



**UNIVERSITÀ
DEL SALENTO**



Piano Lauree Scientifiche 2020

Formazione dei crateri: teoria ed esperimenti

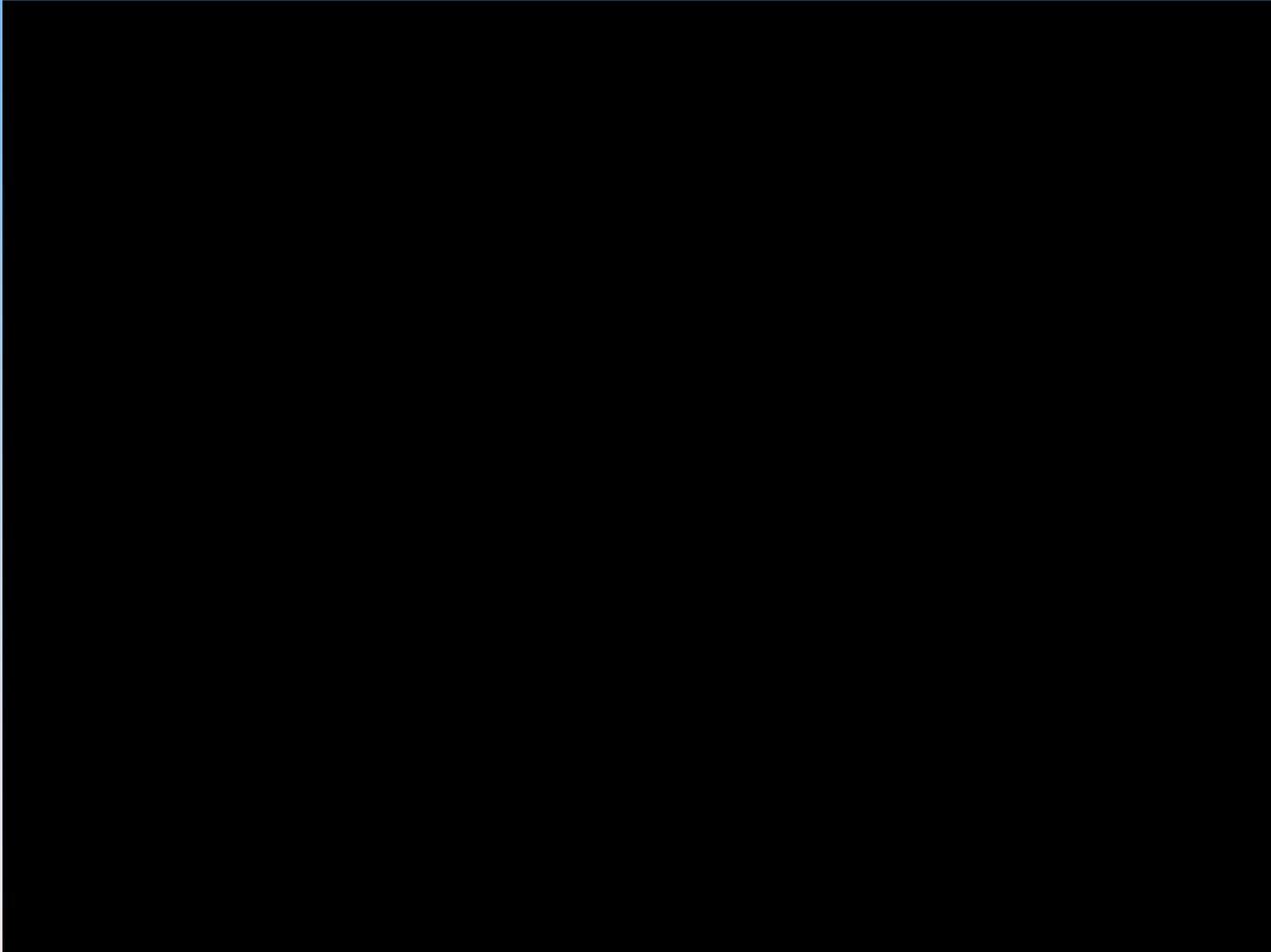
Domenico Licchelli

Vincenzo Orofino



Crateri d'impatto – Definizione e classificazione

Un cratere si forma quando un meteoroido/asteroide/cometa (*proiettile*) colpisce la superficie di un pianeta o di un altro corpo minore.



Nella collisione l'energia cinetica del proiettile si trasforma in energia termica, acustica, elastica, chimica, cinetica (dei vari frammenti espulsi in tutte le direzioni) e potenziale gravitazionale (associata alla riconfigurazione delle masse).



A causa dell'impatto si genera un'esplosione (più correttamente un'onda d'urto) che frantuma il proiettile ed in gran parte lo vaporizza.



Proiettili piccoli e/o con una bassa velocità creano nel terreno cavità quasi emisferiche di piccole dimensioni (*crateri semplici*).



