



Università' del Salento  
Dipartimento di Matematica e Fisica  
"Ennio De Giorgi"  
Gruppo di Astrofisica



UNIVERSITÀ  
DEL SALENTO

# Margaret Hamilton e il codice dell'Apollo 11

Marcella D'Elia

Università del Salento

Dipartimento di Matematica e Fisica "Ennio De Giorgi"

Scuola Estiva di Astronomia "Sergio Fonti" – 19 Luglio 2019

# Margaret Hamilton nel 1969



**codice del software dell'Apollo  
Guidance Computer**

# Percorso formativo

- 2 Lauree - una in **Matematica** e l'altra in **Matematica e filosofia**
- 1960 – impiego temporaneo al MIT (Massachusetts Institute of Technology) per sviluppare software per le previsioni meteo in collaborazione con il Prof. Edward N. Lorenz del Dipartimento di Meteorologia.

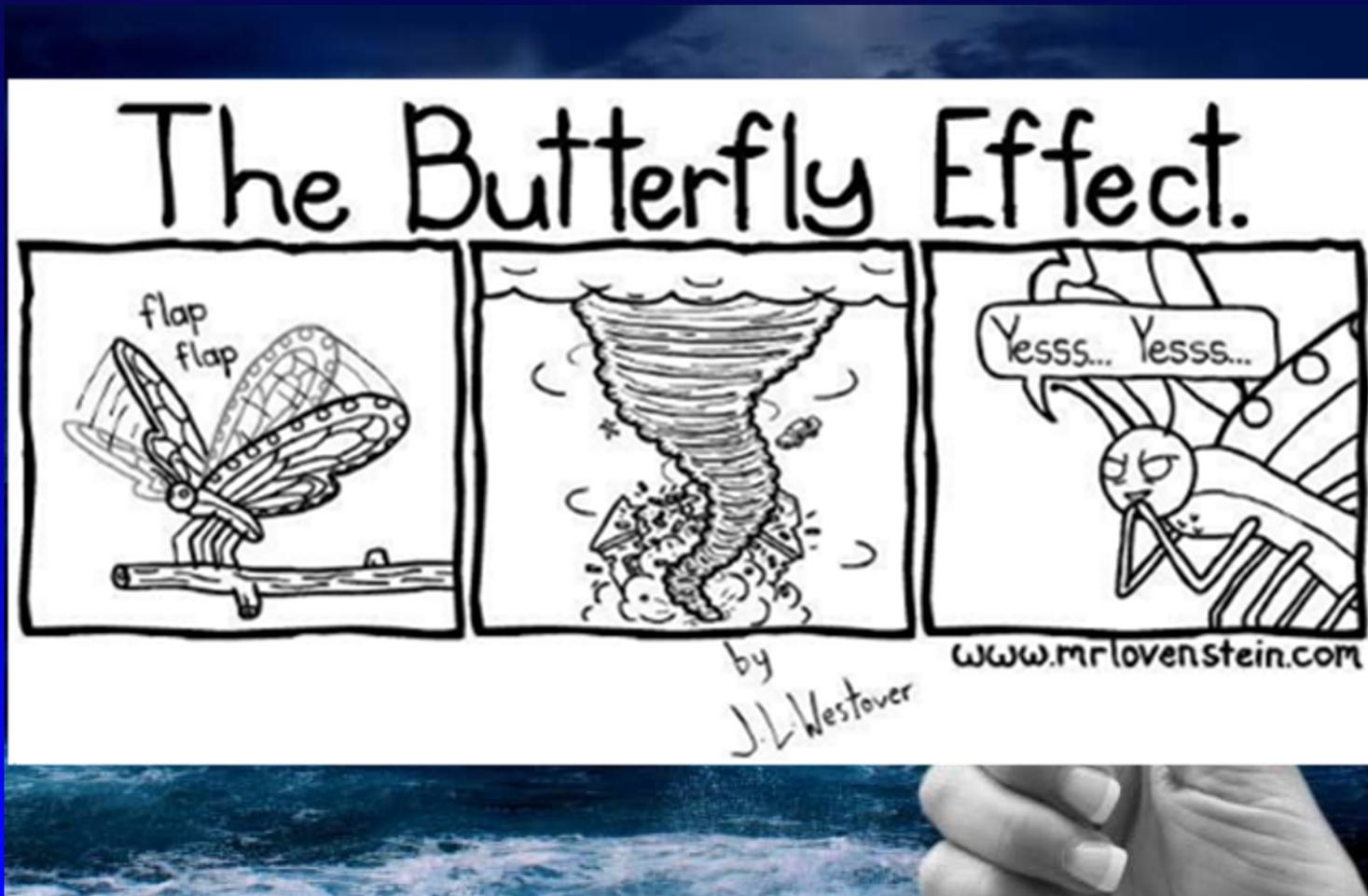


# Alle prese con **PROBLEMI COMPLESSI:**

## **La Meteorologia, la Teoria del Caos e l'Effetto farfalla**

**“Può il batter d’ali di una farfalla in Brasile provocare un tornado in Texas?”**

nello sviluppo di un modello meteorologico, un piccolo cambiamento nelle condizioni iniziali crea un risultato finale significativamente diverso.





LGP-30

STOP  
PUNCH ON

STOP  
PUNCH ON

STOP

COMPUTE

NORMAL

ONE OPERATION

MANUAL INPUT

START BY

OPERATE

STAND BY TO

- Dal 1961 al 1963 la Hamilton ha lavorato al **progetto Semi Automatic Ground Environment (SAGE)** avviato dal MIT e volto allo sviluppo di un sistema informatico per le **previsioni e simulazioni meteorologiche**. Il SAGE è stato quindi sviluppato ad uso militare, come **sistema di difesa antiaerea** in previsione di possibili attacchi sovietici durante la guerra fredda.
- Grazie al suo contributo al progetto ed all'esperienza accumulata, è diventata una **candidata ideale per la NASA**.



Lo sviluppo di software era spesso affidato alle donne, perché ritenuto una specializzazione di minore importanza.

Margaret Hamilton è stata il **primo programmatore** che la NASA ha assunto nell'ambito del Programma Apollo.

*La nascita del **software engineering***



Nel 1965, non ancora trentenne, entra a far parte del progetto Apollo del MIT per poi diventare **direttrice e supervisore dello sviluppo software per i programmi Apollo**.



Alla NASA, il team diretto dalla Hamilton era responsabile dello **sviluppo del software che avrebbe guidato le capsule del programma Apollo nella navigazione e nell'atterraggio sulla Luna**.

# I computer che ci hanno portati sulla Luna



**Sopra.** Mary Jackson al Langley Research Centre della NASA in cui diventò il primo ingegnere donna di colore, svolgendo un ruolo importante in particolare nel calcolo delle traiettorie delle missioni del progetto Mercury e del programma Apollo. Crediti: Robert Nye/NASA.

# IBM System/360 alla NASA



## Un computer da 3,5 milioni di dollari



# IBM DIETRO LE QUINTE: UN TEAM DI 4000 TECNICI ED INGEGNERI

per costruire i computer che gestivano le operazioni sulla Terra e sviluppare i software per la fase di lancio e per le comunicazioni

