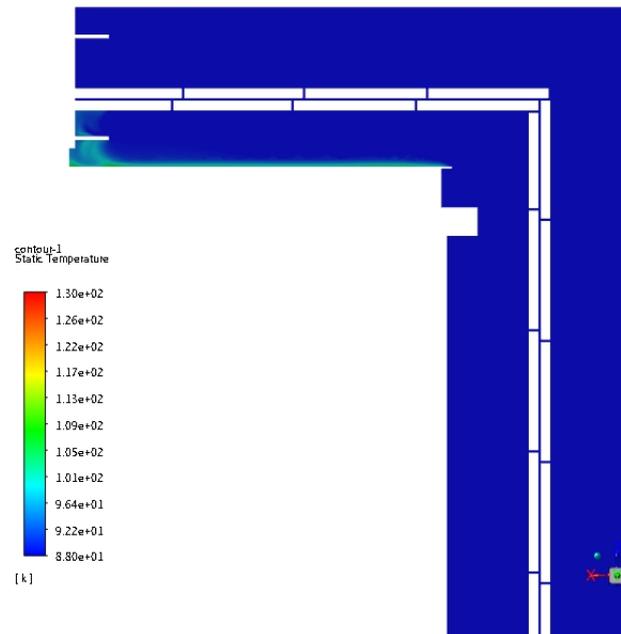


(a) Portata di 0.1 kg/s per inlet.

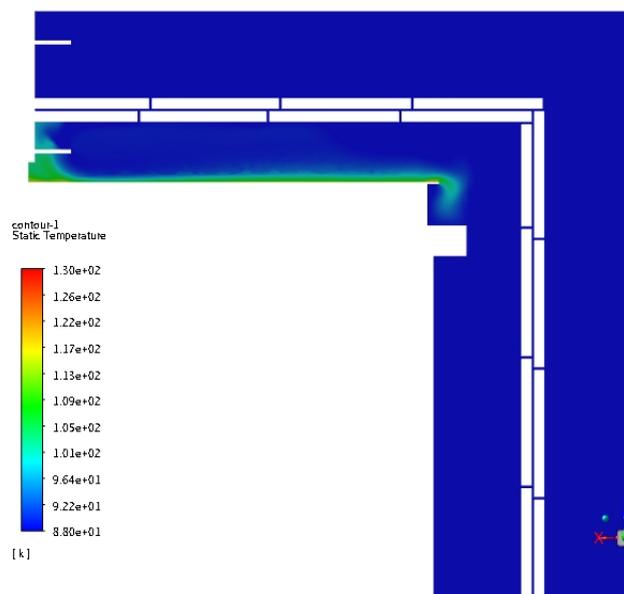


(b) Portata di 0.05 kg/s per inlet.

Figura 7.2: Contorni istantanei di temperatura per i casi a portata di 0.1 kg/s (a) e di 0.05 kg/s (b) ottenuti sul piano mediano del settore del VETO detector. Si noti che nelle zone a più alta temperatura (colorate in rosso) i due parametri possono assumere valori superiori al massimo riportato sulle rispettive scale, pari a 92 K.

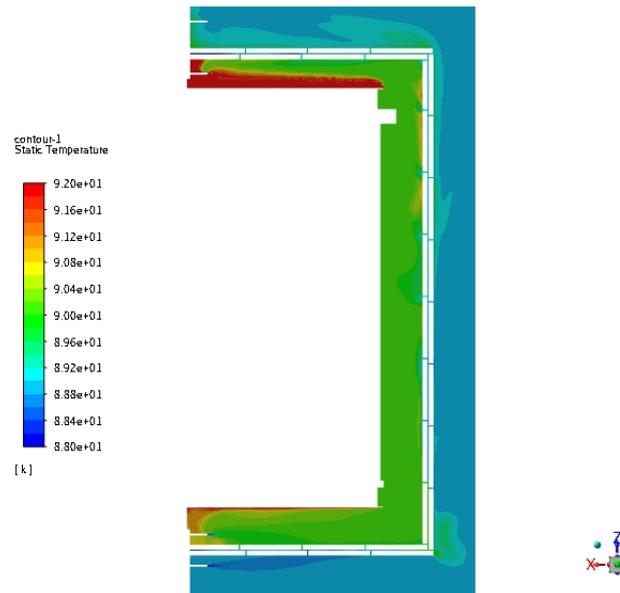


(a) Portata di 0.1 kg/s per inlet.

