



*Università del Piemonte Orientale, 9 Marzo 2005, Alessandria*

# **SISTEMI DISTRIBUITI PER LO SPAZIO**

## **Applicazioni e scenari possibili per soluzioni autonome**

**Michèle Lavagna**

[lavagna@aero.polimi.it](mailto:lavagna@aero.polimi.it)

*Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale*

*Politecnico di Milano - Italy*



# Agenda

- Il contesto spaziale
- Autonomia e spazio
- Sistemi distribuiti e spazio
- Domini applicativi
  - Formazioni
  - Altri scenari
  - Team di robots
  - Sistemistica
- Conclusioni



# Il contesto Spaziale

## MISSIONI

- Commerciali
- Tecnologiche
- Scientifiche
- Di esplorazione

Generano obiettivi di missione, scenari di vincolo, scenari di risorse molto diversificati



# Classificazione di sistemi spaziali

## Geocentrici:

- Telecom e navigazione (GPS, Galileo, ASTRA)
- Osservazione e remote sensing (ERS1, Meteosat)
- Satelliti scientifici (Integral)
- Dimostratori tecnologici (Proba)

## • Interplanetari

- Esplorazione (MEX, MER, Messenger, Programma Aurora, Mars Exploration)
- Scientifici (Rosetta, Programma Aurora, Mars Exploration, Genesis, stardust)
- Dimostratori tecnologici (Smart1, Proba, DS1)



# Autonomia

## AUTONOMIA

capacità di percepire lo stato esterno/interno del sistema

+

capacità di intervenire sullo stato interno/esterno del sistema al fine di:

- rispettare il raggiungimento degli obiettivi di missione
- mantenersi vivo ed efficiente!

Basso livello ➡ controllo

Alto livello ➡ problema decisionale

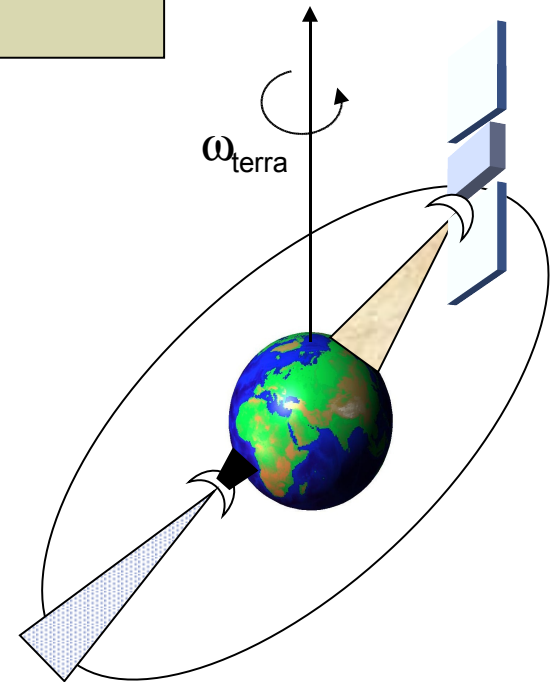
## AUTONOMIA:PERCHE'?

### •Missioni Terrestri:

- Carico delle stazioni di Terra ↑↑↑
- Contatti per Telecomm discretizzati nel tempo
- Tempestività di intervento ↓↓↓