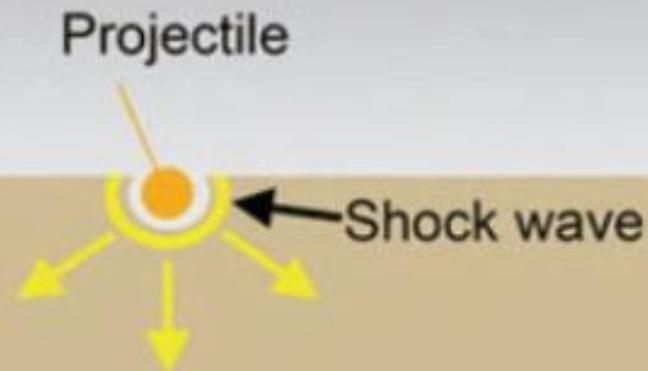
Tipico esempio di cratere semplice lunare

Linné Crater



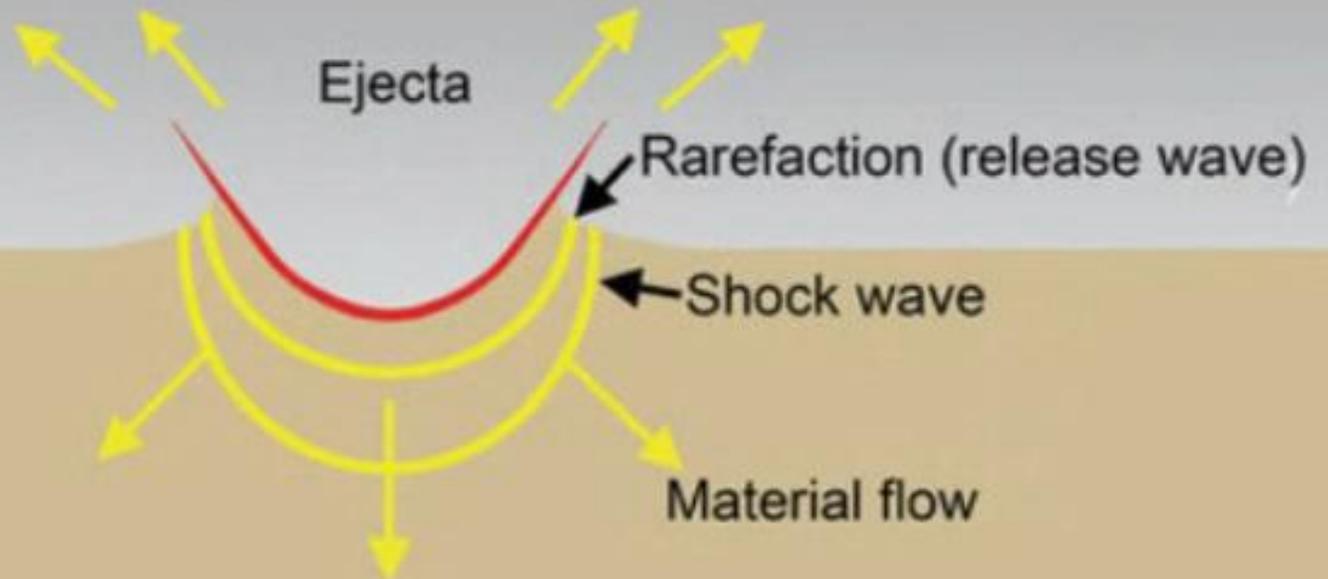
Formazione di un cratere semplice – Fase 1