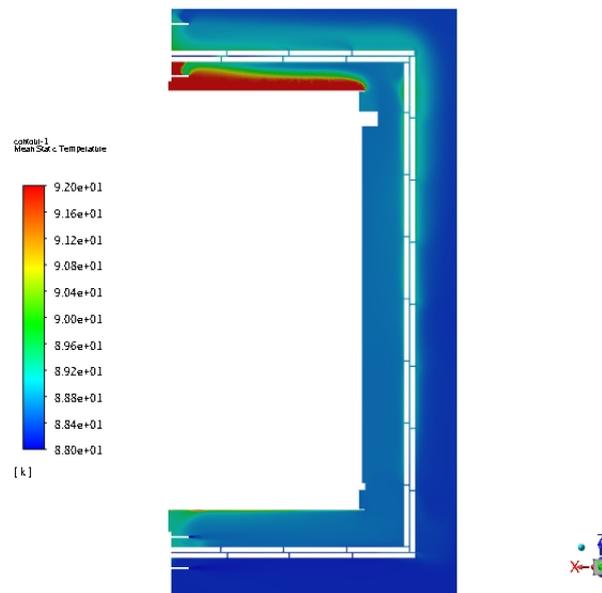


(b) Portata di 0.05 kg/s per inlet.

Figura 7.3: Ingrandimento dei contorni istantanei di temperatura per i casi a portata di 0.1 kg/s (a) e di 0.05 kg/s (b) ottenuti sul piano mediano del settore del VETO detector. Il limite superiore della scala è stato spostato a 130 K per evidenziare le zone più critiche, dove la temperatura supera effettivamente il valore di 92 K.



(a) Portata di 0.0375 kg/s per inlet.



(b) Portata differenziale di 0.05 kg/s all'IAB e di 0.025 kg/s all'OAB.

Figura 7.4: Contorni istantanei di temperatura per i casi a portata di 0.0375 kg/s per inlet (a) e differenziale di pari valore totale (b) ottenuti sul piano mediano del settore del VETO detector. Si noti che nelle zone a più alta temperatura (colorate in rosso) i due parametri possono assumere valori superiori al massimo riportato sulle rispettive scale, pari a 92 K.