### •Missioni interplanetarie:

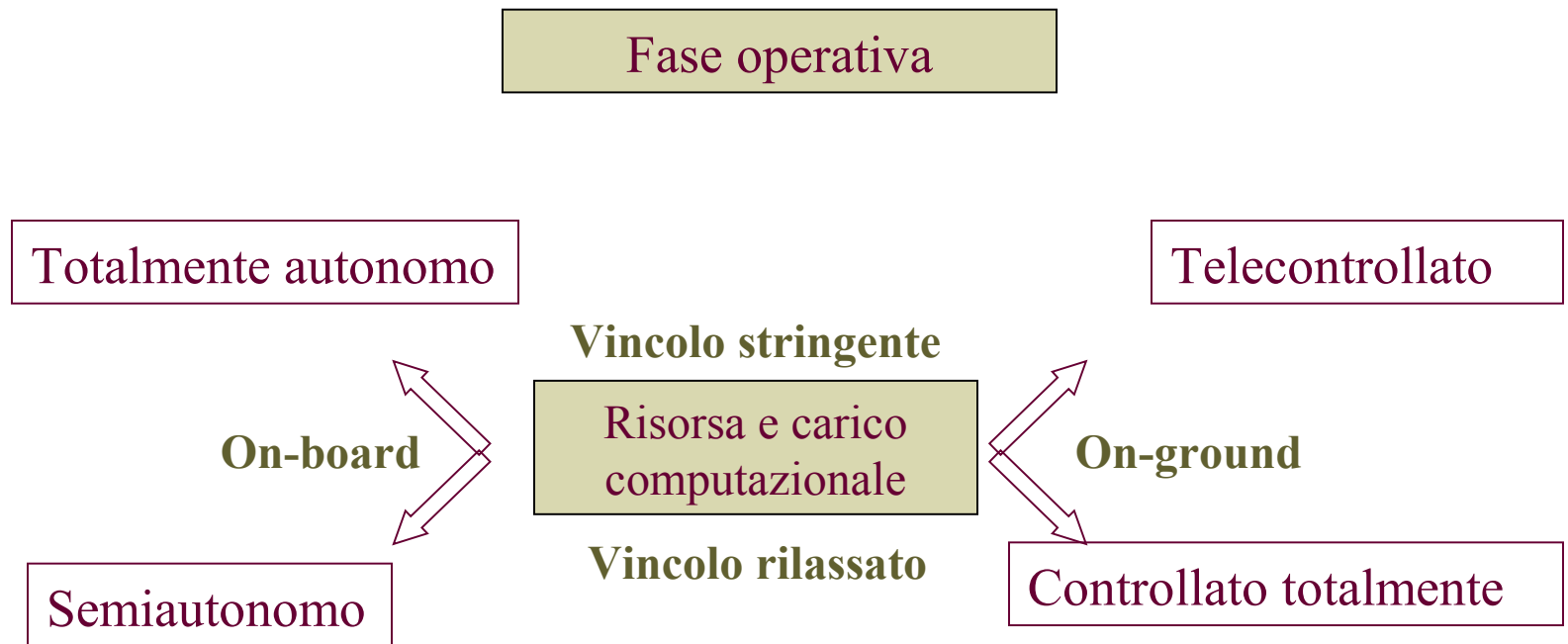
- Tempi di ricezione del segnale  $O(2R)$   
 $R \rightarrow O(10^8 \text{Km!})$  es. Marte=8.3 min Giove 1.16h!!
- Ambiente non noto  $\rightarrow$  necessità di capacità reattive/adattative!!
- Elevata complessità di sistema





# Autonomia:dove?

L'autonomia può interessare livelli e regimi operativi differenti





# Autonomia: fase operativa

## Alto livello: deliberativo

Scelta di:

- obiettivi (locali/globali)



Scheduling/planning

- strategie per raggiungere gli obiettivi



Diagnosi

## Basso livello: reattivo

Scelta di:

- legge di controllo
- Strategie di coordinamento comportamenti elementari



Gestione delle incertezze



Riconfigurazione/ripristino





# Autonomia: fase operativa

## ■ Deep Space 1 (DS-1) → cometa Braille AUTONOMA

⇒ Prima missione NASA dimostratore tecnologico

→ lancio 1998

→ Autonomia

→ Propulsione elettrica

⇒ Navigazione autonoma

→ Identificazione dello stato → autonomo

⇒ Remote Agent

→ Pianificatore/scheduler

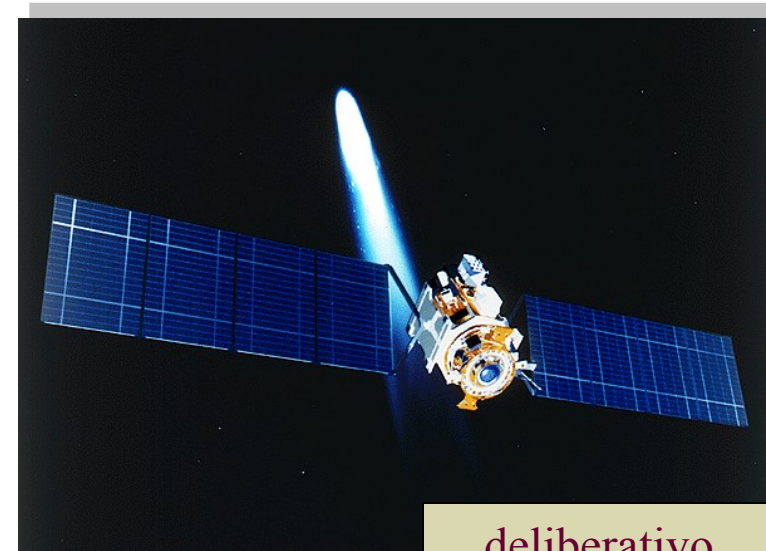
→ Manovre propulse

→ Gestione payload

→ riconfigurazione

⇒ Livingstone

→ modulo di gestione autonoma di guasti (FDIR)