Contact/Compression stage



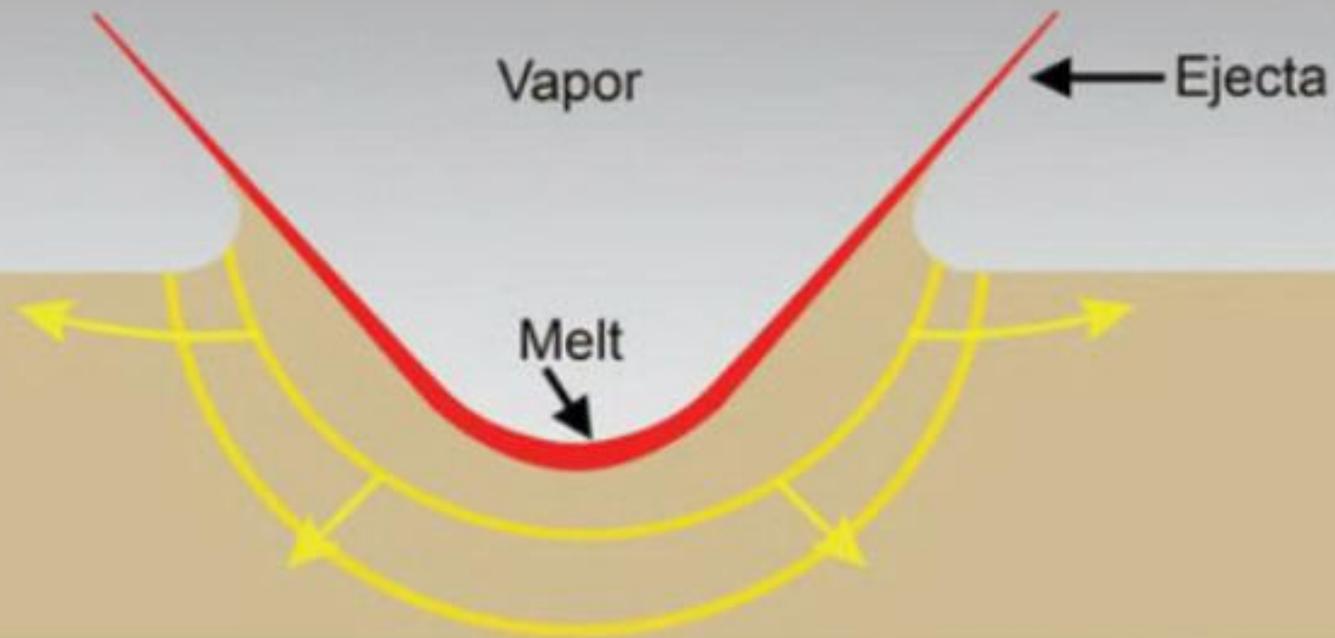
Formazione di un cratere semplice – Fase 2