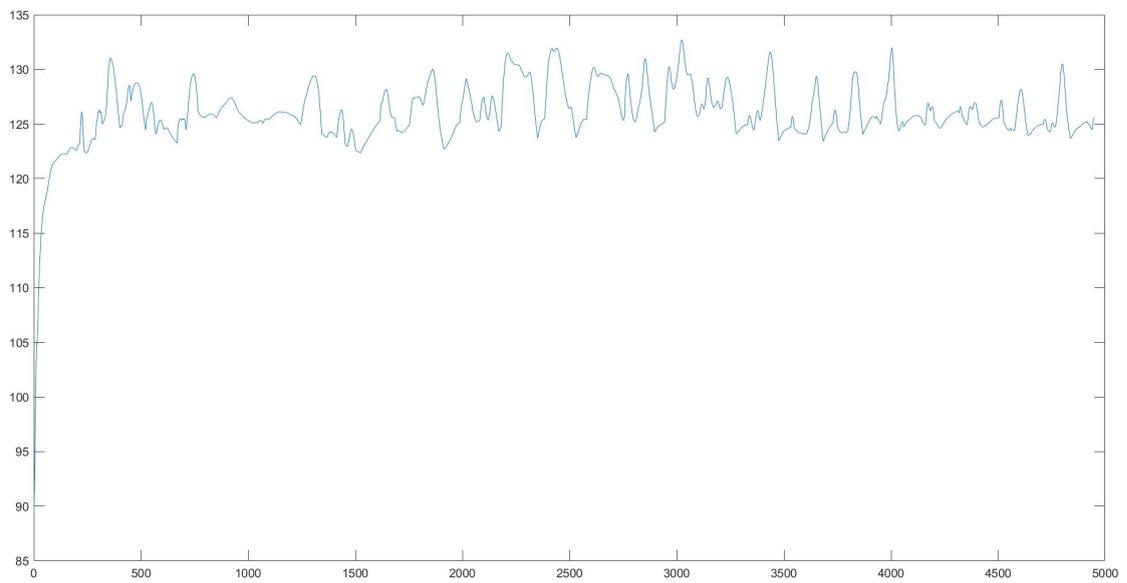
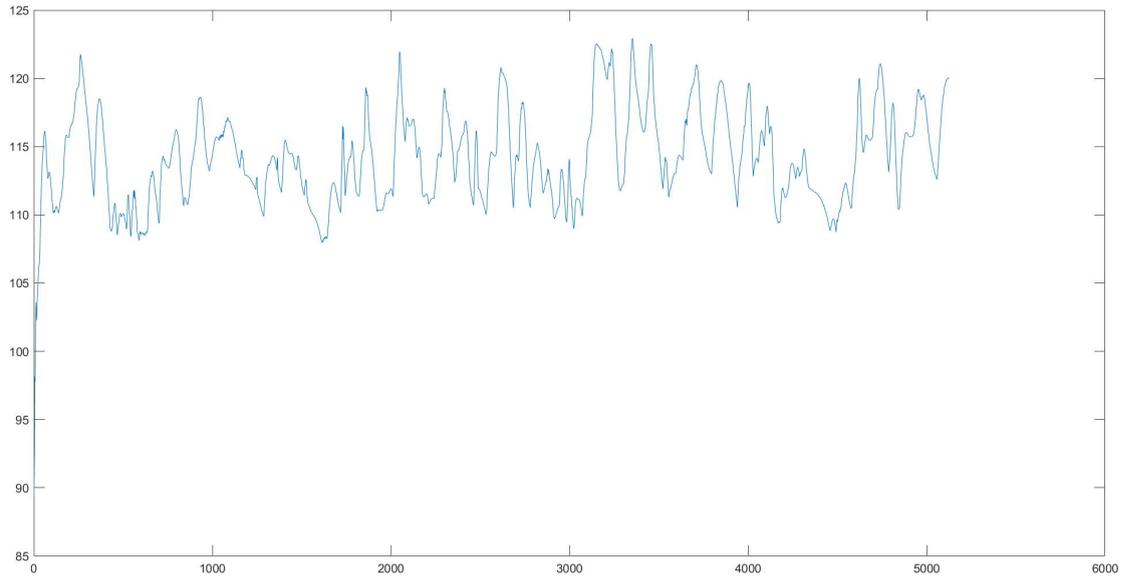
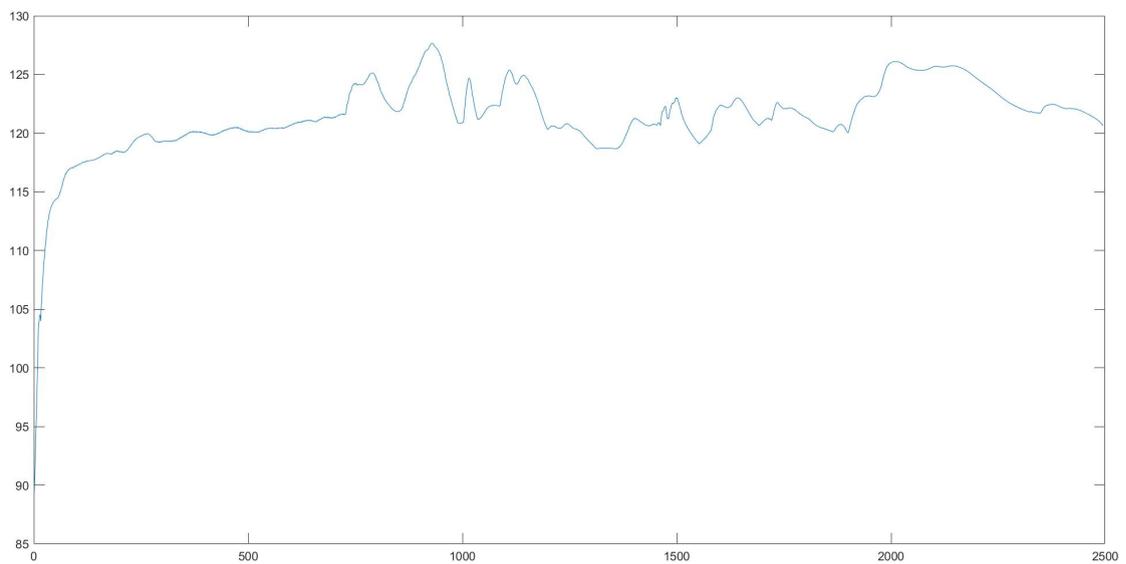


Figura 7.5: Grafico della temperatura massima raggiunta nel settore del VETO detector in funzione del numero di iterazione per il caso a portata differenziale di valore totale pari a 0.075 kg/s.