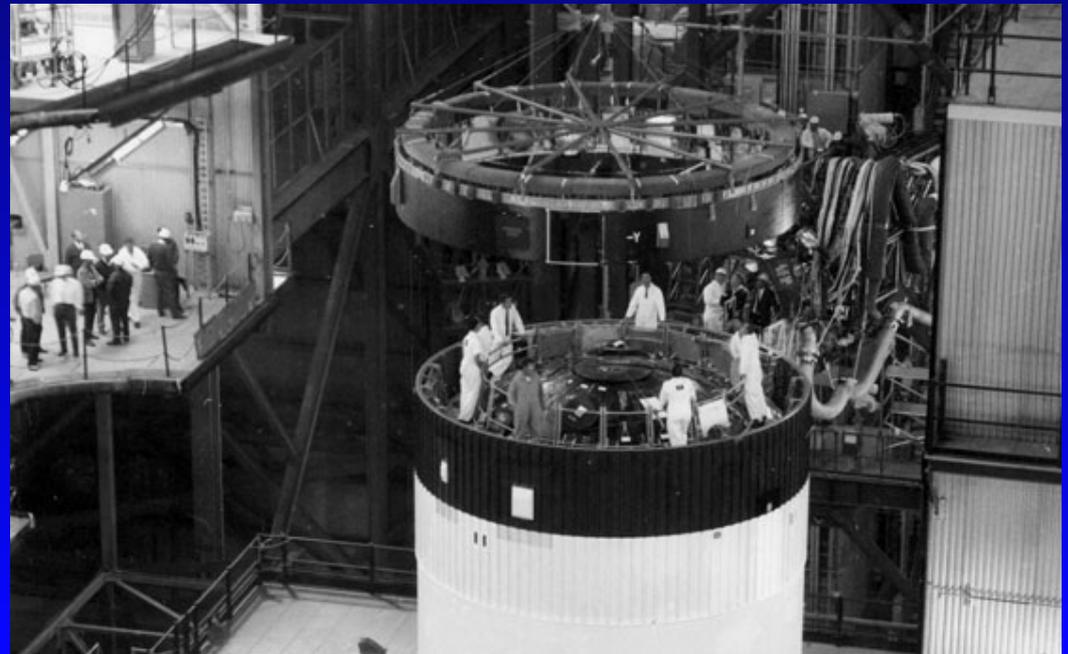


Unità di guida alloggiata all'interno del razzo Saturn V



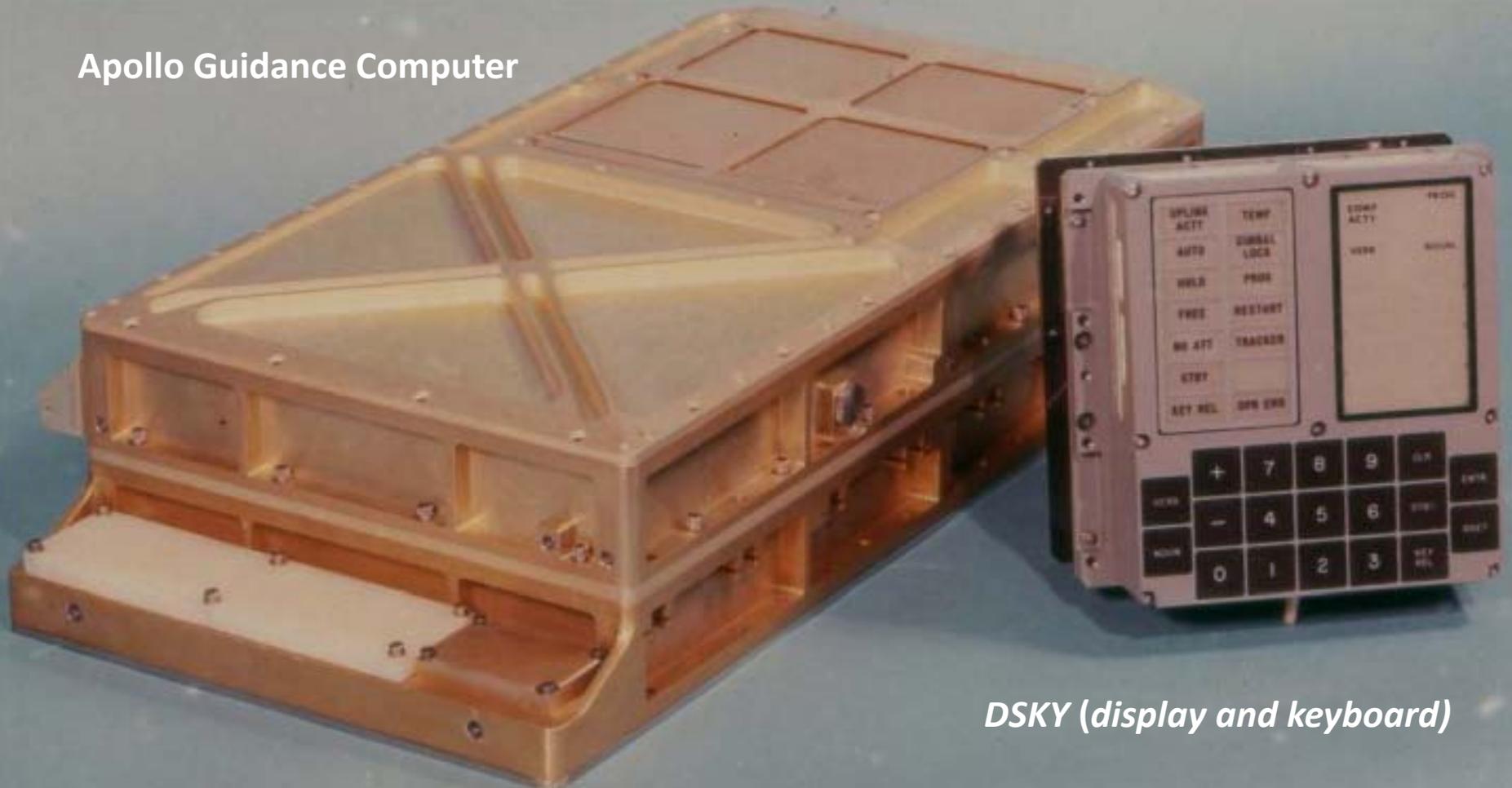
Furono i tecnici e gli ingegneri IBM a realizzare **l'unità di guida alloggiata all'interno del razzo Saturn V**, e fu sempre il personale IBM a effettuare i **test finali** e a **coadiuvare il lancio del razzo a Cape Kennedy** (oggi Cape Canaveral).

Vicino a Washington, svilupparono anche la complessa **rete di tracciamento** composta da **17 stazioni a terra** e **quattro navi**, che seguivano il velivolo spaziale in orbita permettendo le comunicazioni fra la Terra e gli astronauti.



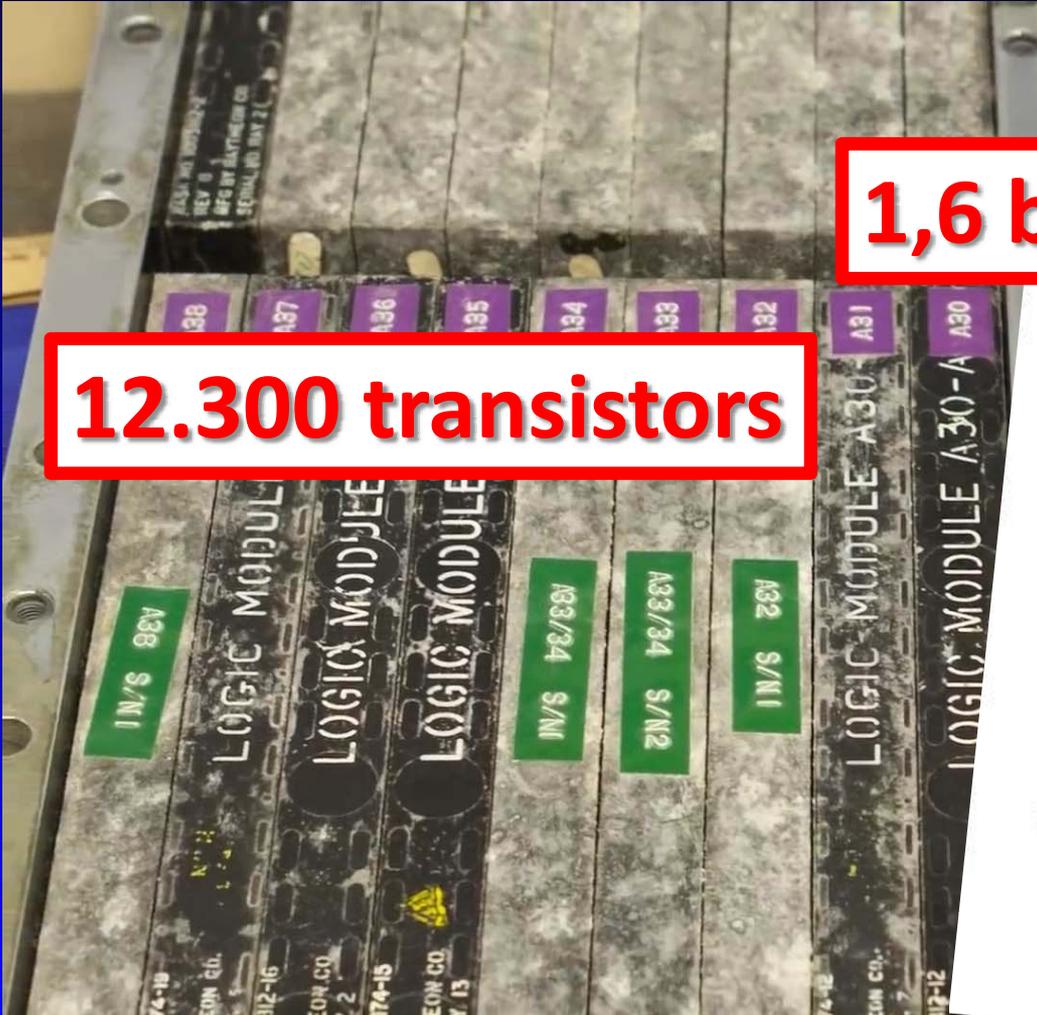
**L'APOLLO GUIDANCE COMPUTER.** L'**AGC** aveva il compito di gestire tutte le operazioni di navigazione, guida e controllo nello spazio. Una unità era installata sul **Modulo di Comando e Servizio** (Command/Service Module - **CSM**), una seconda invece sul **Modulo Lunare (LM o LEM** – Lunar Excursion Module). Rispetto agli enormi calcolatori dell'epoca, grandi come frigoriferi, aveva una taglia ridotta: 61 centimetri di profondità, 32 di larghezza e 17 di altezza, per un peso di 32 kg.

Apollo Guidance Computer



*DSKY (display and keyboard)*

# Confronto AGC vs iPhone 6



**12.300 transistors**



**1,6 bilioni di transistors**

# Confronto AGC vs iPhone 6



**RAM iPhone = 1Gb**  
**488.000 volte la RAM dell'AGC**



# Confronto AGC vs iPhone 6

**Memoria iPhone = 128 Gb**

**3,5 milioni di volte la ROM dell'AGC**



# Confronto AGC vs iPhone 6



**L'iPhone è almeno 4 milioni di volte più veloce dell'AGC**

**Potremmo andare sulla Luna utilizzando il nostro smartphone?**

## Caratteristiche dell'AGC:

- Affidabile
- Volume e peso ridotto
- A bassa potenza
- Autonomo
- Robusto (per resistere ai voli spaziali)
- In grado di gestire i dati di navigazione che arrivavano da Terra
- Dotato di semplice interfaccia per gli astronauti

Era il primo computer da cui dipendevano vite umane e non era pensato per scopi generici ma era cablato esclusivamente per quella missione.

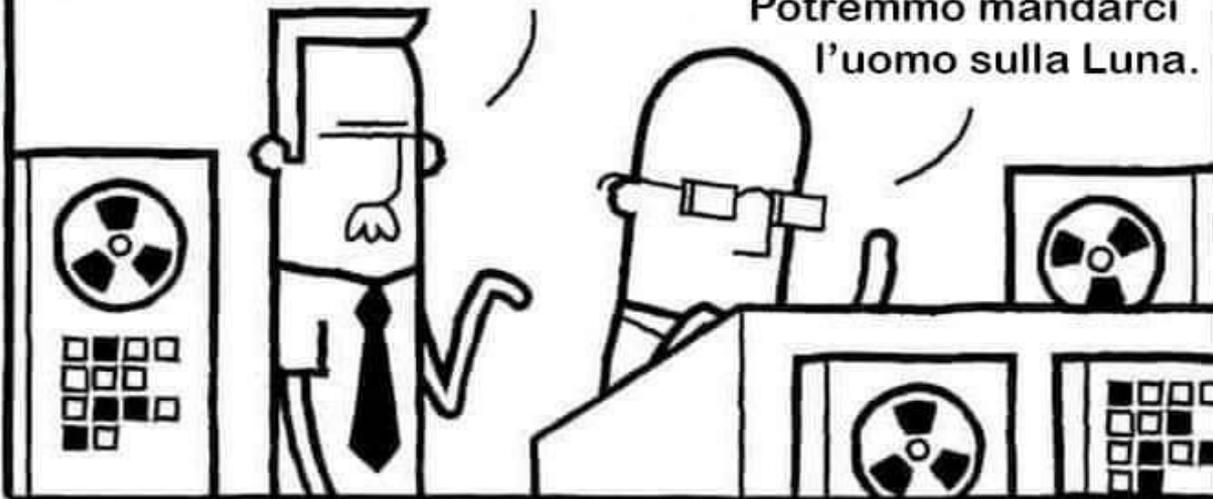
E' stato sviluppato per continuare a lavorare sia in caso di crach che di overload.