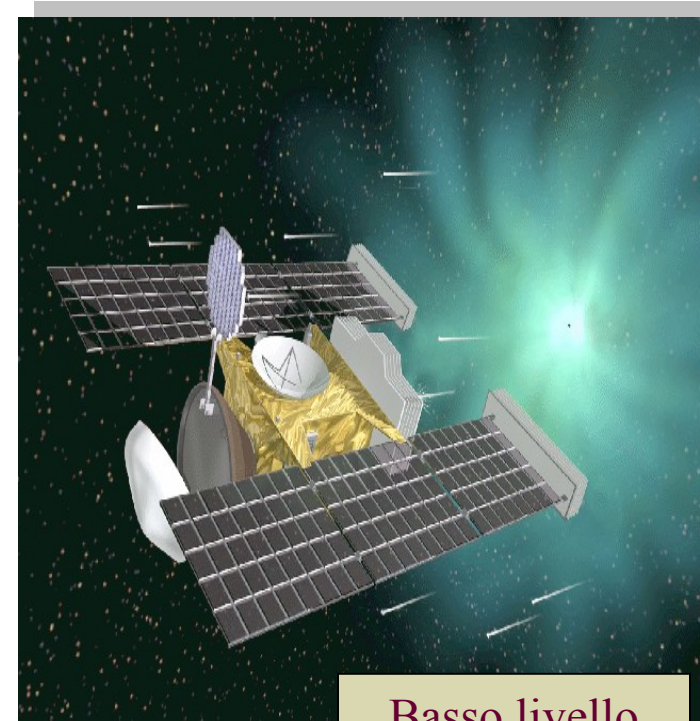
deliberativo



# Autonomia: fase operativa

## ■ Stardust SEMIAUTONOMA

- ⇒ Missione NASA recupero di campioni da cometa
- ⇒ Lancio: febbraio 1999
  - Recupero di polvere interstellare
  - Incontro con cometa Wild 2 Gennaio 2005
  - Ritorno a Terra Gennaio 2006
- ⇒ Sistema di Navigazione autonoma
  - Navigazione ottica
  - Manovre di correzione
- ⇒ Payload
  - Dispiegamento strumenti
- ⇒ Ritorno scientifico
  - campioni di materiale cometario



Basso livello



# Autonomia: fase operativa

## ■ Rosetta TELECONTROLLATA

⇒ ESA Horizon 2000 missione cornerstone

→ Lancio Marzo 2004

→ 10 anni di trasferimento fino alla cometa 67P

⇒ Sistema di atterraggio autonomo

⇒ Ritorno scientifico

→ Analisi materiale cometario

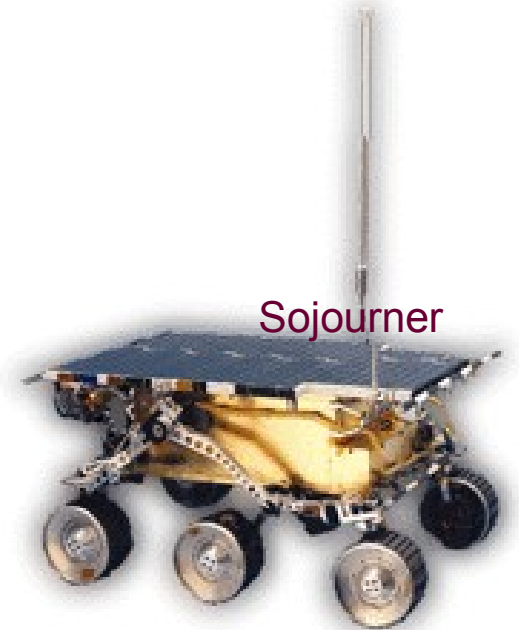




# Autonomia: fase operativa

## ■ Pathfinder AUTONOMA

- ⇒ Missione NASA per esplorazione di Marte
- ⇒ Lancio dicembre 1996
  - Ammartaggio luglio 1997
  - Primo rover su Marte
  - Vita operativa 12 volte il progetto
  - Navigazione per waypoint telecomandati
  - Determinazione e scarto dell'ostacolo autonomo





# Autonomia: fase operativa

## ■ Cassini-Huygens SEMIAUTONOMA

⇒ Missione NASA-ESA a Saturno-Titano

- Lancio ottobre 1997
- Arrivo a Saturno luglio 2004
- Huygens: discesa su Titano

