

A technical drawing of a particle detector cooling system, showing a complex network of pipes and components. The drawing is rendered in a light purple and black color scheme. It features a central horizontal section with two large, rectangular cooling units. From these units, a network of pipes extends outwards, connecting to various other components, including smaller cooling units and structural elements. The overall layout is symmetrical and highly detailed, typical of a technical schematic for a large-scale scientific experiment.

14-18 settembre 2020

106° Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica

**TECNOLOGIA E PROGETTAZIONE
DEL SISTEMA DI RAFFREDDAMENTO
PER LA FASE 2 DEL TRACCIATORE
DELL'ESPERIMENTO CMS.**



Cristiano Turrioni – in rappresentanza della collaborazione CMS
Università e INFN, Sezione di Perugia

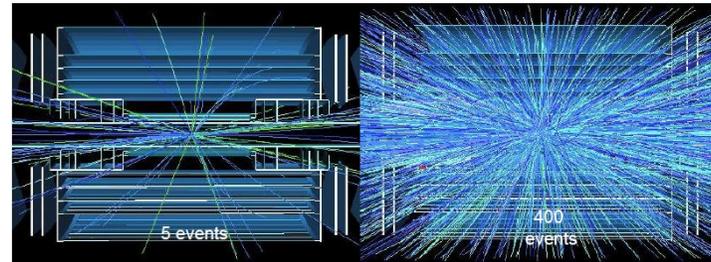
Il tracciatore di CMS per l'upgrade di fase 2



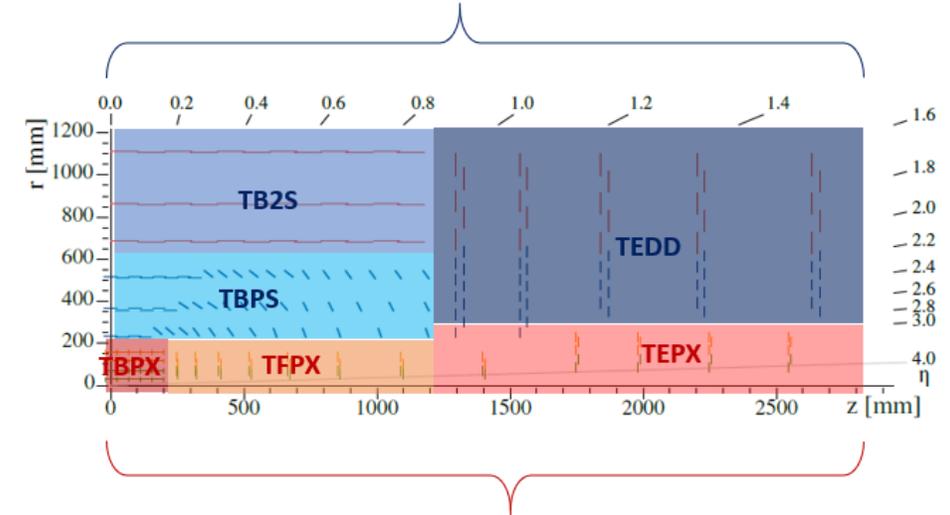
L'esperimento CMS, durante LS3, andrà incontro ad un sostanziale aggiornamento al fine di poter operare al meglio durante la fase di alta luminosità.

Il nuovo tracciatore dovrà:

- Essere resistente alla radiazione
- Avere un'alta granularità
- Avere basso material budget
- Partecipare al Livello 1 (L1) di Trigger



