Associazione Politecnica Italiana

in collaborazione con

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA ELETTRICA, GESTIONALE E MECCANICA

dell'Università degli Studi di Udine

Lockheed F-104 Starfighter

Tecnologia ed Eccellenza

di un Mito dell'Aeronautica Militare

13 Settembre 2014

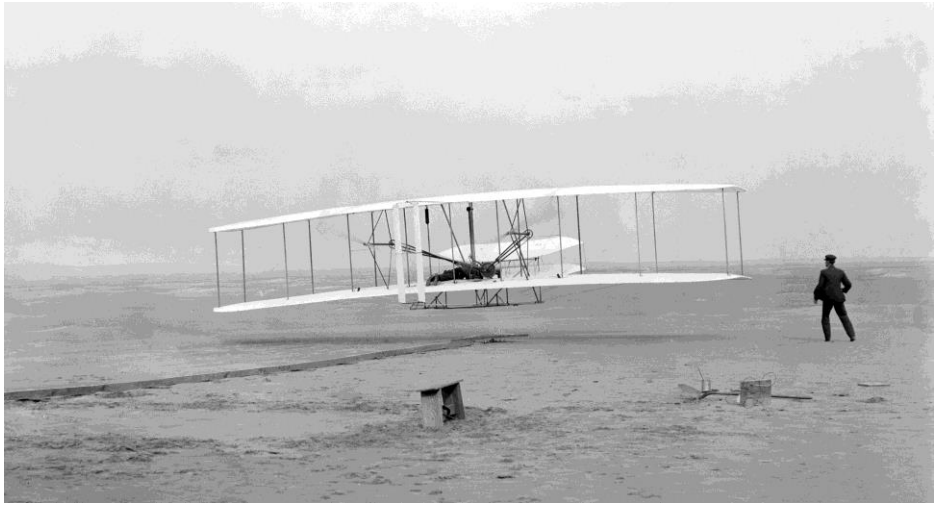
Alcune considerazioni introduttive

Earth is the cradle of mankind,
but man cannot live in the cradle forever

La terra è la culla dell'umanità,
ma l'uomo non puo' vivere nella culla per sempre

Kostantin E. Tsiolkovski, 1857-1935
scienziato russo, pionere dell'ingegneria spaziale

Aeronautica: un secolo di storia



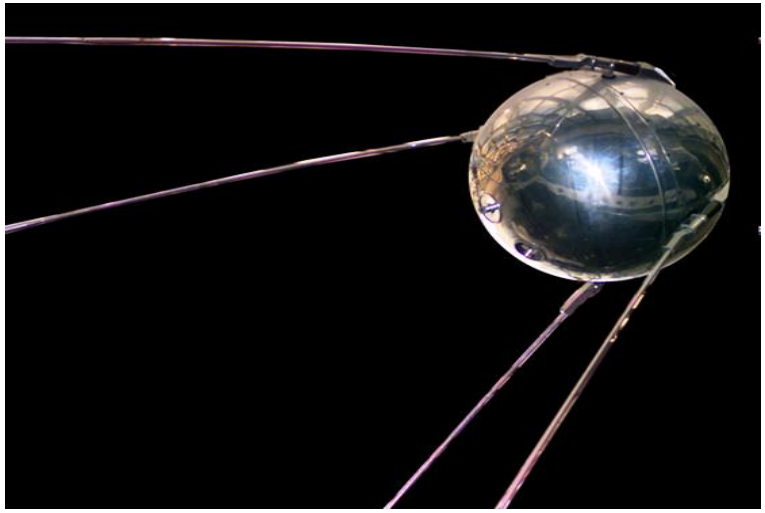
17 dicembre 1903: Flyer

Peso al decollo:	350 kg
Passeggeri:	1
Autonomia:	150 m

27 aprile 2005: Airbus A380

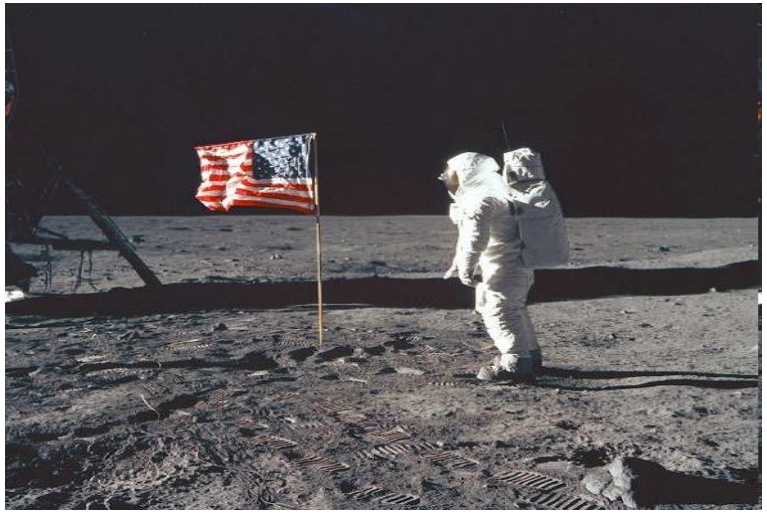
Peso al decollo:	660’000 kg
Passeggeri :	525-853
Autonomia :	15’100 km

Lo spazio: un decennio di storia



4 ottobre 1957: Sputnik

Massa:	83 kg
Diametro:	0.58 m



20 luglio 1969: l'uomo è sulla luna

Peso al decollo:	3.038.000 kg
Altezza/diametro:	111/10 m

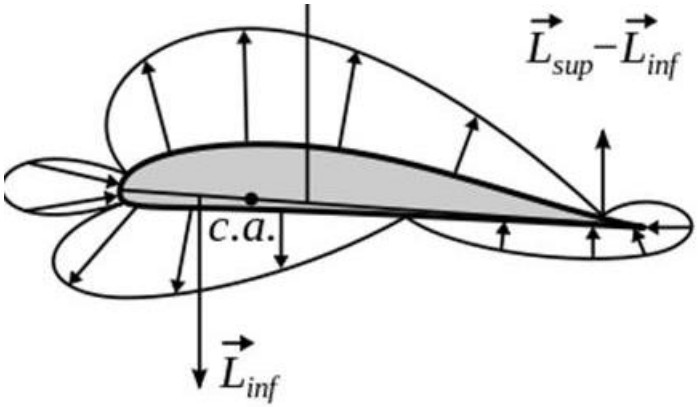
Il futuro dello spazio: nuovi sistemi di lancio

Alcune considerazioni introduttive

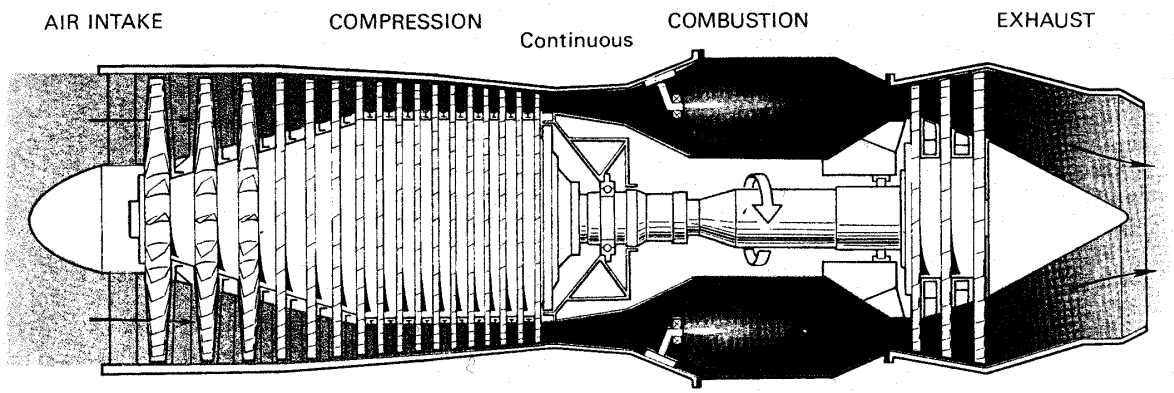
Perché l'aereo vola ?

La portanza, la forza che consente ad un velivolo di staccarsi da terra e di raggiungere quote elevate, dipende dalla velocità del velivolo rispetto all'aria e dalla configurazione dell'ala. Superficie e inclinazione dell'ala, che vengono modificate attraverso il movimento degli elementi mobili (flap e slat, o ipersostentatori) posti alle estremità anteriori (bordo d'attacco) e posteriori (bordo di uscita).
A velocità costante, l'incremento della curvatura dell'ala porta ad un aumento della portanza. La densità dell'aria diminuisce con l'aumentare della quota di volo (all'incirca si dimezza ogni 5 km). Aria a densità piu' bassa delle alte quote, determina una minore resistenza aerodinamica ma richiede velocità piu' elevata per garantire la portanza.