⇒ Sonda Cassini: autonomia

- Inseguimento e cattura del target
- Stabilità dell'assetto
- Controllo termico e di potenza
- Pianificazione e scheduling delle attività di



⇒ Huygens: autonomia

- Gestione dei 12 payloads
  - ➔ Invio comandi
  - ➔ Telemetria strumenti



# Autonomia: fase operativa

## ■ Space Technology 5 SEMIAUTONOMA

⇒ Missione del programma New Millennium

→ Lancio nel 2005

⇒ Formation Flying

→ Stazioni di Terra autonome

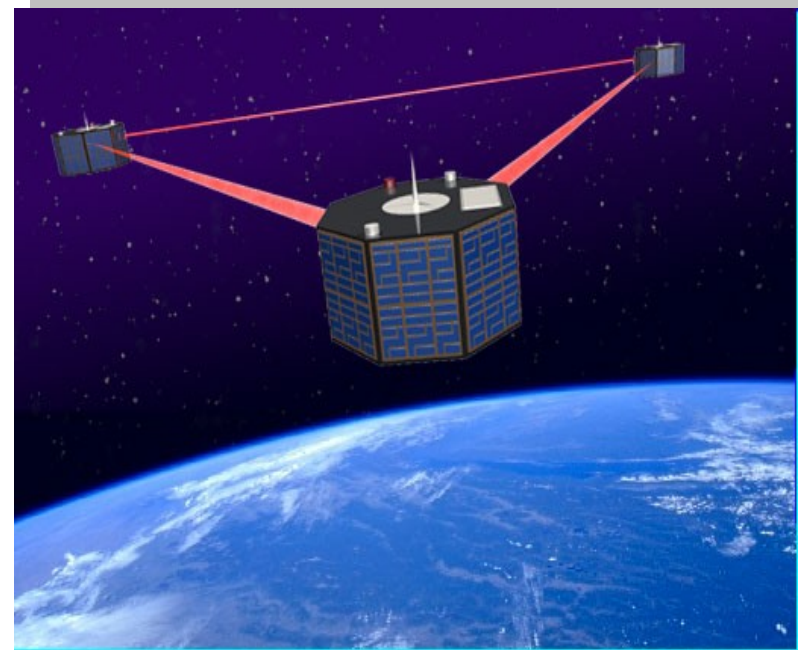
→ Determinazione orbitale

→ Posizionamento relativo

→ Scheduling

⇒ Obiettivo scientifico

→ Attività solare nella magnetosfera





# Autonomia: fase operativa

## ■ Engineering Test Satellite (ETS) 7 SEMIAUTONOMA

⇒ Missione del programma New Millennium

→ Lancio 1997

→ Termine missione 1999

→ Due satelliti separati

➔ Satellite Docking - autonomo

➔ Stazione Docking – controllata in remoto

⇒ Rendezvous docking

→ Primo tentativo nel 1998

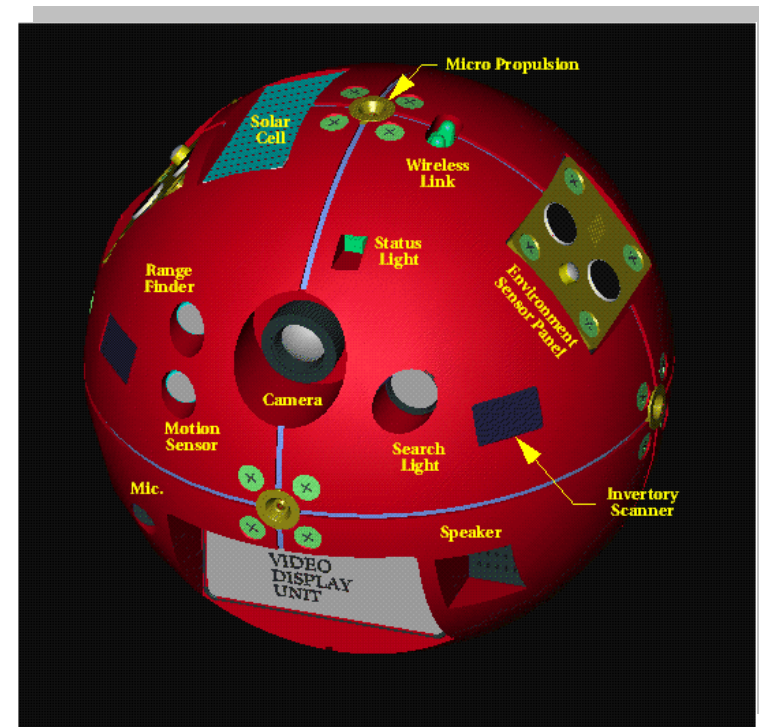
→ Due in totale



# Autonomia: fase operativa

## ■ Personal Satellite Assistant (PSA)

- ⇒ Dispositivo di supporto all'astronauta
- ⇒ Navigazione autonoma
- ⇒ Sensing
- ⇒ Riconoscimento del linguaggio
- ⇒ Diagnostica
- ⇒ Interfaccia uomo-macchina