Tracciatore esterno



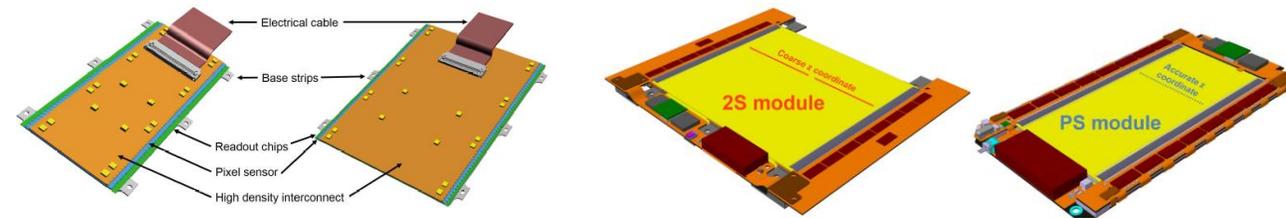
Tracciatore interno

➤ Tracciatore Interno

- Due tipi di moduli ibridi: **1x2 chips** e **2x2 chips**
- 3900 moduli, 4.9 m², 2x10⁹ pixels

➤ Tracciatore Esterno

- Due tipi di moduli "pT": **Strip-Strip (2S)** e **macroPixel-Strip (PS)**
- 13200 moduli, 192 m²



Perché è necessario dover raffreddare ?



■ Dissipare il calore prodotto da:

- Sensori
- Elettronica
- Cavi elettrici

2S Module - elettronica		PS Module - elettronica	
Componenti	Potenza [W]	Componenti	Potenza [W]
cbc (x16)	2.160	MPA (x16)	3.600
cic (x2)	0.4075	SSA (x16)	1.236
DC-DC	2.028	cic (x2)	0.355
lpGBT	0.35807	DC-DC	3.848
vtrx+	0.20562	lpGBT	0.463
TOT:	5.159	vtrx+	0.207
		TOT:	9.709

Potenza termica dissipata da ogni singolo modulo 2S e PS

$$P(r, T) = U_{bias}(\phi(r) \cdot \alpha_0 \cdot V) \frac{T^2}{T_0^2} \exp\left(-\frac{\Delta E}{2k_b} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right)$$

Potenza termica dissipata dai sensori del tracciatore esterno, funzione di:

- U_{bias} = tensione di bias
- Φ = fluenza
- T = temperatura

■ Garantire il corretto funzionamento del detector per tutto il ciclo di vita

- Evitare il **Thermal Runaway**
- $T_{sensori} \approx -20 \text{ °C}$

CMS	Heat load of detector [design]	Ambient pick up	Preheaters	Total heat x cooling design
	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]
Outer Tracker	105.0	0.5	8	113.5
Inner Tracker	37.0	0.5	3	40.5
Barrel Timing Layer	38.5	6.5	1.2	46.2
Calorimeter Endcap	230.0	14.0	5	249
Endcap Timing Layer	80.0	2.0	3	85
TOT:	490.5	23.5	20.2	534.2