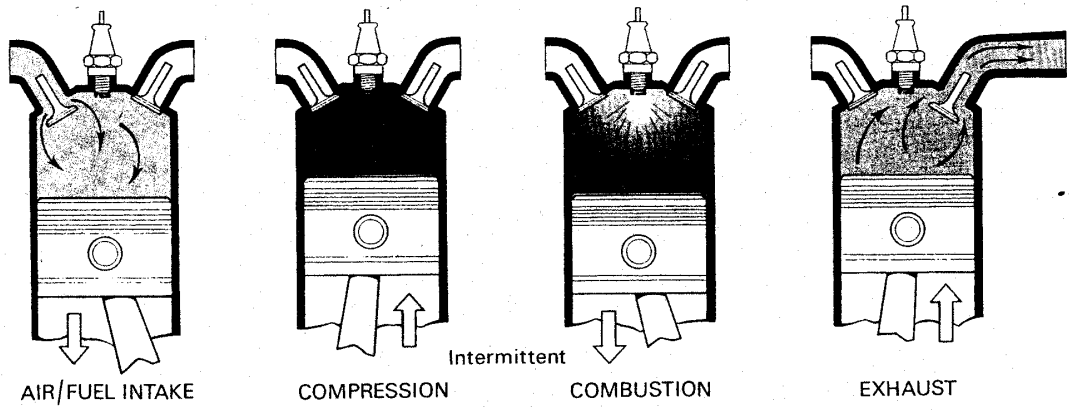
$L \sim \rho V^2 S$



I motori nella storia dell'aeronautica



Il turboreattore semplice



Il motore a combustione interna, alternativo

L’evoluzione del turboreattore

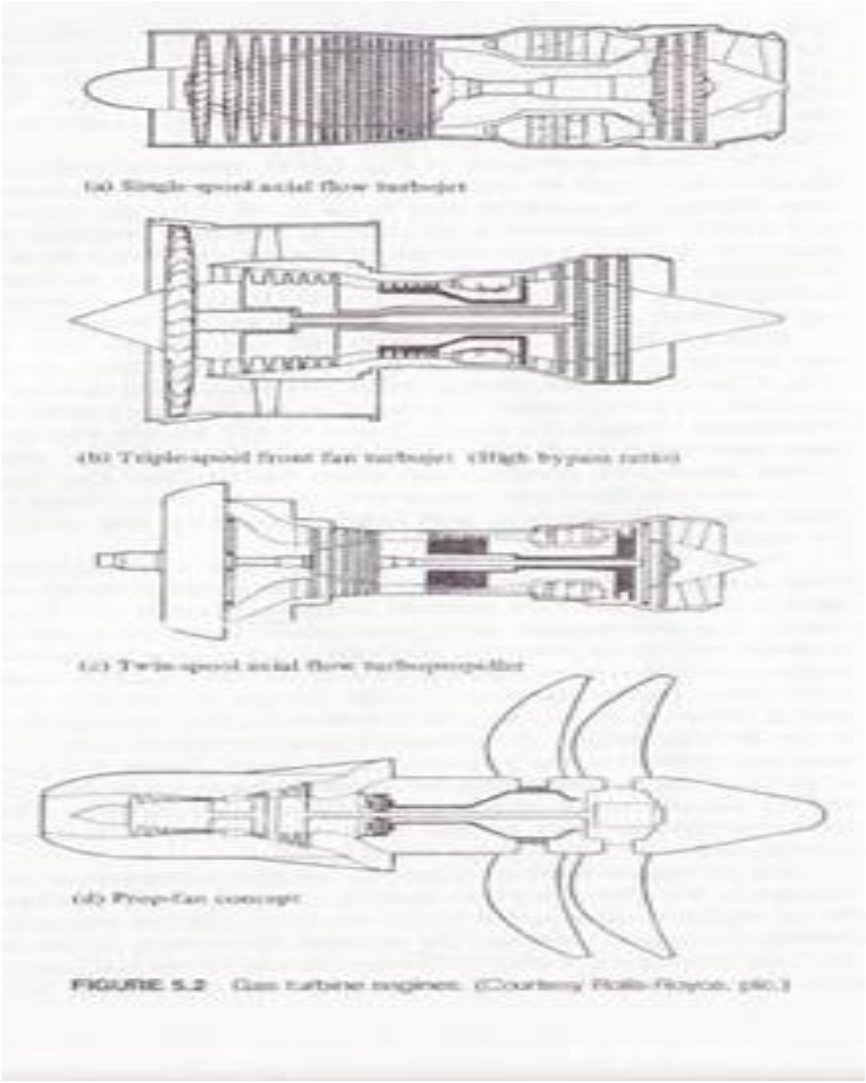
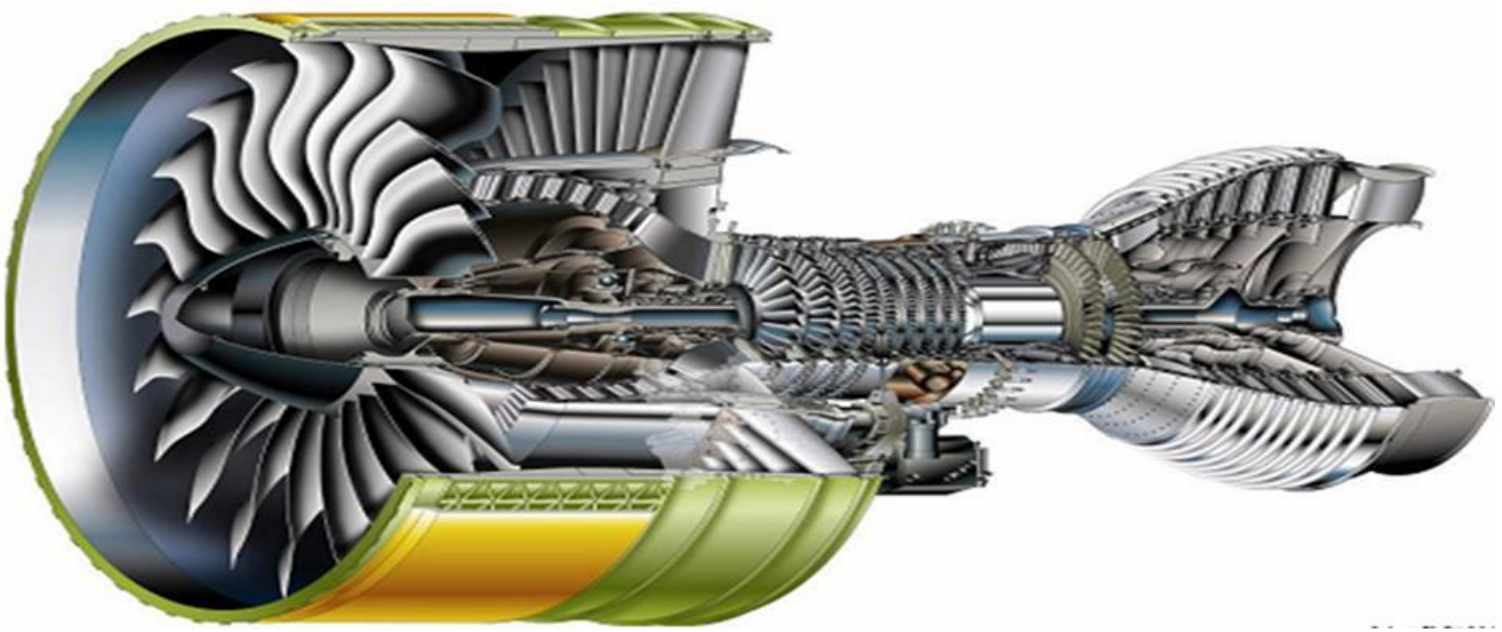


FIGURE 5.2 Gas turbine engines. (Courtesy Rolls-Royce, plc.)

Il motore turbofan



Sommario

1. Introduzione storica al Lockheed F-104 Starfighter
2. Breve introduzione tecnica al volo supersonico
3. Le specifiche tecniche piu' peculiari
4. Le caratteristiche generali e le prestazioni
5. Il sistema propulsivo del velivolo: il motore GE - J79
6. Le varianti nelle Forze Aeree che lo hanno adottato
7. L'F-104 nell'Aeronautica Militare Italiana
8. Le industrie produttrici, i costi del velivolo
9. Galleria fotografica dell'F-104 Starfighter
10. L'eredità dell'F-104: breve rassegna di moderni velivoli militari

Introduzione storica
al Lockeed F-104 Starfighter

Peculiarità

- F-104 Starfighter: *"cacciatore di stelle"*
- E' il primo caccia a raggiungere *Mach 2*, in un tempo in cui quasi tutti i velivoli erano subsonici. Ha lasciato traccia nella storia dell'Aviazione per le sue soluzioni avveniristiche
- Definito *"missile pilotato"* è stato il primo aereo da caccia a detenere simultaneamente i record di velocità e di quota
- Ha avuto una *carriera lunghissima*. E' stato adottato dalla NASA come addestratore per astronauti e come velivolo sperimentale
- E' stato ben conosciuto in Italia, dove è entrato in servizio nel marzo 1962. *L'Aeronautica Militare Italiana è stata l'ultima a dismettere, nel 2005, questo straordinario velivolo*, divenuto ormai obsoleto

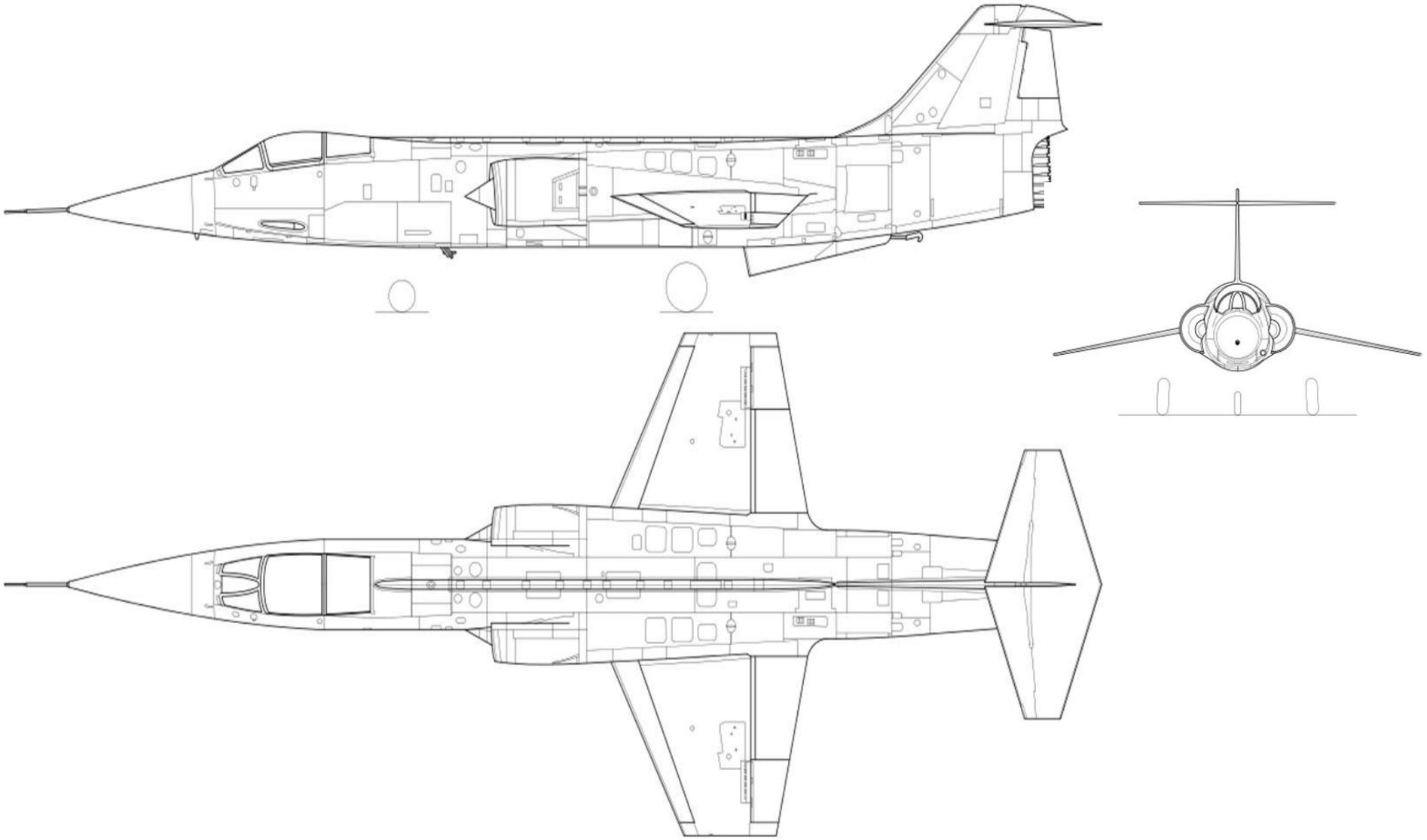
La genesi e le caratteristiche del progetto

- La guerra di Corea evidenzia l'esigenza di surclassare i MiG sovietici. Nel marzo del 1952 la Lockheed inizia la progettazione di un *caccia ad alte prestazioni*, sotto la guida del progettista Kelly Johnson

- Dopo alcuni studi preliminari nasce la configurazione del velivolo: *ala piccola* (l'aereo assomiglia a un missile), a freccia, contraddicendo il favore dell'USAF per l'ala a delta. L'ala a freccia tende a stallare a velocità subsonica e si introducono *flaps con soffiaggio d'aria proveniente dal motore*. Piani di coda alti, capaci di permettere il controllo anche a velocità supersonica. *Piani di coda totalmente mobili* e sistema per il controllo della stabilità longitudinale con sistemi *"kicker-shaker"* per avvisare il pilota sullo stallo. La fusoliera lunga, con pesi lontani dal baricentro, e le ali piccole, pongono seri *problemi di stabilità*. *Sedile eiettabile verso il basso*. I coni delle prese d'aria non c'erano perché il motore (J65) non avrebbe potuto portare il velivolo a Mach 2

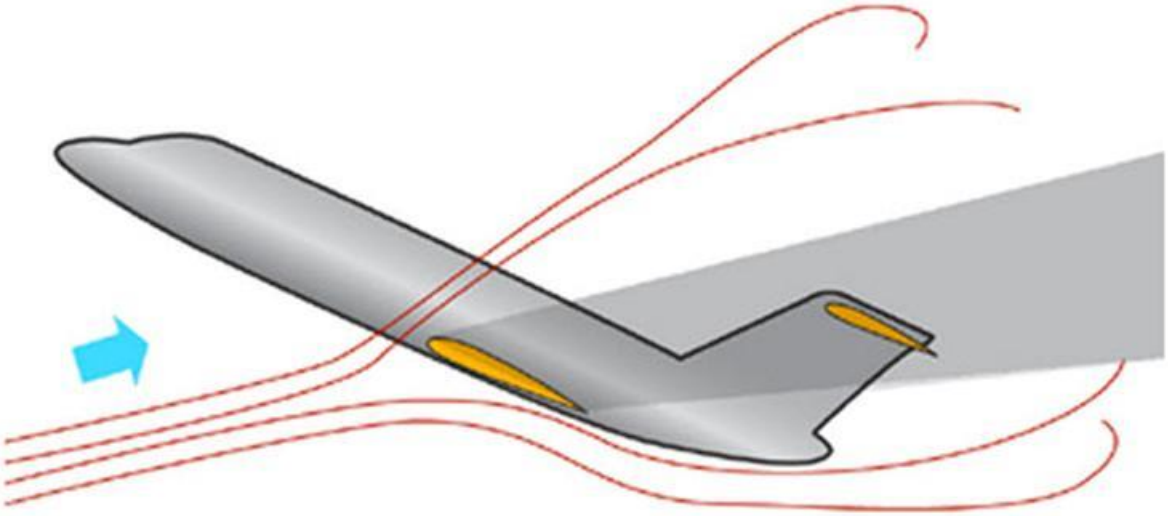
Introduzione storica al Lockheed F-104 Starfighter