# Autonomia: dove?

## Fase progettuale

Scelta di:

- Architetture di sistema (componentistica di bordo)

Semiautonomo

∃ Interazione con progettisti

Totalmente autonomo

∄ Interazione con progettisti



# Sistemi distribuiti

## TIPOLOGIE

- ~ ~~Costellazioni (GPS, Glonass, Galileo, Iridium, etc)~~
- ~ Formation Flying/Swarms
- ~ Stazioni di Terra
- ~ Squadre di Robots
- ~ Sottosistemistica di bordo



# Sistemi distribuiti

Sistemi distribuiti: PERCHE'?

## Missioni Terrestri/interplanetarie

- ~ Affidabilità/robustezza di sistema ↑↑↑
- ~ Flessibilità di missione ↑↑↑
- ~ Raggiungimento obiettivi di missione
- ~ semplicità di integrazione



# Sistemi distribuiti:dove?

## Formation Flying/Swarms

$N=[2;100]$  Controllo di posizione continuo  $\rightarrow$  requisito stretto=autonomia

**Missioni esistenti**: EO-1+Landsat-7; GRACE(DLR); LISA (ESA); SMART2 (ESA); DARWIN(ESA); Terrestrial Planet Finder(NASA); ST5 Nanosat(NASA)

**Vincoli**: hard  $\rightarrow$  dinamica relativa della formazione

$\rightarrow$  risorse di bordo/locali-condivise disponibili

$\rightarrow$  real-time

$\rightarrow$  obiettivi di alto livello condivisi (dati scientifici, manovre, etc)

**Gestione autonoma**: ~~centralizzata~~  $\leftrightarrow$  distribuita

Requisiti: flessibilità/robustezza

**Problematiche**: consistenza locale  $\leftrightarrow$  locale  $\Rightarrow$  strategie di negoziazione, comunicazione, distribuzione/gestione delle basi di conoscenza

# Sistemi distribuiti:dove?

## Stazioni di Terra

1 Centro di Controllo → N stazioni di terra dedicate a:

Tracking/Ranging sistemi orbitanti

Ricezione telemetria /dati

Invio Telecomandi



**ESTRACK**: Darmstadt (MOC), 7 stazioni di Terra (Redu 10 Antenne, Villafranca 8)

**Vincoli**: hard → dinamica relativa sistemi orbitanti/antenne (visibilità)

→ risorse tecnologico/finanziarie

→ elevate dimensioni del problema

→ vincoli tecnologici di bordo

**Gestione autonoma/intelligente**: centralizzata/distribuita (reti etero/omo-genee)

Requisiti: flessibilità/robustezza, possibile interazione umana



# Sistemi distribuiti:dove?

## Squadre di Robots

Robots: flottiglie di rover/UAV da 10 a 100 unità

**Scenario:** esplorazione planetaria / preparazione sito per habitat umano → autonomia

**Elementi:** eterogenei/omogenei

**Vincoli:** → obiettivi/compiti condivisi

→ risorse locali/condivise

→ dinamica relativa

**Gestione autonoma:** ~~centralizzata~~ ← → distribuita

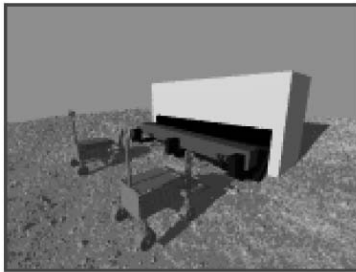
**Requisiti:** robustezza/reattività/flessibilità

**Problematiche:** scarsa conoscenza dell'ambiente operativo/gestione della comunicazione/interazione strategie di negoziazione/ interazione umana/apprendimento

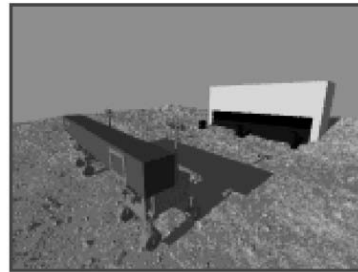
# Sistemi distribuiti:dove?

