

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

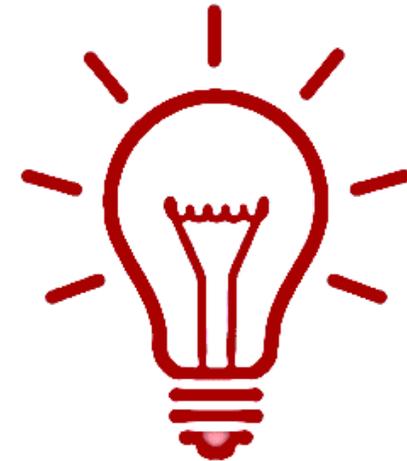
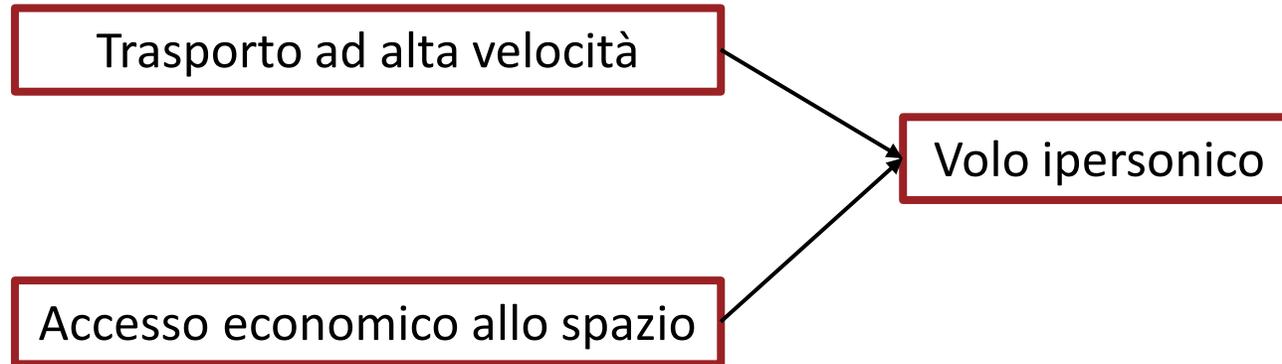
Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

***Relazione per la prova finale  
«Sistemi di controllo vettoriale della  
spinta in velivoli propulsi da scramjet»***

Tutor universitario: Prof. Ernesto Benini

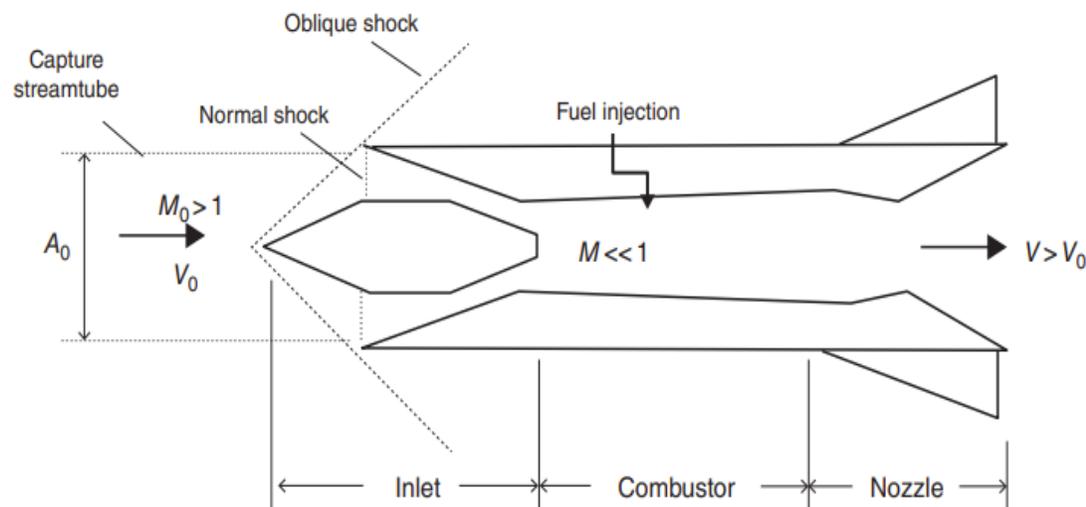
Laureando: *Diego Ciampà*

Padova, 29/09/2023



- Che cos'è e come funziona un motore scramjet?
- Che cosa si intende per controllo vettoriale della spinta (TVC)?
- Quali sono i principali sistemi TVC che potrebbero essere implementati in velivoli propulsi da scramjet?