Potenza termica complessivamente prodotta all'interno dell'esperimento CMS fase2



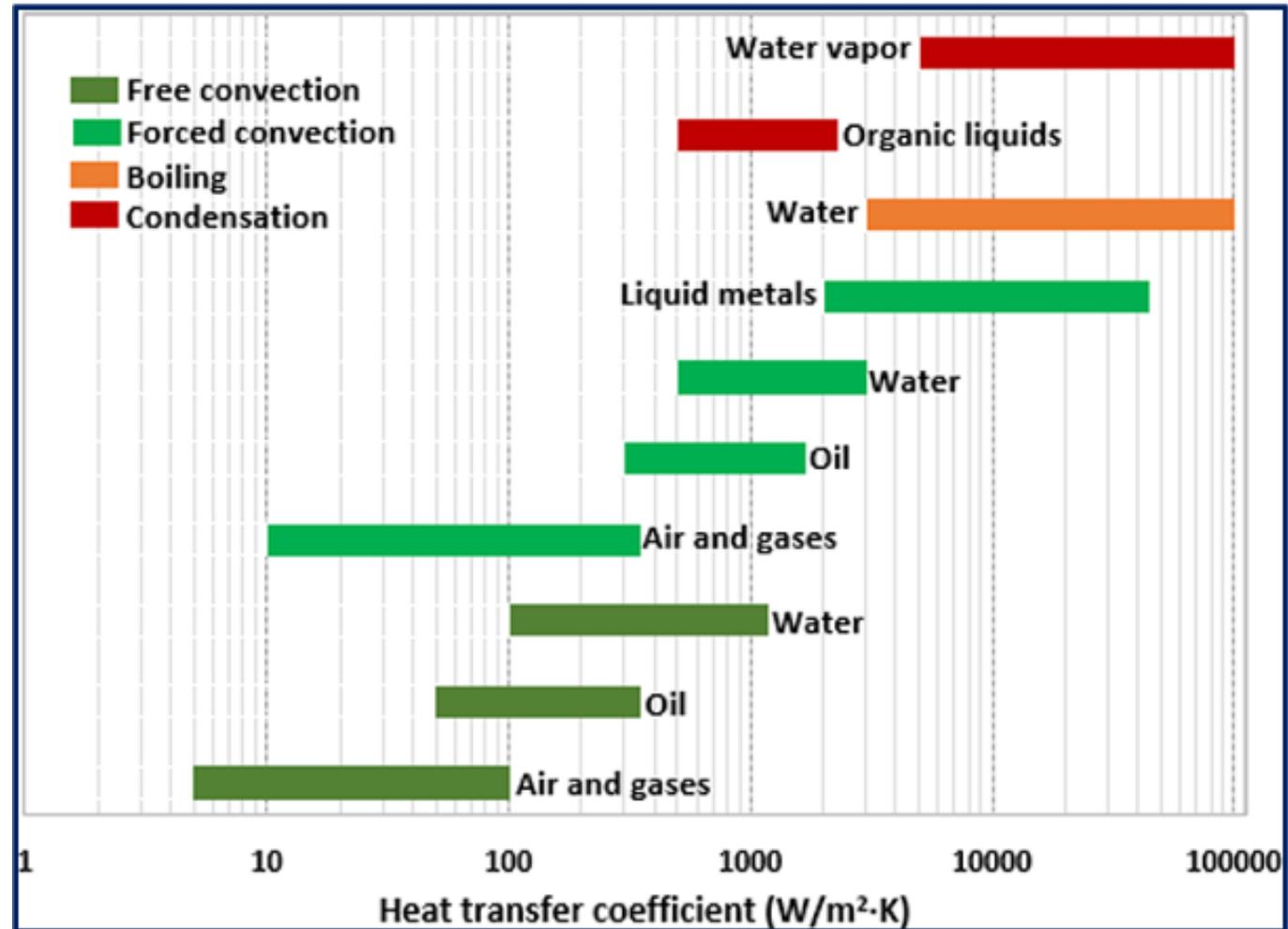


Esistono numerosi **metodi di trasferimento di calore**, i quali, basandosi sulla natura dello scambio termico, possono essere classificati in diverse categorie:

- Conduzione (solidi)
- Convezione naturale (liquidi o aeriformi)
- Convezione forzata (liquidi o aeriformi)
- Ebollizione (fluido bifase)
- Condensazione (fluido bifase)
- Irraggiamento

Ebollizione e condensazione consentono di ottenere il coefficiente di trasferimento di calore più elevato, grazie al calore latente dovuto al passaggio di fase.

Coefficienti di scambio termico per le diverse modalità di trasferimento del calore



Anidride carbonica bifase

Già utilizzata con successo in altri esperimenti:

- AMS
- LHCb VELO
- CMS pixel Phase-1



5

- L'impiego di un fluido bifase consente quindi di:
 - Avere un elevato **coefficiente di scambio termico**.
 - Controllare la **temperatura** tramite il controllo della **pressione**.
 - Ridurre il **material budget**.
- L'esperimento CMS utilizzerà **CO₂ bifase** per il proprio sistema di raffreddamento.
 - Fluido **economico e non tossico**
 - Fluido **gassoso** in condizioni ambientali.
 - Alta **stabilità termica** dovuta alle alte pressioni di impiego
- La temperatura di setpoint richiesta è di **-35°C**.

