

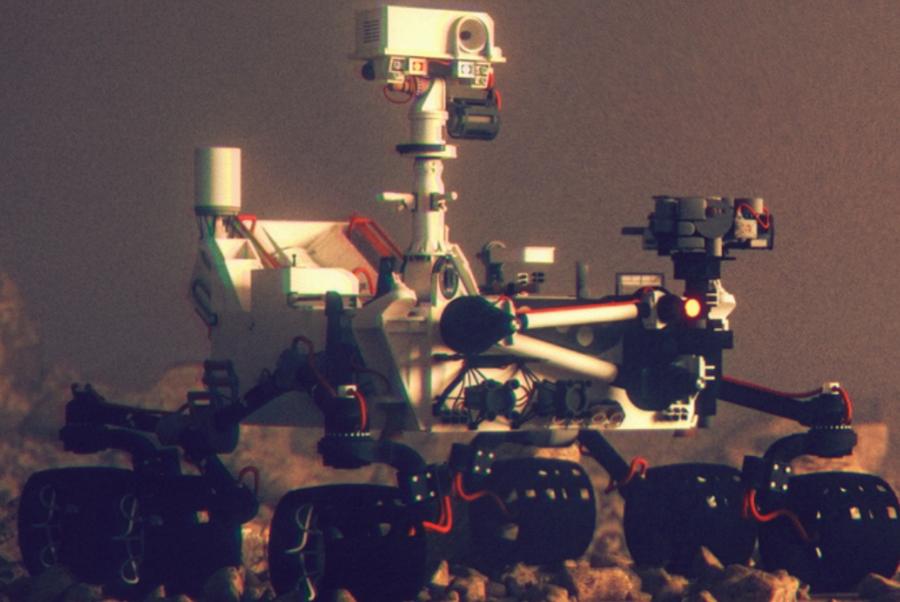


UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI MILANO

Dipartimento d'Informatica  
**Autonomous Mobile Robots as  
Embodied Multi-Agent Systems**  
Giuseppe De Martino

# Alla conquista di Marte

## L'evoluzione dei mars rover





# AGENDA

- Introduzione a Marte
- Scheda tecnica dei Mars Rover
  - Caratteristiche ed equipaggiamento
  - Sistema di navigazione autonoma
- Cosa è stato scoperto
- Progetti futuri



# MARTE

## CARATTERISTICHE FISICHE

Densità: Circa  $1,5 \text{ g/cm}^3$ .

Tempertura max  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  (nelle regioni equatoriali)

Tempertura min  $-140 \text{ }^\circ\text{C}$  (regioni polari.)

Media  $-63 \text{ }^\circ\text{C}$ . circa

Gravità: 38% di quella Terrestre

Distanza dalla terra :

Minima: 54,6 milioni di km

Massima: 401 milioni di km

Diametro

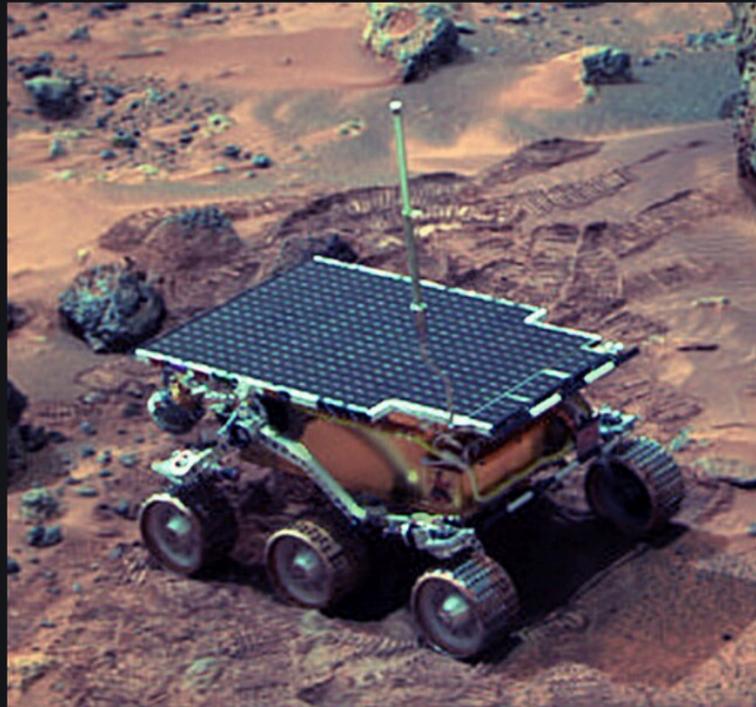
Terra: 12.742 km

Marte: 6.779 km

Circa la metà delle particelle ha una dimensione inferiore a 100 micron.

Un sol -> 24 ore, 39 minuti e 35 secondi

# I MARS ROVER



**SOJOURNER**  
**1997**

Tecnologie di test per i futuri rover, analisi chimica di rocce e suolo



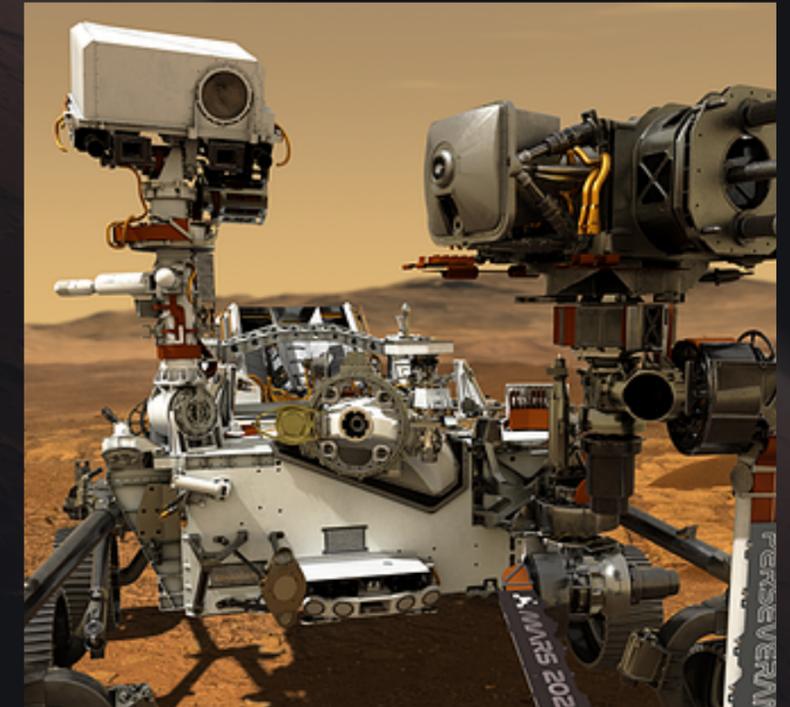
**SPIRIT & OPPORTUNITY**  
**2004**

Esplorare la geologia marziana e cercare segni di attività passata di acqua



**CURIOSITY**  
**2012**

Analisi chimica e mineralogica, studio delle condizioni ambientali, ricerca di composti organici

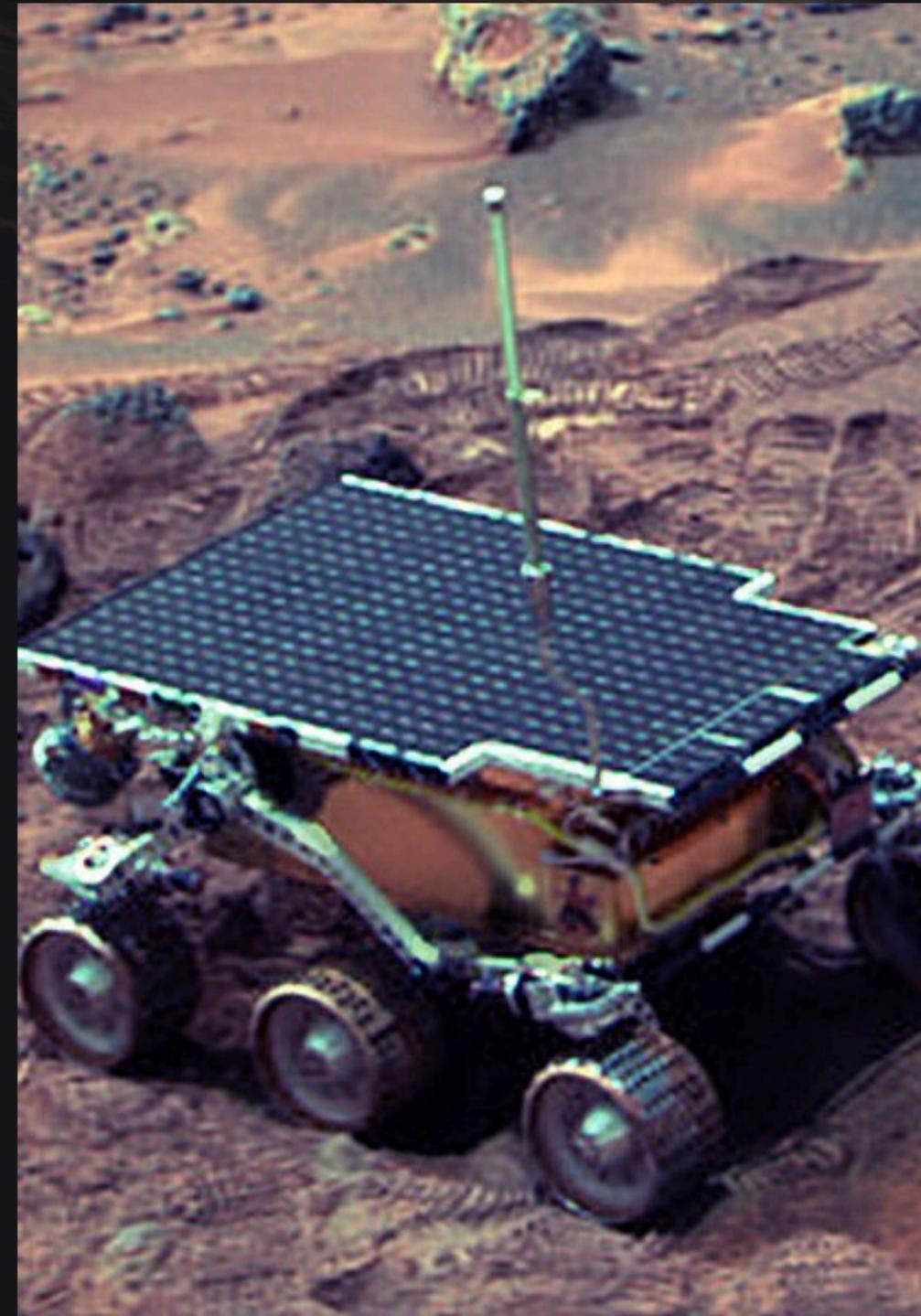


**PERSEVERANCE**  
**2021**

Raccolta e conservazione dei campioni, studio della potenziale abitabilità passata e produzione sperimentale di ossigeno dall'atmosfera

# SOJOURNER

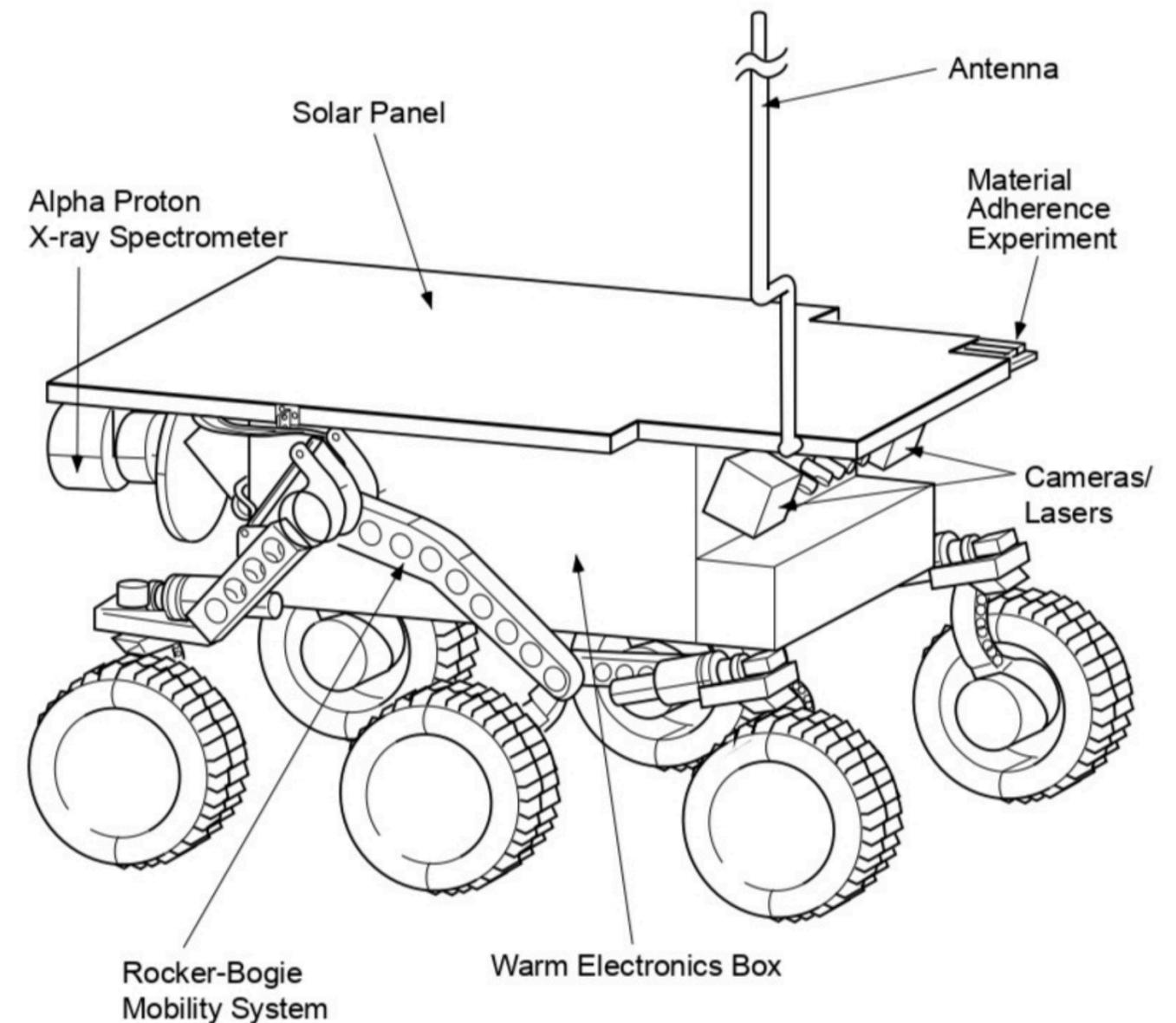
- Dimensioni: 63L × 48W × 28H cm
- Peso: 10,6 kg
- Velocità: ~1 cm/s
- Numero ruote: 6 da 13 cm
- Tipo di batteria: Batteria NiMH (Nickel-Metal Hydride)  
da 18 wattora (Wh)
- Autonomia: 1 sol (ricaricata dai pannelli solari)
- Durata missione: 83 sol (previsti 7 sol)