## Obiettivi possibili:

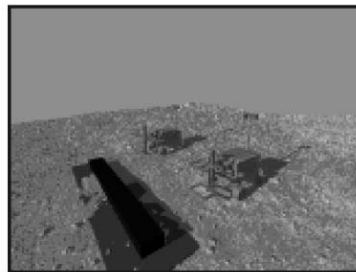
- alta reattività/adattività ad eventi imprevisi (guasti, ambiente non noto)
- Architettura top-down: scelta degli obiettivi e redistribuzione dei compiti sui vari elementi: strategia cooperativa/competitiva?
- Architettura bottom-up: definizione dei comportamenti locali per soluzione di un problema globale:: strategia cooperativa/competitiva?



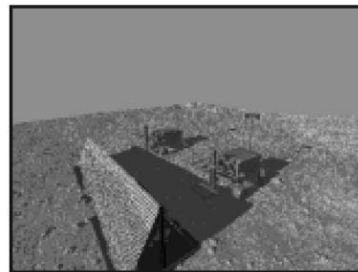
(a)



(b)



(c)



(d)



li distribuiti



# Sistemi distribuiti:dove?

## Robot singolo

**Scenario:** esplorazione planetaria / preparazione sito per habitat umano → autonomia

**Elementi:** Insieme di comportamenti di basso livello: controllo di componenti

**Obiettivo:** generazione di comportamenti reattivi di livello superiore: combinazione di comportamenti elementari (controllo adattativo)

**Vincoli:** → modello funzionale del sistema (dominio dei comportamenti elementari)  
→ risorse di bordo

**Gestione autonoma:** competitiva/collaborativa

**Requisiti:** robustezza/reattività/flessibilità

**Problematiche:** strategie decisionali adattative/apprendimento





# Sistemi distribuiti:dove?

## Sottosistemistica di bordo

Sistema spaziale: orbiter/lander/robot etc

**Scenario:** progettazione a Concurrent Engineering di sistemi complessi → supporto decisionale/ strumento di analisi di processo