End contact/compression stage



Formazione di un cratere semplice – Fase 3

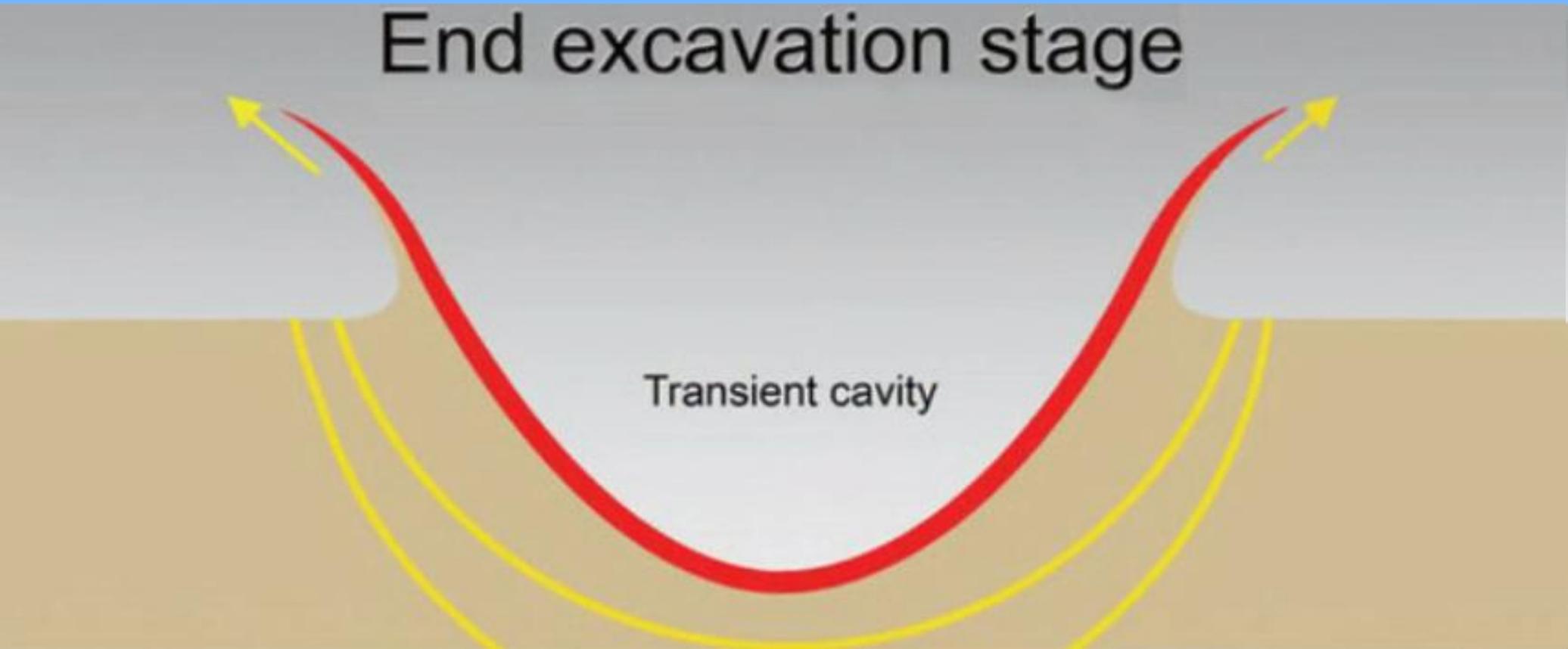
Excavation stage



Formazione di un cratere semplice – Fase 4

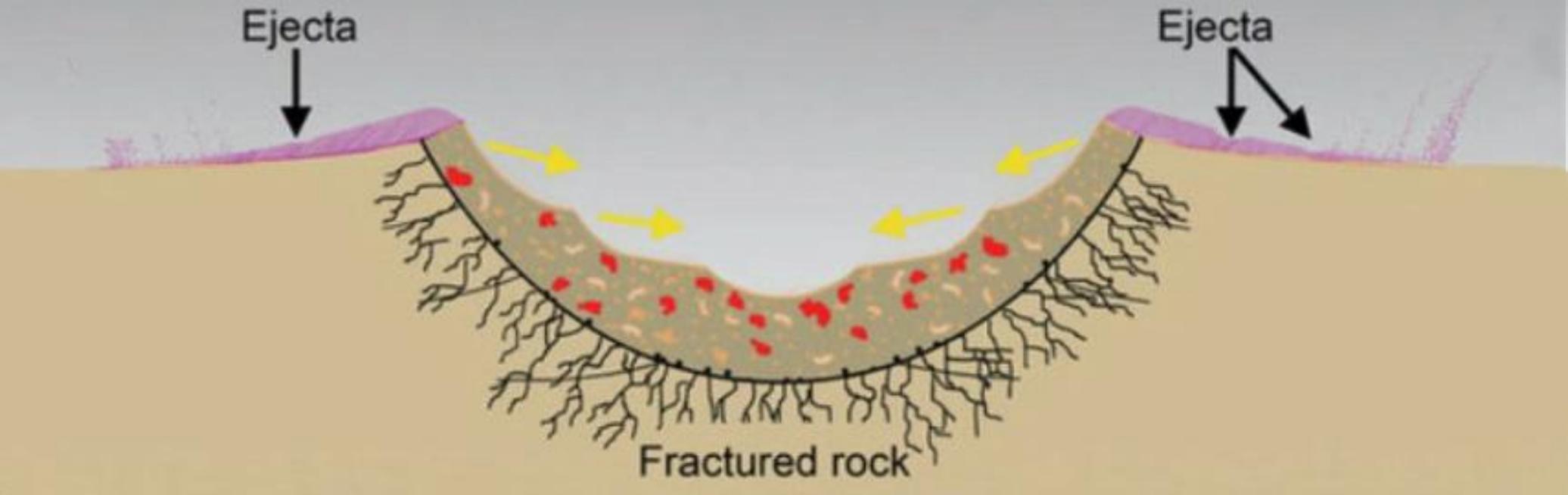