# SOJOURNER

## EQUIPAGGIAMENTO

- Camera System: Telecamere stereo a colori anteriori e posteriori per immagini e navigazione.
- Alpha Proton X-ray Spectrometer (APXS): Per analizzare la composizione delle rocce e del suolo marziano.
- Accelerometer: Per misurare il movimento e le vibrazioni.
- Temperature Sensors: Per monitorare la temperatura del rover e del suo ambiente.
- Sun Sensors: Per aiutare a orientare il rover in base alla posizione del Sole.



*Mars Pathfinder's Sojourner rover*

# SOJOURNER

## RAPPRESENTAZIONE DELL'AMBIENTE

Governato da remoto tramite il Mars Pathfinder con comunicazioni che impiegavano circa 20 minuti.

Esegua operazioni in autonomia per evitare ostacoli o correggere la traiettoria

Navigazione basata su immagini:

2 telecamere stereo per immagini 2D, elaborazione per identificare ostacoli e calcolare distanza tramite visione stereoscopica.

Algoritmi di evitamento degli ostacoli:

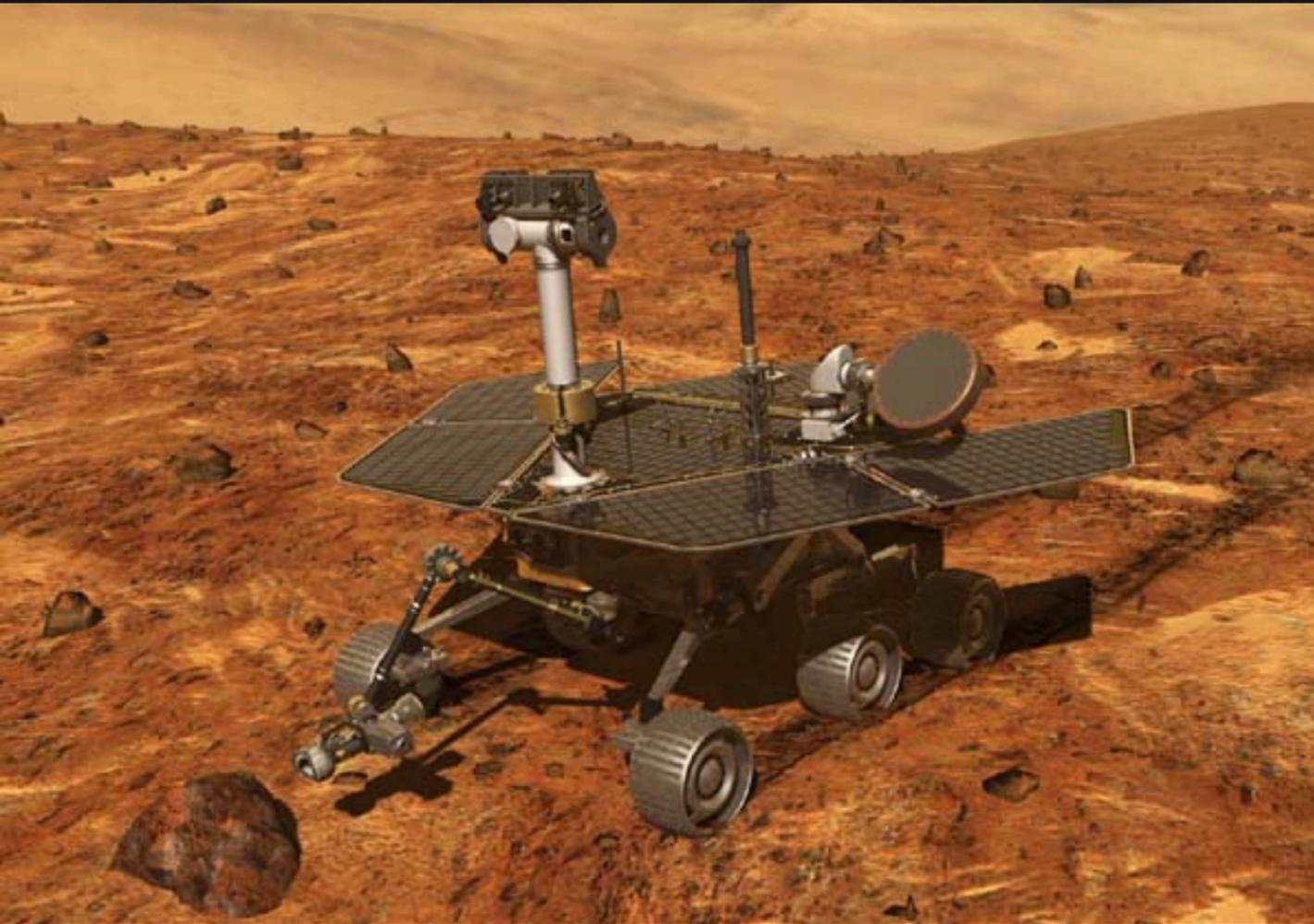
Rilevamento ostacoli a breve distanza e spostamento laterale per aggirarli.

Navigazione basata su odometria:

Monitoraggio della distanza percorsa con sensori di movimento (accelerometri, giroscopi) e contatore ruote per stima posizione.



# SPIRIT & OPPORTUNITY



- Dimensioni: 157L × 230W × 150H cm
- Peso: 185 kg
- Velocità: ~3 cm/s
- Numero ruote: 6 da 26 cm
- Tipo di batteria: Batteria Li-ion (Litio-Ione) da 140 watt
- Autonomia: Solare, operava di giorno
- Durata missione:
  - Spirit: 2.269 sol (previsti 90 sol)
  - Opportunity: 5.111 sol (previsti 90 sol)

# SPIRIT & OPPORTUNITY

## EQUIPAGGIAMENTO

### Navigazione

**NavCam** (Navigation Camera) e **HazCam** (Hazard Avoidance Camera): fotocamere per supportare la navigazione del rover e per il rilevamento di ostacoli durante i suoi spostamenti.