**Motore ramjet**  
(applicazioni con Mach compreso tra 1 e 5)



**Sfide tecnologiche:**

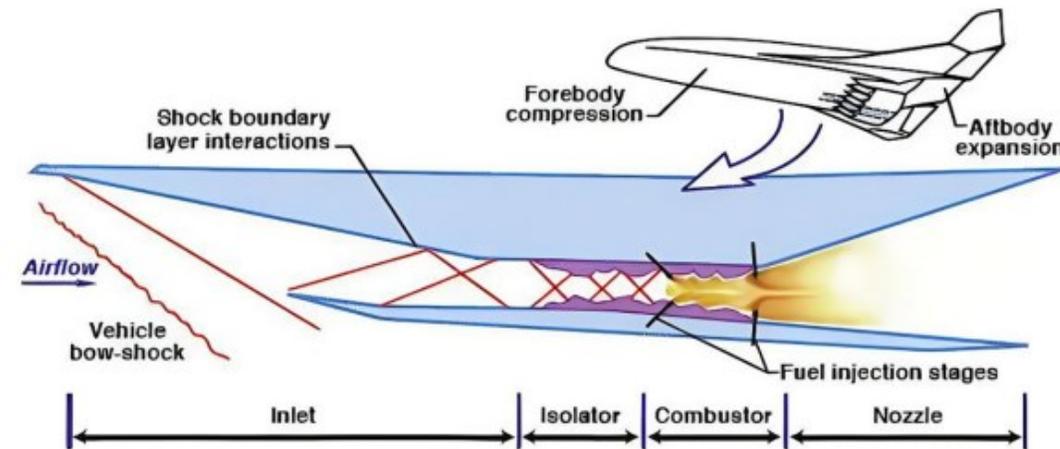
- Combustione in un intervallo di tempo ristretto
- Materiali
- Veicolo portante
- Laboratori hi-tech

**Motore scramjet**  
(applicazioni con Mach maggiore di 5)

## Cenni storici

- Anni '50: inizio ricerca su scramjet da parte della NASA
- 1992: lancio veicolo franco-russo propulso da scramjet
- 1998: la joint venture tra NASA e CIAM lancia un veicolo alimentato da scramjet
- 2004: l'X-43 della NASA supera Mach 6
- 2005: l'India lancia un prototipo di veicolo ipersonico alimentato da scramjet
- 2014: la Cina effettua il primo test sul DF-ZF (hypersonic glide vehicle)