End excavation stage

Transient cavity

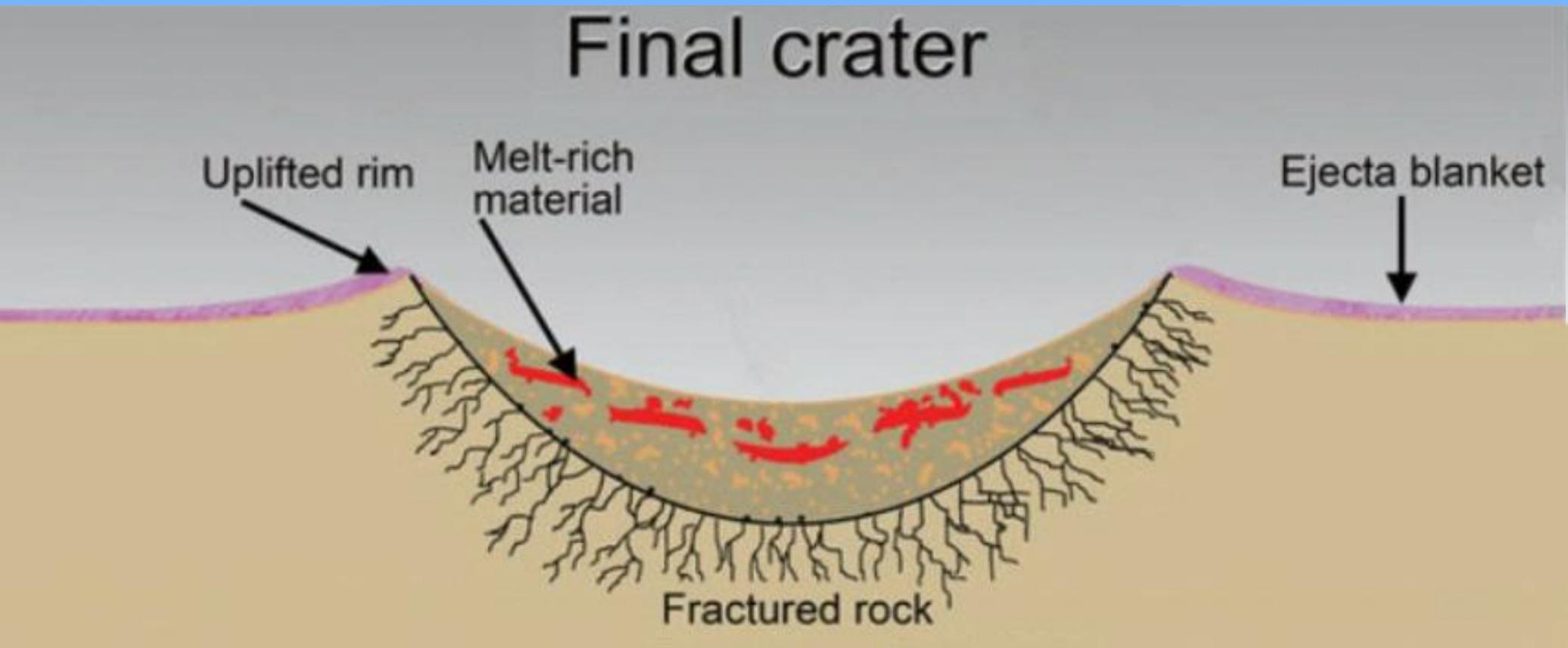


Formazione di un cratere semplice – Fase 5

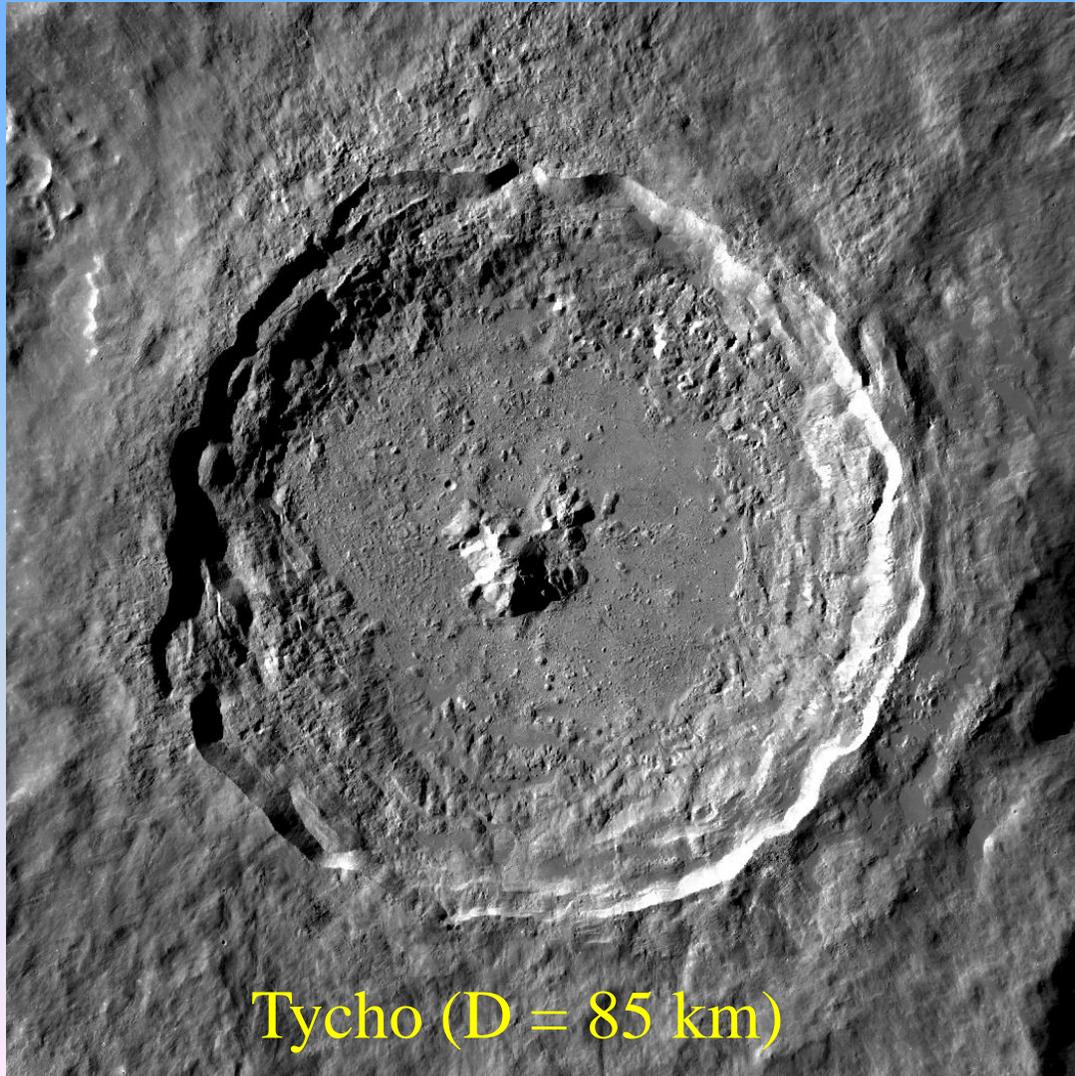
Modification stage



Formazione di un cratere semplice – Fase 6