L’architettura del velivolo



50

I problemi di stabilità



Prestazioni eccezionali

- L'ala piccola consente velocità di *rotazione di 180 gradi al secondo*. Serbatoi alle estremità alari riducono l'accoppiamento inerziale; il timone verticale tende a comportarsi come una sorta di alettone e *quale compensazione si adotta il diedro negativo delle ali*. L'ala è molto sottile, il *bordo d'attacco è una lama*

- Il 12 marzo 1953 l'USAF stipula un contratto con la Lockheed per due prototipi. Il 7 febbraio 1954 viene effettuato il primo volo. Nell'aprile 1955 il primo velivolo arriva alla soglia di Mach 2; il pilota, Joe Ozier, è il primo uomo a raggiungere *Mach 2 a bordo di un velivolo non sperimentale*. Il 16 Febbraio 1956 viene presentato al pubblico con le prese d'aria coperte per non fare vedere la soluzione tecnica adottata

- Il 7 maggio 1958 il Capitano Irwin raggiunge Mach 2.13, e sale a 25.000 m in 4 min e 26 s. *Prestazioni eccezionali* che culminano in altrettanti record mondiali

Percorsi diversi in USA e nel mondo

- I molti problemi, legati all'adozione di *soluzioni d'avanguardia ma tecnicamente molto complesse*, provocano molte perdite umane e di velivoli. Ed è per questo che dei 722 velivoli programmati ne vengono realizzati solo 296; gli altri vengono cancellati dall'USAF

- A metà degli anni '50 si apre il *concorso NATO* per un caccia multiruolo e ognitempo. Tra i 10 candidati vince, inaspettatamente, l'F104 Starfighter. Il 6 Febbraio 1959 viene firmato un contratto per 30 F-104F e il primo lotto di 66 F-104G, poi aumentato a 96 aerei, commissionati alla Lockheed. Altri 210 sarebbero stati prodotti da un consorzio di industrie tedesche

- Poi il Canada, il 2 Luglio 1959, sottoscrive la coproduzione, da parte della *Canadair* Ltd di 200 velivoli, in aggiunta a 38 velivoli in configurazione biposto commissionati alla Lockheed

Il motore

- Nel novembre 1960 il governo giapponese annuncia la scelta a favore dell'F-104. L'aereo viene costruito su licenza da Mitsubishi. La designazione è di F-104J con una declinazione volta alla *intercettazione piu' che all'attacco* poiché il Giappone non aveva "forze armate" ma poteva disporre di sole forze di autodifesa

- Il 2 marzo 1961 si stipula il contratto che coinvolge *FIAT*, con una commessa di 199 velivoli, con i subfornitori Alfa Romeo (per il motore), Piaggio, SACA, SIAI-Marchetti, Aerfer-Macchi, Officine Aeronavali

- *La versione italiana F-104S è la versione piu' potente*. Il motore (J79-GE-19) incrementa la spinta del 13%, con prestazioni ancora superiori in salita

Il motore

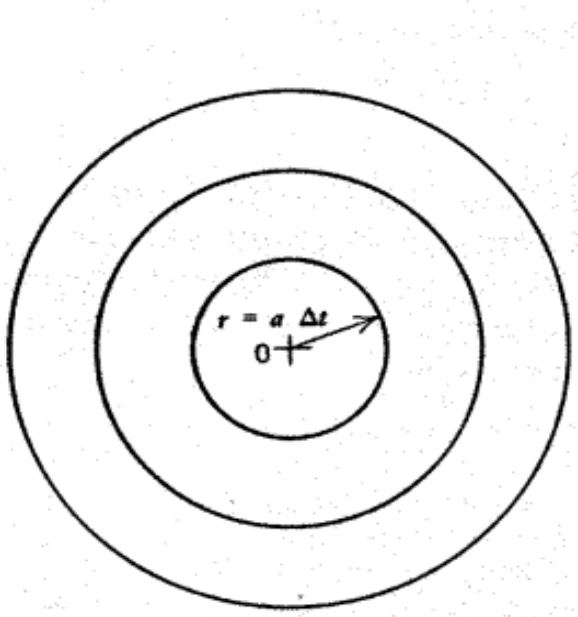
- Si è trattato di un *programma importante*, che ha coinvolto gran parte dell'industria italiana del settore, arrivando a costruire il 65% dell'aereo. FIAT Aviazione (poi Aeritalia) ; Alfa Romeo e Macchi per la costruzione delle fusoliere; Selenia per i missili Sparrow; FIAR per il radar NASARR R-21-G; FIAT e G.E. International per la costruzione del motore. Con post-combustore totalmente modulabile, sistema di controllo combustibile automatico, regolazione automatica dei giri del motore

- L'F-104 Starfighter è stato prodotto in *2579 esemplari*, costruito in 7 nazioni diverse. Solo Phantom e F-16 hanno superato questa soglia nel settore dei caccia da Mach 2

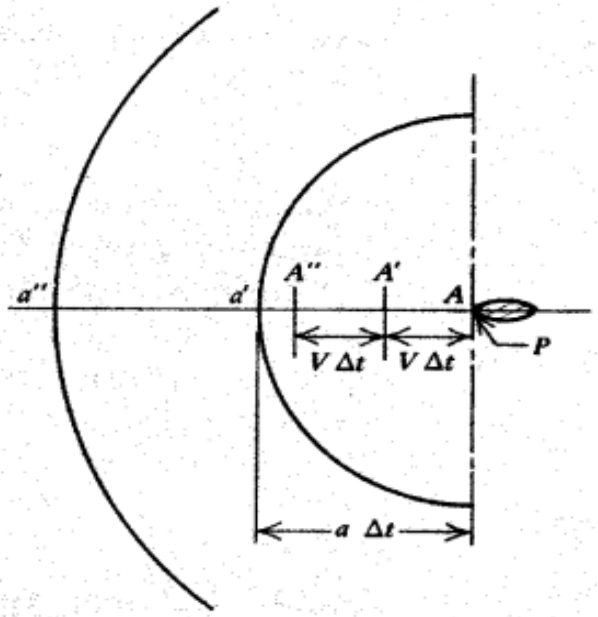
Introduzione tecnica al volo supersonico

Introduzione tecnica al volo supersonico (1/6)

Perturbazioni di pressione in un fluido comprimibile



a



b

Fig. a **: propagazione di onde sonore da una sorgente stazionaria puntiforme**

Fig. b **: perturbazioni di pressione prodotte da un corpo che si muove con velocità subsonica**

Introduzione tecnica al volo supersonico (2/6)

Perturbazioni di pressione in un fluido comprimibile

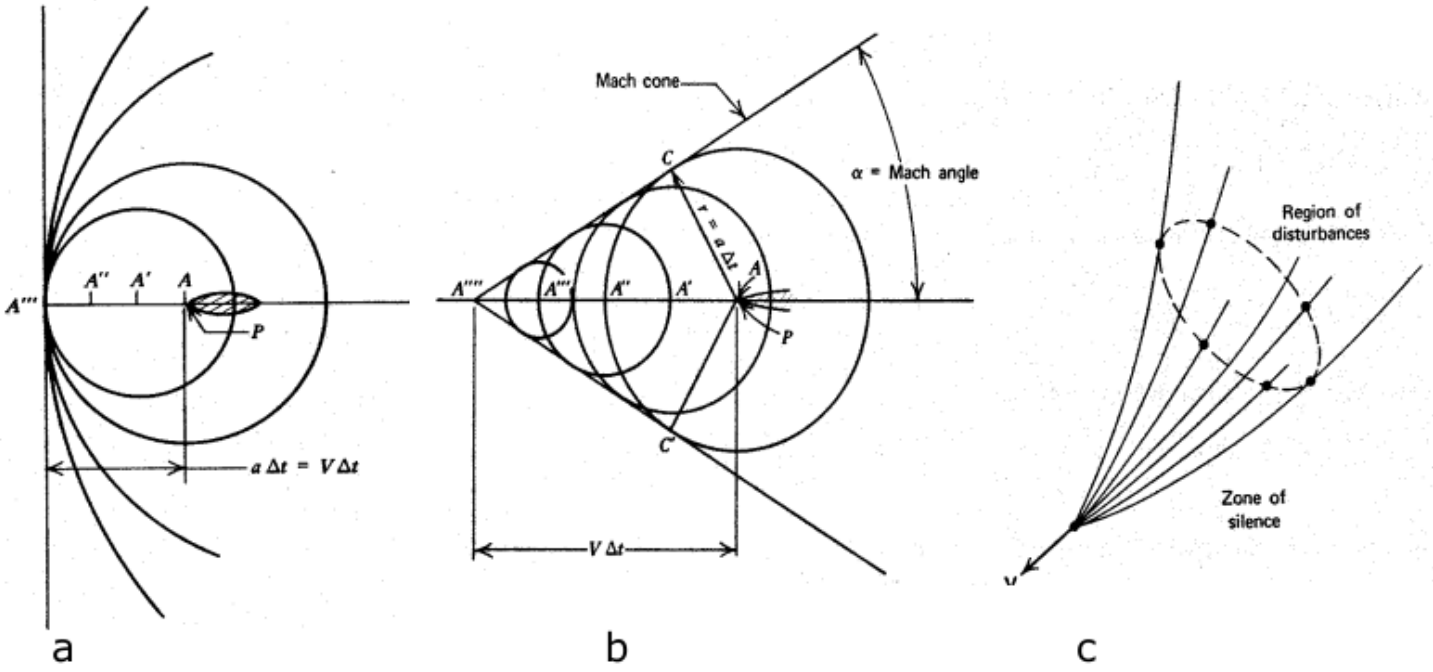


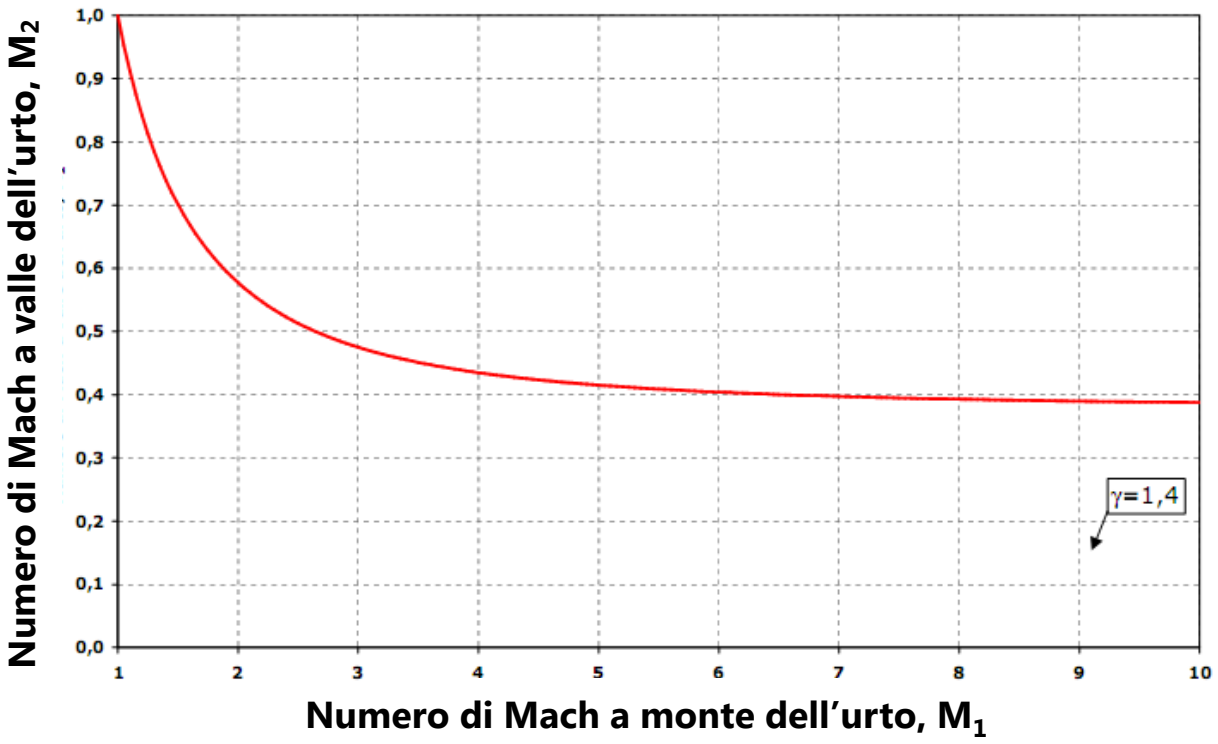
Fig. a **: perturbazioni di pressione prodotte da un corpo che si muove alla velocità del suono**