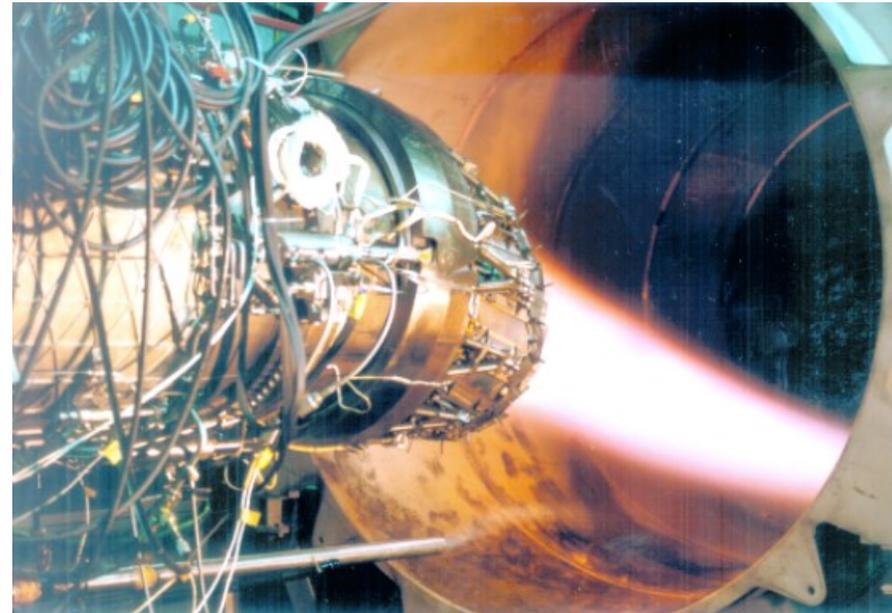
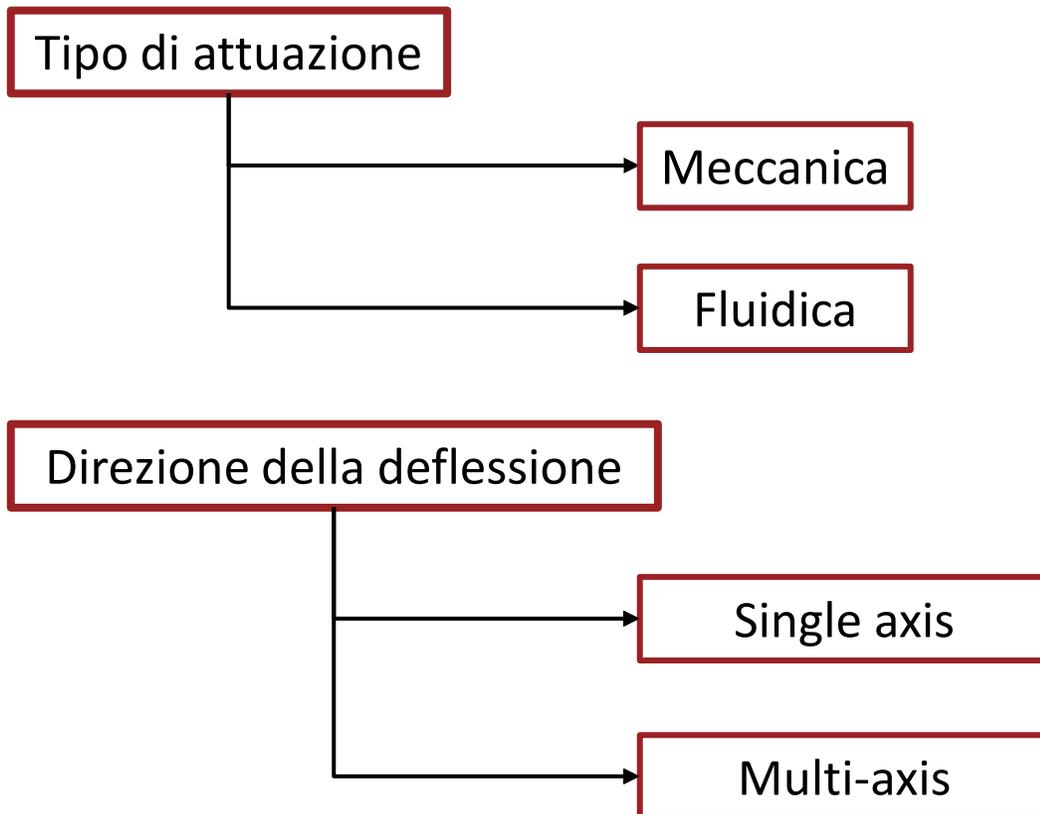
Il **motore scramjet** può essere considerato l'evoluzione della tecnologia ramjet in termini di raggiungimento di velocità maggiori tramite l'elaborazione di un flusso supersonico in ingresso alla camera di combustione.