1969

Che ci facciamo con 2KB di RAM?

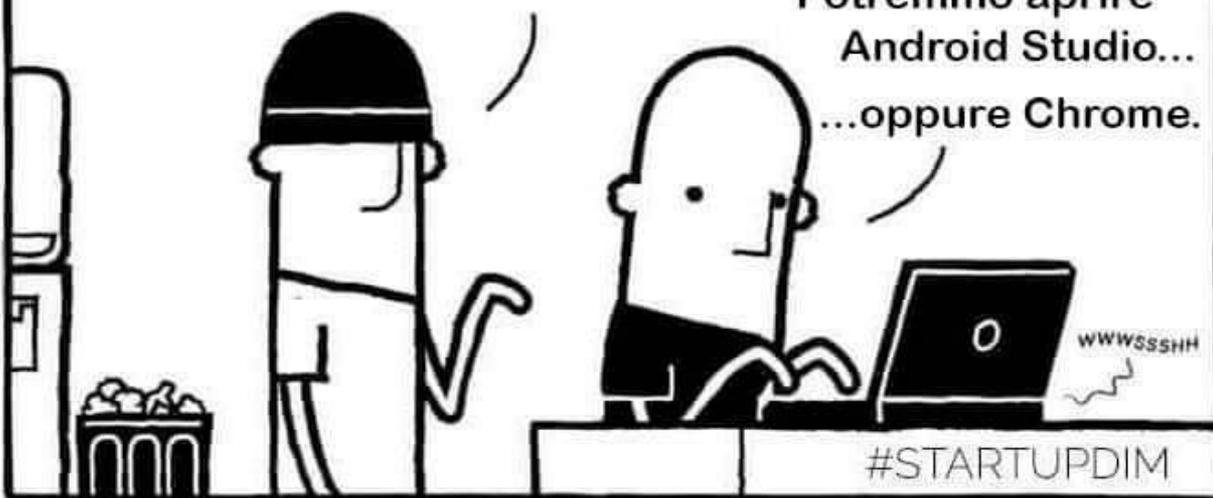
Potremmo mandarci  
l'uomo sulla Luna.



2018

Che ci facciamo con 2GB di RAM?

Potremmo aprire  
Android Studio...  
...oppure Chrome.



# CONTRATTO MIT-NASA per sviluppare il sistema di navigazione del progetto Apollo

<b>CLASS OF SERVICE</b> This is a fast message unless its deferred character is indicated by the proper symbol.	<b>WESTERN UNION</b> <b>TELEGRAM</b> W. P. MARSHALL, PRESIDENT	<b>SYMBOLS</b> DL = Day Letter NL = Night Letter LT = International Letter Telegram
--	--	--

The filing time shown in the date and time of telegrams is LOCAL TIME at point of origin. Time of receipt is LOCAL TIME at point of destination.

435P EDT AUG 9 61 BB257 PB375  
W NFA084 GOVT PD NF WASHINGTON DC 9 405P EDT  
DR STARK DRAPER, DIR

INSTRUMENTAL LABORATORY MASSACHUSETTS INST OF TECHNOLOGY  
CAMBRIDGE MASS

PLEASD TO ADVISE THAT THE NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATI  
ON TODAY ANNOUNCED THAT MIT'S INSTRUMENTATION LABORATORY HAS  
BEEN SELECTED TO DEVELOP THE GUIDANCE NAVIGATION SYSTEM OF THE  
PROJECT APOLLO SPACECRAFT. APOLLO IS CAPABLE OF CARRYING THREE  
MEN TO THE MOON AND BACK. MIT IS THE FIRST MEMBER OF THE APOLLO  
TEAM TO BE CHOSEN. BIDS ARE NOW UNDERWAY FOR THE PRIME CONTRACTOR'S  
JOB. IN ADDITION TO APOLLO THE INSTRUMENTATION LABORATORY WILL  
ALSO DEVELOP THE GROUND SUPPORT AND CHECKOUT EQUIPMENT. CONTRACT  
COVERING THE FIRST YEAR IS AN ESTIMATED \$4 MILLION  
LEVERETT SALTONSTALL UNITED STATES SENATOR.

Notiamo che **non ci sono specifiche riguardo al software** perchè in effetti nessuno della NASA sapeva quali dovessero essere le caratteristiche del computer dell'Apollo, nessuno aveva mai costruito niente del genere e nessuno aveva idea di come fare.

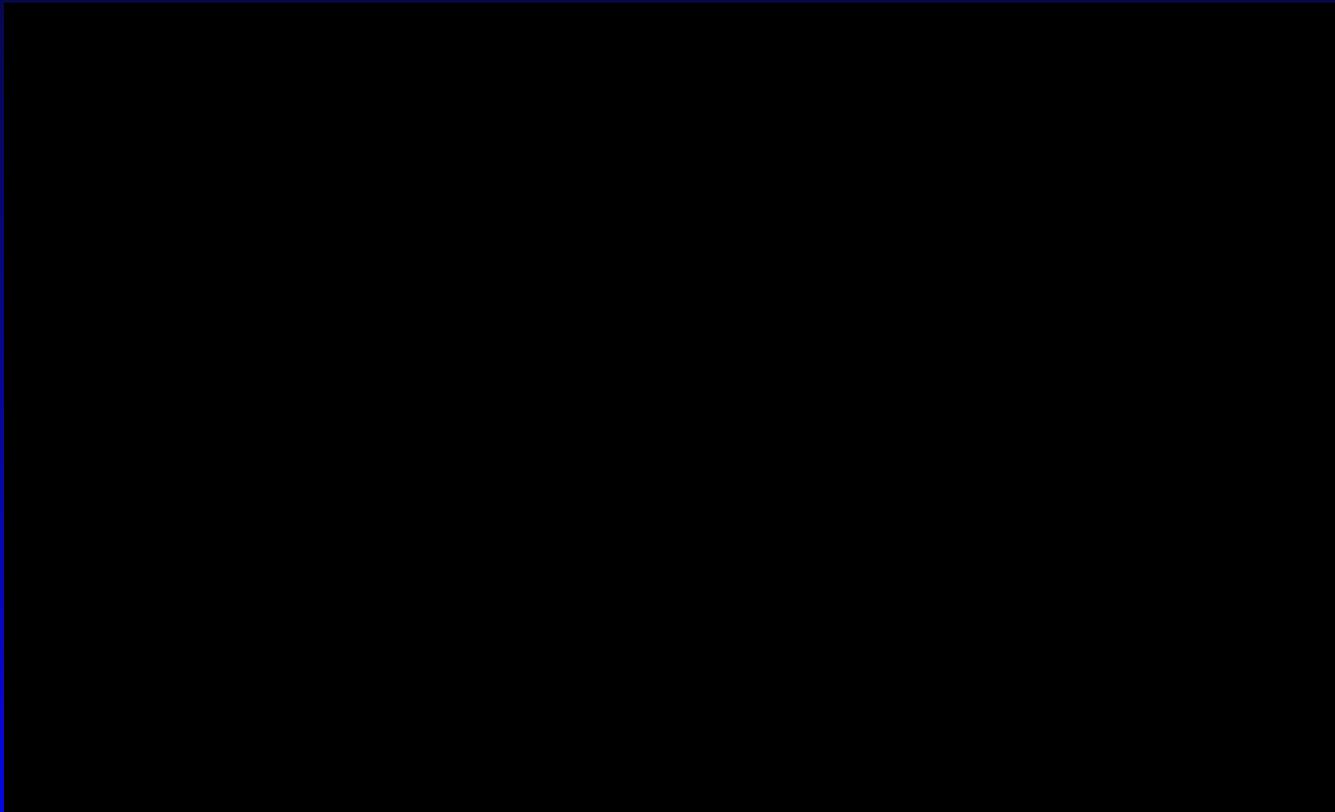
## **PROBLEMA: come memorizzare programmi e dati?**

Nuovo approccio: il software (che è una sequenza di numeri binari 0 e 1) è stato letteralmente intessuto nei banchi di memoria con dei piccoli anelli di ferro e dei fili di rame.