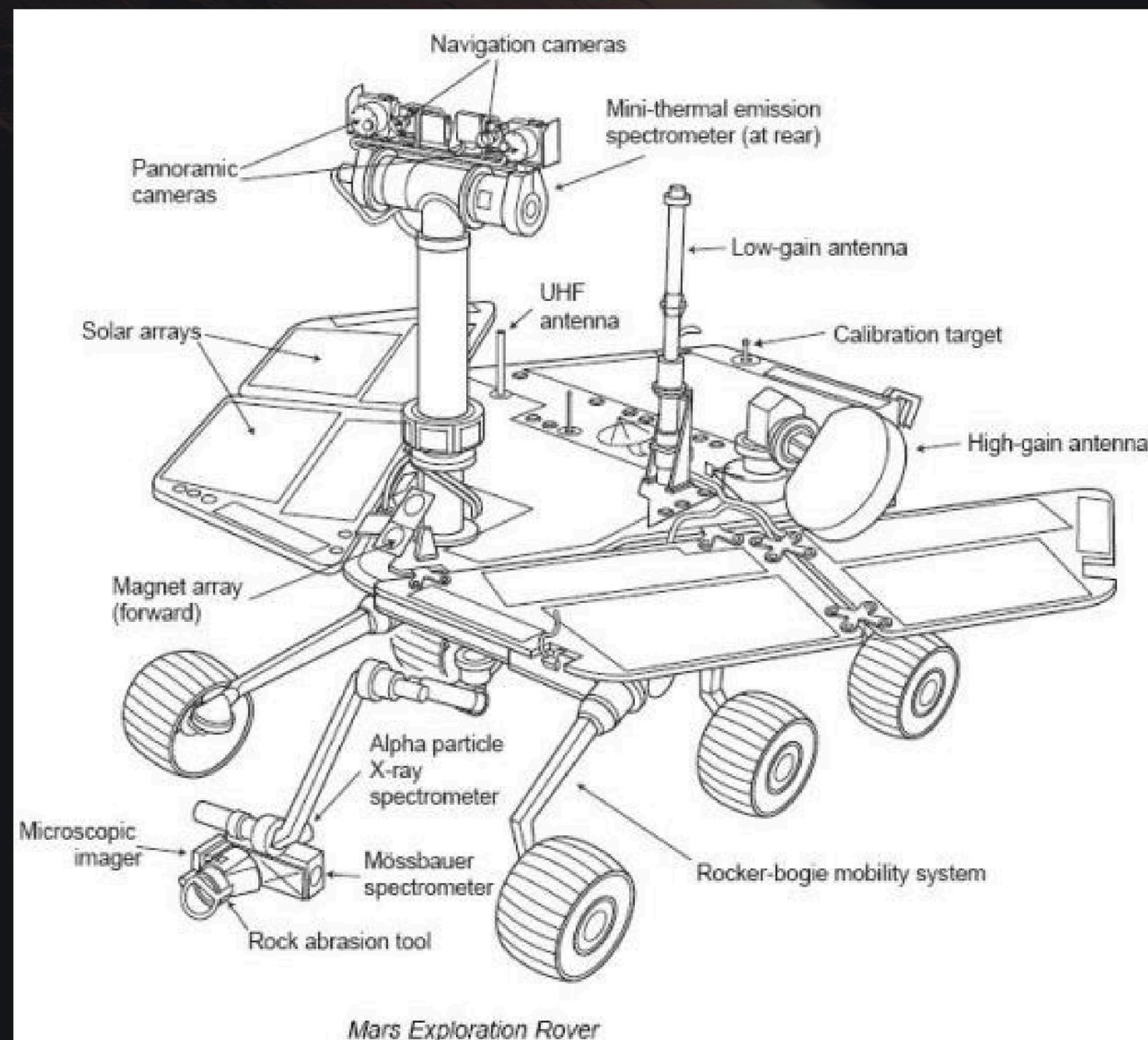
### Scientifiche

**PanCam** (Panoramic Camera): 2 fotocamere a colori per catturare immagini a 360°. Usata per studi geologici.

**MiniTES** (Miniature Thermal Emission Spectrometer):

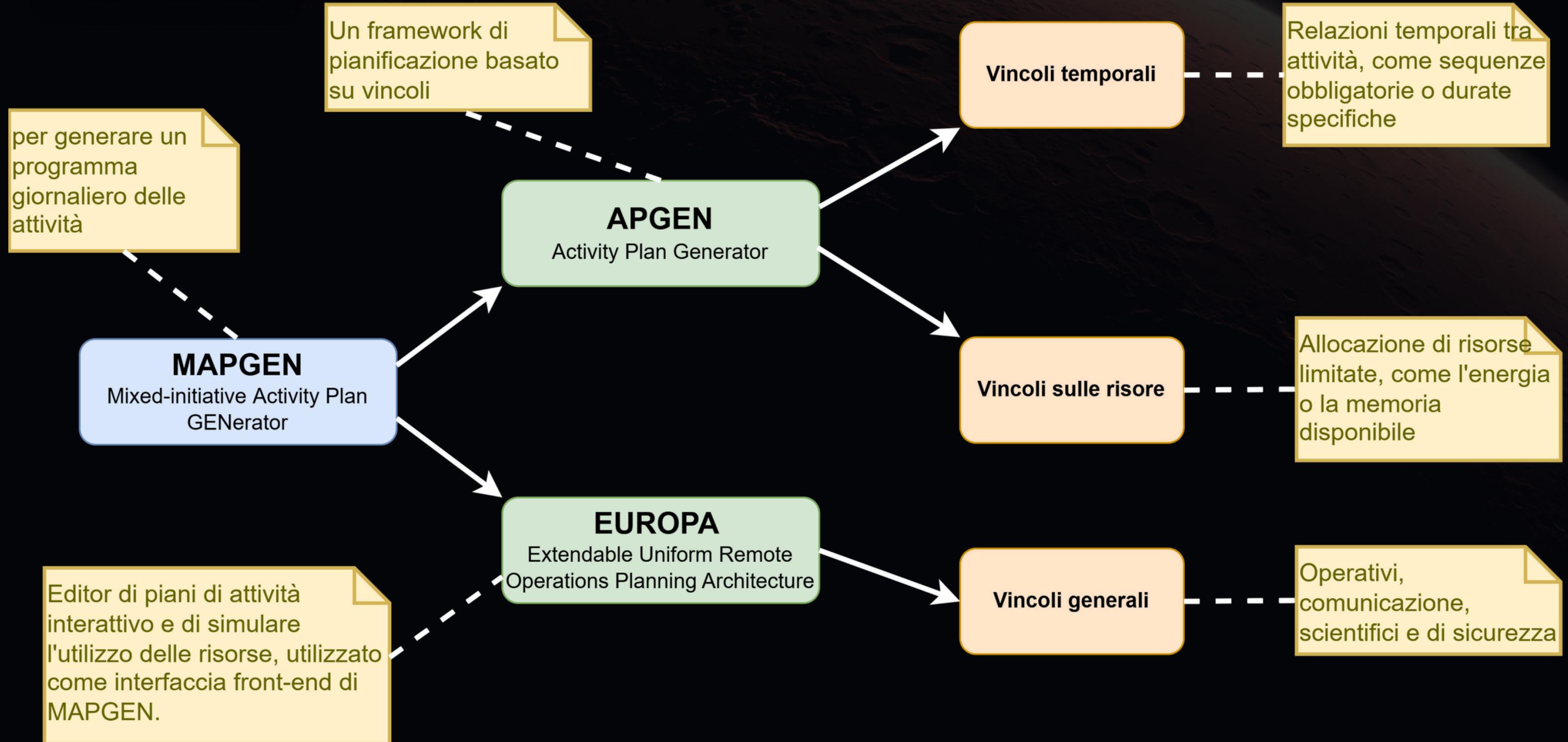
Spettrometro a emissione termica miniaturizzato che analizzava la radiazione infrarossa emessa dalle superfici marziane.

**RAT** (Rock Abrasion Tool): Un utensile rotante con dischi abrasivi, in grado di rimuovere uno strato superficiale delle rocce marziane.



# SPIRIT & OPPORTUNITY

## PIANIFICAZIONE



Un framework di pianificazione basato su vincoli

per generare un programma giornaliero delle attività

**MAPGEN**  
Mixed-initiative Activity Plan  
GENERator

**APGEN**  
Activity Plan Generator

**EUROPA**  
Extendable Uniform Remote  
Operations Planning Architecture

**Vincoli temporali**

Relazioni temporali tra attività, come sequenze obbligatorie o durate specifiche

**Vincoli sulle risorse**

Allocazione di risorse limitate, come l'energia o la memoria disponibile

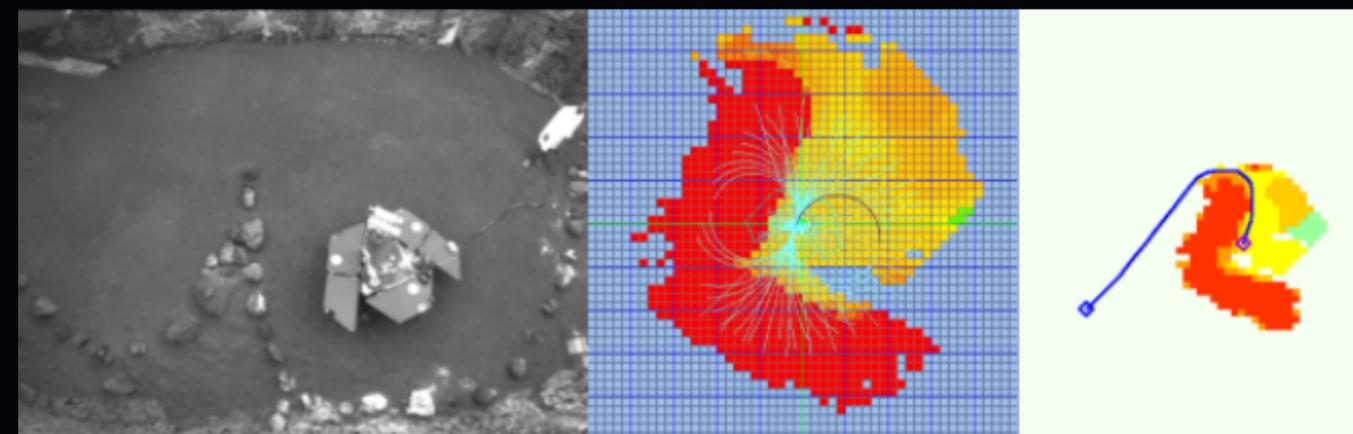
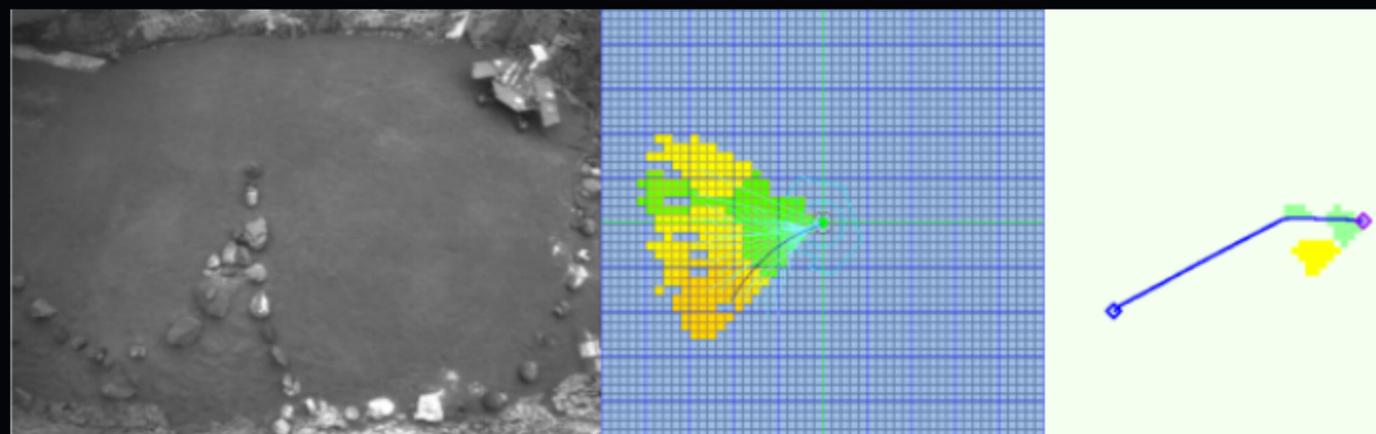
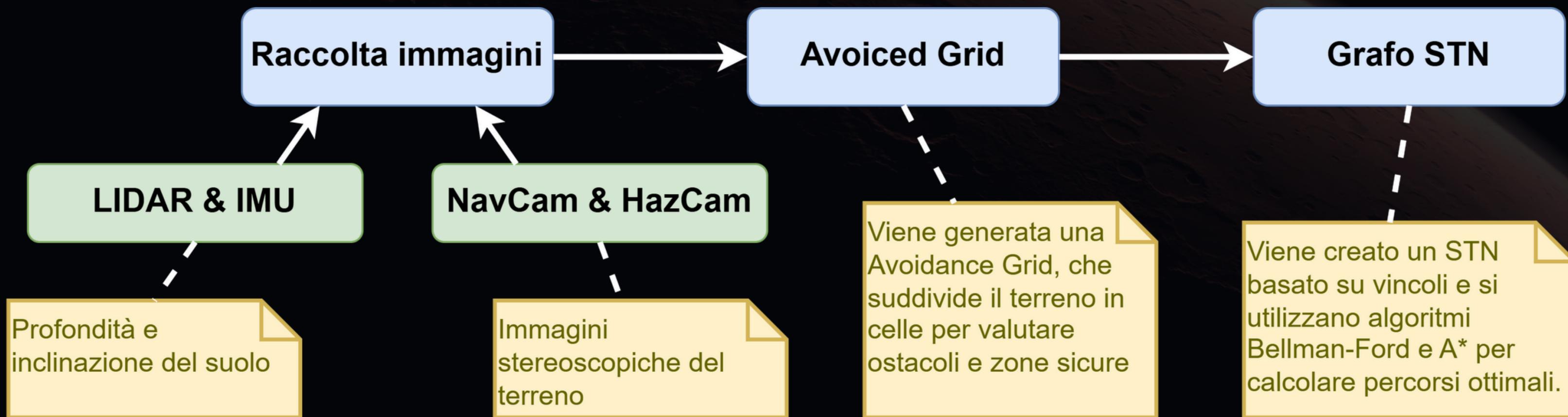
**Vincoli generali**

Operativi, comunicazione, scientifici e di sicurezza

Editor di piani di attività interattivo e di simulare l'utilizzo delle risorse, utilizzato come interfaccia front-end di MAPGEN.