Quattro componenti fondamentali:

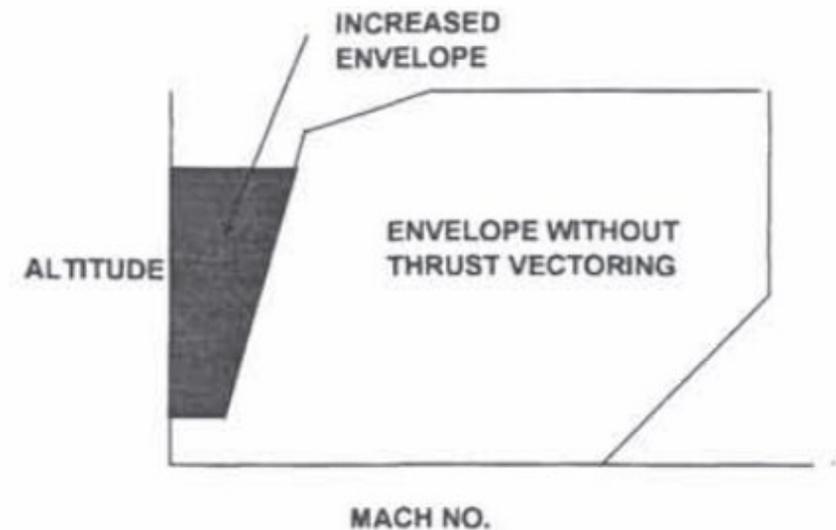
- Presa d'aria (inlet)
- Isolator
- Camera di combustione (combustor)
- Ugello (nozzle)

Con **controllo vettoriale della spinta** (o thrust vectoring, o thrust vector control, TVC) si intende l'abilità di un velivolo o di un razzo di controllare la direzione della spinta generata dal motore.



L'implementazione del controllo vettoriale della spinta garantisce un'ampia gamma di vantaggi, tra i quali figurano:

1. Miglioramento delle prestazioni in condizioni di volo convenzionali;
2. Estensione dell'inviluppo di volo;
3. Aumento della sicurezza;
4. Riduzione dei controlli di volo.



## Sistemi di tipo meccanico

- Problematiche termomeccaniche
- Elevati pesi e ingombri
- Difficoltà d'integrazione
- Maggiore manutenzione
- Maggiore suscettibilità alla rilevazione

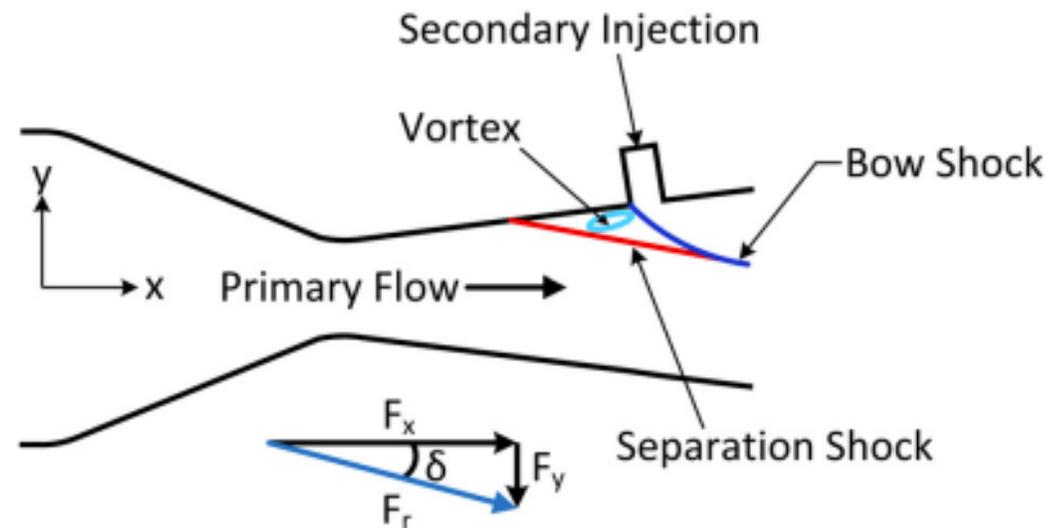
## Sistemi di tipo fluidico

| Vantaggi  | Svantaggi  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Maggiore semplicità</li> <li>- Minori pesi e ingombri</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Generazione onde d'urto</li> <li>- Limitati angoli di deflessione della spinta</li> </ul> |