(a) Portata di 0.1 kg/s per inlet.



(b) Portata di 0.05 kg/s per inlet.

Figura 7.6: Grafici della temperatura massima raggiunta nel dominio di calcolo in funzione del numero di iterazione nei casi a portata di 0.1 kg/s per inlet (a) e di 0.05 kg/s per inlet (b). Si noti la scarsa differenza tra i valori cui i due andamenti convergono, nonostante il rapporto tra le portate sia pari a 2:1.

Capitolo 8

Simulazione con doppio outlet modificato

8.1 Modifiche all'outlet dell'IAB

I risultati delle precedenti simulazioni hanno mostrato la formazione di una zona di ristagno nei pressi dell'outlet dell'IAB. Si è immaginato che la causa fosse la geometria scelta, la quale, molto simile a quella degli inlets, non appare la migliore per favorire un efficiente deflusso del fluido. La nuova geometria adottata non ha previsto modifiche per l'outlet dell'OAB, mentre, per quanto riguarda il secondo outlet, è stato eliminato il tubo radiale in modo che il fluido uscisse direttamente in corrispondenza del tubo verticale di raccordo. Al fine di aumentarne contemporaneamente l'area, si è scelto di utilizzare come outlet tutta la superficie del tubo verticale che è a contatto con l'argon dell'IAB: la sezione di uscita del fluido, come si può osservare in figura 8.1, è costituita quindi dalla superficie laterale di uno specchio cilindrico.

8.2 Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno sono rimaste essenzialmente invariate rispetto ai casi precedenti. Per quanto riguarda la portata si è scelto di testare un solo valore differenziale, ossia $0,025 \text{ kg/s}$ per l'inlet esterno e $0,05 \text{ kg/s}$ per quello interno. In questo modo risulta facile confrontare questa simulazione con l'analogo caso analizzato con la precedente geometria.

8.3 Analisi dei risultati

Come si voleva ottenere, la zona di ristagno è stata significativamente ridotta: adesso l'argon circola in modo efficiente anche nella porzione superiore dell'IAB. Tuttavia non si può trascurare la permanenza di uno strato caldo in prossimità dei sensori presenti sulla faccia superiore della TPC, il quale è presente in tutte le simulazioni, anche in quelle in cui la circolazione si è mostrata migliore. Bisogna notare che

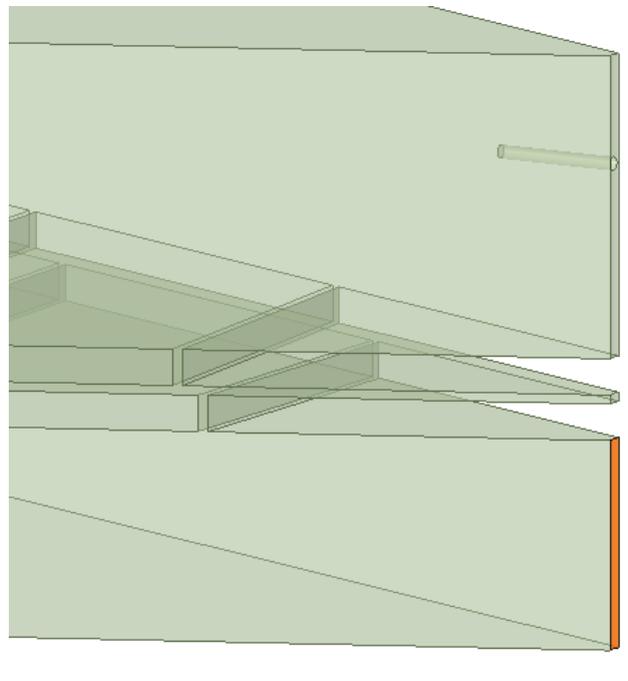


Figura 8.1: Particolare della nuova configurazione degli outlets. In evidenza l'outlet dell'IAB.