### **Rope Memory / LOL (Little Old Ladies) Memory**

**Filo che scorre dentro l'anello rappresenta il numero binario 1**

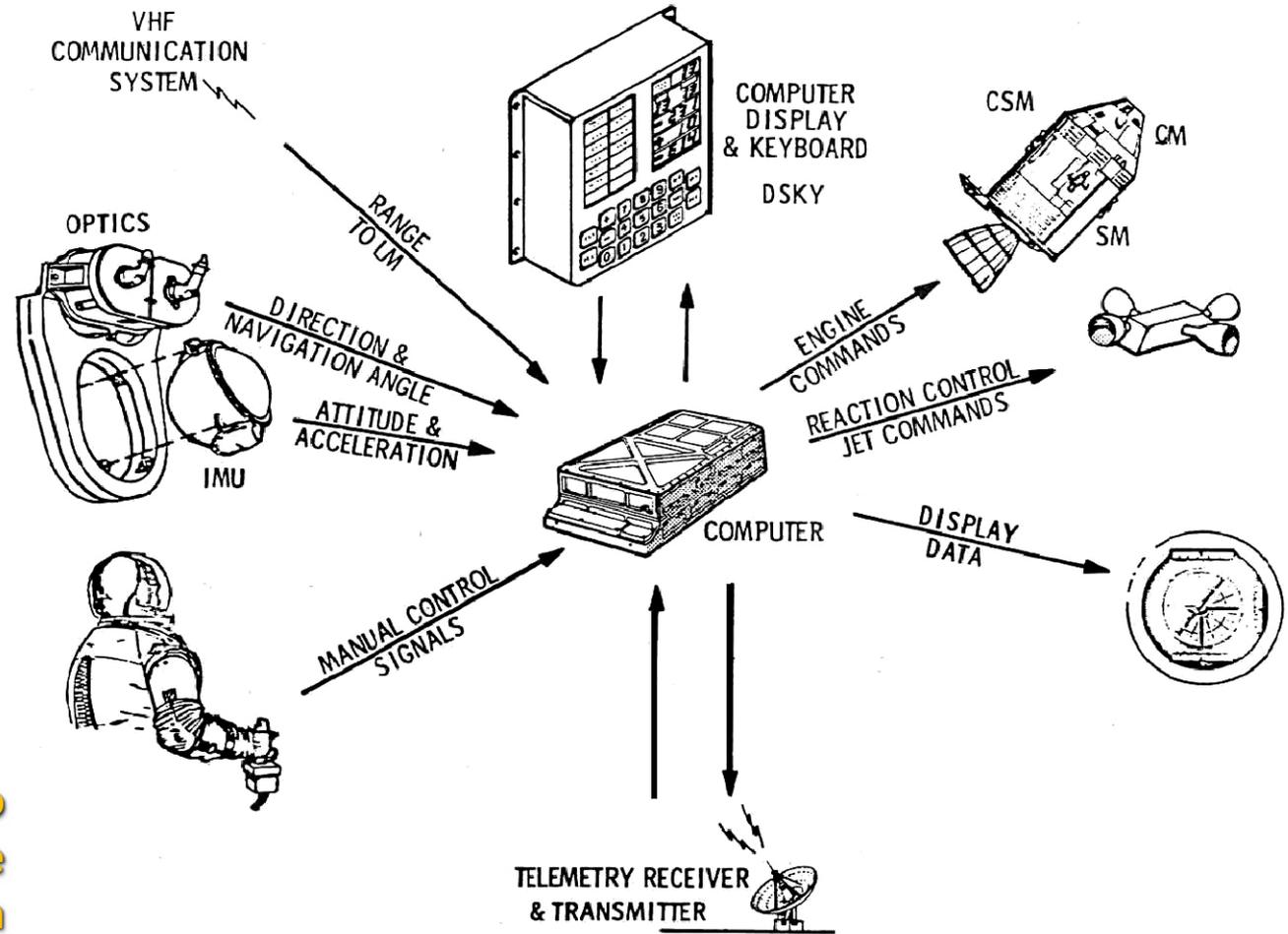
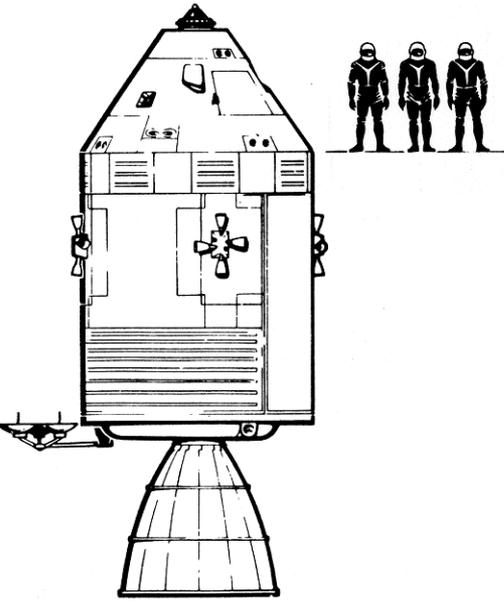
**Filo che passa fuori dall'anello rappresenta il numero binario 0**



**MEMORIA INDISTRUTTIBILE**

**CHE NON POTEVA ESSERE CANCELLATA, ALTERATA O CORROTTA**

# Flussi di dati sul computer del Modulo di Comando e Servizio



Modulo di Comando poteva lavorare anche se il collegamento con la Terra era interrotto

Figure 1 The

GN & C System Schematic

# Flussi di dati sul computer del Modulo Lunare

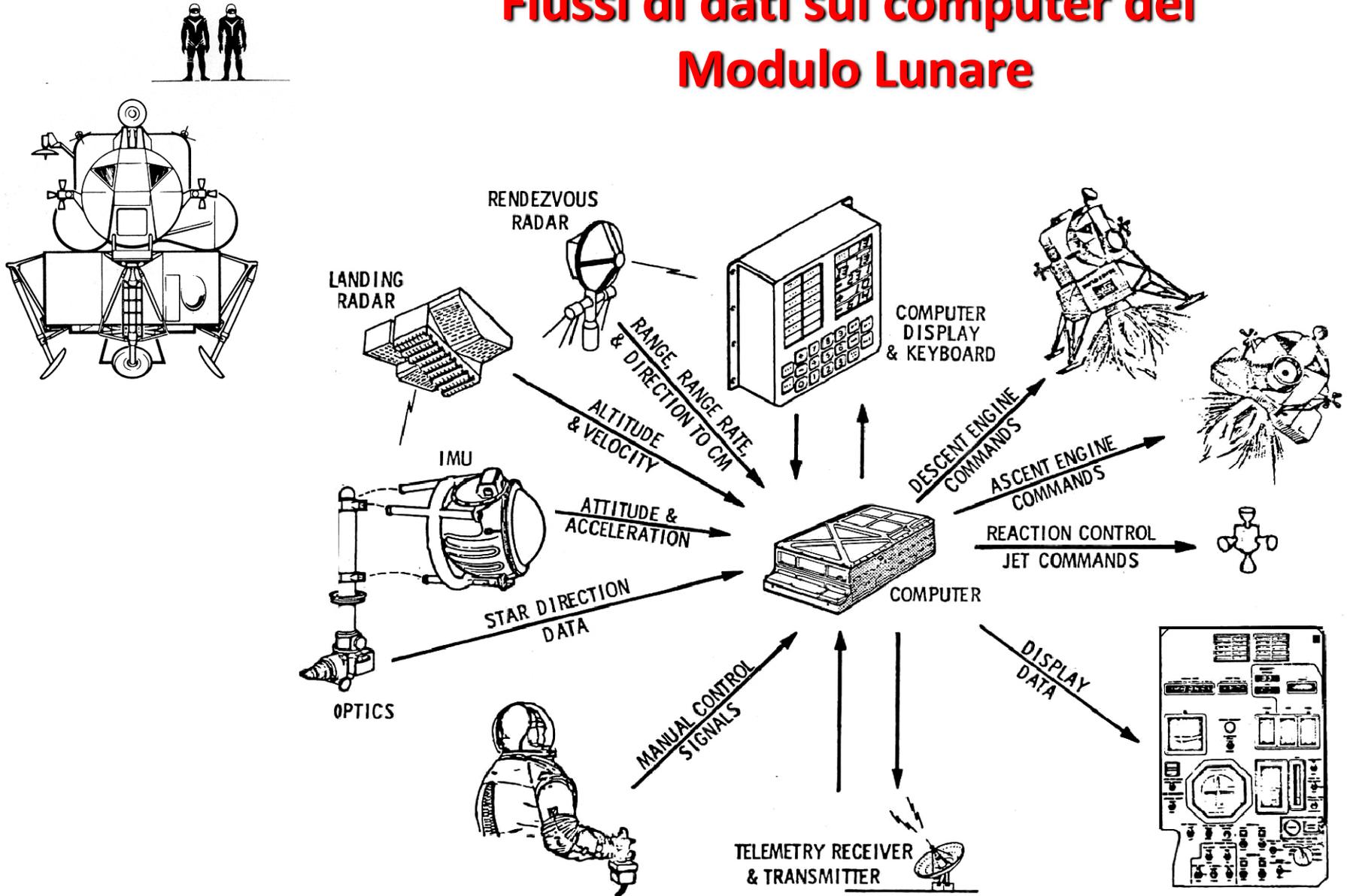
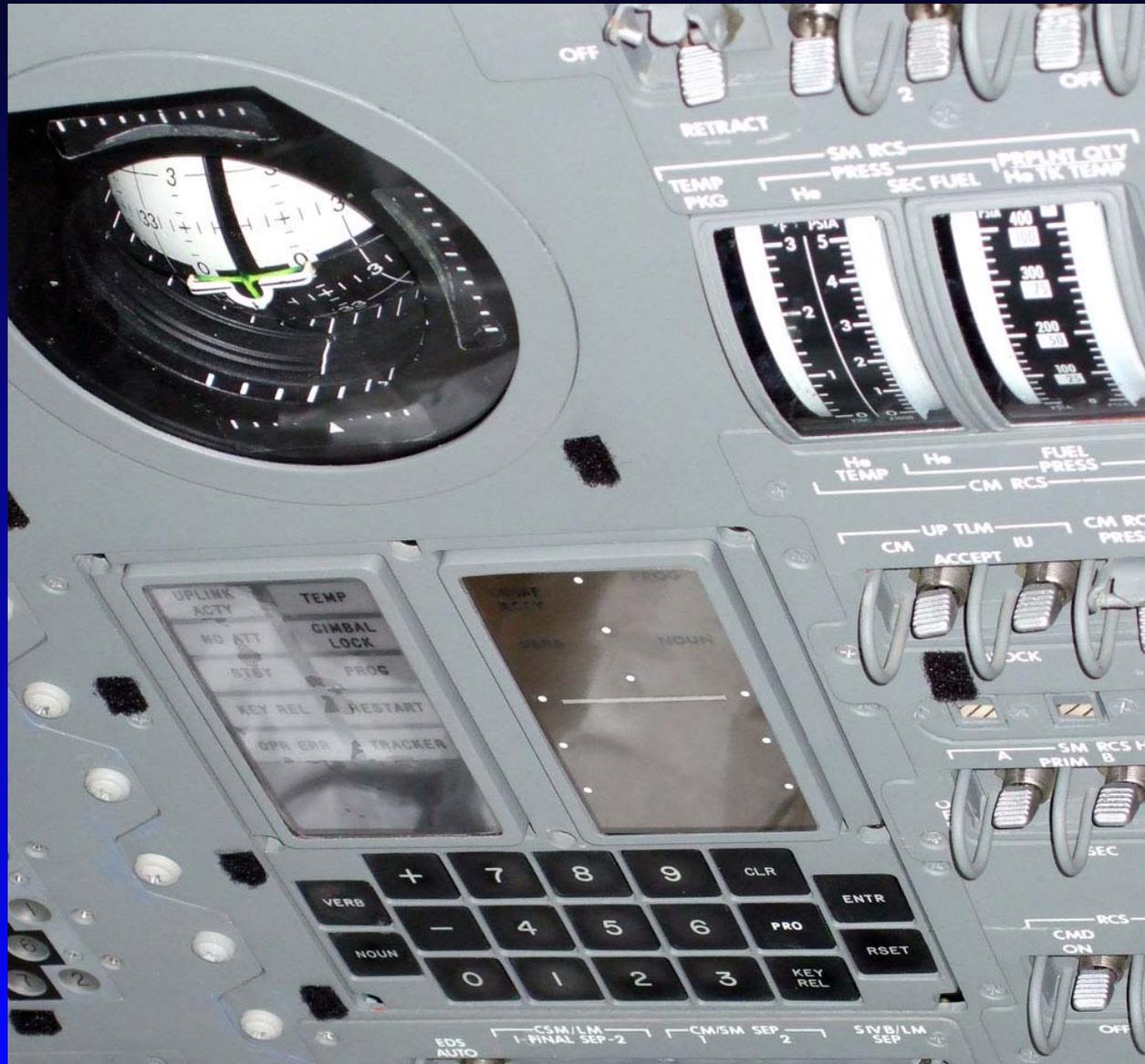
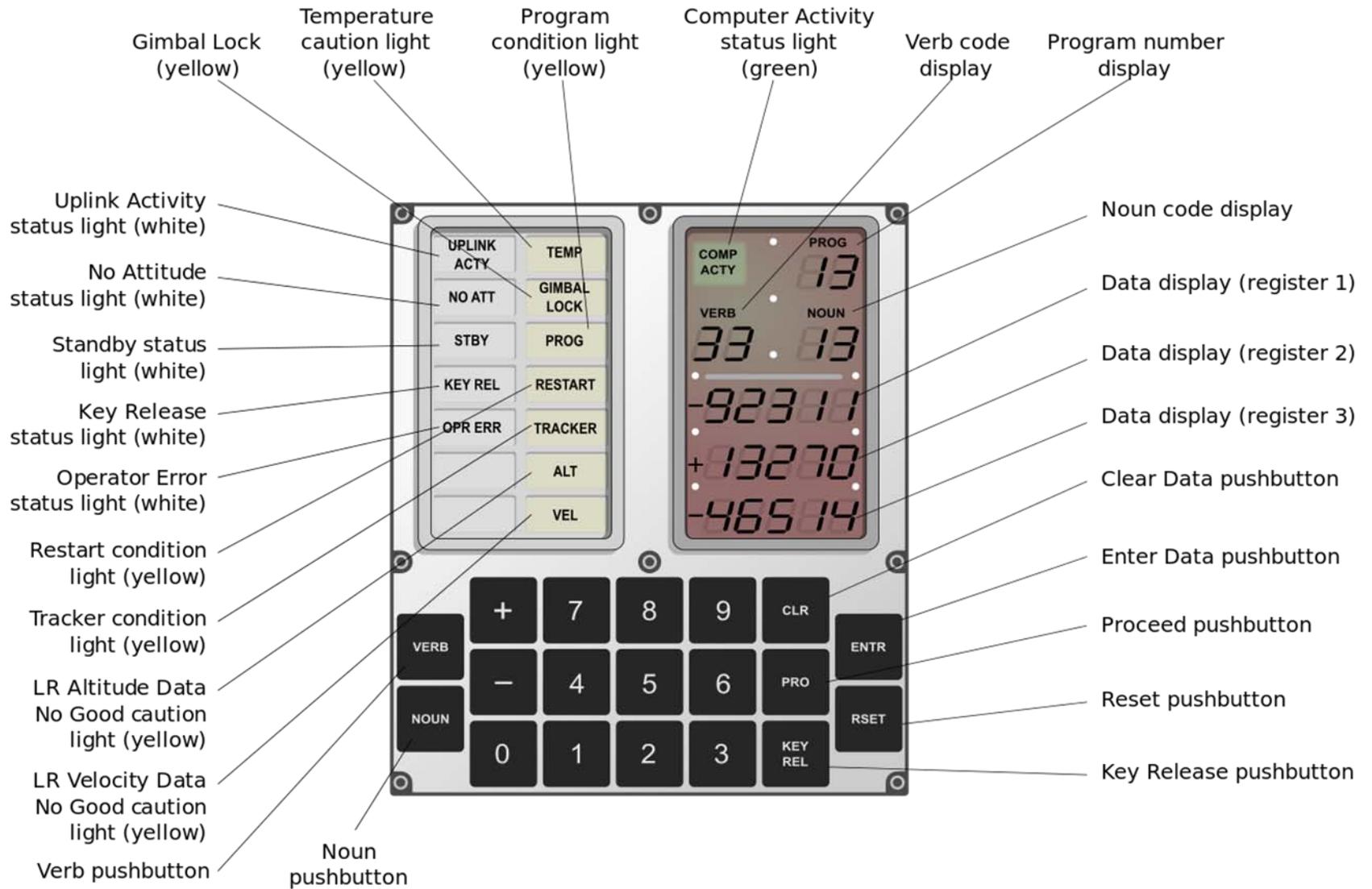