Fig. b **: perturbazioni di pressione prodotte da un corpo che si muove a velocità supersonica**

Fig. c **: conoide di Mach prodotto da una perturbazione che si muove in una regione non uniforme**

Introduzione tecnica al volo supersonico (3/6)

Le onde d'urto normali

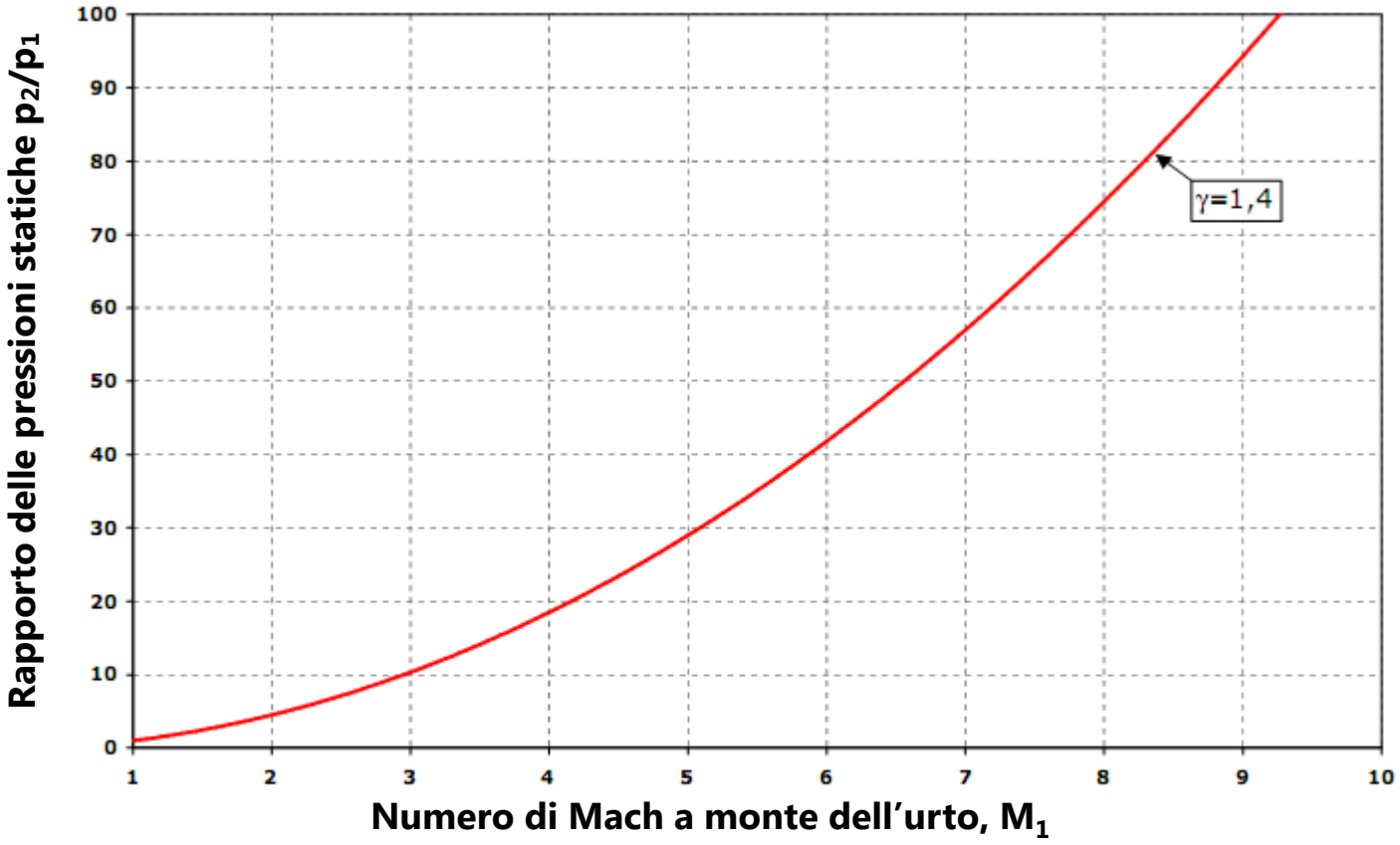


Andamento del numero di Mach a valle dell'urto normale in funzione del numero di Mach incidente.

Attraverso l'onda d'urto si ha: $\mathbf{M_2 < M_1}$ (il flusso decelera e diventa subsonico)

Introduzione tecnica al volo supersonico (4/6)

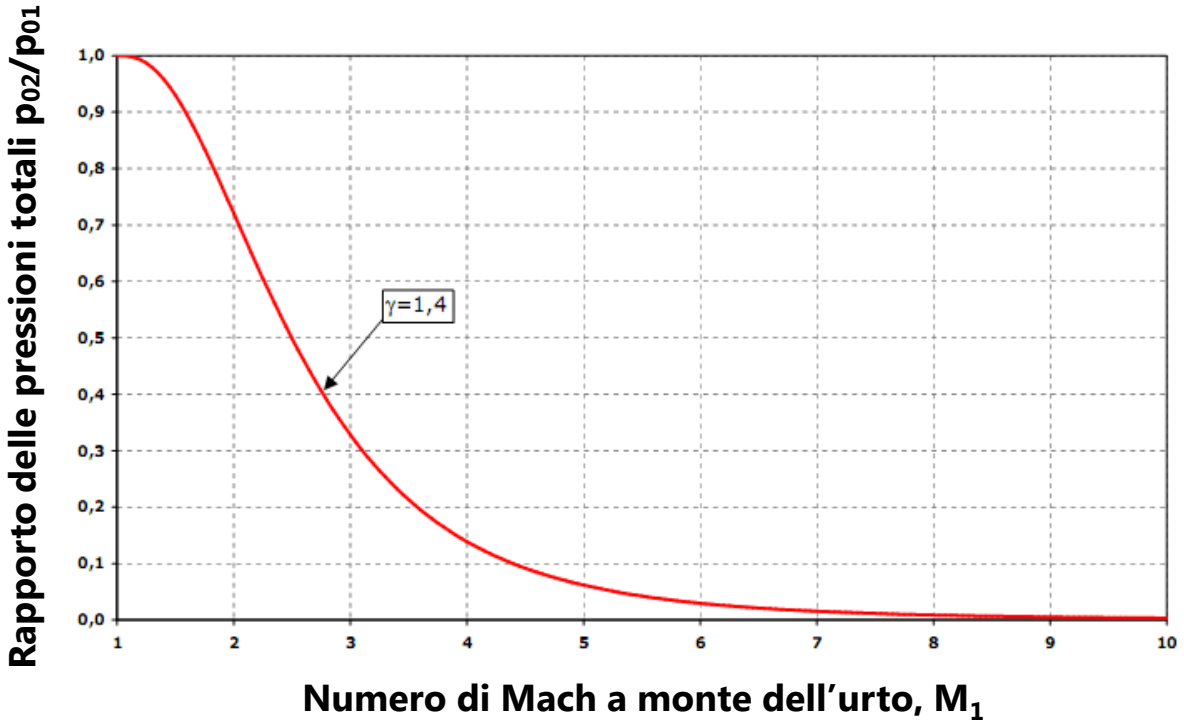
Le onde d'urto normali



Andamento del rapporto delle pressioni statiche a valle e a monte dell'urto normale in funzione del numero di Mach incidente.
Attraverso l'onda d'urto si ha: $p_2 > p_1$ (la pressione statica aumenta)

Introduzione tecnica al volo supersonico (5/6)

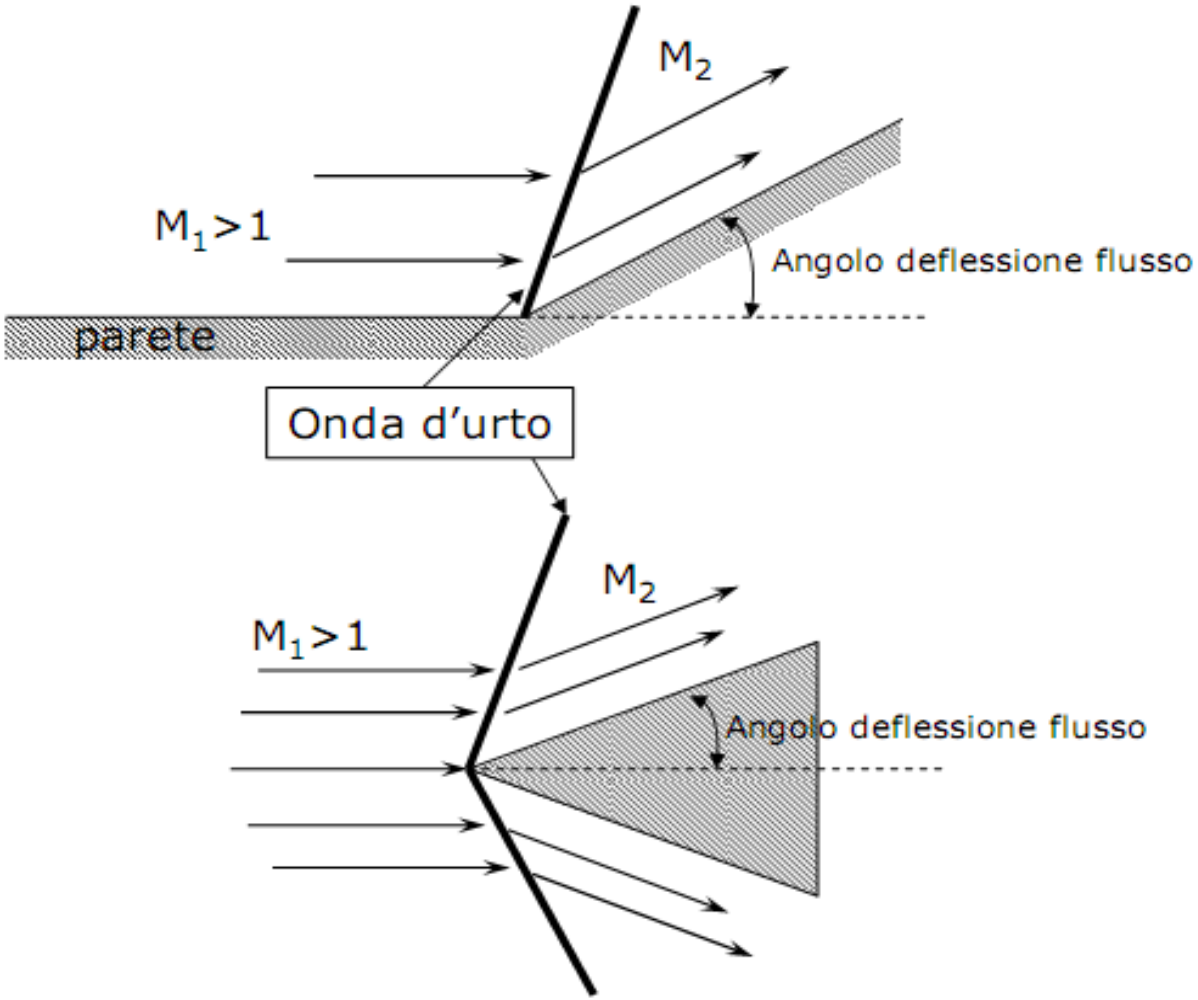
Le onde d'urto normali



Andamento del rapporto delle pressioni totali a valle e a monte dell'urto normale in funzione del numero di Mach incidente.
Attraverso l'onda d'urto si ha: $\mathbf{p_{02} > p_{01}}$ (la pressione totale diminuisce)

Introduzione tecnica al volo supersonico (6/6)