**Elementi:** sottosistemi di bordo / architetture differenti di alto livello

**Vincoli:** → relazioni interdisciplinari di dimensionamento del sistema  
→ risorse temporali/finanziarie/tecnologiche

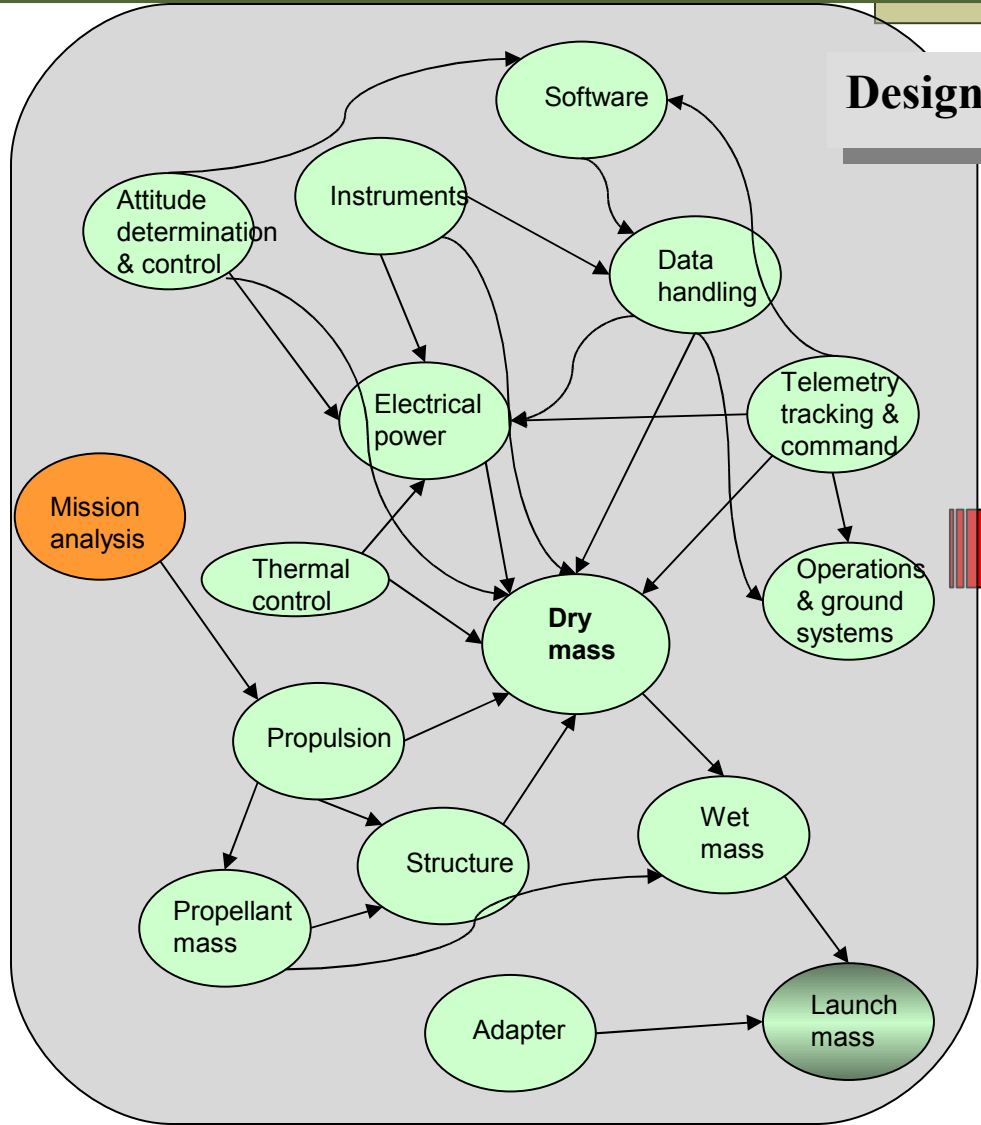
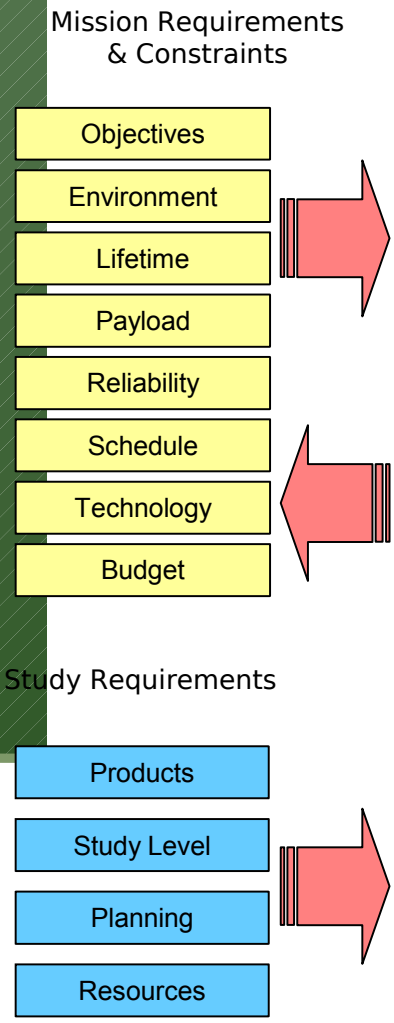
**Gestione autonoma:** centralizzata ↔ distribuita, competitiva ↔ cooperativa

**Requisiti:** robustezza/reattività/flessibilità

**Problematiche:** elevata interazione tra sottosistemi/elevata dipendenza dalle fasi operative/ possibile modellazione comportamenti umani (progettisti)



# Sistemi distribuiti:dove?



## Design Process

## Study Results

- S/C Design
- S/C Configuration
- Launcher
- Risk
- Cost
- Simulation
- Programmatics
- Options