La **tecnica SVC** viene implementata utilizzando un'iniezione di fluido secondaria trasversale. Tale iniezione secondaria si comporta come un ostacolo posto sulla traiettoria del flusso primario causando una variazione di quantità di moto di quest'ultimo.

Fattori d'influenza:

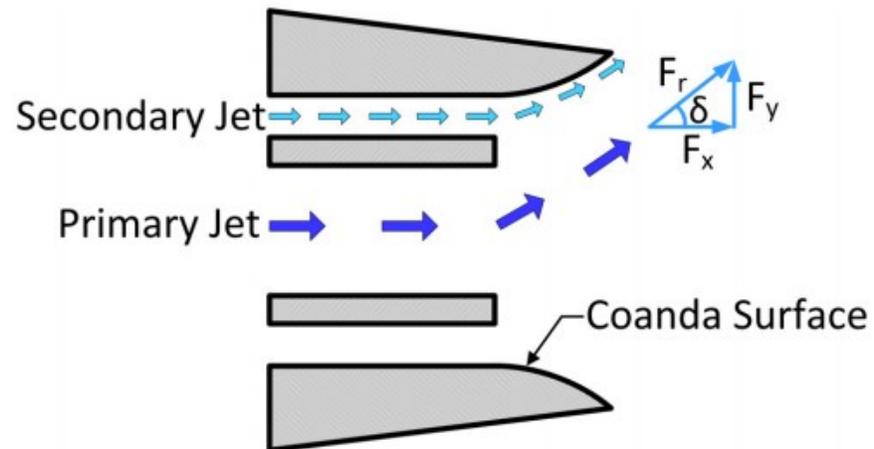
- Posizione iniettore
- Geometria iniettore
- $J = \frac{(\rho u^2)_s}{(\rho u^2)_p}$  (1)
- NPR (2)



(1) I pedici  $s$  e  $p$  sono rispettivamente riferiti a flusso secondario e primario,  $\rho$  è la densità e  $u$  è la velocità

(2) L' NPR è il rapporto tra la pressione di ristagno del flusso primario e la pressione di ristagno del flusso indisturbato

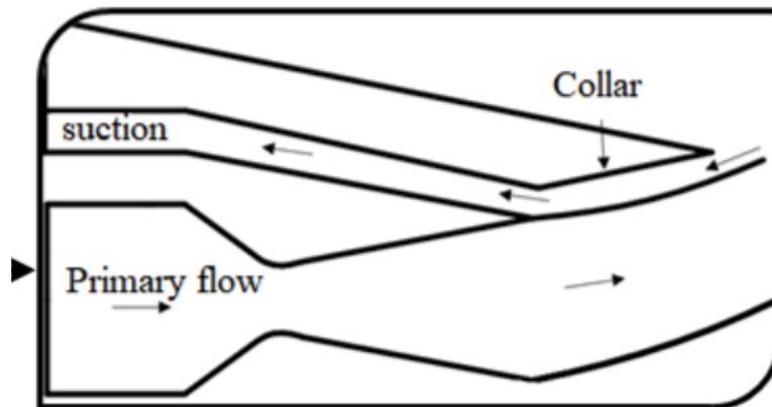
La **tecnica co-flow** garantisce il controllo vettoriale della spinta sfruttando l'effetto Coanda <sup>(3)</sup>, il quale permette di variare la direzione del flusso in uscita.



Questa tecnica non è prediletta per applicazioni in regime ipersonico in quanto prove sperimentali mostrano che permetterebbe di raggiungere prestazioni inferiori al metodo SVC.