Le onde d'urto oblique



Le specifiche tecniche piu’ peculiari

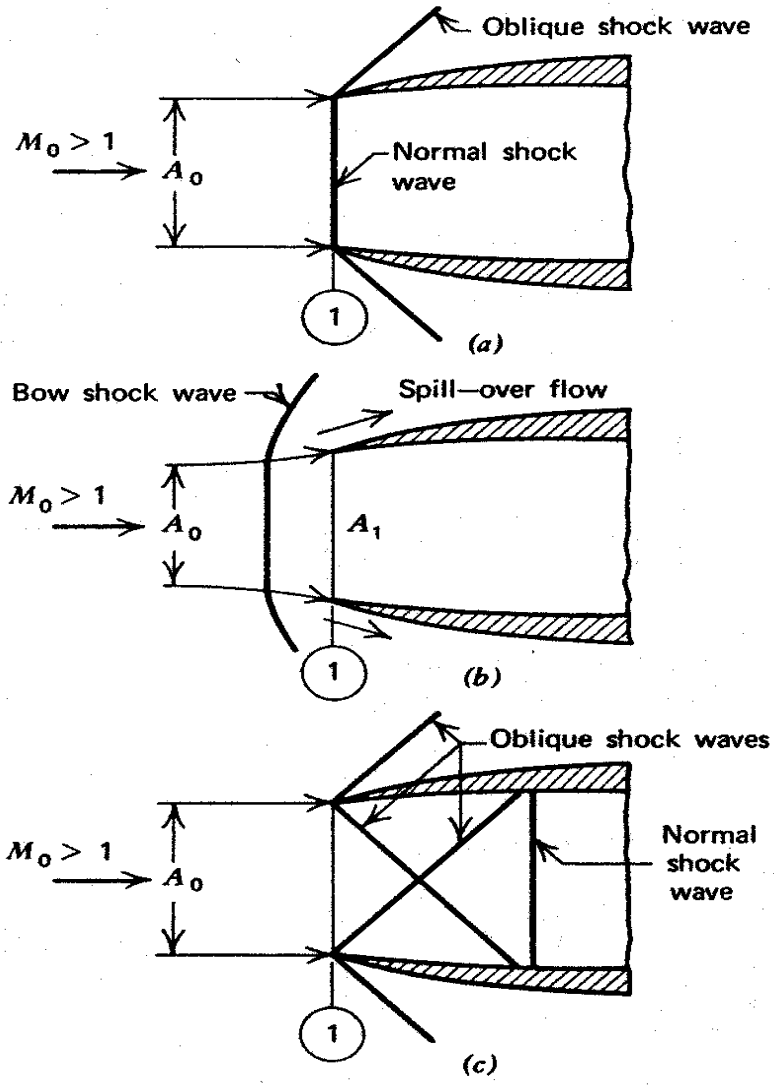
del Lockheed F-104 Starfighter

Le specifiche tecniche (1/5)

La presa d'aria di Pitot *(a onda d'urto normale)*

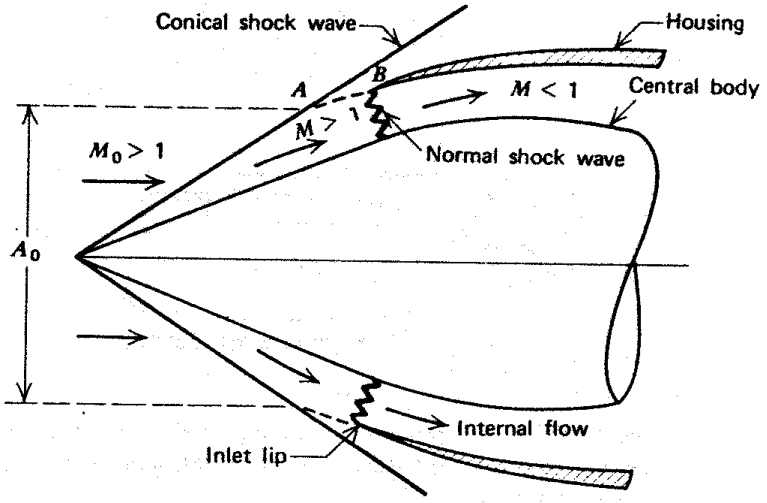
Presa di Pitot nel North American F 100F

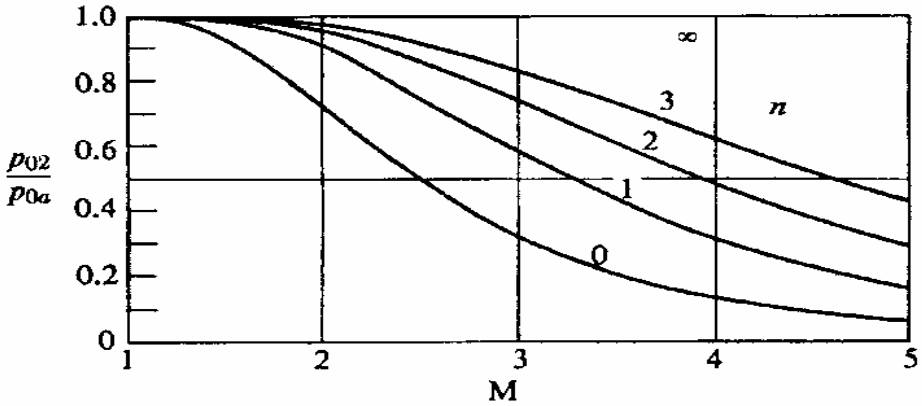
(aereo impiegato nella guerra in Vietnam)



Le specifiche tecniche (2/5)

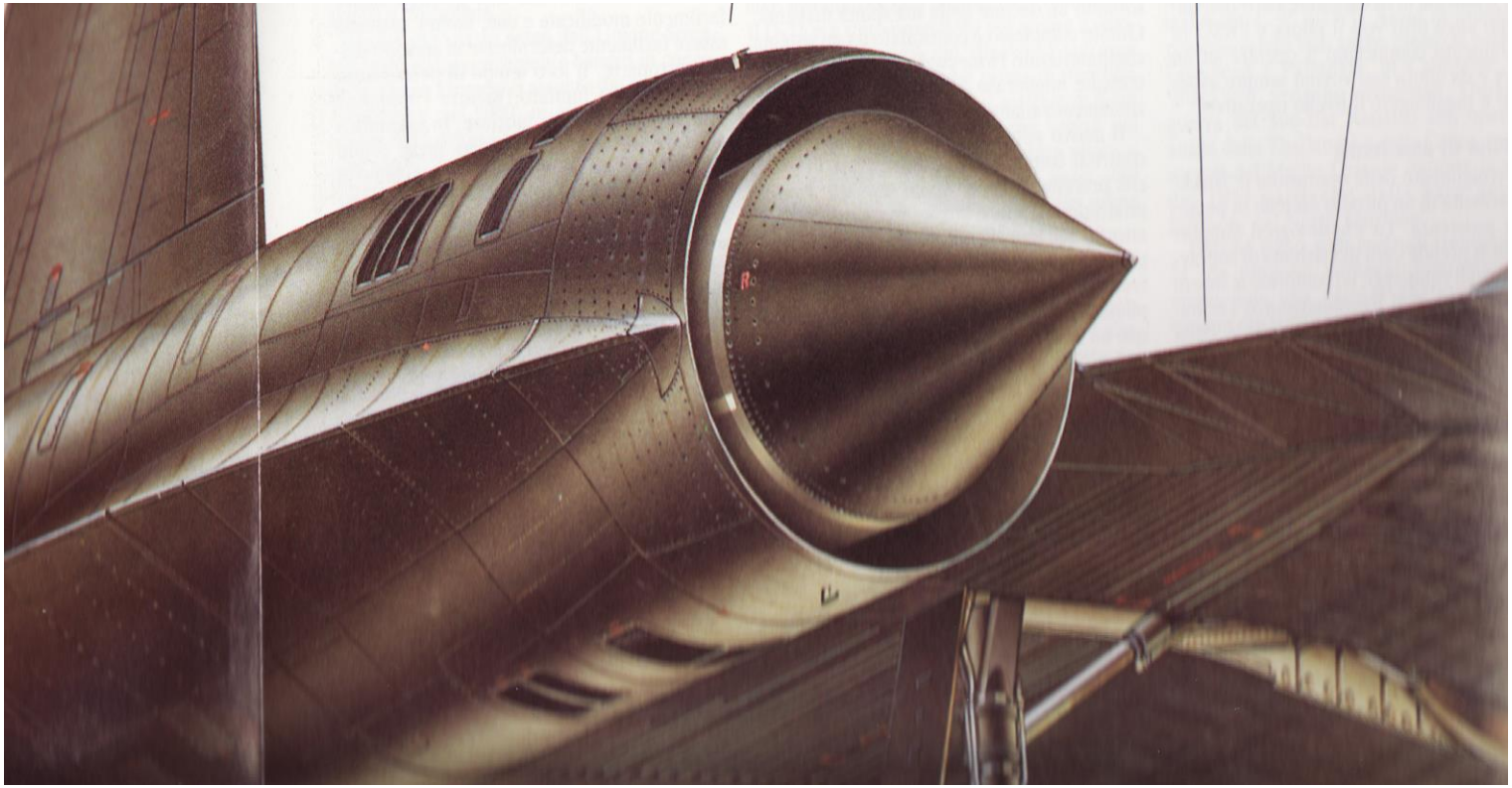
La presa supersonica a spina *(a onda d'urto obliqua)*





Le specifiche tecniche (3/5)

La presa d'aria del velivolo SR 71



Le specifiche tecniche (4/5)

Altri esempi di prese d'aria a spina conica

MiG-21MF

Dassault Mirage IV

Le specifiche tecniche (5/5)

La presa d'aria a semi-spina conica dell'F-104

Le caratteristiche generali

e le prestazioni

del Lockeed F-104 Starfighter

Caratteristiche generali e prestazioni

Caratteristiche generali

- **Lunghezza:** 16.66 m
- **Altezza:** 4.09 m
- **Apertura alare:** 6.36 m
- **Superficie alare:** 18.22 m2
- **Peso a vuoto:** 6,350 kg
- **Peso lordo:** 9,365 kg
- **Peso massimo al decollo:** 13,170 kg
- **Motore:**

  General Electric J79-GE-11A con post-combustore

  spinta: 48 kN

  con post-combustore: 69 kN

Caratteristiche generali e prestazioni

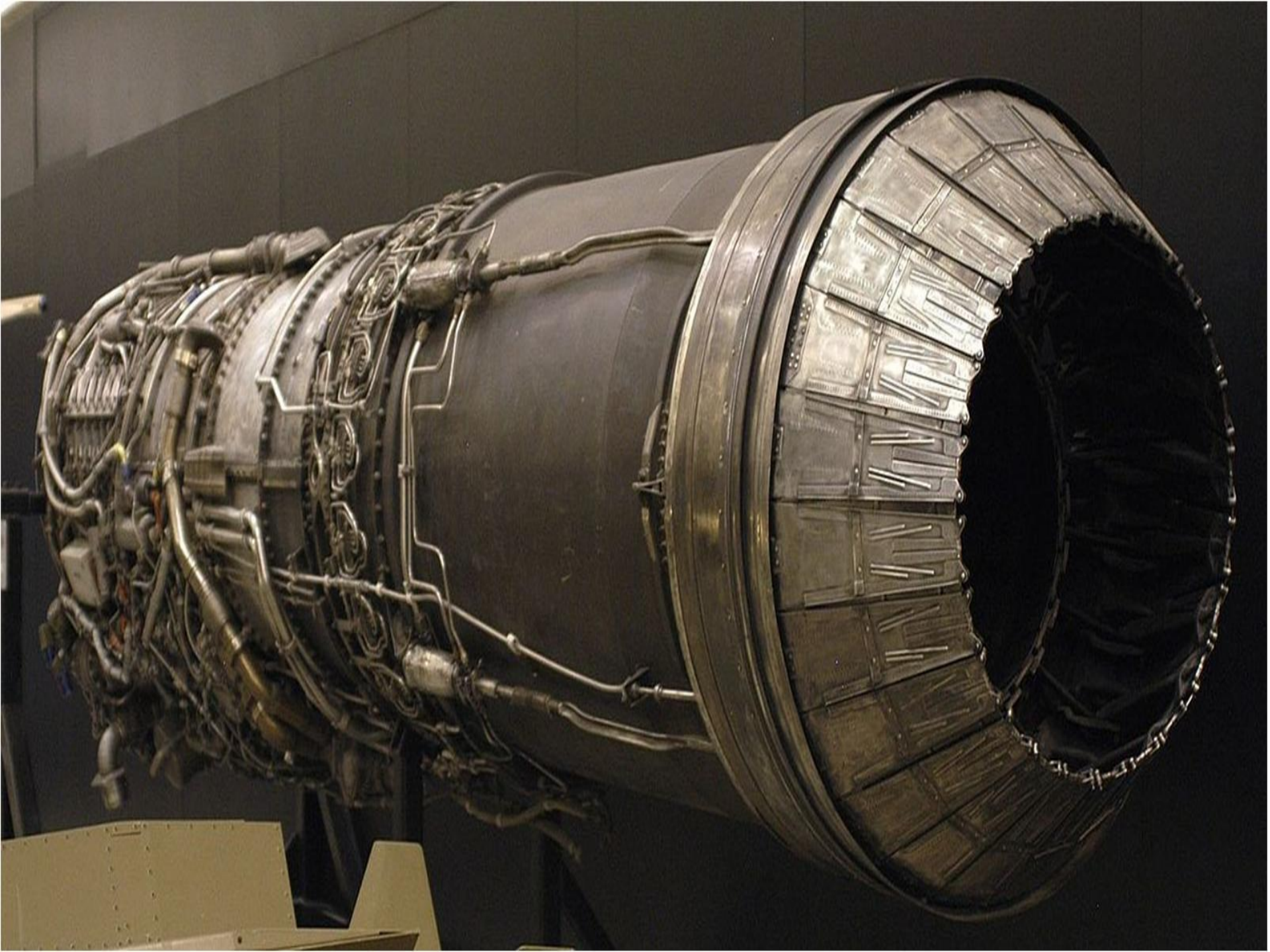
Prestazioni

- **Velocità massima:** 2137 km/h (Mach 2.01)
- **Raggio di combattimento:** 670 km
- **Quota di tangenza:** 15,000 m
- **Velocità di salita:** 244 m/s
- **Carico alare:** 514 kg/m^2
- **Rapporto spinta/peso:** 0,54 kg
- **Rapporto portanza/resistenza:** 9.2