Figure 2 The Lunar Module GN & C System Schematic

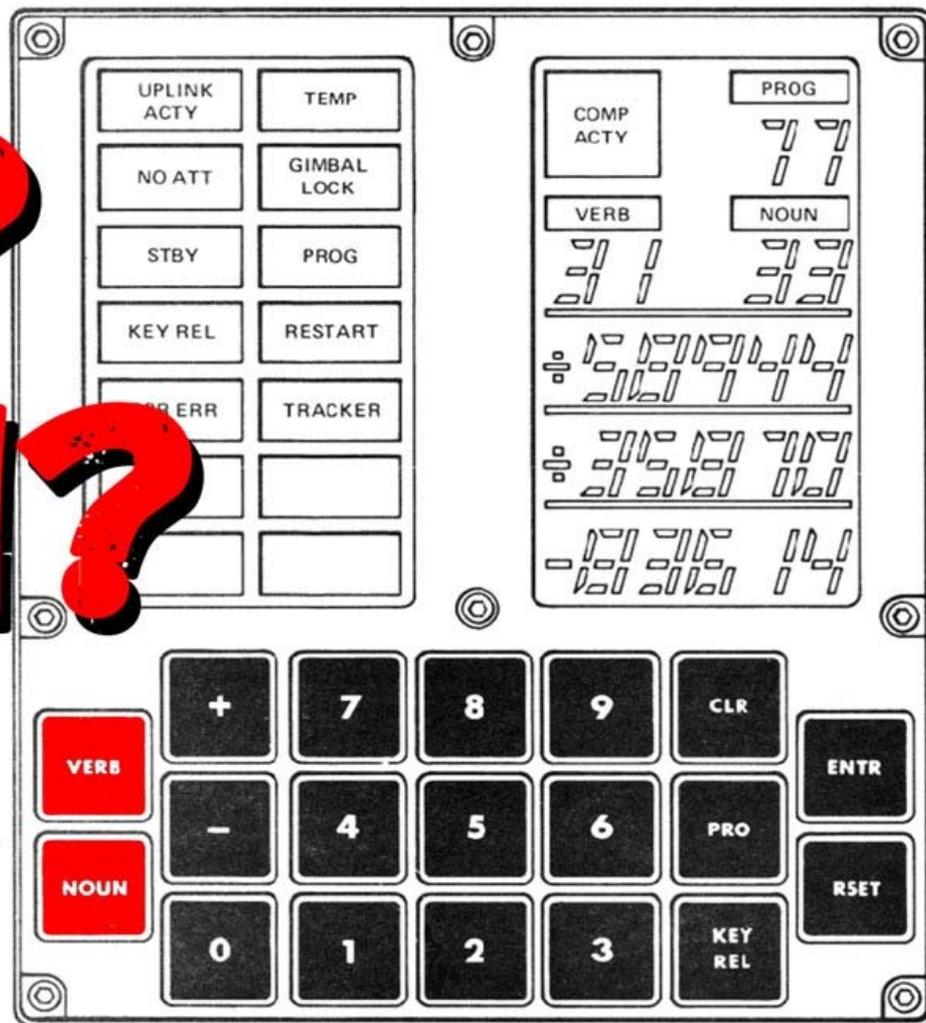
# DSKY (display and keyboard) sul pannello di controllo del Modulo di Comando