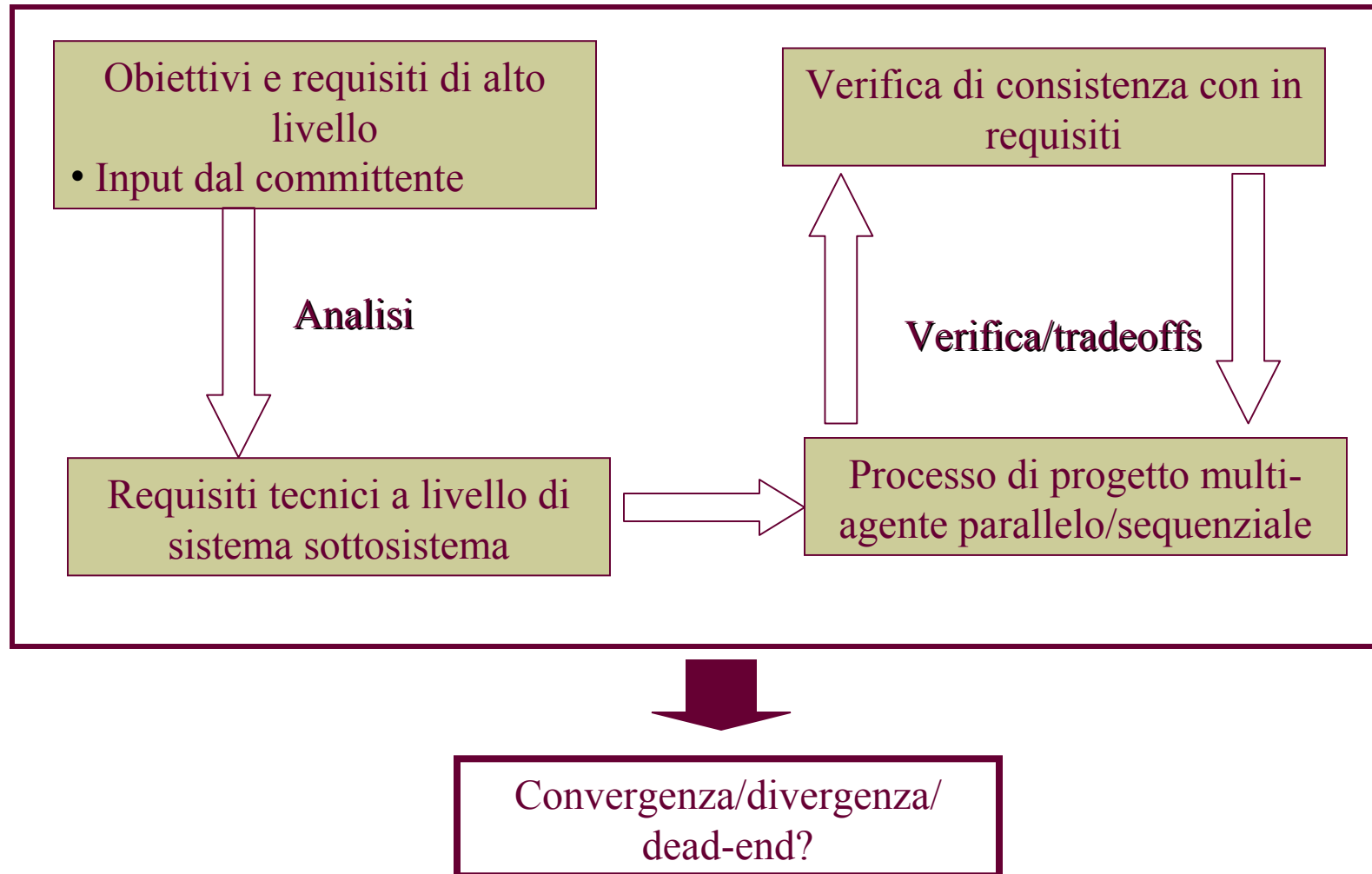
Conceptual model of mission & spacecraft design process

Courtesy from ESA/CDF

venerdì 4 luglio 2008

M.Lavagna - sistemi distribuiti ed autonomia per lo spazio

# Sistemi distribuiti:dove?





# Sistemi spaziali: vincoli

## Vincoli

**Dinamica controllata**: profilo di controllo

- generazione centralizzata
- accoppiamento forte con gli stati di ogni elemento della formazione

**Modello funzionale**: pre-post/condizioni anche inter-elementi



# Sistemi spaziali: vincoli

## Risorse

Limitate - Condivise - Generalizzabili,/specifiche dello scenario

**non consumabili**: Potenza generata → dipendente dalla dinamica del sistema

**consumabili rinnovabili**: Memoria di bordo

**consumabili rinnovabili integrali**: Energia immagazzinata → dipendente dall'allocazione temporale delle attività

Momento della quantità di moto → dipendente dall'allocazione temporale delle attività

**consumabili non rinnovabili**: propellente, tempo, finanziamenti

**Unarie**: Strumentazione/dispositivi



# Sistemi spaziali: variabili libere

## Scenari operativi:

- obiettivi di alto livello
- attività/task di medio livello
- comportamenti/controlli di basso livello

## Scenari di progetto:

- Scelte progettuali a livello di componentistica di sottosistema
- Architetture di alto livello di sistema
- comportamenti/controlli di basso livello



# Conclusioni

- In ambito spaziale lo studio e la realizzazione di sistemi **autonomi** e di sistemi **distribuiti** si sta rivelando un passaggio obbligato per rispondere ad obiettivi e requisiti di missione sempre più stringenti e complessi
- L'approccio distribuito sembra rivelarsi interessante sia in ambito operativo che progettuale
- Apre, tuttavia, problematiche connesse alla gestione della conoscenza e dei vincoli condivisi
- Strumenti di analisi di architetture distribuite nei differenti contesti evidenziati sono di grande interesse per effettuare scelte mirate nella realizzazione delle strategie decisionali necessarie per rendere il sistema ATTIVO rispetto all'ambiente che lo circonda