Il sistema propulsivo

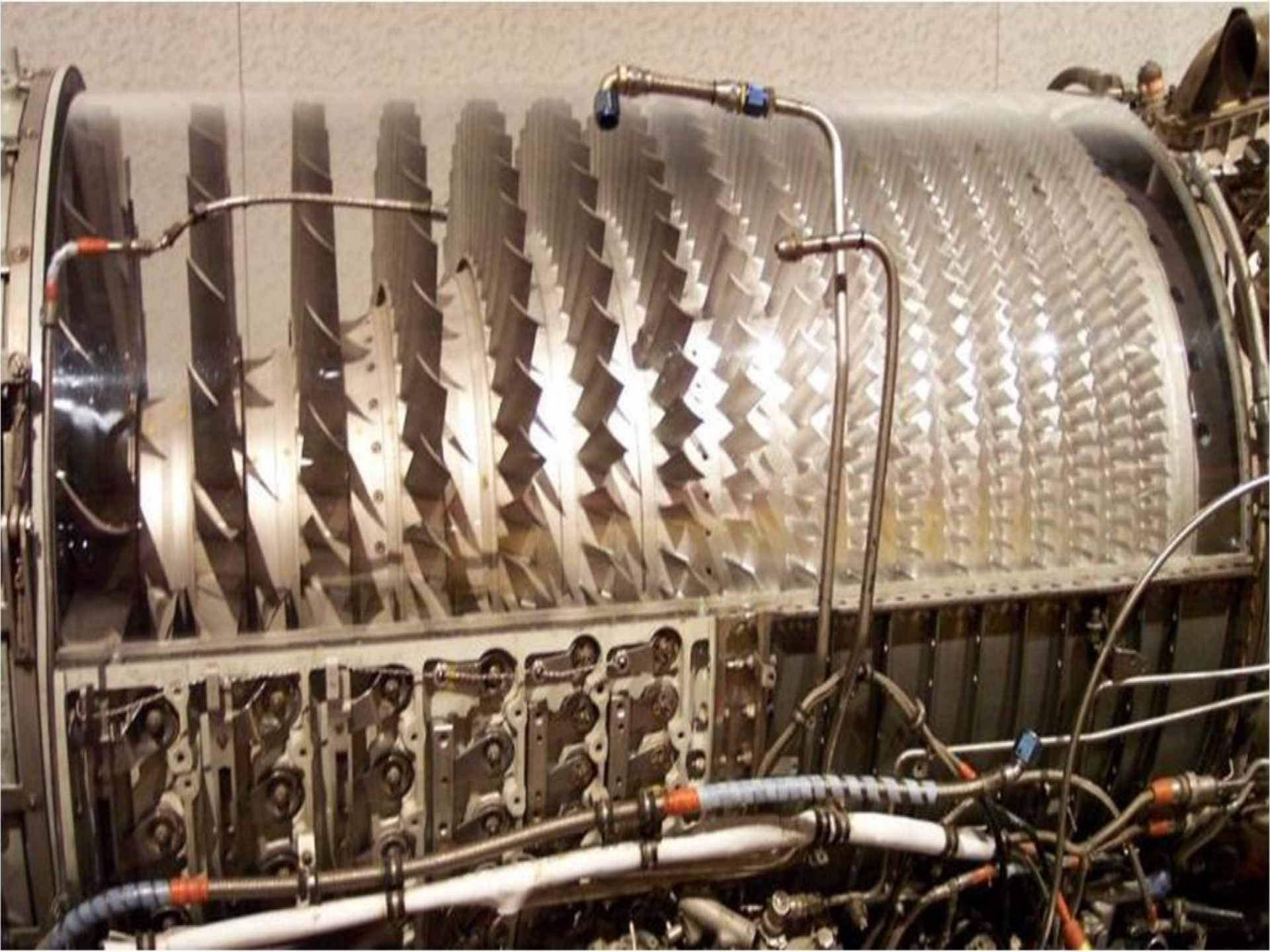
del Lockeed F-104 Starfighter:

il motore GE - J79



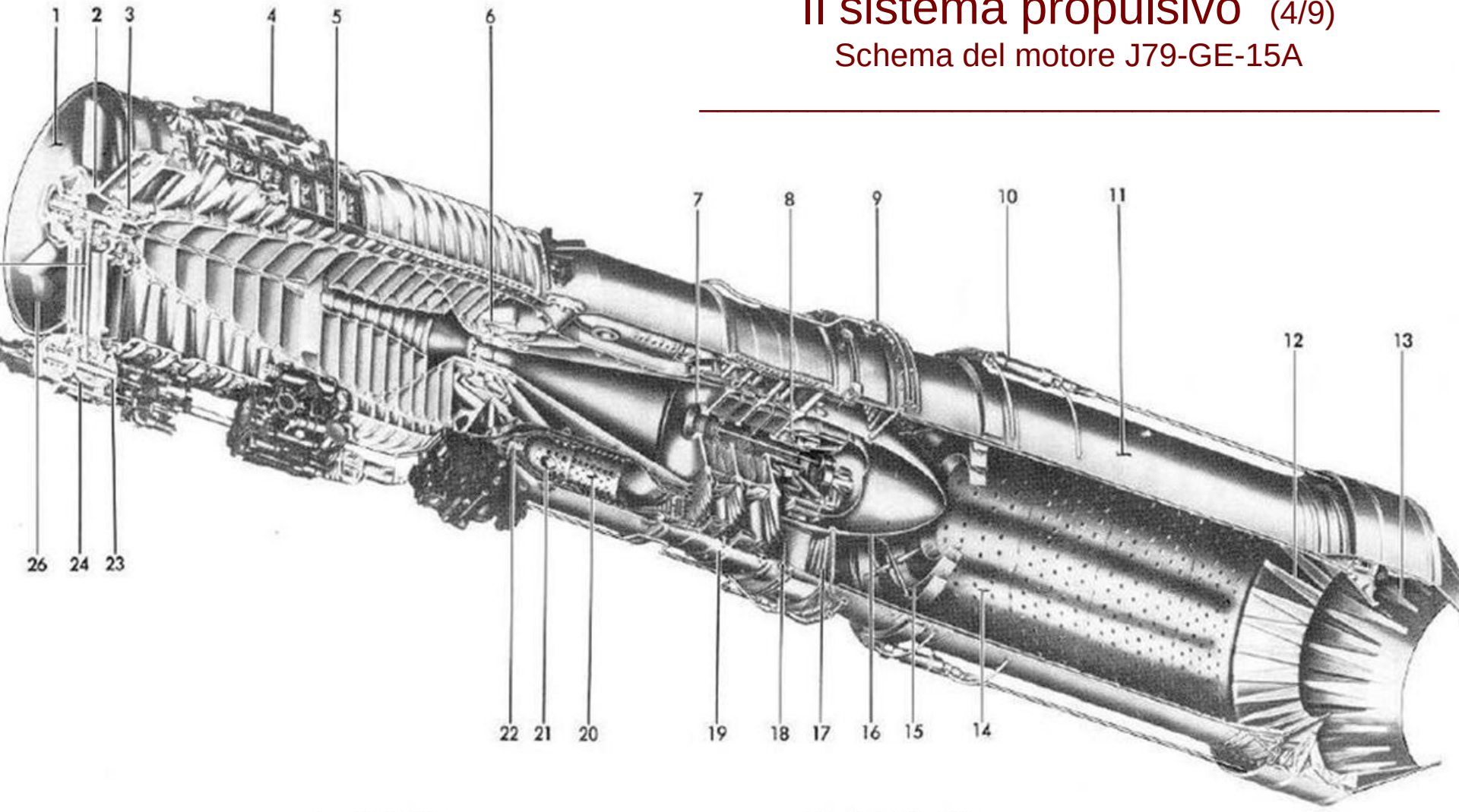
Il sistema propulsivo (2/9)

Il motore J79-GE-15A



Il sistema propulsivo (4/9)

Schema del motore J79-GE-15A



1. AIR INTAKE
2. FRONT GEAR CASE
3. NO. 1 BEARING HOUSING
4. VARIABLE VANE ACTUATOR
5. 17 STAGE COMPRESSOR SECTION
6. NO. 2 BEARING HOUSING
7. THREE STAGE TURBINE WHEEL
8. NO. 3 BEARING HOUSING
9. AFTERBURNER FUEL MANIFOLDS
10. EXHAUST NOZZLE FLAPS ACTUATOR
11. TAILPIPE
12. PRIMARY EXHAUST NOZZLE FLAPS
14. TAILPIPE LINER
15. FLAME HOLDER
16. EXHAUST CONE
17. AFTERBURNER SPRAY BARS
18. TAILPIPE TEMPERATURE THERMOCOUPLE
19. 3 STAGE TURBINE SECTION
20. COMBUSTION CHAMBER
21. CROSS FIRE DUCT
22. FUEL NOZZLE
23. HORIZONTAL ACCESSORY DRIVESHAFT
24. TRANSFER GEAR CASE
25. VERTICAL ACCESSORY DRIVESHAFT