(3) L'effetto Coanda è la tendenza di un fluido ad aderire ad una superficie solida e a seguirne la curvatura

La **tecnica CFTV**, anch'essa basata sull'effetto Coanda, sfrutta la presenza di un collare e di una sorgente di aspirazione per generare un gradiente di pressione trasversale responsabile della deflessione del flusso.



Fattori d'influenza:

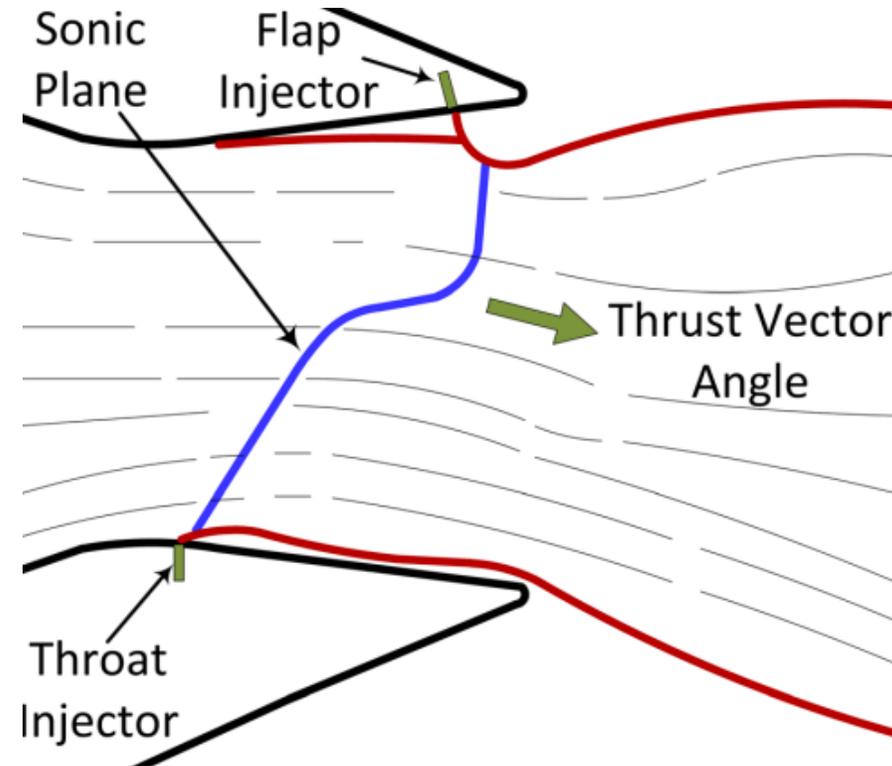
- Geometria collare
- NPR
- Ampiezza intercapedine

La tecnica CFTV risulta essere simile alla tecnica co-flow ma, rispetto a quest'ultima, ha dimostrato di permettere l'ottenimento di simili angoli di deflessione del flusso primario a parità di geometria utilizzando una minore quantità di flusso secondario.