# SPIRIT & OPPORTUNITY

## PIANIFICAZIONE DEGLI SPOSTAMENTI

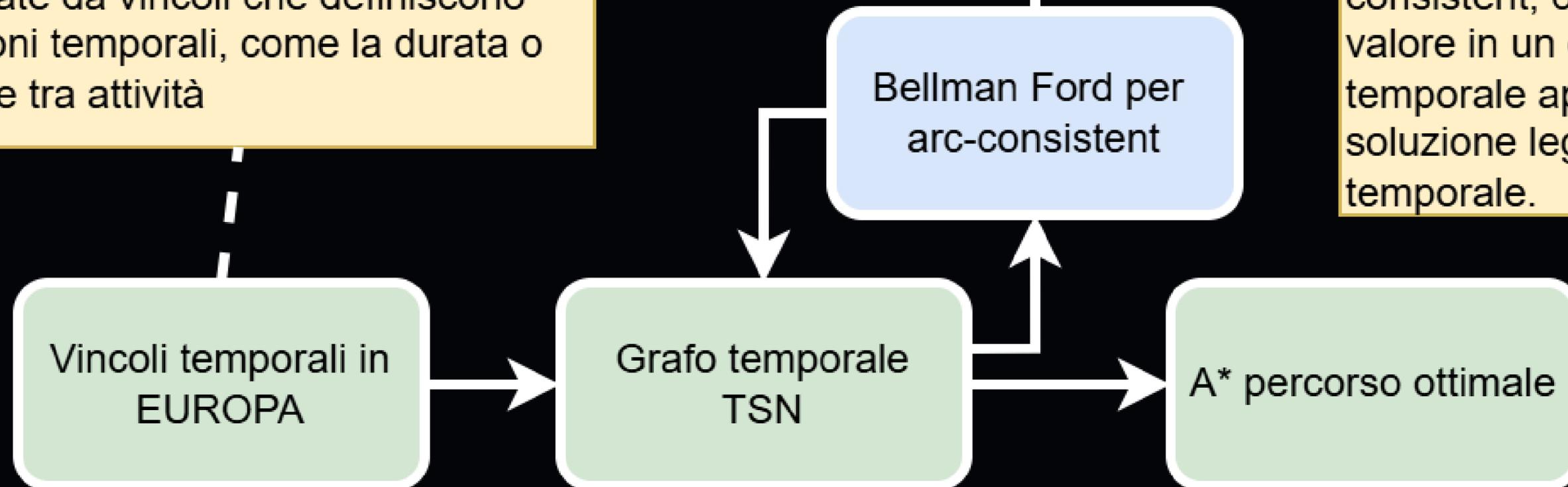


# SPIRIT & OPPORTUNITY

## PIANIFICAZIONE ALGORITMI

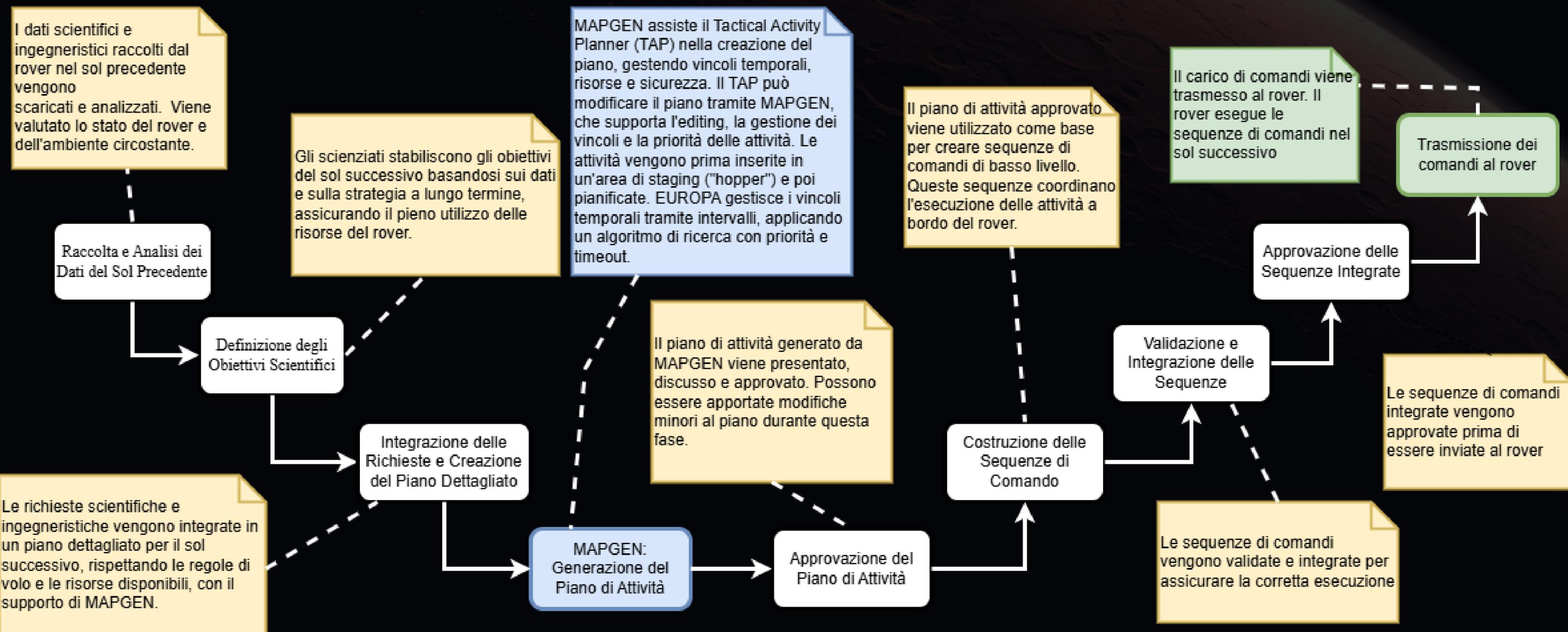
I vincoli temporali in EUROPA sono rappresentati come una rete temporale semplice (STN). Questa rete include variabili che rappresentano i punti temporali di inizio e fine delle attività, collegate da vincoli che definiscono relazioni temporali, come la durata o l'ordine tra attività

Per verificare la consistenza di queste reti temporali, EUROPA utilizza l'algoritmo di Bellman-Ford per determinare se la rete è consistente e di renderla arc-consistent, ovvero tale che ogni valore in un dominio di una variabile temporale appaia in almeno una soluzione legale della rete temporale.



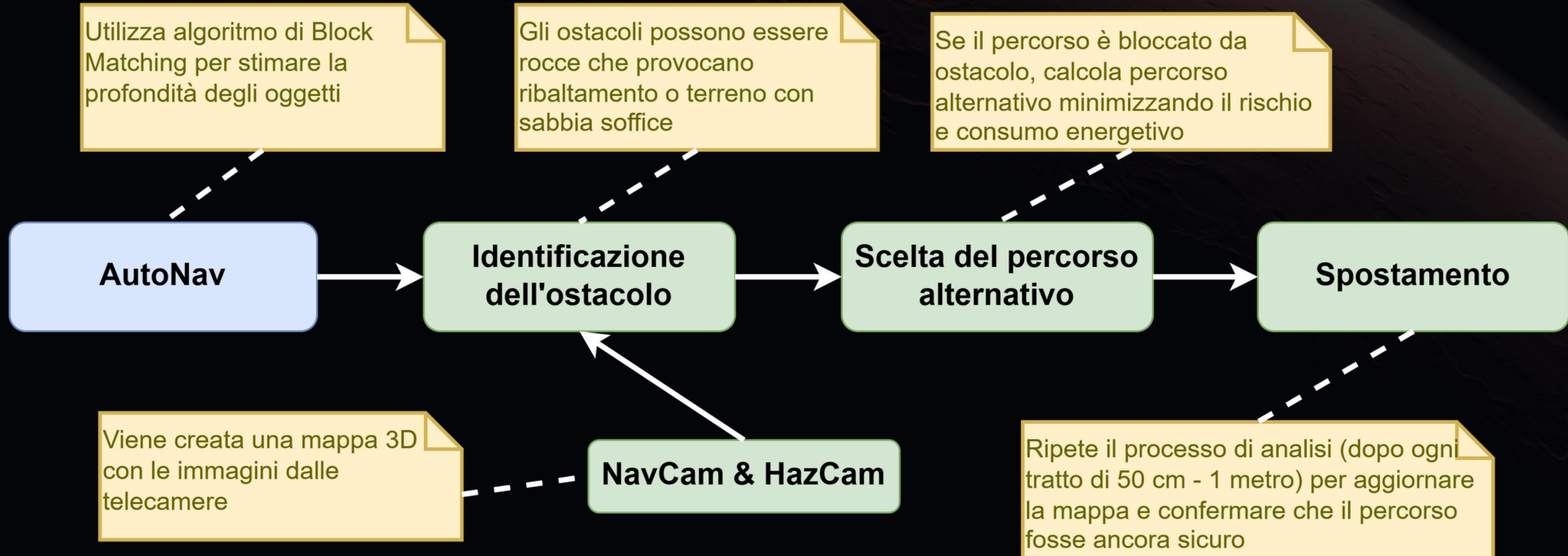
# SPIRIT & OPPORTUNITY

## PIANIFICAZIONE



# SPIRIT & OPPORTUNITY

## NAVIGAZIONE AUTONOMA



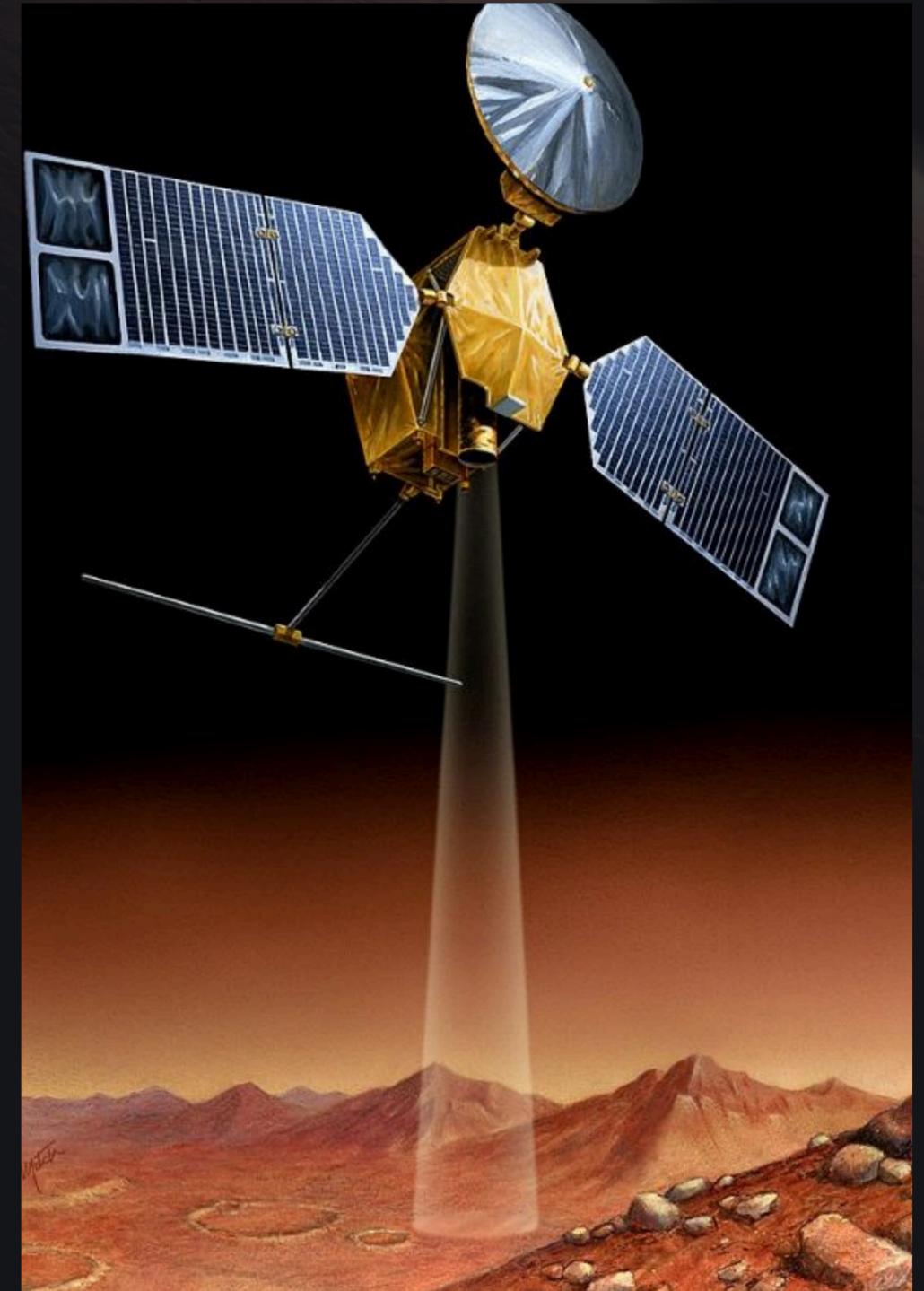
# HIRISE

JPL, High Resolution Imaging Experiment <https://science.nasa.gov/mission/mars-reconnaissance-orbiter/science-instruments/>

Potente fotocamera a bordo del Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) della NASA, in attivo dal 12 agosto 2005, è in grado di catturare immagini ad alta risoluzione della superficie marziana, rilevando dettagli fino alle dimensioni di un tavolo da cucina.



Front end of the HiRISE Telescopic Camera for Mars Reconnaissance Orbiter.  
NASA/JPL-Caltech/Ball Aerospace



# CURIOSITY

NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL). (2012). Curiosity Rover: Mission Overview. NASA.  
<https://mars.nasa.gov/msl/mission/overview/>

- Dimensioni: 290L × 270W × 220L cm
- Peso: 899 kg
- Velocità: ~4,5 cm/s
- Numero ruote: 6 da 50 cm
- Tipo di batteria: 2 batterie a ioni di litio ricaricate da generatore RTG (Radioisotope Thermoelectric Generator) da 125 Watt e 42 ampere ora
- Autonomia: 14 Anni, grazie al plutonio-238
- Durata missione: ancora operativo



# CURIOSITY

## EQUIPAGGIAMENTO

### Cam per la navigazione

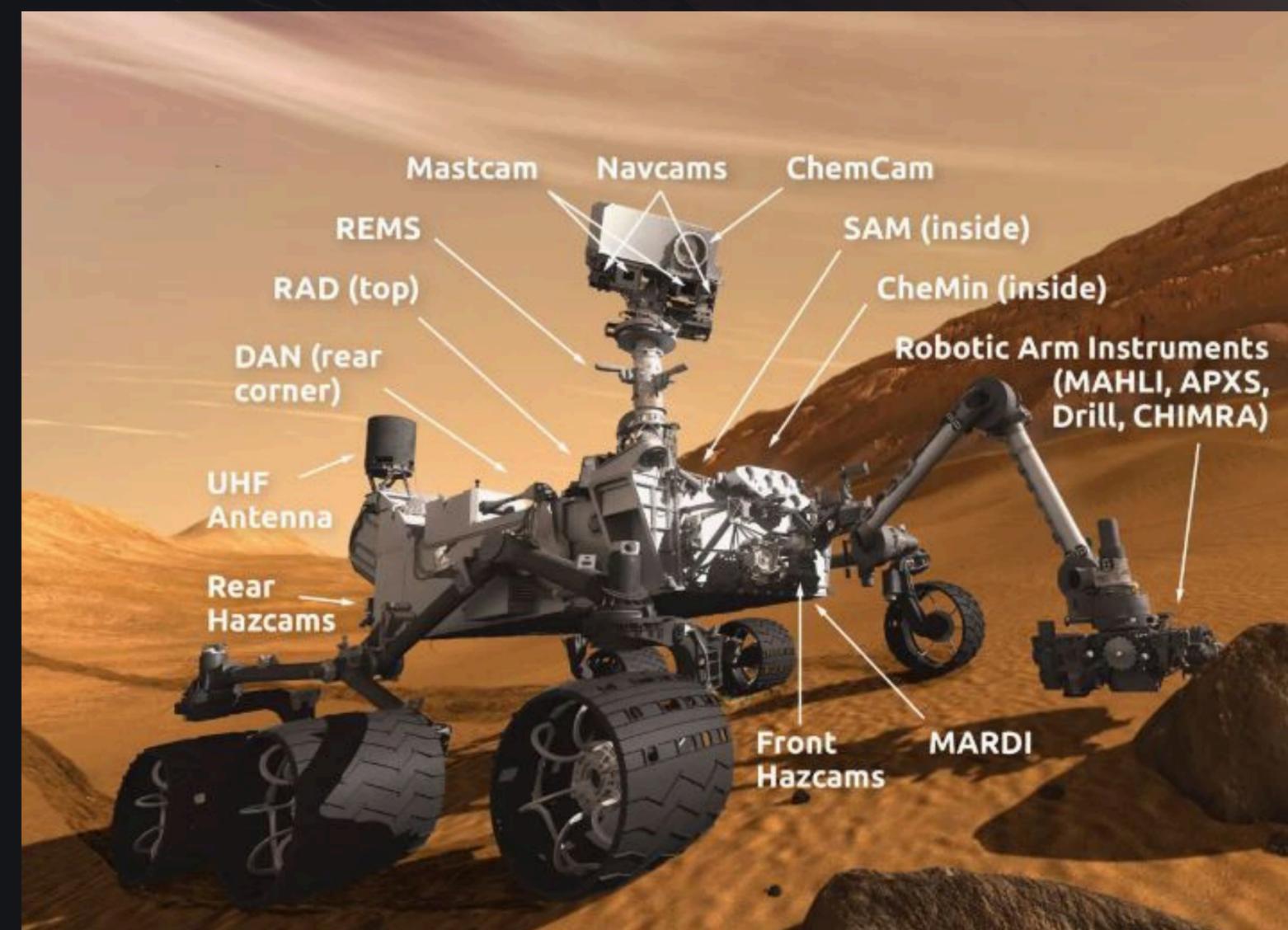
- Hazard Avoidance Cameras (Hazcams): 4 telecamere per rilevamento ostacoli sul percorso
- Navigation Cameras (Navcams): 2 telecamere per immagini stereoscopiche per la navigazione

### Cam scientifiche

- Mast Camera (Mastcam)
- Chemistry and Camera Complex (ChemCam)
- Rover Environmental Monitoring Station (REMS)
- Mars Hand Lens Imager (MAHLI)

### Sensori

- Alpha Particle X-ray Spectrometer (APXS)
- Chemistry and Mineralogy (CheMin)
- Sample Analysis at Mars (SAM)
- Radiation Assessment Detector (RAD):
- Dynamic Albedo of Neutrons (DAN)



# CURIOSITY

## ATTUATORI

**Braccio Robotico:** braccio a cinque gradi di libertà, lungo circa 2,1 metri, dotato di MAHLI, APXS e di un drill

**Drill:** Strumento montato sul braccio robotico per raccogliere campioni interni da analizzare con gli strumenti di bordo.