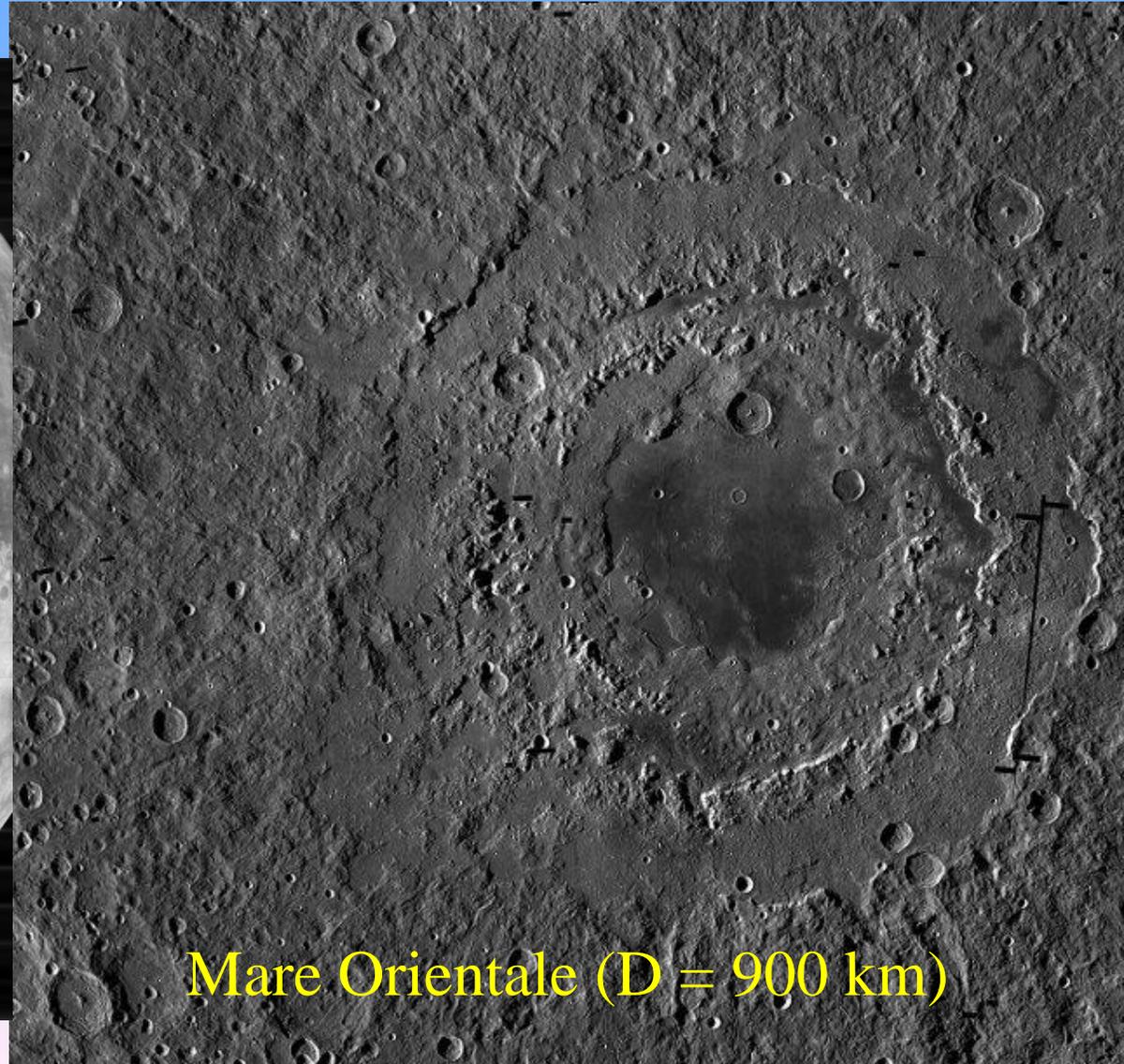


Strutture più grandi hanno una morfologia più complicata a causa della presenza di terrazzamenti (serie di scarpate concentriche) e di un picco centrale (*crateri complessi*).