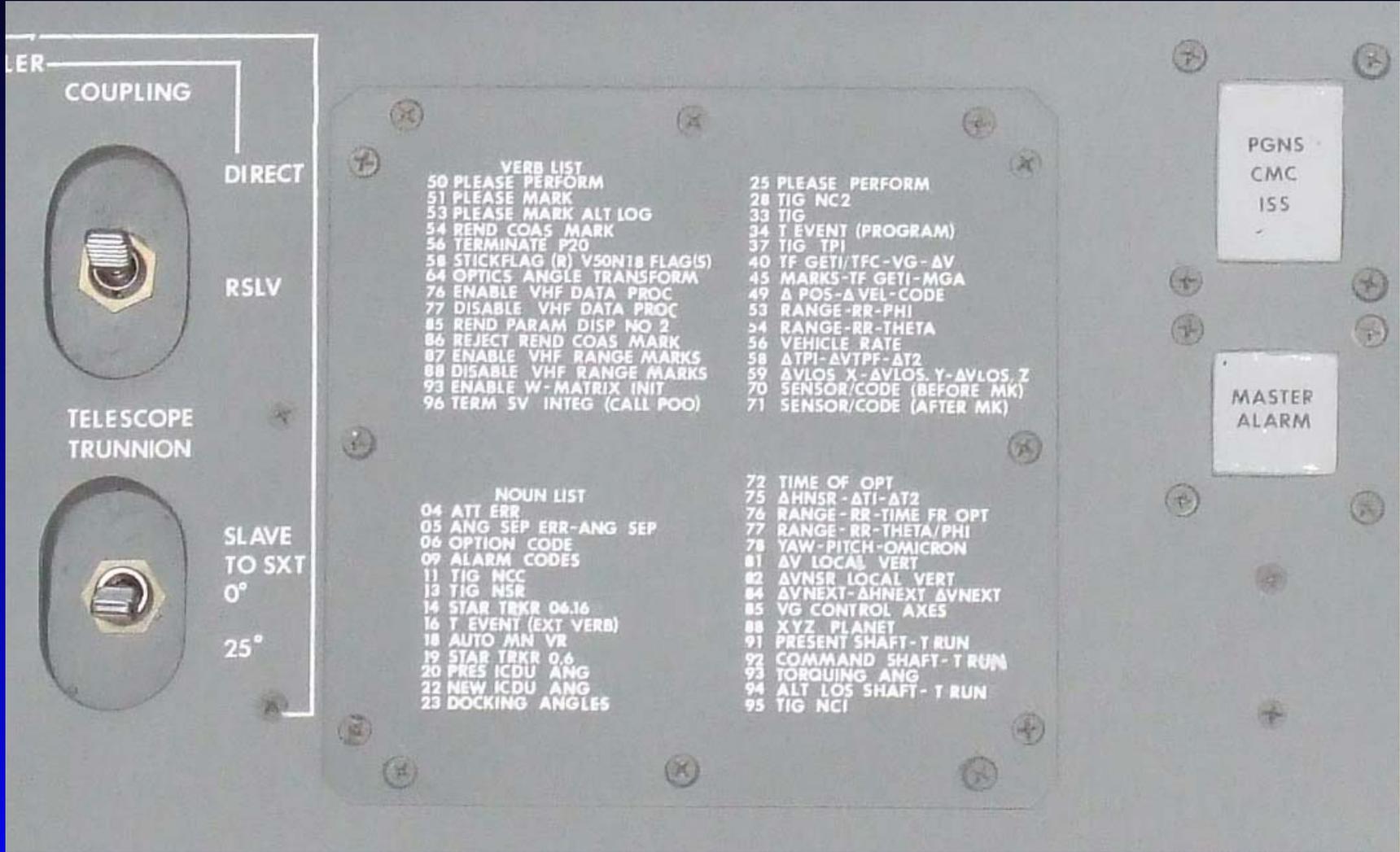
**Tipo di azione che doveva essere eseguita (Comando)**

**VERB?**  
**NOUN?**

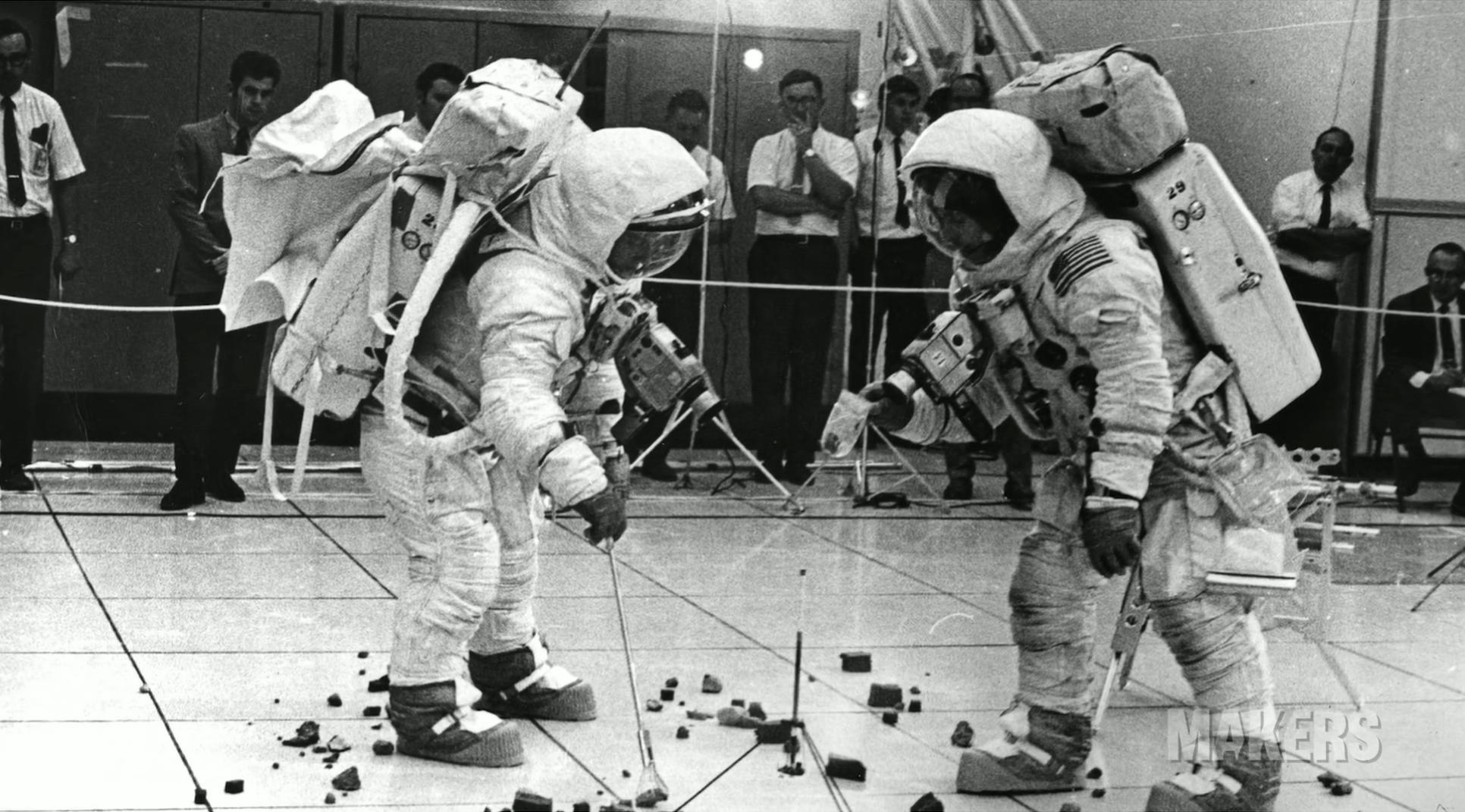


**Dati interessati dall'azione definita dal comando Verb**

# Quick reference sul pannello del Modulo di Comando







MAKERS

# Nel modulo di comando



Per gioco la figlia Lauren introdusse il codice di pre-lancio durante una simulazione di volo

La Hamilton inserì un codice nel software di volo dell'Apollo che tenesse in considerazione **dell'errore umano**.



Riunione nella SCAMA (Switching, Conference, And Monitoring Arrangement) room dopo l'errore P01 (programma di lancio) dell'Apollo 8 digitato durante il programma di navigazione P23

R000009 \* \* \* \* \*  
R00001 \* THIS PROGRAM IS INTENDED FOR USE IN THE CM AS SPECIFIED \*  
R000011 \* IN REPORT R-577. THIS PROGRAM WAS PREPARED UNDER DSR \*  
R000012 \* PROJECT 55-23870, SPONSORED BY THE MANNED SPACECRAFT \*  
R000013 \* CENTER OF THE NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE \*  
R000014 \* ADMINISTRATION THROUGH CONTRACT NAS 9-4065 WITH THE \*  
R000015 \* INSTRUMENTATION LABORATORY, MASSACHUSETTS INSTITUTE OF \*  
R000016 \* TECHNOLOGY, CAMBRIDGE, MASS. \*  
R000017 \* \* \* \* \*  
R000018 \*\*\*\*\*

R000019 SUBMITTED: MARGARET H. HAMILTON DATE: 28 MAR 69  
R00002 M.H.HAMILTON, COLOSSUS PROGRAMMING LEADER  
R000021 APOLLO GUIDANCE AND NAVIGATION

R000022 APPROVED: DANIEL J. LICKLY DATE: 28 MAR 69  
R000023 D.J.LICKLY, DIRECTOR, MISSION PROGRAM DEVELOPMENT  
R000024 APOLLO GUIDANCE AND NAVIGATION PROGRAM

R000025 APPROVED: FRED H. MARTIN DATE: 28 MAR 69  
R000026 FRED H. MARTIN, COLOSSUS PROJECT MANGER  
R000027 APOLLO GUIDANCE AND NAVIGATION PROGRAM

R000028 APPROVED: NORMAN E. SEARS DATE: 28 MAR 69  
R000029 N.E. SEARS, DIRECTOR, MISSION DEVELOPMENT  
R00003 APOLLO GUIDANCE AND NAVIGATION PROGRAM

MAKERS



**Il codice di volo della Missione Apollo 11 è online**  
(sul sito GitHub)

**350 ingegneri e l'equivalente di 1400 anni-uomo per sviluppare il software prima del primo sbarco sulla Luna e... tanti divorzi 😞**

## EASTER EGGS tra le linee di codice

Tra i messaggi nascosti più buffi trovati al suo interno - brevi annotazioni ai comandi - c'è un **BURN\_BABY\_BURN--MASTER\_IGNITION\_ROUTINE**, ispirato a una frase recitata da un popolare conduttore radio degli anni '60 quando lanciava i dischi del momento (la linea è inserita, presumibilmente, tra i comandi per l'accensione dei motori).

Ma anche l'augurio che due linee di codice pensate per essere temporanee non divenissero permanenti (e invece...)

```
179          TC      BANKCALL      # TEMPORARY, I HOPE HOPE HOPE
180          CADR    STOPRATE      # TEMPORARY, I HOPE HOPE HOPE
181          TC      DOWNFLAG      # PERMIT X-AXIS OVERRIDE
```

O l'invito, rivolto agli astronauti, a "girare quella stupida cosa".