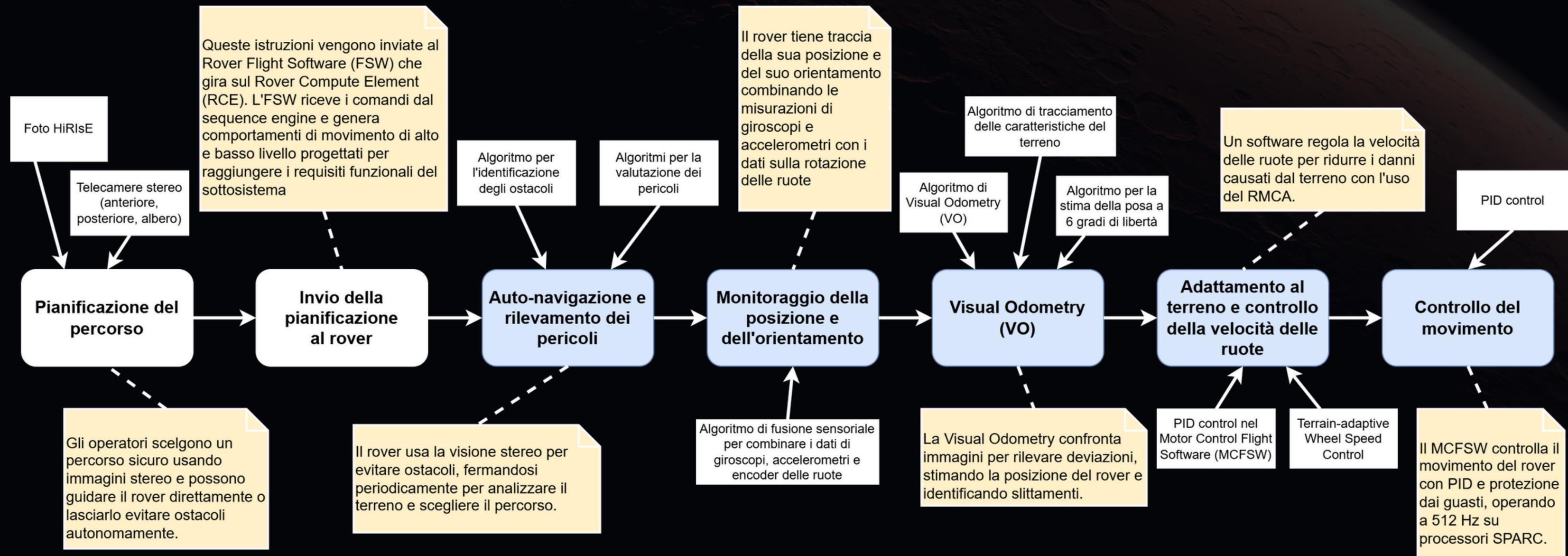


Drilling Sample in the Scoop

# CURIOSITY

## PIANIFICAZIONE E NAVIGAZIONE

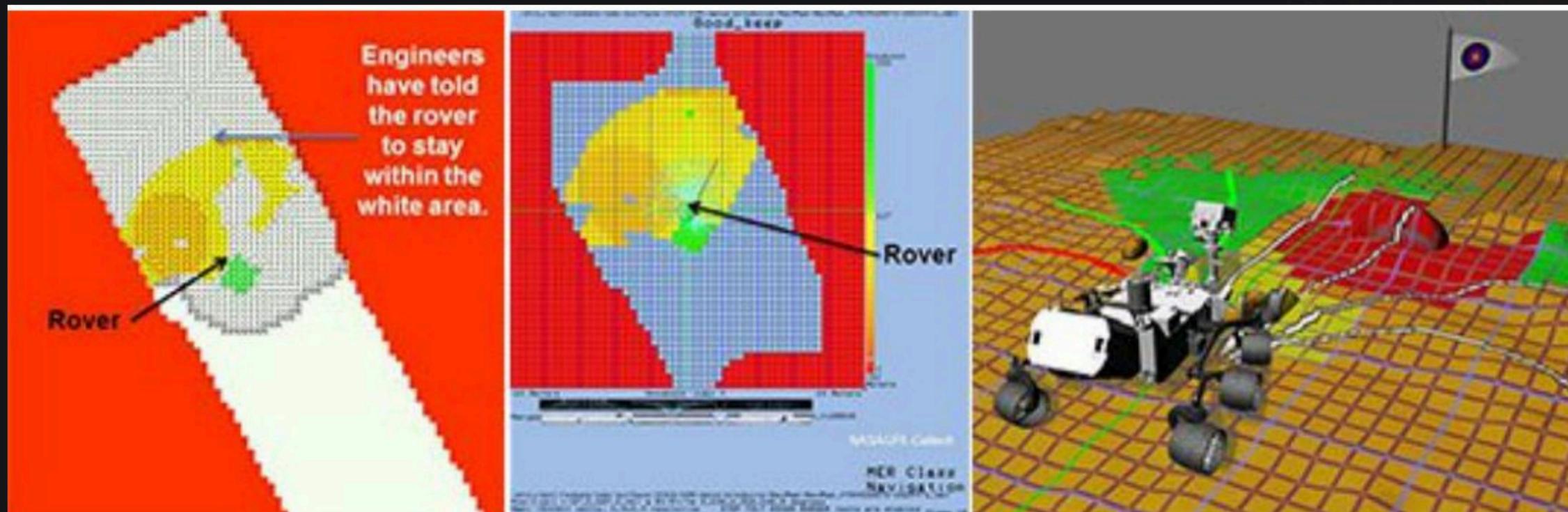
1. Il rover avanza per una breve distanza (0.5-1.5 metri).
2. Si ferma e acquisisce immagini stereo.
3. Valuta i potenziali pericoli nel terreno (ostacoli, pendenze, asperità).
4. Decide il percorso successivo per evitare i pericoli



# CURIOSITY

## PIANIFICAZIONE E NAVIGAZIONE

- Dijkstra: Per determinare il percorso ottimale tra due punti sulla superficie di Marte, considerando la distanza e gli ostacoli come rocce o crateri.
- A\*: Vengono aggiunte delle euristiche e impiegato dove le distanze sono essere lunghe e il terreno è sconosciuto.
- RRT (Rapidly-exploring Random Trees): Per esplorare terreni accidentati e complessi.



Three representations of MSL autonomous navigation: operators bound the space, the rover interprets the terrain, and a 3D view of the rover in a similar terrain.

# PERSEVERANCE

Jet Propulsion Laboratory. (2020). Mars 2020 Perseverance Rover: Press Kit. NASA:  
[https://www.jpl.nasa.gov/news/press\\_kits/mars\\_2020/download/mars\\_2020\\_launch\\_press\\_kit.pdf](https://www.jpl.nasa.gov/news/press_kits/mars_2020/download/mars_2020_launch_press_kit.pdf)  
JPL, Mars 2020: Perseverance Rover  
<https://science.nasa.gov/mission/mars-2020-perseverance/science-instruments/>

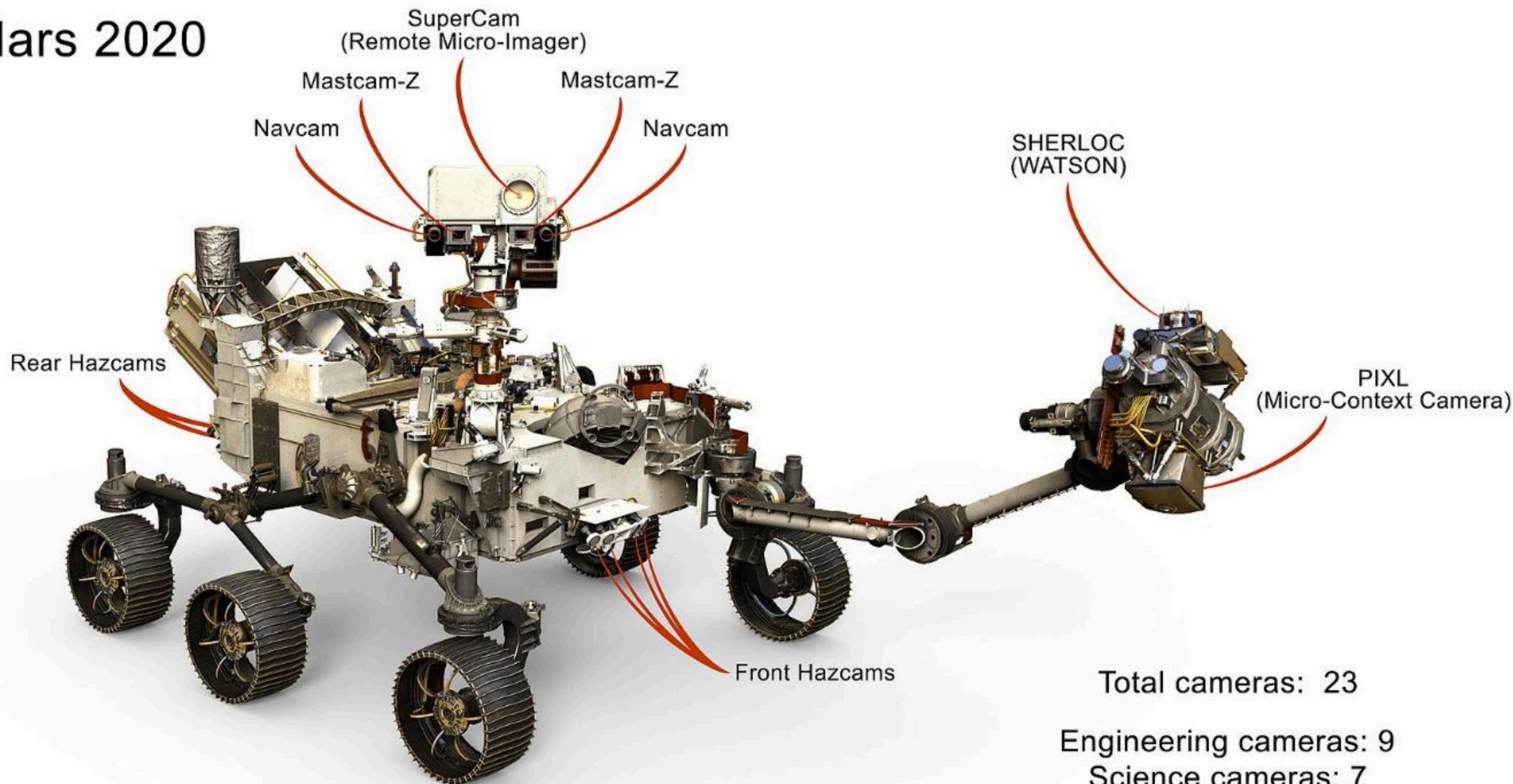
- Dimensioni: 300L × 270W × 220L cm
- Peso: 1.025 kg
- Velocità: ~4,8 cm/s
- Numero ruote: 6
- Diametro ruote: 52,5 cm
- Tipo di batteria: 2 batterie a ioni di litio da 900 watt per 43 amp-ora ricaricate da generatore MMRTG (termoelettrico a radioisotopi multi-missione)
- Autonomia: 14 Anni, grazie al plutonio-238
- Durata missione: Ancora operativo