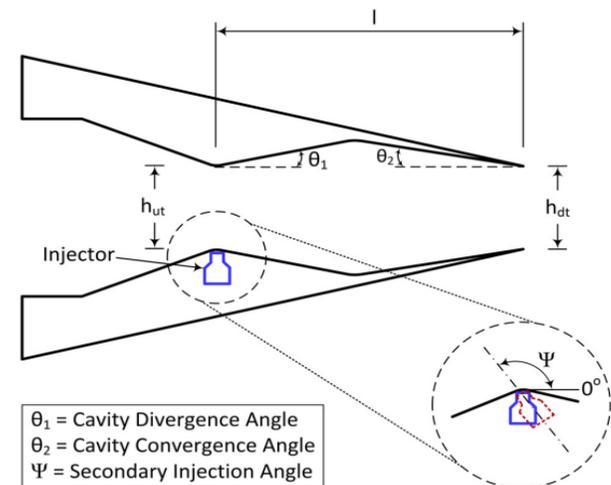
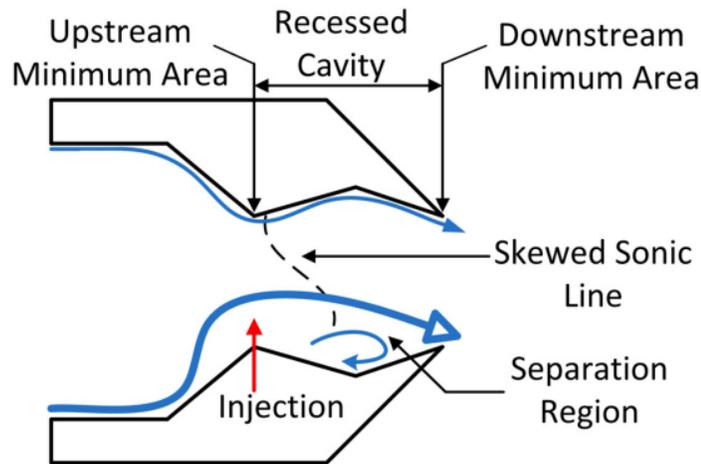
Il principio su cui si basa la **tecnica TS** è lo spostamento della sezione di gola dell'ugello, realizzato tramite un'iniezione asimmetrica di un flusso secondario.



- Può essere implementata solamente nel caso in cui nell'ugello si verifichi una transizione da regime subsonico a supersonico
- Efficienza maggiore rispetto alla tecnica SVC
- Efficienza indipendente da NPR
- Angolo di deflessione della spinta limitato



La **tecnica DNT** è basata su un ugello che presenta due sezioni di passaggio minime separate da una cavità.



Fattori d'influenza:

- Lunghezza della cavità
- CDA (cavity divergence angle)
- CCA (cavity convergence angle)

- Che cos'è e come funziona un motore scramjet? ✓
- Che cosa si intende per controllo vettoriale della spinta (TVC)? ✓
- Quali sono i principali sistemi TVC che potrebbero essere implementati in velivoli propulsi da scramjet? ✓

|   | Vantaggi  | Svantaggi  |
|---|---|--|
| SVC   | Elevati angoli di deflessione                       | Elevate perdite  |
| Metodi basati su effetto Coanda<br>(co-flow e CFTV) | Buoni angoli di deflessione                         | Degrado performance con<br>passaggio da regime supersonico<br>a ipersonico   |
| TS  | Buona efficienza                                    | - Piccoli angoli di deflessione<br>- Ugello con conformazione<br>particolare |
| DNT   | - Buoni angoli di deflessione<br>- Buona efficienza | Ugello con conformazione<br>particolare                                      |