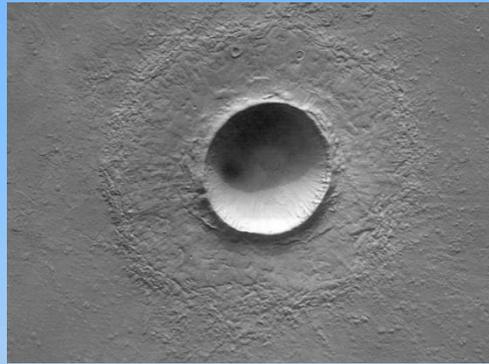
Tycho (D = 85 km)

Strutture ancora più grandi perdono il picco centrale ed hanno un fondo piatto con bordi costituiti da sistemi di anelli concentrici (*bacini d'impatto*).

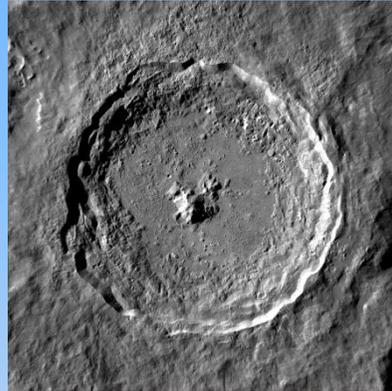


Mare Orientale ($D = 900$ km)

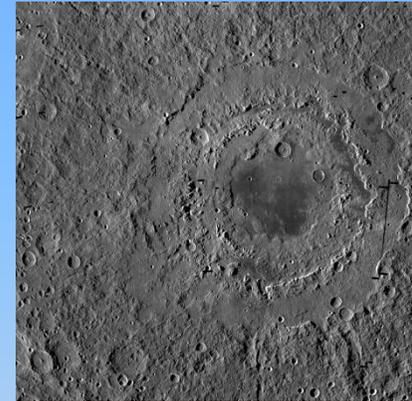
Diametro di transizione tra le varie tipologie di crateri presenti sulla Luna



$D \approx 20 \text{ km}$



$D \approx 400 \text{ km}$



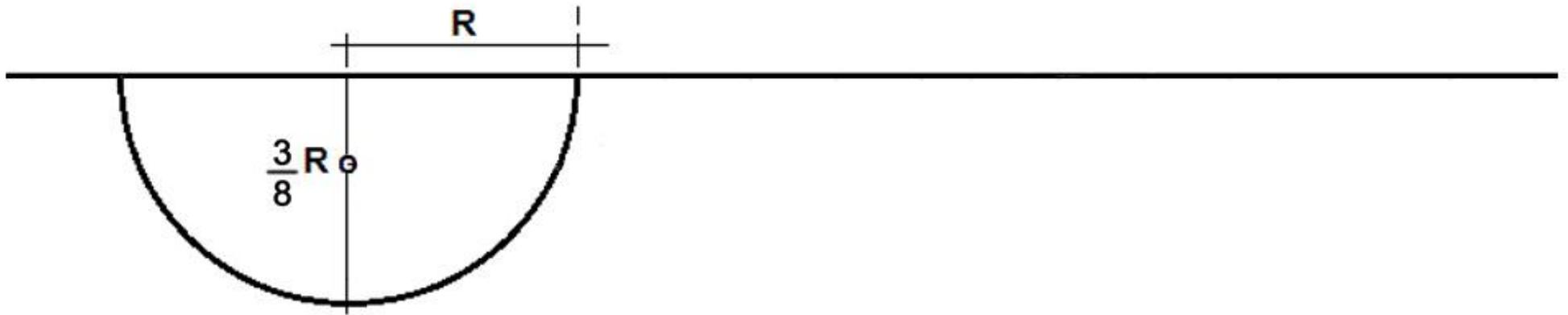
cratere
semplice

cratere
complesso

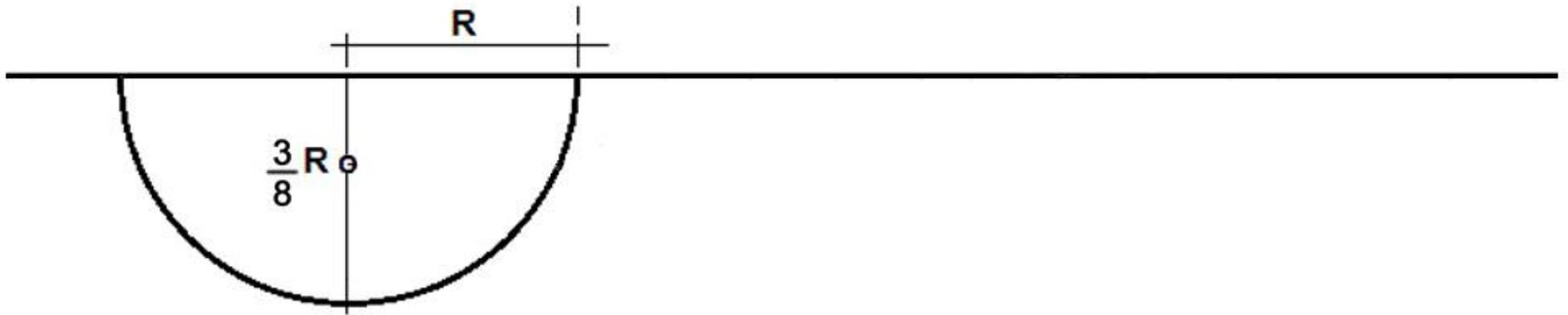
bacino
d'impatto

In questo studio analizzeremo crateri semplici presenti sulla Luna.