# PERSEVERANCE

## EQUIPAGGIAMENTO

### Mars 2020



Total cameras: 23

Engineering cameras: 9

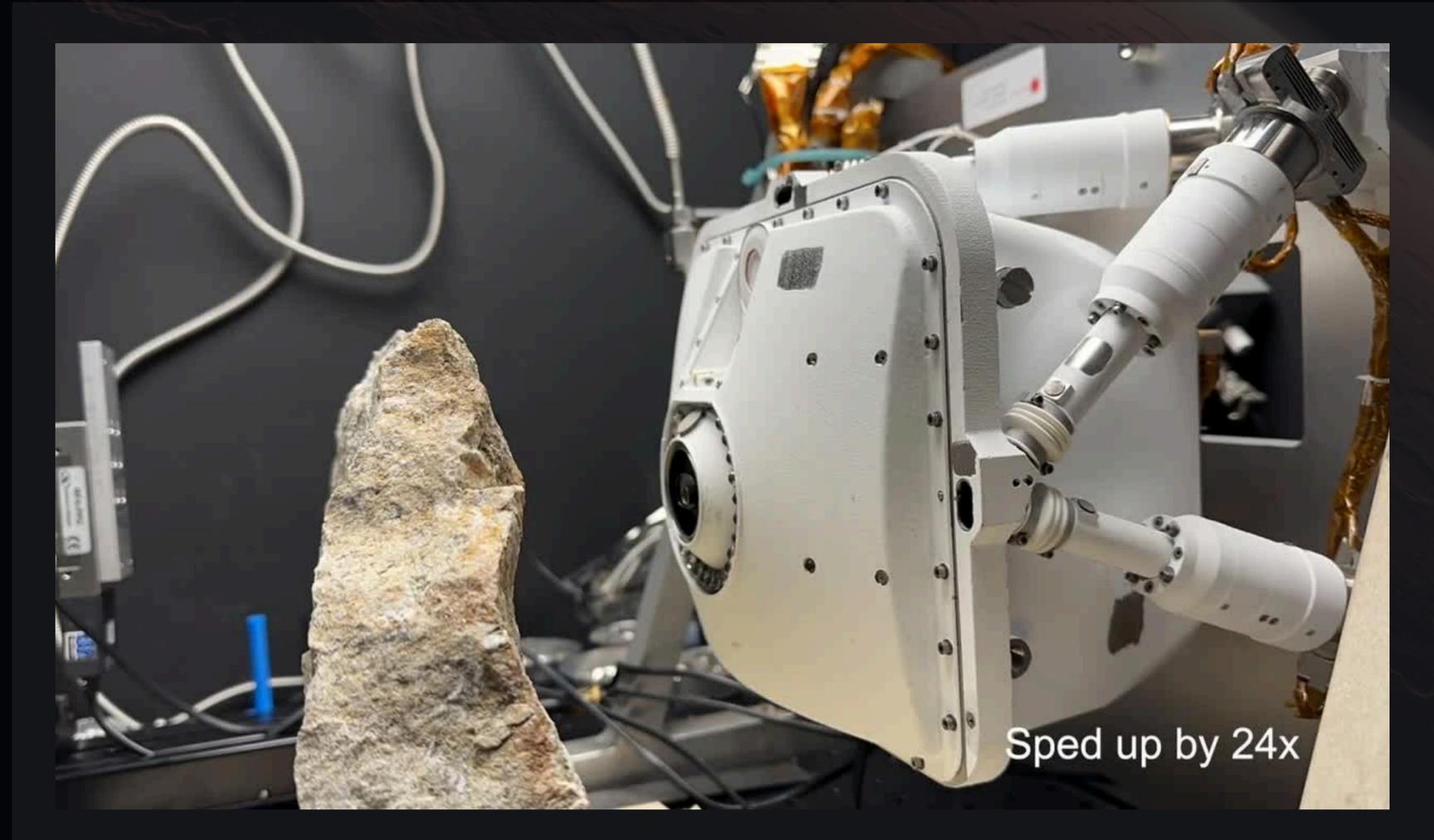
Science cameras: 7

Entry, descent and landing cameras: 7

# PERSEVERANCE

## PIXL (PLANETARY INSTRUMENT FOR X-RAY LITHOCHEMISTRY)

Spettrometro a fluorescenza X con telecamera ad alta risoluzione, capace di fornire immagini a risoluzione sub-millimetrica e analisi chimiche dettagliate delle rocce e del suolo. Scopo: Determinare la composizione elementare dei materiali marziani a livello microscopico.



# PERSEVERANCE

## SHERLOC

### SCANNING HABITABLE ENVIRONMENTS WITH RAMAN & LUMINESCENCE FOR ORGANICS & CHEMICALS

Spettrometro Raman con imaging a fluorescenza e una telecamera macro. Utilizza spettroscopia Raman e fluorescenza per identificare minerali organici e inorganici, è assistito da un'altra telecamera chiamata WATSON



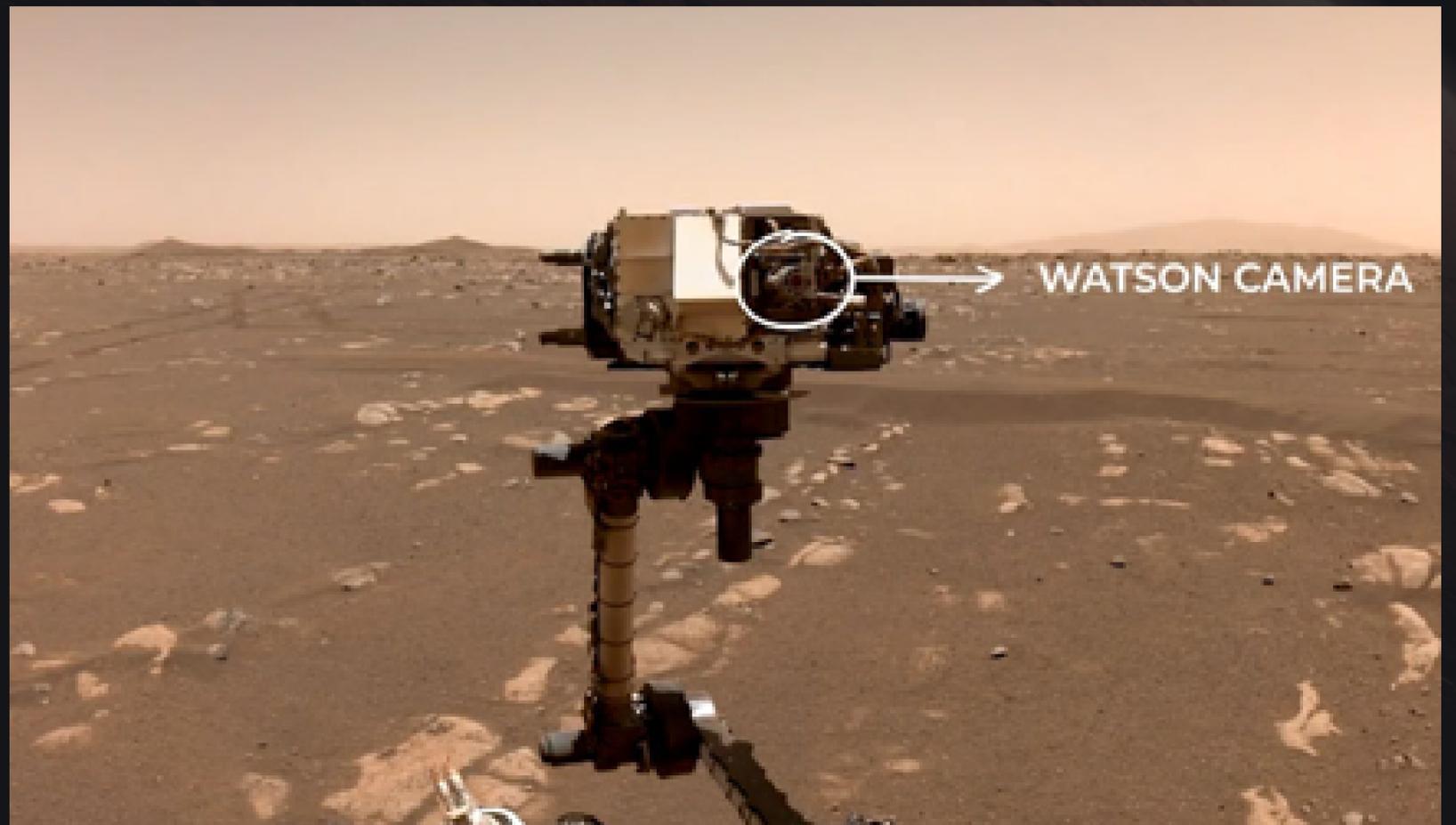
# PERSEVERANCE

## WATSON

### (WIDE ANGLE TOPOGRAPHIC SENSOR FOR OPERATIONS AND ENGINEERING)

Telecamera montata sul braccio robotico del rover. Fornisce immagini a colori ad alta risoluzione delle rocce, del suolo delle attrezzature del rover.

Scopo: Supportare le operazioni del braccio robotico e documentare le aree di campionamento.



# PERSEVERANCE

## SENSORI

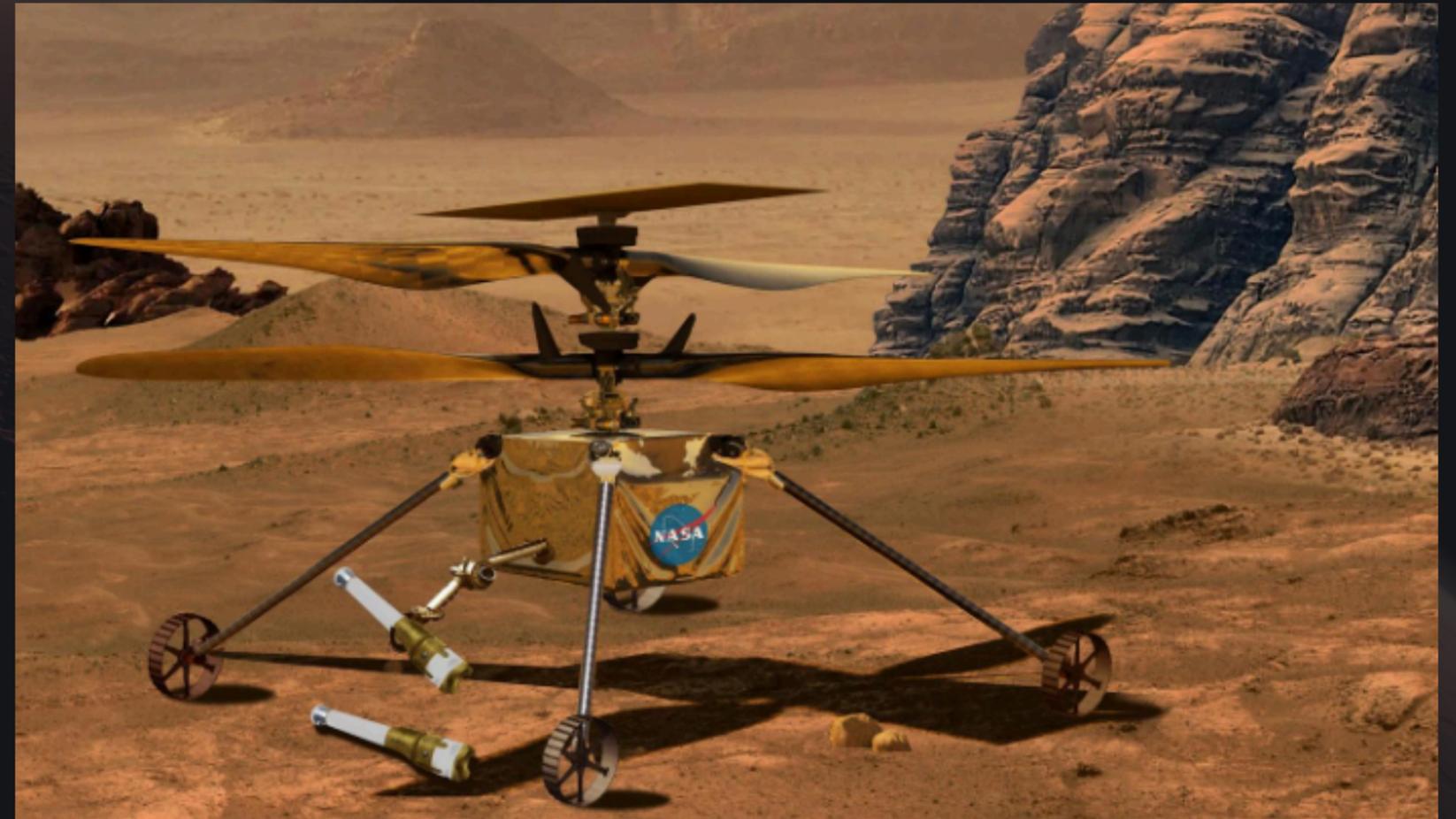
- MEDA (Mars Environmental Dynamics Analyzer): misurare velocità e direzione del vento, pressione dell'aria, umidità relativa, temperatura ambiente e radiazione solare.
- MOXIE (Mars Oxygen ISRU Experiment): convertire l'anidride carbonica nell'atmosfera marziana in ossigeno.
- PIXL (Planetary Instrument for X-ray Lithochemistry): raggio di raggi X verso le rocce per determinarne la composizione chimica elementare.
- RIMFAX (Radar Imager for Mars' Subsurface Experiment): Radar a penetrazione nel terreno per determinare come si sono formati diversi strati della superficie marziana.
- SuperCam: Strumento che utilizza un laser a impulsi per studiare la chimica di rocce e suolo. Include un microfono per registrare il suono dei laser.
- Microfoni: Uno su SuperCam e uno sul lato del rover.
- Sensori di navigazione: Sensori aggiornati, computer e algoritmi che forniscono capacità di attraversamento rapido.