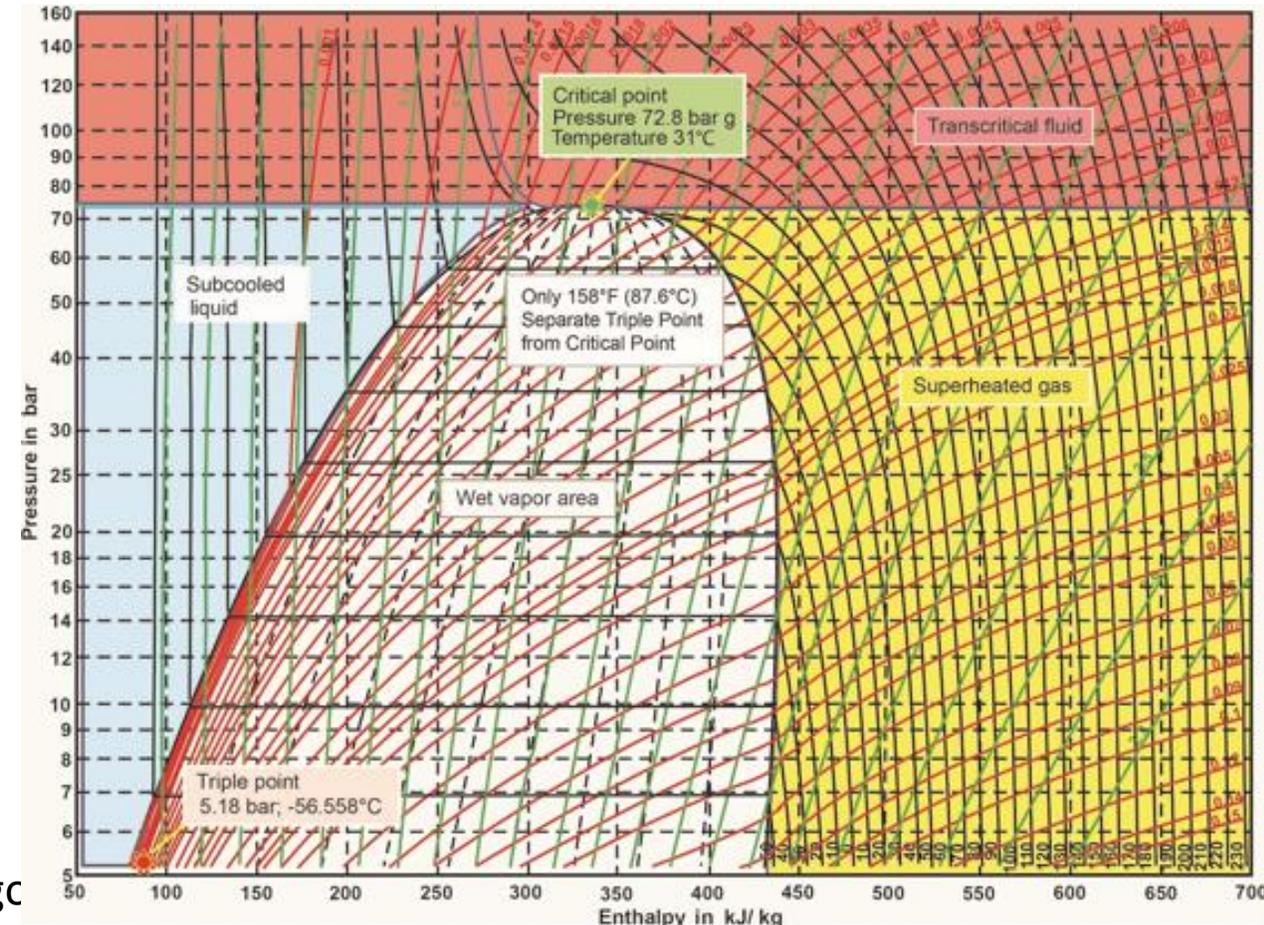
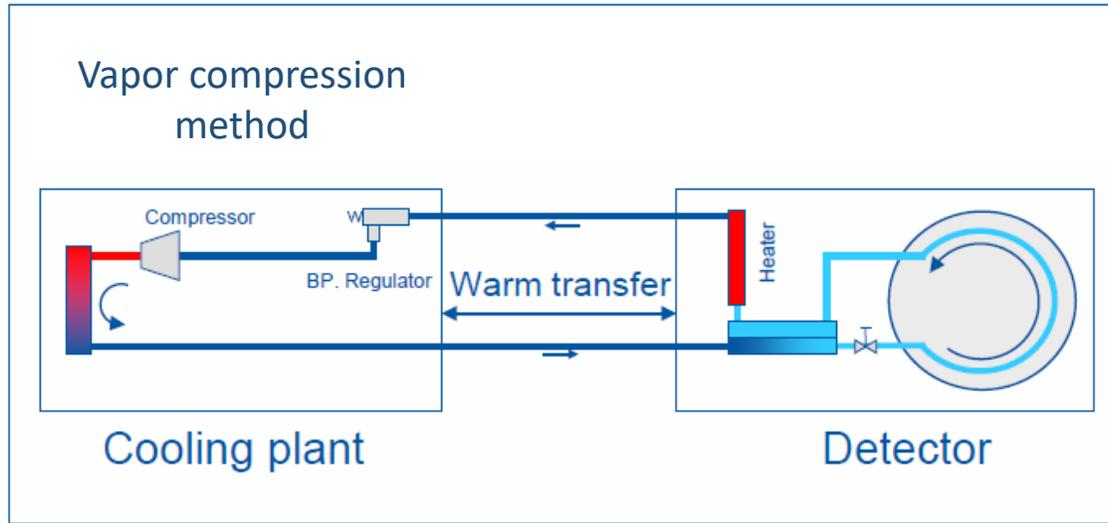