si è comunque riusciti a fare sì che la temperatura massima di quella zona, che corrisponde alla temperatura massima in assoluto di tutto il dominio, si riducesse (in questo ultimo caso si attesta a valori prossimi a 120 K rispetto ai 125 K dell'analogo caso con la precedente geometria dell'outlet), ma si tratta pur sempre di valori non compatibili con gli obiettivi di progetto. L'idea di aumentare di molto la portata evolvente nei buffers si scontra con le capacità del sistema di purificazione, mentre le modifiche alla geometria degli outlets, che soprattutto in questo ultimo caso sono state piuttosto sostanziali e difficilmente migliorabili, non hanno sortito gli effetti sperati.

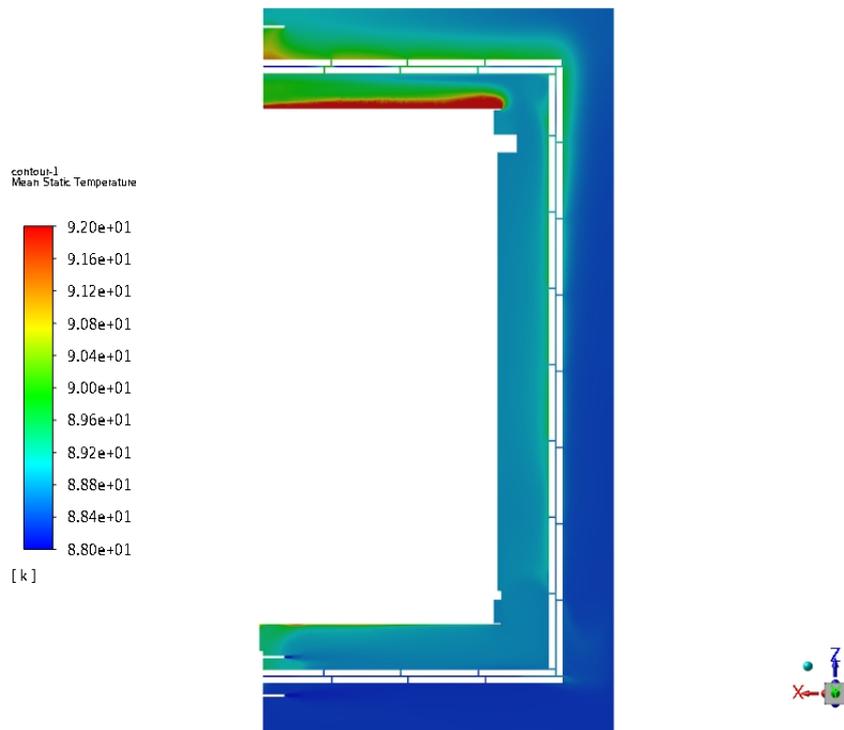


Figura 8.2: Contorno istantaneo di temperatura ottenuto sul piano mediano del settore di VETO detector per portata differenziale di 0.05 kg/s all'IAB e di 0.025 kg/s all'OAB.