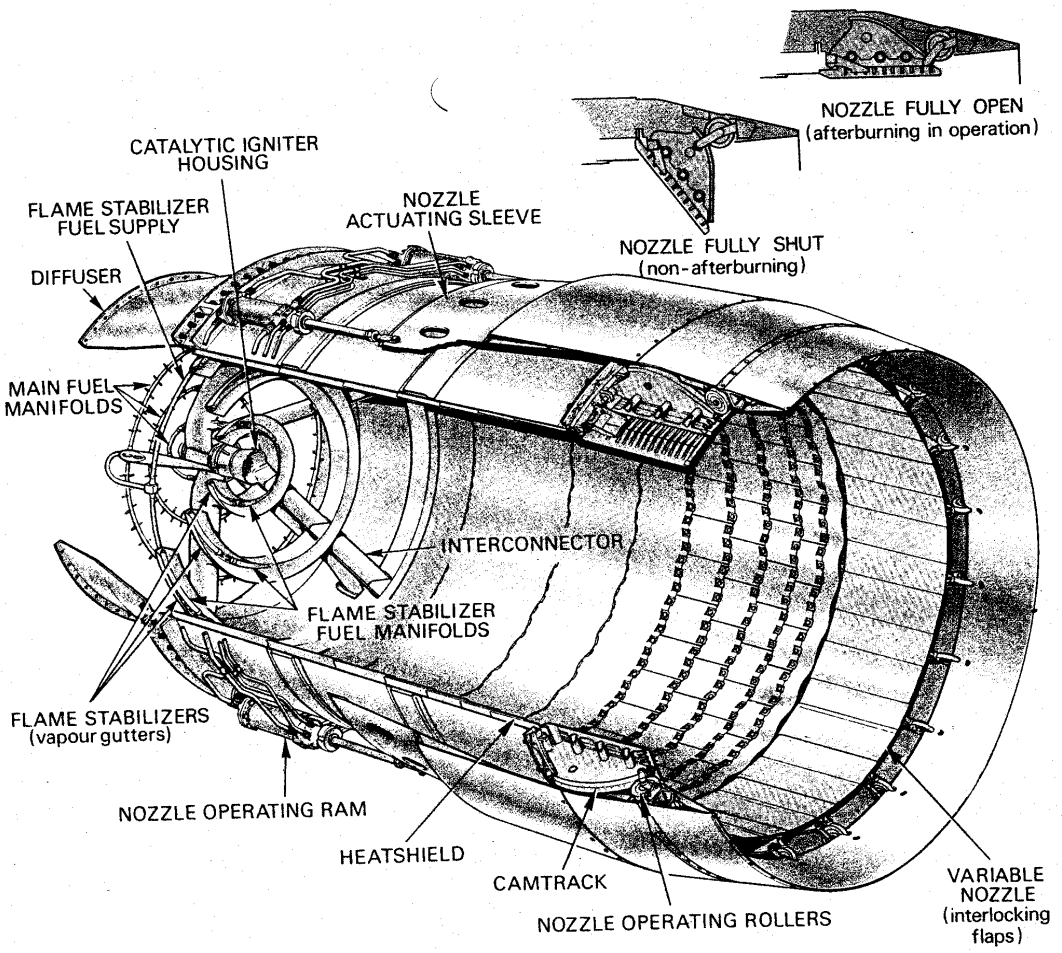
Il sistema propulsivo (5/9)

La post-combustione

- La postcombustione è una tecnica impiegata per *aumentare la spinta* di un motore. E' utilizzata al decollo, nelle fasi di salita o in specifiche fasi di una missione militare
- L'incremento di spinta consegue a un incremento di potenza che potrebbe essere ottenuto con un motore più potente, che sarebbe però anche più pesante, di maggiore ingombro frontale e penalizzato da più elevati consumi. La postcombustione si configura come la tecnica migliore per *ottenere aumenti di spinta per brevi periodi*
- La postcombustione consiste nell'introdurre e nell'ossidare combustibile tra la turbina e l'ugello, Per la combustione viene impiegato l'*ossigeno presente nei gas combusti*; l'incremento di temperatura dei gas combusti porta ad una accresciuta velocità dei gas di scarico e conseguentemente ad una spinta più elevata
- Generalmente *l'ugello è del tipo a geometria variabile*. L'ugello è chiuso quando la postcombustione è disinserita e aperto quando invece è inserita. La maggiore area della sezione di efflusso soddisfa l'accresciuto volume dei gas di scarico
- La spinta di un motore con postcombustore è inferiore, a postcombustione disinserita, alla spinta dello stesso motore privo di postcombustore, a causa delle *perdite aerodinamiche* legate alla presenza del postcombustore

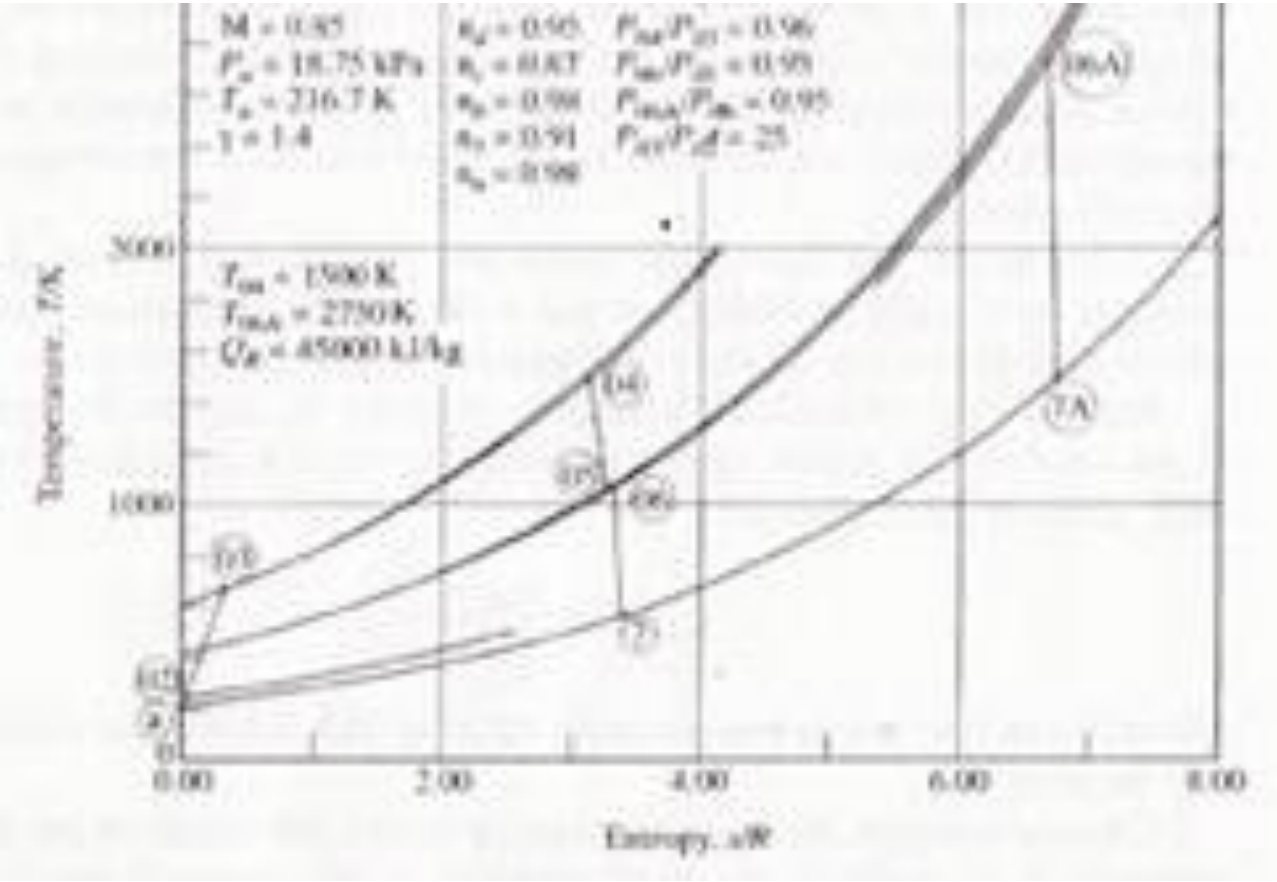
Il sistema propulsivo (6/9)

Configurazione del post-combustione



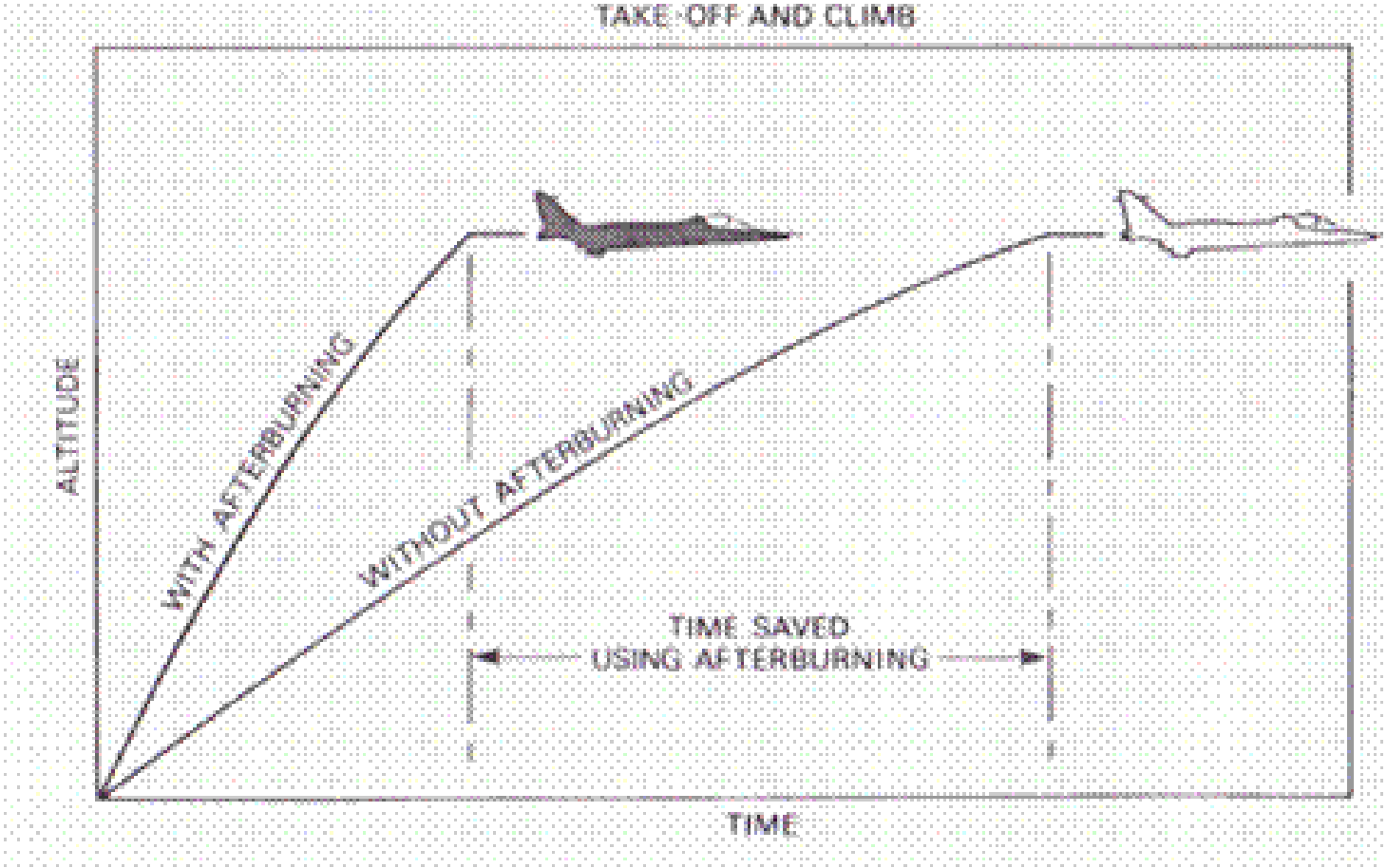
Il sistema propulsivo (7/9)

Configurazione del ciclo termodinamico post-combustione



Il sistema propulsivo (8/9)

Effetti della post-combustione



Il sistema propulsivo (9/9)

L'ugello a geometria variabile dell'F-104

Le varianti

nelle forze aeree

che lo hanno adottato

Le versioni

F-104A

In servizio all'USAF dal 1958 al al 1080. 153 velivoli prodotti

F-104B

Addestratore biposto, derivato dall'F-104°. 26 velivoli prodotti

F-104C

Versione bombardiere per l'USAF Tactical Air Command. Abilitato al trasporto di bombe nucleari. Abilitato al rifornimento in volo. Il 14 Dicembre 1959, conquista il record del mondo di altezza(31,515 m). 77 velivoli prodotti

F-104D

Versione biposto dell'F-104C. 21 velivoli prodotti

F-104F

Versione biposto basata sull'F-104D, ma con motore aggiornato dell'F-104G. Assenza di radar e senza capacità di combattimento. Destinato alla Luftwaffe. 30 velivoli prodotti

F-104G

Bombardiere multi-ruolo. Prodotto da Lockheed, e sotto licenza da Canadair e un consorzio di industrie europee. 1122 velivoli prodotti

F-104J

Versione intercettore dell'F-104G per le forze aeree giapponesi per superiorità aerea.
F-104DJ: Versione biposto dell'F-104J. 20 velivoli prodotti da Lockheed e assemblati da Mitsubishi

F-104S

Aggiornato nel motore con 53 kN e 80 kN di spinta. Ruolo intercettore. Autonomia 1250 km con quattro serbatoi. 246 velivoli prodotti da FIAT. 40 per le forze aeree turche, gli altri per l'Aeronautica Militare It.