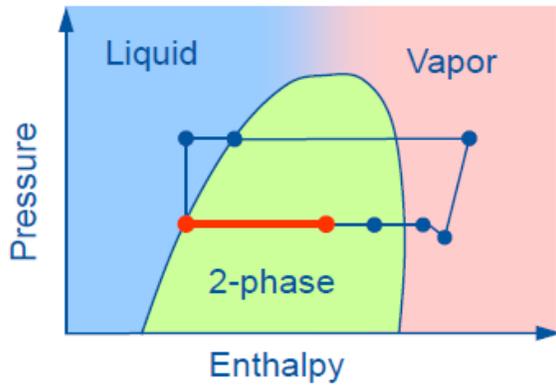
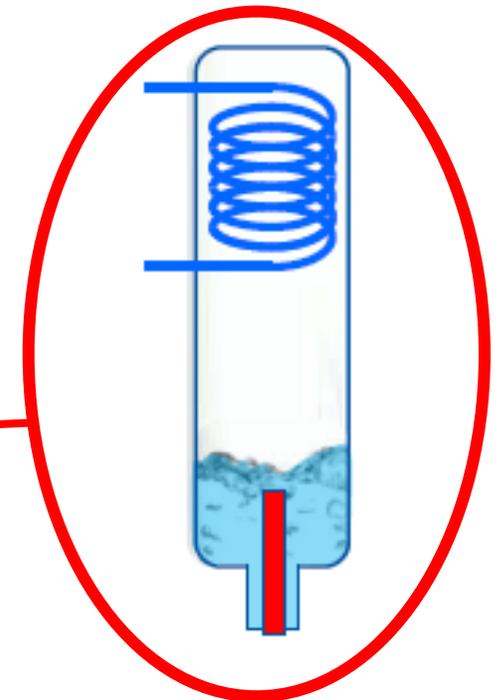