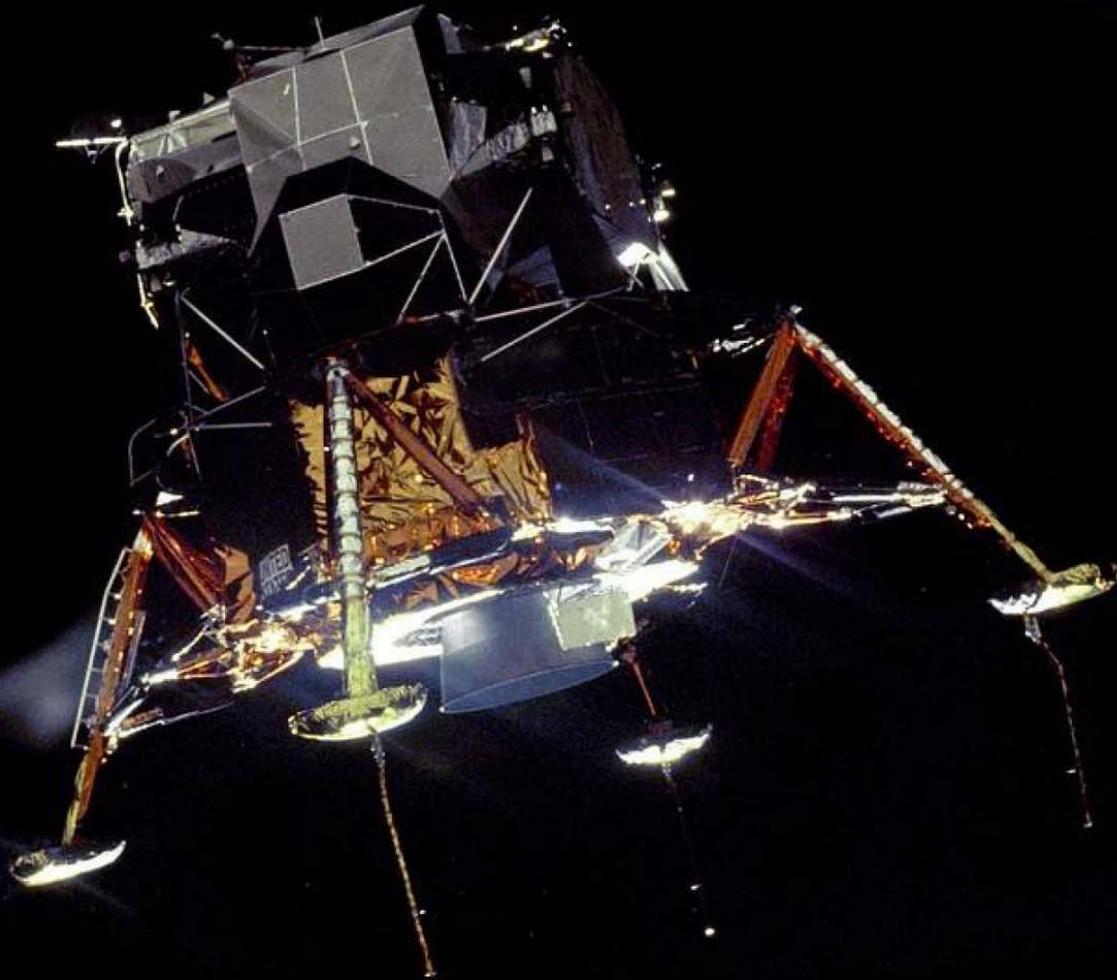
```
245          CAF     CODE500      # ASTRONAUT:  PLEASE CRANK THE
246          TC      BANKCALL      #              SILLY THING AROUND
247          CADR    GOPERF1
248          TCF     GOTOP00H      # TERMINATE
249          TCF     P63SPOT3      # PROCEED     SEE IF HE'S LYING
250
251  P63SPOT4    TC      BANKCALL      # ENTER       INITIALIZE LANDING RADAR
252          CADR    SETPOS1
253
254          TC      POSTJUMP      # OFF TO SEE THE WIZARD ...
255          CADR    BURNBABY
```



**MIT - 17 luglio 1969 - durante la missione Apollo 11 ... analizzando i dati che arrivavano in diretta dal Controllo Missioni di Houston**

**LEM Apollo 11 - qualche minuto prima dell'allunaggio**

**Program Alarm 1202  
e poi altri 4 errori dello stesso tipo**



# Cosa era successo?

Aldrin aveva avuto il consenso di lasciare acceso il **Radar di Rendezvous** durante la discesa (in caso l'allunaggio fosse annullato) e quindi al computer arrivavano in automatico dei dati non necessari in fase di atterraggio **assorbendo il 15% delle risorse del computer** mentre si stava affrontando la fase impegnativa della discesa.

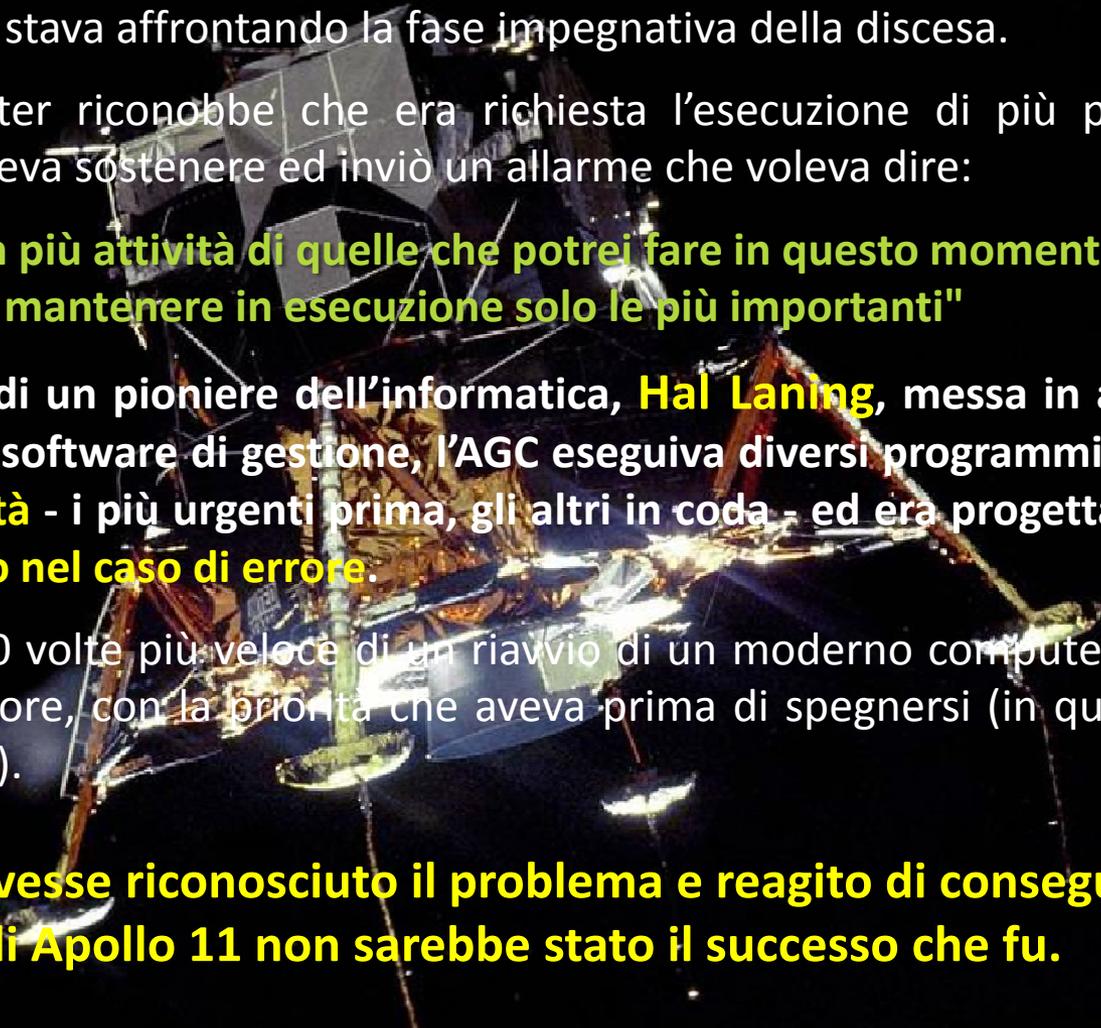
Il software del computer riconobbe che era richiesta l'esecuzione di più processi rispetto a quelli che poteva sostenere ed inviò un allarme che voleva dire:

**"sono sovraccarico con più attività di quelle che potrei fare in questo momento e mi accingo a mantenere in esecuzione solo le più importanti"**

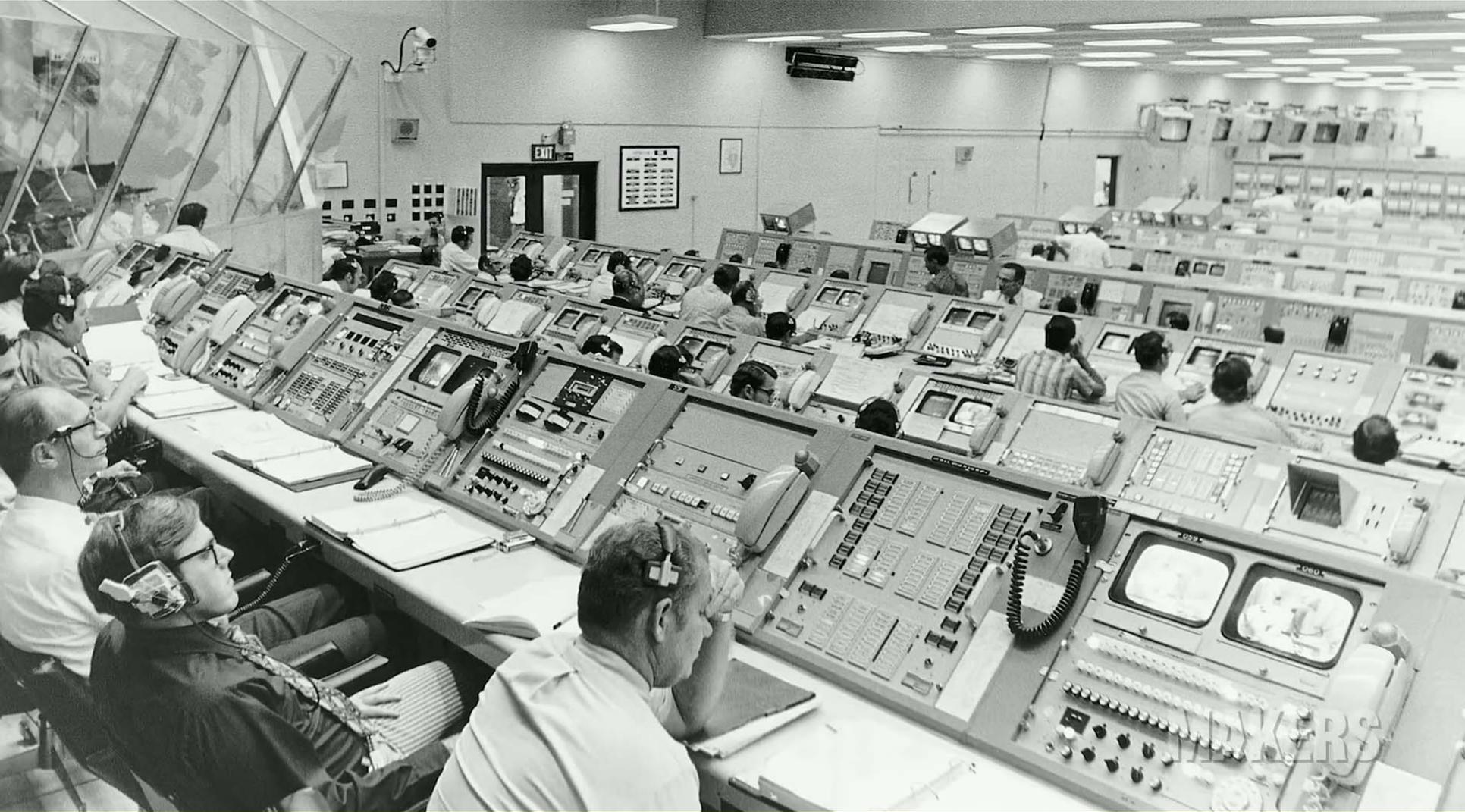
Grazie all'idea geniale di un pioniere dell'informatica, **Hal Laning**, messa in atto da Margaret Hamilton nel software di gestione, l'AGC eseguiva diversi programmi dando loro un **ordine di priorità** - i più urgenti prima, gli altri in coda - ed era progettato per **non bloccarsi nemmeno nel caso di errore**.