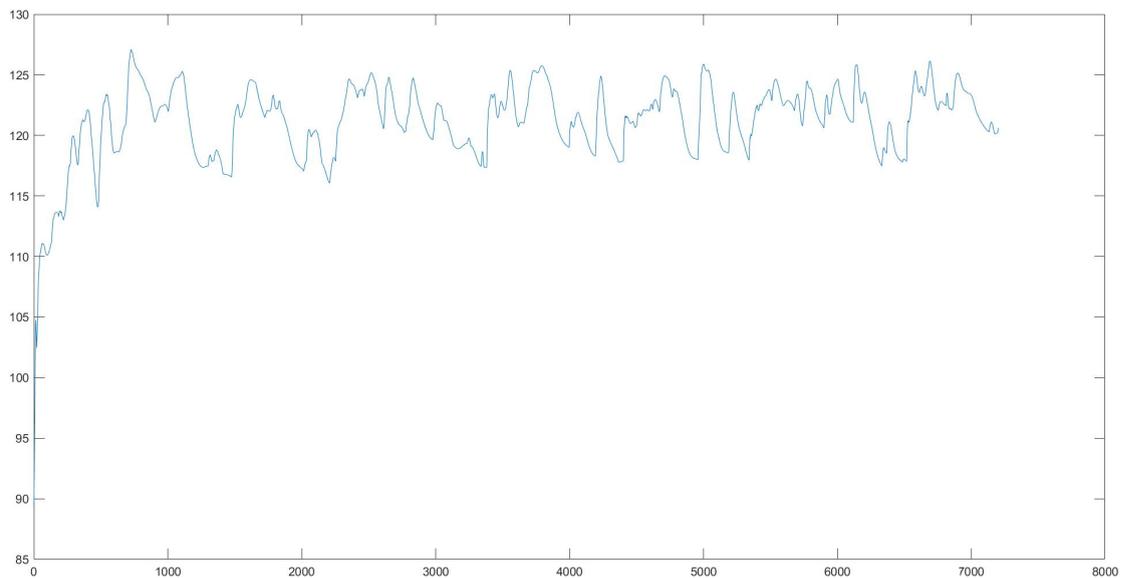


Figura 8.3: Grafico della temperatura massima raggiunta nel dominio di calcolo in funzione del numero di iterazione nel caso a portata differenziale con doppio outlet modificato.

Capitolo 9

Conclusioni

L'attività svolta si è conclusa con la simulazione effettuata sulla terza geometria, di cui al capitolo 8.

Come era lecito aspettarsi, i risultati ottenuti hanno in generale evidenziato come l'aumento della portata di argon in ingresso migliori notevolmente la circolazione del fluido, permettendo di ottenere temperature medie più basse. Ciò, tuttavia, si scontra con il fatto che un valore troppo elevato di questo dato non risulti compatibile con il funzionamento del sistema di purificazione del fluido. Ha invece avuto successo l'introduzione del sistema a portata differenziale, che ha permesso di garantire una migliore circolazione nell'IAB, zona dove si erano riscontrati i maggiori problemi. Nei casi analizzati si è scelto di utilizzare sempre un rapporto 2:1 fra la portata dell'IAB e quella dell'OAB.

Le modifiche alla geometria degli outlets, attuate al fine di limitare l'estensione della zona di ristagno che in tutti i casi permane nella porzione superiore dell'IAB, si sono confermate utili al raggiungimento delle condizioni di temperatura tali da mantenere l'argon allo stato liquido, ma non sufficienti: anche l'ultimo caso, ossia con doppio outlet modificato, non rappresenta una soluzione accettabile ai fini della corretta operatività del VETO detector. Si nota infatti la continua presenza, presso le sorgenti superiori della TPC, di una zona a temperatura molto alta, che si riduce ma che non scompare neppure aumentando la portata fino a valori considerevoli, come si è potuto osservare in particolar modo al capitolo 7. In tabella 9 si riportano, per chiarezza, le temperature massime raggiunte nel modello utilizzato durante le simulazioni, per differenti valori di portata e configurazione degli outlets. Si può notare come i numeri siano tutti superiori a 89 K, temperatura alla quale si avrebbe, per l'argon, il passaggio di fase da liquida a gassosa nelle condizioni di pressione vigenti nel sistema.

In conclusione possiamo affermare che, pur non avendo raggiunto appieno l'obiettivo prefissato, sono stati introdotti degli accorgimenti che hanno dato luogo ad un significativo miglioramento nella circolazione dell'argon, evidenziando nel contempo le criticità su cui sarà necessario agire in futuro. Bisognerà quindi operare in parallelo su portata (che si dovrà cercare, per quanto possibile, di massimizzare) e geometria

del sistema, con una possibile evoluzione che consista, ad esempio, nell'implementare un miglior sistema di immissione dell'argon, nell'inserire dei deflettori nelle curve che evitino la formazione di strutture vorticose o nell'ottimizzare la conformazione dei sensori con l'aggiunta di dissipatori termici. Quest'ultima soluzione, alla luce delle criticità emerse nelle nostre simulazioni, che sembrano perdurare anche in condizione di circolazione efficiente, appare al momento la più risolutiva.