# PERSEVERANCE

## INGENUITY

Dimostrare le tecnologie necessarie per volare nell'atmosfera marziana

Alimentato da un pannello solare che carica batterie agli ioni di litio con un'autonomia sufficiente per un volo di 90 secondi



- Unità di misura inerziale (IMU): misura l'accelerazione e la velocità angolare dell'elicottero
- Altimetro: misura l'altitudine dell'elicottero rispetto alla superficie marziana
- Inclino metro: Questo sensore misura gli angoli di inclinazione dell'elicottero
- due telecamere, una a colori per immagini del terreno e una in bianco e nero per la navigazione

# PERSEVERANCE

## NAVIGAZIONE

### Raccolta dati iniziale

- Acquisizione Immagini
- Analisi Sensoriale
- Info Meteo

Il rover acquisisce immagini stereo per creare una mappa di elevazione 2.5D del terreno, aggiornandola con una nuvola di punti 3D. Successivamente, analizza il terreno e genera una costmap, valutando inclinazione, rugosità e costo di attraversamento, assegnando costi elevati alle aree difficili o proibite.

### Pianificazione Percorso

- Definizione Obiettivi Scientifici
- Analisi Percorso Ottimale
- Valutazione dei Dati
- Simulazione del Percorso

I team scientifici definiscono gli obiettivi della missione, selezionano le aree di interesse e pianificano i percorsi del rover tenendo conto del terreno e delle priorità scientifiche, mentre gli ingegneri traducono questi piani in comandi eseguibili per il movimento, la raccolta di immagini, l'analisi chimica e le attività di campionamento.

### Invio Comandi al Rover

### Guida autonoma

- Selezione del percorso
- Ranking iniziale del percorso
- Valutazione ACE
- Applicazione delle euristiche
- Euristiche basate sulla convoluzione del gradiente
- Euristiche basate sull'apprendimento automatico
- Scelta del percorso finale
- Attuazione della prima manovra
- Ripetizione del ciclo

Il rover utilizza il software **Enhanced AutoNav (ENav)** per selezionare il percorso migliore, analizzando opzioni basate su costi di attraversamento e distanza dall'obiettivo. Un algoritmo di valutazione (ACE) verifica la sicurezza dei percorsi, eliminando quelli non percorribili. Euristiche basate su gradienti e apprendimento automatico ottimizzano la selezione. Dopo aver scelto il percorso più sicuro ed efficiente, il rover esegue la prima parte della manovra, acquisisce nuove immagini e ripete il ciclo di pianificazione per adattarsi continuamente al terreno.

# PERSEVERANCE

## NAVIGAZIONE DECISIONE AUTONOMA

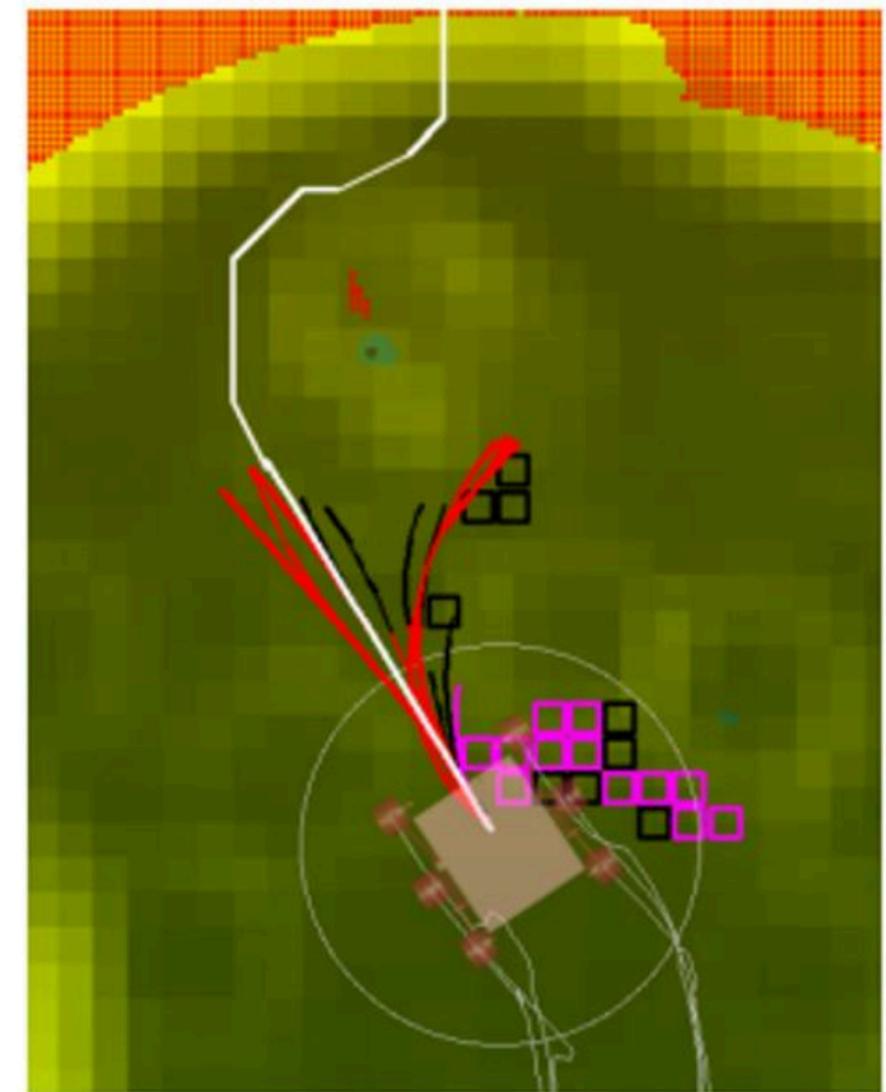


# PERSEVERANCE

## NAVIGAZIONE ENHANCED AUTONAV (ENAV)

**ENav:** software per la pianificazione dei percorsi sicuri ed efficienti in autonomia, utilizzando dati sensoriali, algoritmi e machine learning.

1. Acquisizione Immagini: Telecamere stereo.
2. Disparità: Immagine di disparità convertita in nuvola di punti 3D.
3. Mappa di Elevazione: Aggiornamento della mappa 2.5D.
4. Percorsi Candidati: Albero di opzioni (svolte e archi). Esempio: 14 svolte + 2x11 archi di 3 metri = 1694 percorsi.
5. Ranking Percorsi: Euristiche (gradiente e ML) per ordinare. Le euristiche sono usate per ordinare i percorsi prima dell'analisi ACE.
6. Valutazione ACE: Verifica della sicurezza dei percorsi. Un albero di percorsi più ampio (4050 percorsi) è reso possibile dalle euristiche, aumentando le opzioni di percorso
7. Esecuzione: Il rover segue il percorso migliore e il ciclo si ripete

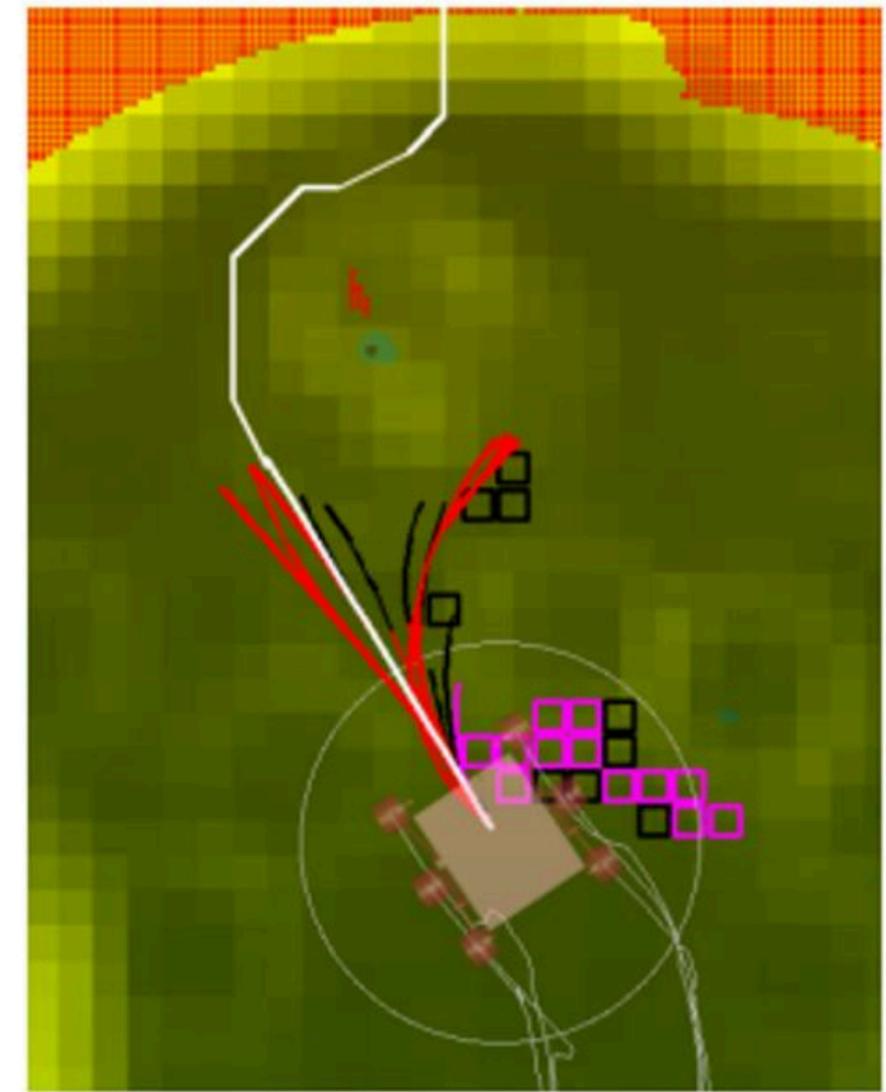


**Figure 1:** A view of the ENav simulation environment. The green-yellow terrain shows how the Gradient Convolution heuristic, developed in this work, has assessed the cost of traversing the terrain (yellow regions are higher cost) and steers the rover toward safer regions.

# PERSEVERANCE

## NAVIGAZIONE ENHANCED AUTONAV (ENAV) ALGORITMI

- Approximate Clearance Evaluation (ACE): Questo algoritmo valuta la sicurezza dei percorsi candidati, determinando se il rover può attraversarli senza rischi.
- Heuristiche Basate su Machine Learning (ML): Per migliorare l'efficienza, ENav integra modelli di ML che prevedono la fattibilità dei percorsi, riducendo il numero di valutazioni necessarie da parte di ACE.
- MLNav Framework: Machine Learning-based Navigation, utilizza reti neurali profonde per prevedere la percorribilità del terreno, riducendo il carico computazionale associato alle valutazioni tradizionali.



**Figure 1:** A view of the ENav simulation environment. The green-yellow terrain shows how the Gradient Convolution heuristic, developed in this work, has assessed the cost of traversing the terrain (yellow regions are higher cost) and steers the rover toward safer regions.

# CONFTONTO PIANIIFCAZIONE SPOSTAMENTI

## Sojourner

Pianificazione manuale basata su poche euristiche per il riconoscimento degli ostacoli

## Spirit & Opportunity

Viene generata una Avoidance Grid, che suddivide il terreno in celle per valutare ostacoli e zone sicure.

Si utilizzano algoritmi A\* e D\*

Lite per calcolare percorsi ottimali.

## Curiosity

Utilizza Dijkstra per determinare percorsi ottimali, A\* con euristiche per terreni sconosciuti e distanze lunghe, e RRT per esplorare terreni accidentati e complessi

## Perseverance

Pochissima pianificazione viene delegato molto alla guida autonoma mediante MLNav, e ACE

# CONFTONTO NAVIGAZIONE AUTONOMA

## Sojourner

1. Acquisizione immagini da fotocamera per identificare ostacoli.
2. Decisione locale basata su algoritmi semplici di evitamento degli ostacoli.
3. Movimento breve e correzione .
4. Invio dei dati alla Terra per nuovi comandi.

- **Dipendenza quasi totale dai comandi degli operatori sulla Terra.**
- **Non poteva pianificare percorsi complessi o navigare autonomamente su lunghe distanze.**

## Spirit & Opportunity

1. Acquisizione immagini da NavCams e HazCams per costruire una mappa del terreno.
2. Generazione di un percorso sicuro basato su un algoritmo di grid-based path planning.
3. Verifica della sicurezza.
4. Evitamento degli ostacoli attraverso un modello semplificato di valutazione del terreno.
5. Movimento autonomo fino a 50-100 metri al giorno, con correzioni periodiche.

- **Movimenti lenti e dipendenza da conferme della Terra.**
- **Algoritmi meno sofisticati rispetto a quelli moderni, con frequenti stop per evitare errori.**

## Curiosity

1. Acquisizione immagini e costruzione della mappa 3D del terreno con telecamere e LIDAR.
2. Pianificazione del percorso con A\* e D\* (custom) .
3. Evitamento avanzato degli ostacoli con modelli dettagliati del terreno.
4. Movimento autonomo su distanze fino a 200 metri.
5. Auto-stop in caso di rischio elevato, con richiesta di conferma dalla Terra.