Con una velocità 10.000 volte più veloce di un riavvio di un moderno computer, l'AGC ripartiva, dopo ogni errore, con la priorità che aveva prima di spegnersi (in quel caso P66... Fase di allunaggio).

**Se il computer non avesse riconosciuto il problema e reagito di conseguenza, l'allunaggio di Apollo 11 non sarebbe stato il successo che fu.**



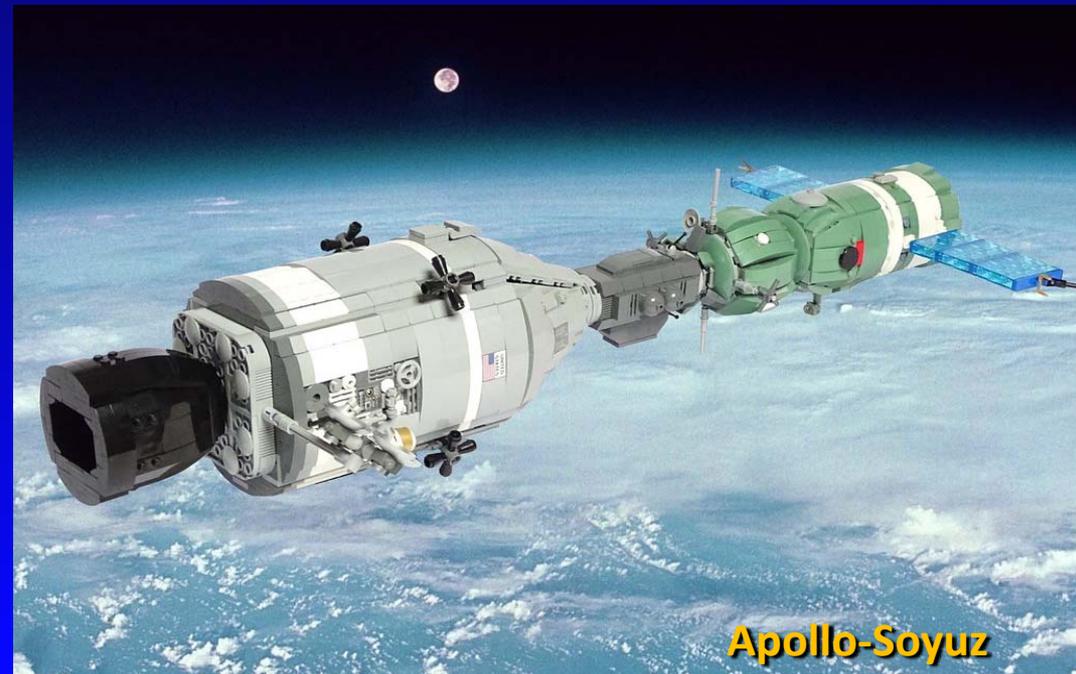
**“Go for landing”**

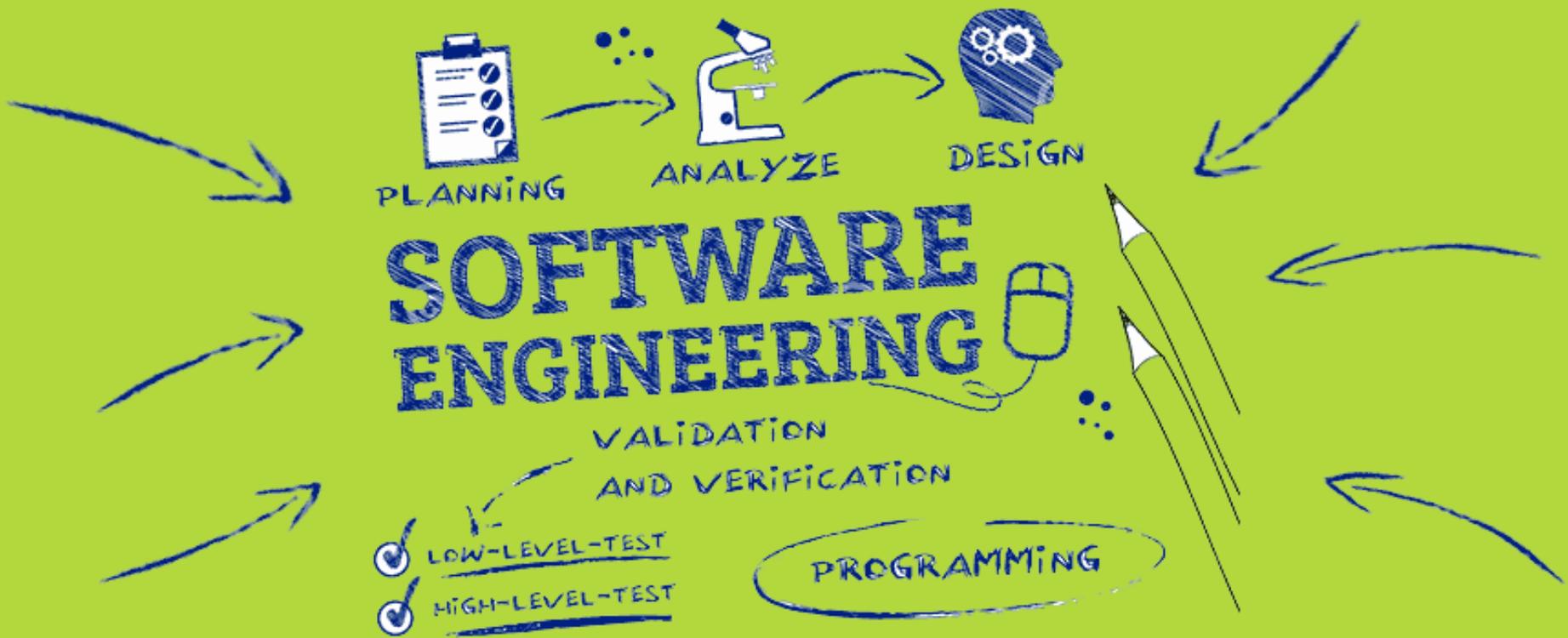


**Mission Control Center (MCC) di Houston**

# Un grande successo:

**15 missioni** con equipaggio tra cui **9 voli verso la Luna** (6 con allunaggio), **3 missioni Skylab** (stazione spaziale degli Stati Uniti d'America – lancio 1973, rientro 1979) ed una **missione test Apollo-Soyuz** nel 1975 (la prima collaborazione tra gli Stati Uniti d'America e l'Unione Sovietica nel settore dei voli nello spazio).





**Fasi per realizzare sistemi software complicati**

Analisi dei requisiti

Progettazione

Scrittura di codice

Collaudo

Manutenzione

Il 22 novembre 2016 Margaret Hamilton, ormai 80enne, ha ricevuto da Barack Obama la **medaglia presidenziale della libertà**, la più alta onorificenza civile degli Stati Uniti, concessa a chi ha contribuito alla sicurezza, agli interessi, alla pace o alla cultura nel Paese.

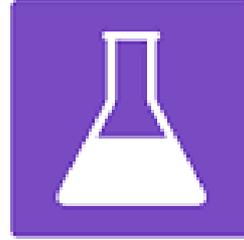
In 2016, Hamilton received the highest civilian honor in the United States – the Presidential Medal of Freedom – for her work on Apollo and the creation of the Universal Systems Language.

**MAKERS**

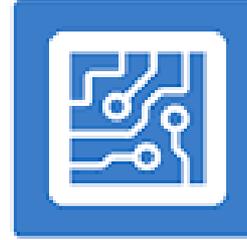
Motivazione:

«Margaret H. Hamilton led the team that created the on-board flight software for NASA's Apollo command modules and lunar modules. A mathematician and computer scientist who started her own software company, Hamilton contributed to concepts of asynchronous software, priority scheduling and priority displays, and human-in-the-loop decision capability, which set the foundation for modern, ultra-reliable software design and engineering.»

# Women in STEM



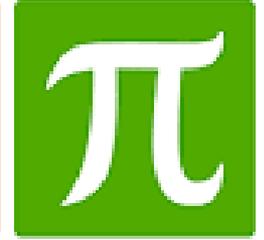
SCIENCE



TECHNOLOGY



ENGINEERING



MATHEMATICS