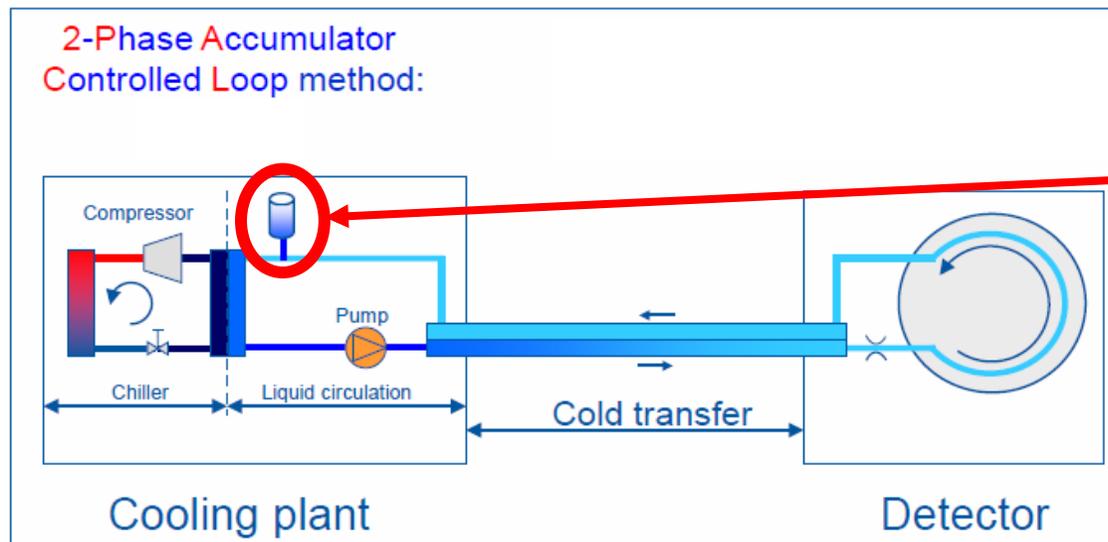
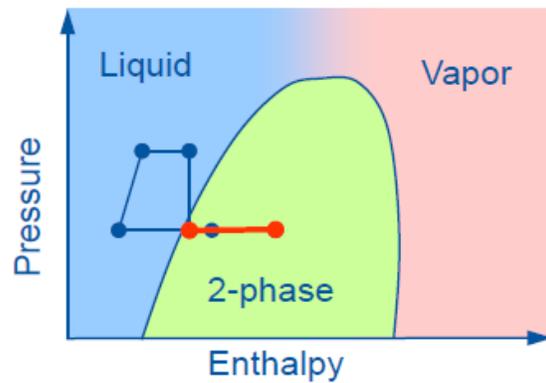