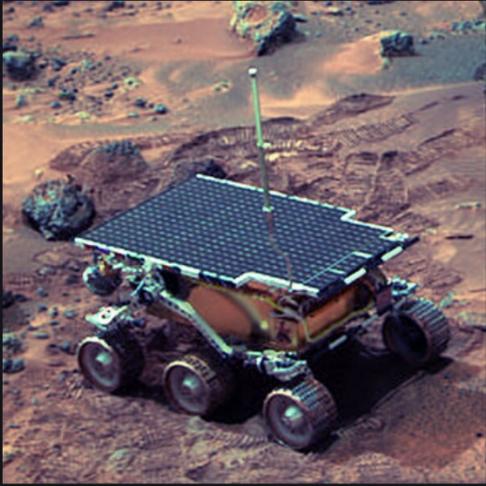
- **Necessitava di frequenti comandi dalla Terra.**
- **L'algoritmo AutoNav migliorato era ancora più lento rispetto agli standard richiesti per missioni future.**

## Perseverance

1. Acquisizione immagini e mappa 3D dettagliata con sensori avanzati.
2. Generazione di percorsi con MLNav basato su machine learning e dati storici.
3. Valutazione della sicurezza con ACE, per stima rapidamente la clearance.
4. Movimento autonomo fino a 300 metri al giorno, senza necessità di conferma dalla Terra.
5. Adattamento in tempo reale grazie a modelli predittivi AI.

**Guida quasi tutta autonoma**

# COSA È STATO SCOPERTO



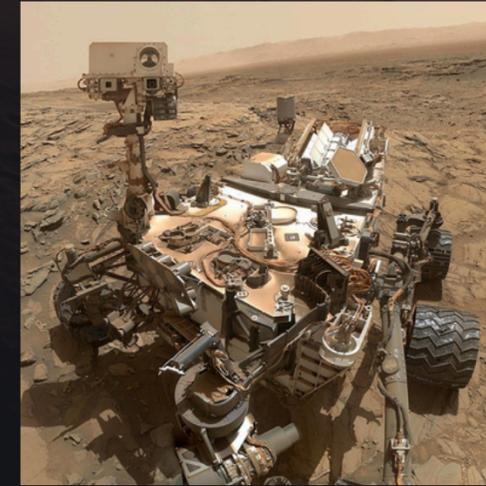
## Sojourner

- Sito di atterraggio: Ares Vallis
- Distanza percorsa: Circa 100 metri
- Ha esplorato la valle di Ares, una vasta valle dove ha analizzato rocce e suolo.
- Ha fornito dati significativi sulla geologia marziana.



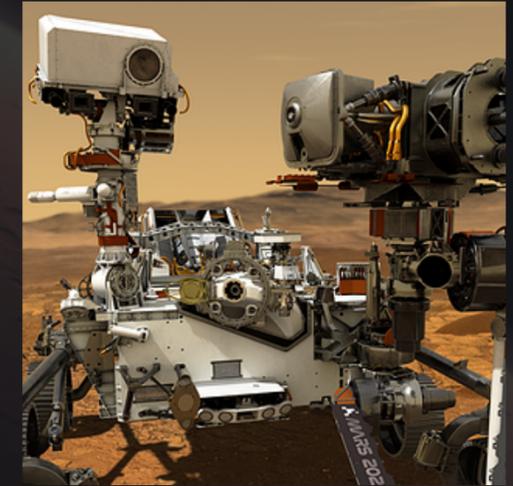
## Spirit

- Sito di atterraggio: Gusev Crater
- Distanza percorsa: Circa 7,7 km
- Ha esplorato il cratere Gusev, cercando segni di antica acqua.
- Ha rivelando prove di interazioni passate tra acqua e roccia.



## Opportunity

- Sito di atterraggio: Meridiani Planum
- Distanza percorsa: Circa 45,16 km
- Ha trovato minerali che suggerivano un ambiente marziano umido e ricco di acqua nel passato.



## Curiosity

- Sito di atterraggio: Gale Crater
- Distanza percorsa: oltre 45km ancora operativo
- Ha esplorato il cratere Gale
- Ha trovato composti organici. Sta ancora analizzando vari siti geologici e raccogliendo dati sulla potenziale abitabilità di Marte.

## Perseverance

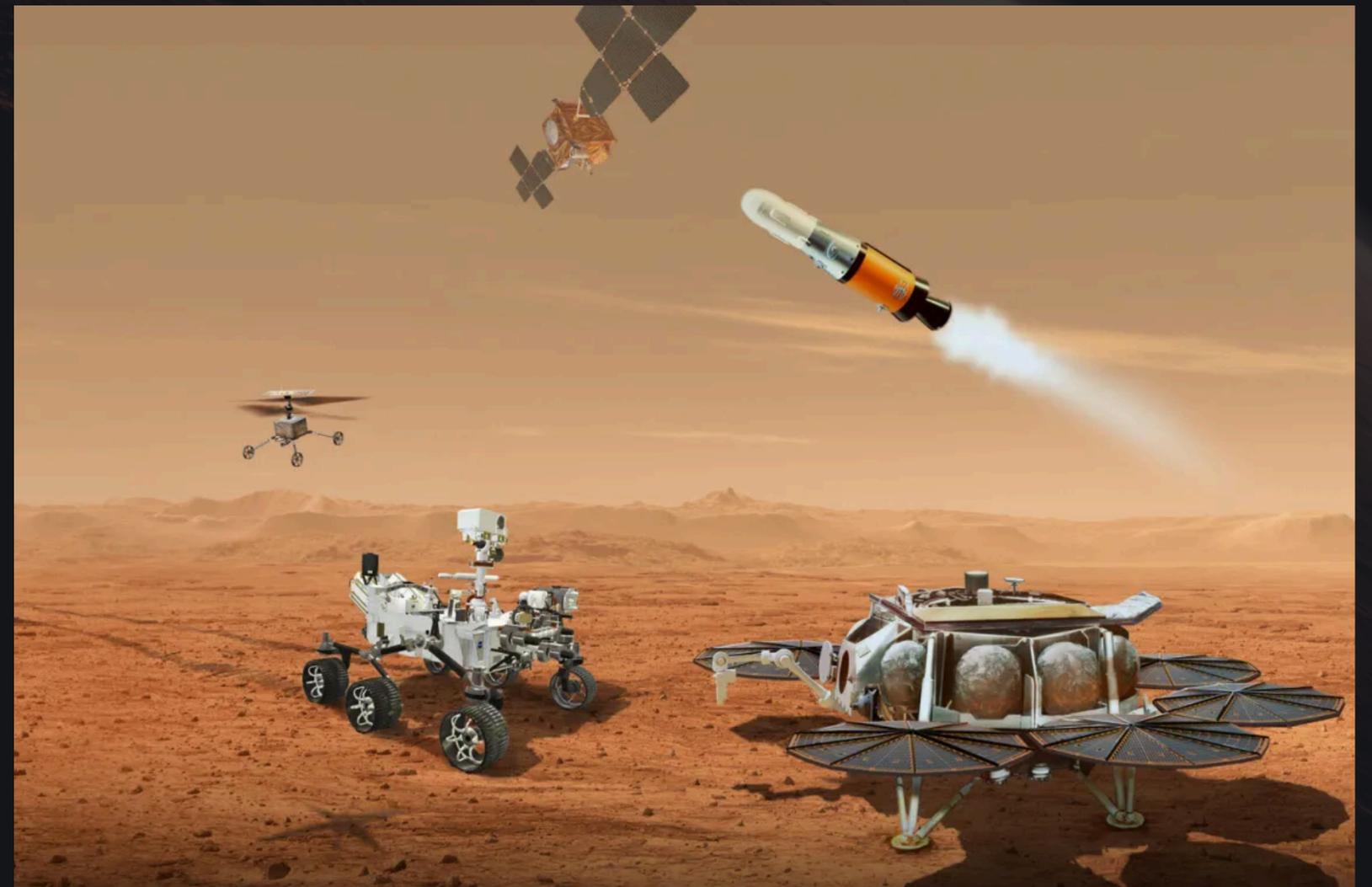
- Sito di atterraggio: Jezero Crater
- Distanza percorsa: oltre 9km ancora operativo
- Opera nel nel cratere Jezero, dove si crede che un antico lago esistesse.
- Ha scoperto prove di antica vita microbica

# PROGETTI FUTURI

## Mars Sample Return

Mars Sample Return (MSR) sarebbe l'ambiziosa campagna multi-missione della NASA e dell'ESA (Agenzia Spaziale Europea) per portare sulla Terra campioni attentamente selezionati. MSR realizzerebbe uno degli obiettivi di esplorazione del sistema solare di massima priorità della comunità scientifica. I campioni restituiti rivoluzionerebbero la nostra comprensione di Marte, del nostro sistema solare e preparerebbero gli esploratori umani al Pianeta Rosso.

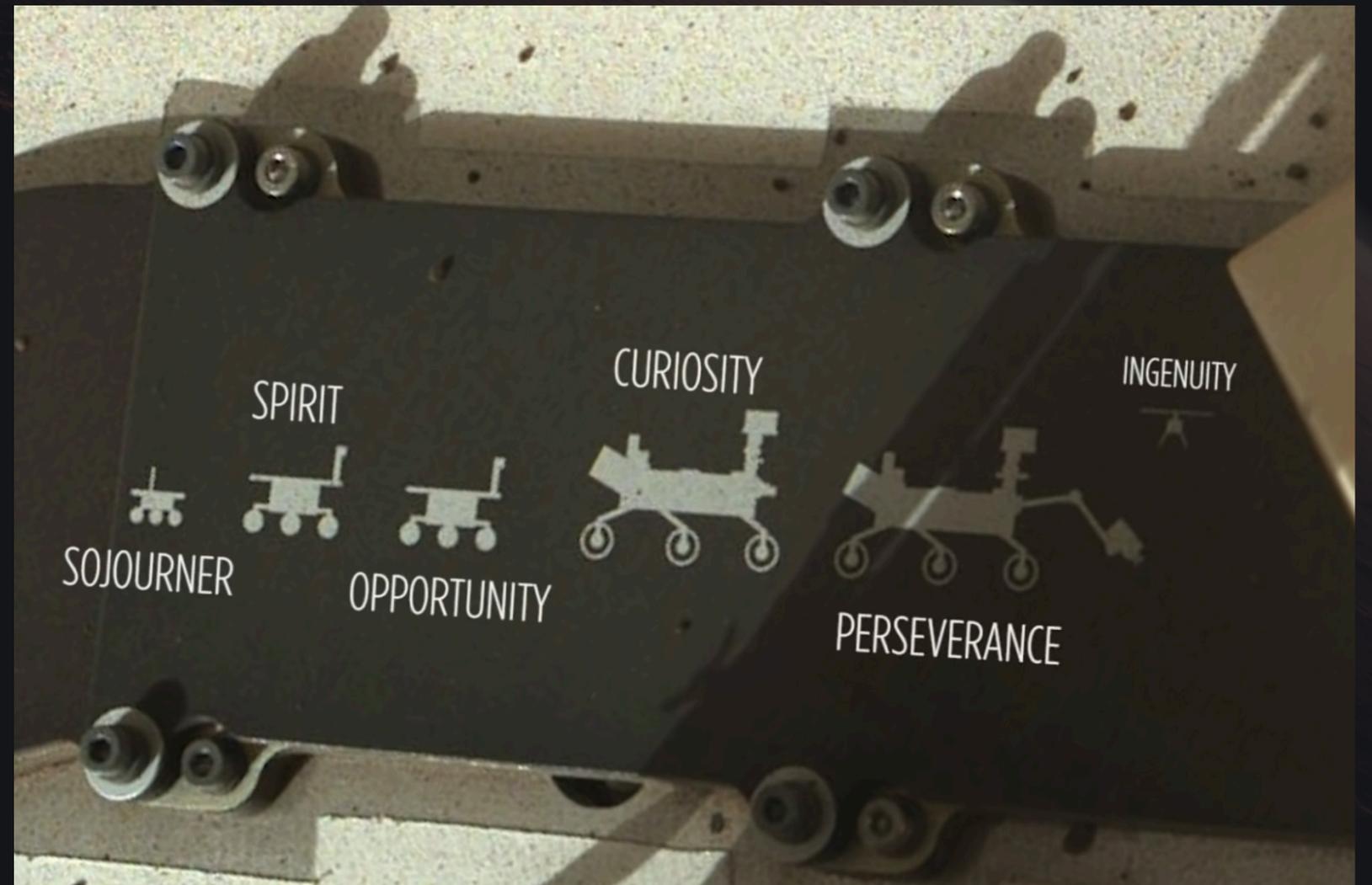
La missione prevede una serie di lanci, con il primo previsto per il 2028, e il ritorno dei campioni sulla Terra entro il 2031.



# PROGETTI FUTURI

## Budget speso

- Sojourner: \$ 150 milioni
- Spirit: \$ 400 milioni
- Opportunity: \$ 400 milioni
- Curiosity: \$ 2,5 miliardi
- Perseverance: \$ 2,7 miliardi
- Mars Sample Return (futuro): \$ 7 miliardi



**GRAZIE PER L'ATTENZIONE**

MARS SAMPLE RETURN