Tabella dei risultati				
Portata [kg/s]			Geometria	Temperatura massima [K]
IAB	OAB	Totale		
0.1	0.05	0.15	1	170
0.1	0.1	0.2	1	250
0.0375	0.0375	0.075	2	127
0.05	0.025	0.075	2	125
0.05	0.05	0.1	2	120
0.1	0.1	0.2	2	117
0.05	0.025	0.075	3	120

Tabella 9.1: Temperature massime calcolate nel modello del settore del VETO detector per le diverse geometrie e valori di portata. I risultati non hanno significato fisico, in quanto il passaggio di fase del fluido non è stato considerato, bensì evidenziano le capacità di una particolare geometria in fatto di circolazione dell'argon liquido.

Bibliografia

- [1] P. Agnes et al. «DarkSide-50 532-day dark matter search with low-radioactivity argon». In: *Physical Review D* 98, 102006 (2018).
- [2] M. Angiolini. «Funzioni di parete adattive per il modello di turbolenza $k-\omega$ ». Thesis. Politecnico di Milano, 2012.
- [3] D. Babusci, A. Berardinelli e F. Bossi. *Il problema della materia oscura*. Articolo tratto dall'intervento degli autori durante la conferenza "Il lato oscuro dell'Universo: teorie e visioni" tenutasi ai LNF il 4 dicembre 2017. INFN-Laboratori Nazionali di Frascati. 2018. URL: <http://w3.lnf.infn.it/problema-della-materia-oscura/>.
- [4] G. Bertone. «Particle Dark Matter: Evidence, Candidates and Constraints». In: *Phys.Rept.* 405 (2005), pp. 279–390.
- [5] B. Bottino. «Dark matter search with liquid argon in DarkSide: results with scientific and technological prototypes». PhD thesis. University of Genoa, 2019.
- [6] Y. Çengel e J. Cimbala. *Fluid Mechanics, Fundamental and Applications*. New York: MacGraw-Hill Education, 2018.
- [7] The Global Argon Dark Matter Collaboration. *DarkSide-20k Technical Design Report*. 2019.
- [8] Multiphysics Cyclopedia. *The Boussinesq Approximation*. Comsol. 2015. URL: <https://www.comsol.it/multiphysics/boussinesq-approximation>.
- [9] O. Lahavand e A.R. Liddle. *PDG-2019, capitolo 24 "Cosmological Parameters"*. 2019. URL: <http://pdg.lbl.gov/2019/reviews/rpp2019-rev-cosmological-parameters.pdf>.
- [10] L. Manenti. «Liquid Argon Time Projection Chambers for Dark Matter and Neutrino Experiments». PhD thesis. University College London, 2016.
- [11] A. Propst. «CFD Analysis Methods for Systems Driven by Natural Convection». Thesis for Master of Science. South Dakota State University, 2017.
- [12] V.C. Rubin e W.K. Jr Ford. «Rotation of the Andromeda Nebula from a Spectroscopic Survey of Emission Regions». In: *Astrophysical Journal*, 159:379 (1970).
- [13] M. Sanguineti e K. Wittkowski. «Winglets a geometria variabile». Thesis. University of Genoa, 2018.
- [14] E. Voirin. *CFD Analysis of Buoyancy Driven Liquid Argon in MicroBooNe Cryostat*. Fermilab, Process Engineering Group. URL: <http://microboone-docdb.fnal.gov/cgi-bin/RetrieveFile?docid=15;filename=CFD%5C%>

- 20Analysis%5C%20of%5C%20Buoyancy%5C%20Drive%5C%20Liquid%5C%20Argon%5C%20in.pptx;version=5.
- [15] Wikipedia. *Boussinesq approximation (buoyancy)*. 2020. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Boussinesq_approximation_\(buoyancy\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Boussinesq_approximation_(buoyancy)).
- [16] Wikipedia. *Equazioni di Navier-Stokes*. 2020. URL: https://it.wikipedia.org/wiki/Equazioni_di_Navier-Stokes.
- [17] F. Zwicky. «On the Masses of Nebulae and of Clusters of Nebulae». In: *Astrophysical Journal* 86 (1937), p. 217.
- [18] F. Zwicky. «Republication of: The redshift of extragalactic nebulae». In: *General Relativity and Gravitation* 41(1) (2009), pp. 207–224.