Diagramma entalpico della CO₂

Tecnologia 2PACL (2-Phase Accumulator Controlled Loop)



➤ Il sistema 2PACL utilizza uno speciale accumulatore per regolare pressione e temperatura della CO₂.



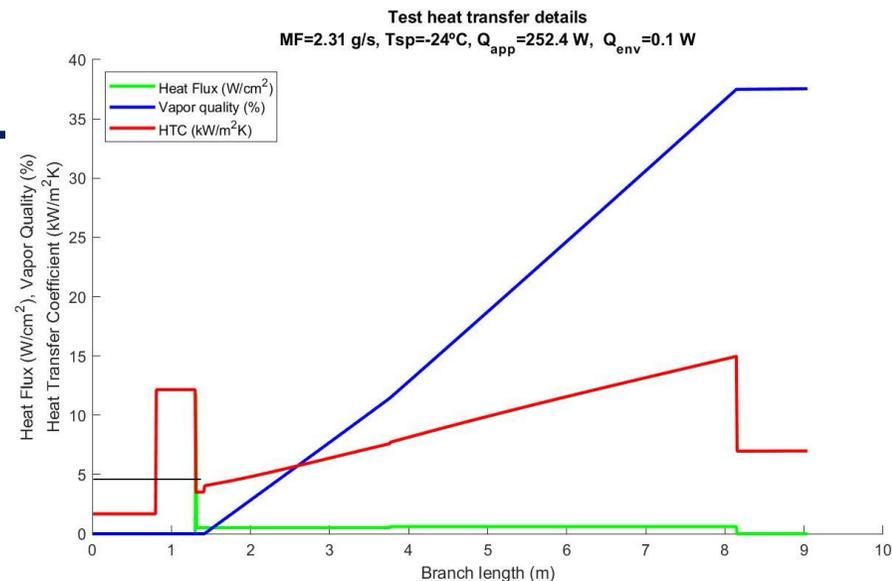
Accumulatore Bifase



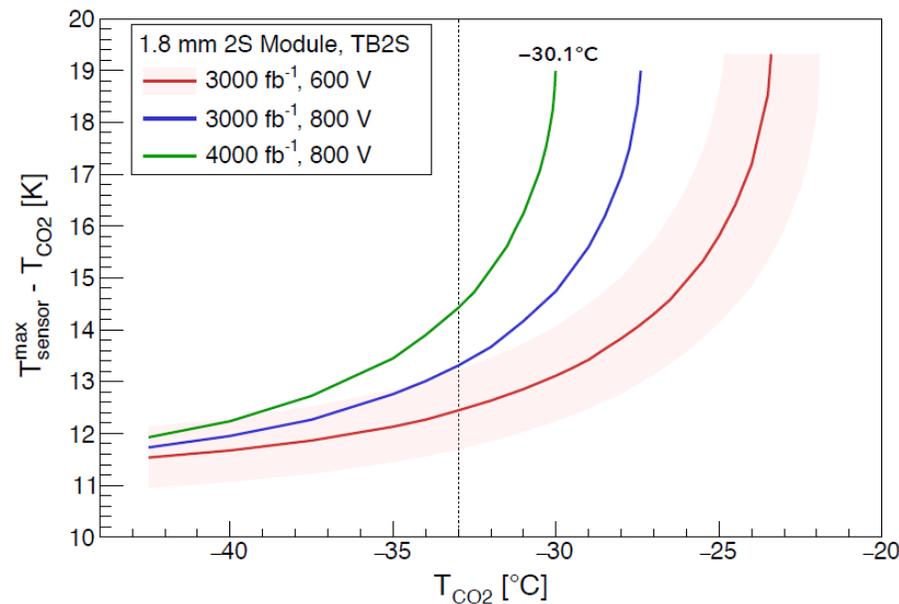
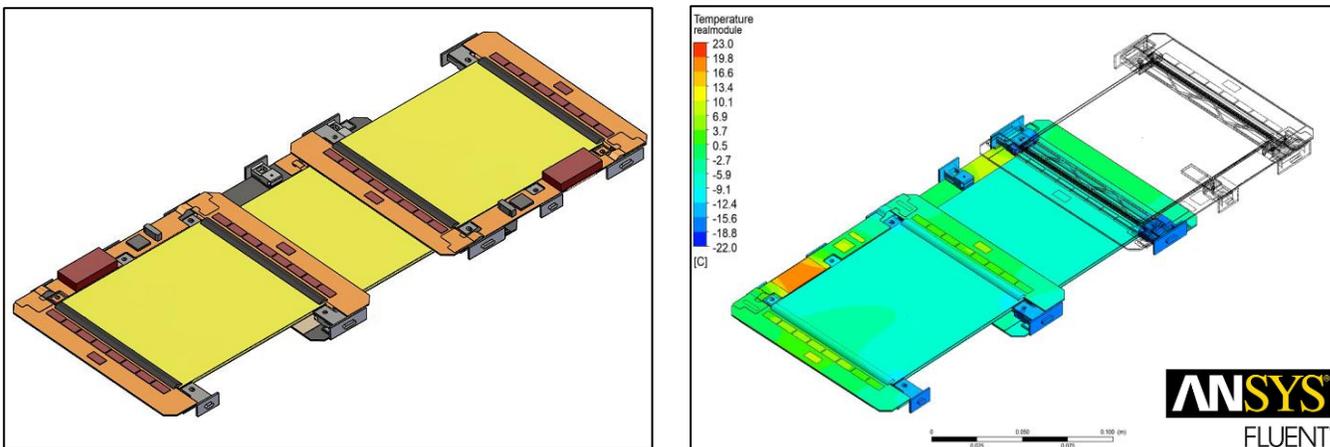
Simulazioni numeriche



- Sono impiegate dai progettisti per guidare il dimensionamento dei vari organi dell'impianto.
- Un software «Multiline» basato sul solver **COBRA**, sviluppato del CERN, consente di simulare il comportamento della CO₂ all'interno delle linee di distribuzione, collettori, capillari ed evaporatori. Fondamentale per studiare l'innesco dell'ebollizione nelle tubazioni e anche prevenire il dryout.
- Il software Fluent della famiglia **Ansys** è impiegato per studiare le performance termiche dei moduli e predire il thermal runaway.