F-104S-ASA

Aggiornamento Sistemi d'Arma .150 F-104S aggiornati

F-104S-ASA/M

Aggiornamento Sistemi d'Arma/Modificato . 49 velivoli aggiornati nel 1998 a ASA/M

Le 16 forze aeree che lo hanno impiegato

L' F-104 è stato impiegato dalle forze aeree delle seguenti 16 nazioni:

- **Belgio**
- **Canada**
- **Danimarca**
- **Germania**
- **Giappone**
- **Giordania**
- **Grecia**
- **Italia**
- **Norvegia**
- **Olanda**
- **Pakistan**
- **Repubblica Popolare Cinese**
- **Spagna**
- **Stati Uniti**
- **Taiwan**
- **Turchia**

Il Lockeed F-104 Starfighter

nell'Aeronautica Militare Italiana

Lockheed F-104 S

Lockheed F-104 S

- F-104S: S sta per Sparrow o Super Starfighter
- Motore piu' potente
- Prese d'aria arretrate, due ulteriori punti di gancio sotto la fusoliera
- Sedile eiettabile verso l'alto
- Raramente armato: caccia intercettore
- Poteva lanciare armi a velocità supersoniche
- E' mancata la versione biposto
- Aggiornato allo standard ASA (Aggiornamento sistema d'arma

Le industrie produttrici, i costi del velivolo

Quadro sinottico dei velivoli prodotti

Production summary										
Type	Lockheed	Multi-national	Canadair	Fiat	Fokker	MBB	Messerschmitt	Mitsubishi	SABCA	Total
XF-104	2									2
YF-104A	17									17
F-104A	153									153
F-104B	26									26
F-104C	77									77
F-104D	21									21
F-104DJ	20									20
CF-104			200							200
CF-104D	38									38
F-104F	30									30
F-104G	139		140	164	231	50	210		188[b]	1122
RF-104G	40			35	119					194
TF-104G (583C to F)	172	27								199
TF-104G (583G and H)		21								21
F-104J	3							207		210
F-104S				245[b]						245
Total by manufacturer	738	48	340	444	350	50	210	207	188	2,575

I costi

F-104 Costs (US dollars, 1960)						
	F-104A	F-104B	F-104C	F-104D	F-104G	TF-104G
Unit R&D cost			189,473	189,473		
Airframe	1,026,859	1,756,388	863,235	873,952		
Engine	624,727	336,015	473,729	271,148	169,000	
Electronics	3,419	13,258	5,219	16,210		
Armament	19,706	231,996	91,535	269,014		
Ordnance	29,517	59,473	44,684	70,067		
Flyaway cost	1.7 million	2.4 million	1.5 million	1.5 million	1.42 million	1.26 million
Modification costs by 1973			198,348	196,396		
Cost per flying hour	655					
Maintenance cost per flying hour	395	544	395	395		

Galleria fotografica dell’F-104 Starfighter

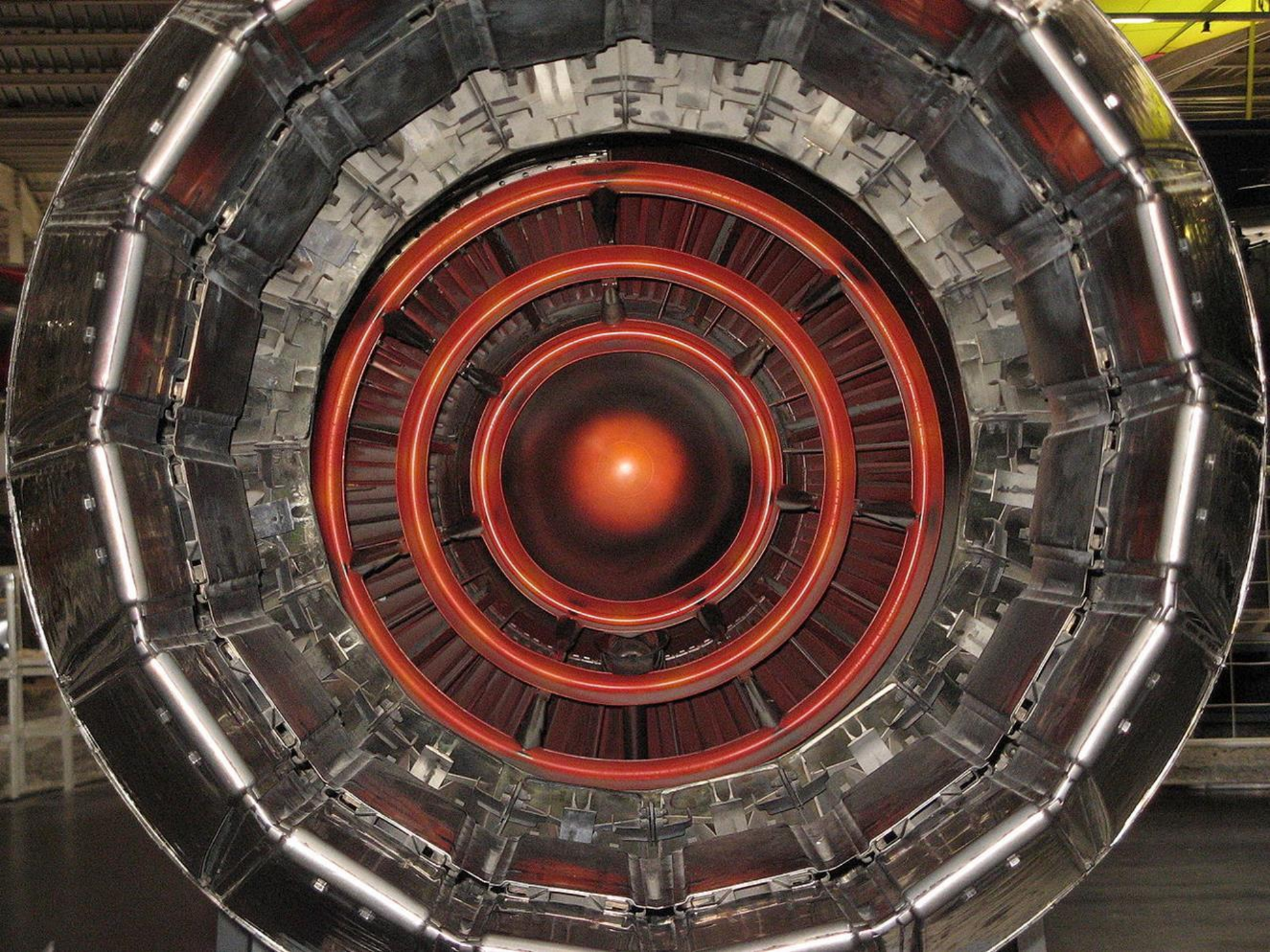
52961
FG-961
U.S.AIR FORCE

53-06
RESCUE

RS 05
SALVATAGGIO
RESCUE

FX98
FX98

RADIO CALL
FIRE
HOOK DOWN
UHF
ALT
CLIMB
FUEL FLOW
ENGINE AIR INLET TEMP
EMERGENCY NOZZLE CLOSURE
MAN LDG GEAR
CLEARANCE
ANTENNA TILT
FUEL QUANTITY
LDG GEAR
LANDING LIGHT
TAXI LIGHT
ANTI-SKID
ENG/DUCT ANTI-ICE
TAKE-OFF TRIM LTS
START
STOP START
BOMBS
MISSILE
ROCKET
GUN
OPTICAL SIGHT
RANGE
CLUTTER ELIM
SPECIAL WEAPONS
DROP LOCK
PYLON
BOMBS
TANKS
SAFE
READY
EMER JETTISON
SPEED BRAKES MIC
UNLOCK CANOPY
CANOPY JETTISON



63-12699
4420
REMOVE BEFORE FLIGHT

5704
8-704

37786
FG-786
U.S. AIR FORCE

4·1

L’eredità dell’F-104: breve rassegna di moderni velivoli militari

Lockheed F-117 Nighthawk

- **Tipologia**
  caccia stealth
- **Velocità massima**
  1040 km/h
- **Paese**
  USA
- **Sistema propulsivo**
  bimotore a getto
- **Primo volo**
  18 giugno 1981
- **Esemplari costruiti**
  64
- **Paesi utilizzatori**
  1

Dassault Mirage 2000

- **Tipologia**
  caccia
- **Velocità massima**
  2336 km/h (M 2.2)
- **Paese**
  Francia
- **Sistema propulsivo**
  monomotore a getto
- **Primo volo**
  10 marzo 1978
- **Esemplari costruiti**
  547
- **Paesi utilizzatori**
  8

Eurofighter (EFA) Typhoon

- **Tipologia**
  caccia
- **Velocità massima**
  2124 km/h (M 2)
- **Paese**
  D, UK, I, E
- **Sistema propulsivo**
  bimotore a getto
- **Primo volo**
  27 marzo 1994
- **Esemplari costruiti**
  593 (ordinati)
- **Paesi utilizzatori**
  4

General Dynamics F-111

- **Tipologia**
  cacciabombardiere
- **Velocità massima**
  2655 km/h (M 2.5)
- **Paese**
  USA
- **Sistema propulsivo**
  bimotore a getto
- **Primo volo**
  21 dicembre 1964
- **Esemplari costruiti**
  562
- **Paesi utilizzatori**
  2

General Dynamics F-16 Fighting Falcon

- **Tipologia**
  caccia
- **Velocità massima**
  2124 km/h (M 2.0)
- **Paese**
  USA
- **Sistema propulsivo**
  monomotore a getto
- **Primo volo**
  20 gennaio 1974
- **Esemplari costruiti**
  3945
- **Paesi utilizzatori**
  18

Grumman F-14 Tomcat

- **Tipologia**
  caccia imbarcato
- **Velocità massima**
  2517 km/h (M 2.34)
- **Paese**
  USA
- **Sistema propulsivo**
  bimotore a getto
- **Primo volo**
  21 dicembre 1970
- **Esemplari costruiti**
  712
- **Paesi utilizzatori**
  2

McDonnel Douglas F/A-18 Hornet

- **Tipologia**
  caccia imbarcato
- **Velocità massima**
  1915 km/h (M 1.8)
- **Paese**
  USA
- **Sistema propulsivo**
  bimotore a getto
- **Primo volo**
  18 novembre 1978
- **Esemplari costruiti**
  1400 (in produzione)
- **Paesi utilizzatori**
  8

Mikoyan-Gurevich MiG-23

- **Tipologia**
  caccia
- **Velocità massima**
  2490 km/h (M 2.35)
- **Paese**
  Russia
- **Sistema propulsivo**
  monomotore a getto
- **Primo volo**
  10 giugno 1967
- **Esemplari costruiti**
  5047
- **Paesi utilizzatori**
  23

Mikoyan-Gurevich MiG-25

- **Tipologia**
  caccia
- **Velocità massima**
  3000 km/h (M 2.83)
- **Paese**
  Russia
- **Sistema propulsivo**
  bimotore a getto
- **Primo volo**
  6 marzo 1964
- **Esemplari costruiti**
  1586 (in produzione)
- **Paesi utilizzatori**
  7

Mikoyan-Gurevich MiG-29

- **Tipologia**
  caccia
- **Velocità massima**
  2450 km/h (M 2.30)
- **Paese**
  Russia
- **Sistema propulsivo**
  bimotore a getto
- **Primo volo**
  6 ottobre 1977
- **Esemplari costruiti**
  1450 (in produzione)
- **Paesi utilizzatori**
  25

Panavia Tornado

- **Tipologia**
  caccia
- **Velocità massima**
  1480 km/h (M 1.20)
- **Paese**
  D, UK, I
- **Sistema propulsivo**
  bimotore a getto
- **Primo volo**
  14 agosto 1974
- **Esemplari costruiti**
  978 (in produzione)
- **Paesi utilizzatori**
  4

SAAB 39 Gripen

- **Tipologia**
  caccia
- **Velocità massima**
  2124 km/h (M 2.00)
- **Paese**
  Svezia
- **Sistema propulsivo**
  monomotore a getto
- **Primo volo**
  9 dicembre 1988
- **Esemplari costruiti**
  204 (in produzione)
- **Paesi utilizzatori**
  1

Sukhoi Su-27

- **Tipologia**
  caccia
- **Velocità massima**
  2490 km/h (M 2.35)
- **Paese**
  Russia
- **Sistema propulsivo**
  bimotore a getto
- **Primo volo**
  20 maggio 1977
- **Esemplari costruiti**
  780 (in produzione)
- **Paesi utilizzatori**
  7

Grazie dell’attenzione