1. Choubey, Gautam, and Manvendra Tiwari. "Scramjet Combustion. *Fundamentals and Advances*". Oxford, UK, Butterworth-Heinemann, 2022
2. Musielak, Dora. "Scramjet Propulsion: a Practical Introduction". Hoboken, USA, John Wiley & Sons, Incorporated, 2023
3. Michael S. Francis. "Air Vehicle Management with Integrated Thrust-Vector Control". AIAA JOURNAL Vol. 56, No. 12, pp. 4640-5045, December 2018 . <https://doi.org/10.2514/1.J056768>
4. Daniel Icaza. "Thrust Vectoring Nozzle for Modern Military Aircraft". Defense Technical Information Center, 2000 . [https://www.icas.org/ICAS\\_ARCHIVE/ICAS2000/PAPERS/RESERVED/ICA0534.PDF](https://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2000/PAPERS/RESERVED/ICA0534.PDF)
5. Abel Jiménez, Daniel Icaza. "Thrust Vectoring System Control Concept". IFAC Proceedings Volumes, Volume 33, Issue 6, pp. 1488-1499, 2000 . [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)35476-9](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)35476-9)
6. Deere, K. A., "Summary of Fluidic Thrust Vectoring Research Conducted at NASA Langley Research Center". 21st AIAA Applied Aerodynamics Conference, Orlando, FL, AIAA Paper 2003-3800, pp. 1-18, June 2003. <https://doi.org/10.2514/6.2003-3800>
7. C.A. Hunter and K.A. Deere. "Computational Investigation of Fluidic Counterflow Thrust Vectoring". 35th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit / Los Angeles, CA, AIAA 99-2669, pp. 1-13, June 20-23, 1999. <https://doi.org/10.2514/6.1999-2669>
8. Afridi, S.; Khan, T.A.; Shah, S.I.A.; Shams, T.A.; Mohiuddin, K.; Kukulka, D.J. "Techniques of Fluidic Thrust Vectoring in Jet Engine Nozzles: A Review". Energies, 16, 5721, pp. 1-33, 2023. <https://doi.org/10.3390/en16155721>
9. Hilbert V. Pelt, Andrew J. Neely and John Young, "A System Study On Fluidic Thrust Vectoring". 20th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, AIAA Paper 2015-3565, pp. 1-9, July 2015. <https://doi.org/10.2514/6.2015-3565>
10. Montes C. F., and Davis, R. L. "Two-Dimensional Supersonic Thrust Vectoring Using Staggered Ramps". ASME. J. Eng. Gas Turbines Power, Volume 139, Issue 8, pp. 1-7, August 2017. <https://doi.org/10.1115/1.4035848>
11. Kexin Wu, Tae Ho Kim, Heuy Dong Kim. "Theoretical and Numerical Analyses of Aerodynamic Characteristics on Shock Vector Control". Journal of Aerospace Engineering, Volume 33, Issue 5, 04020050 (pp. 1-26), May 2020. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AS.1943-5525.0001169](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0001169)
12. Hambidge, C., Iverson, W., Steuer, D. "Investigation of fluidic thrust vectoring for scramjets". Exp Fluids 64:75, pp. 1-10, 2023. <https://doi.org/10.1007/s00348-023-03607-w>
13. Jun-Young Heo and Hong-Gye Sung. "Fluidic Thrust-Vector Control of Supersonic Jet Using Coflow Injection". Journal of Propulsion and Power Vol. 28, No. 4, pp. 858-861, July–August 2012. <https://doi.org/10.2514/1.B34266>
14. McGilvray, Matthew & Neely, Andrew & Hambidge, Christopher & Iverson, William & Hermann, Tobias & Doherty, Luke. "Fundamental Experiments of Fluidic Thrust Vectoring for a Hypersonic Vehicle", AIAA Scitech 2019 Forum, AIAA paper 2019-1680, pp. 1-14, 2019. <https://doi.org/10.2514/6.2019-1680>
15. Das, A. K., Acharyya, K., Mankodi, T. K., and Saha, U. K. "Fluidic Thrust Vector Control of Aerospace Vehicles: State-of-the-Art Review and Future Prospects." ASME. J. Fluids Eng., 080801 (pp. 1-29), August 2023. <https://doi.org/10.1115/1.4062109>
16. Marshall LA, Bahm C, Corpening GF, Sherrill R. "Overview with results and lessons learned of the X-43A Mach 10 flight". AIAA/CIRA 13th international space planes and hypersonics systems and technologies conference, AIAA 2005-3336, pp. 1-23, Italy, 2005. <https://doi.org/10.2514/6.2005-3336>
17. Chambers, Geoffrey. "An Exploratory Analysis of the Chinese Hypersonics Research Landscape". Montgomery, AL: China Aerospace Studies Institute, pp. 1-96, 2022. <https://www.airuniversity.af.edu/Portals/10/CASI/documents/Research/Other-Topics/2022-12-05%20Hypersonics%20Landscape.pdf>
18. Maxwell Goldstein, "Chinese Hypersonic Vehicle Programmes", May 2023. <https://gredynamics.com/chinese-hypersonic-vehicle-programmes/>

# Grazie per l'attenzione