Risultati ottenuti con COBRA



Risultati ottenuti con ANSYS

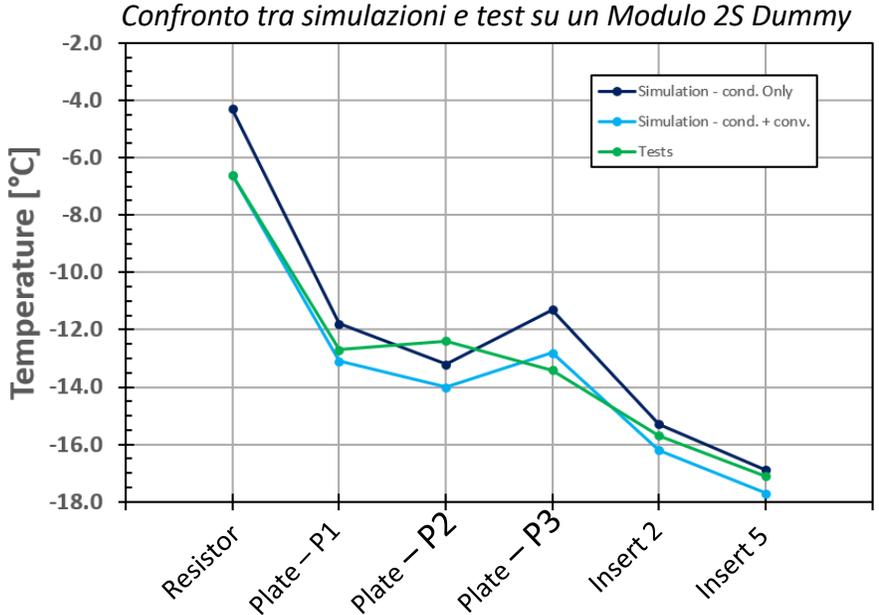


Confronto tra simulazioni e test sperimentali

- I primi test sperimentali sui sub-detector in **scala 1:1** sono in corso presso vari centri di ricerca.
- Il sistema di raffreddamento basato su CO2 bifase è in grado di garantire le **performance richieste**.
- Questi test sono fondamentali al fine di **validare** tutti i risultati ottenuti con i modelli numerici.
- I dati ottenuti fino ad ora tra sperimentazione e test sono in **ottimo accordo**.



Prototipo di DEE per il TEDD a Lione



Prototipo di Ladder per il TB2S al CERN





- Il nuovo tracciatore di CMS per fase 2 necessita di un efficiente sistema di raffreddamento per poter dissipare la **grande quantità di potenza termica** prodotta dai componenti elettrici ed elettronici presenti all'interno del proprio volume.
- Si è scelto di basare il funzionamento dell'impianto sull'utilizzo di **anidride carbonica bifase**, per avere elevati coefficienti di scambio termico, riduzione di materiale all'interno del volume di tracciamento ed inoltre il vantaggio di operare con un fluido noto, abbondante e non eccessivamente pericoloso in caso di perdite.
- Il dimensionamento dei componenti dell'impianto avviene utilizzando diversi **software di calcolo**, sia commerciali, quali Ansys, sia sviluppati appositamente presso il CERN come ad esempio Cobra, al fine di poter studiare e prevenire alcune problematiche specifiche come il thermal runaway o il dryout della CO₂.
- Il **confronto con test sperimentali** risulta comunque di fondamentale importanza. Alcuni prototipi di sub-detector sono stati costruiti e testati dal punto di vista termico, ottenendo risultati molto consistenti con le simulazioni.



GRAZIE PER L'ATTENZIONE

Per domande, curiosità, commenti:

cristiano.turrioni@pg.infn.it