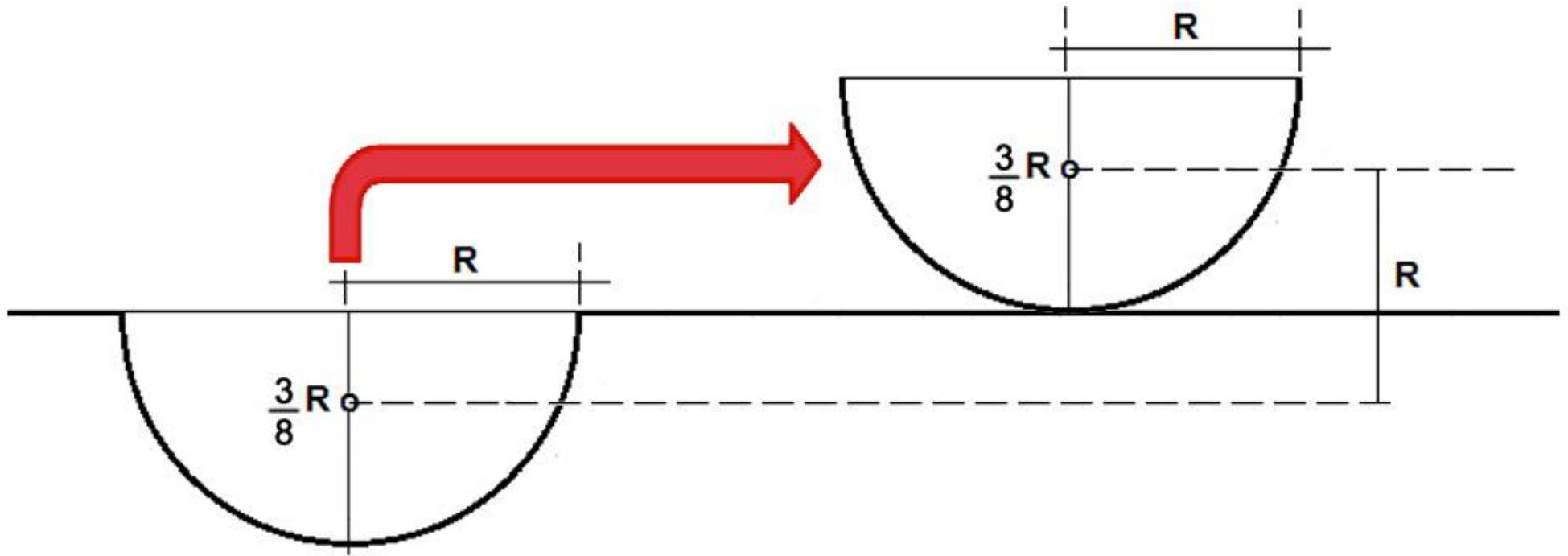
Formazione dei crateri – Considerazioni teoriche



Un cratere semplice può essere idealizzato come una buca emisferica di raggio R .



Considerazioni energetiche suggeriscono che, in condizioni ideali, l'energia richiesta per scavare la buca sia pari al lavoro necessario per sollevare il materiale che un tempo occupava la buca e deporlo sul suolo affianco a quest'ultima: il baricentro viene sollevato di un'altezza $h_0 = R$.



Considerazioni energetiche suggeriscono che, in condizioni ideali, l'energia richiesta per scavare la buca sia pari al lavoro necessario per sollevare il materiale che un tempo occupava la buca e deporlo sul suolo affianco a quest'ultima: il baricentro viene sollevato di un'altezza $h_0 = R$.

L'energia (positiva) E liberata nell'impatto è uguale al modulo $|L|$ del lavoro che si compie contro la gravità per innalzare di una quota $h_0 = R$ la massa del materiale prima presente nella buca:

$$E = |L| = M g h_0 = M g R = \frac{2}{3} \pi \rho g R^4,$$

essendo la massa del materiale espulso:

$$M = \rho V = \frac{1}{2} \left(\frac{4}{3} \right) \pi \rho R^3 = \frac{2}{3} \pi \rho R^3 .$$

L'energia E liberata nell'impatto è uguale all'energia cinetica K dissipata nell'urto, per cui:

$$K = \frac{2}{3} \pi \rho g R^4 = \frac{2}{3} \pi \rho g \left(\frac{D}{2} \right)^4 = f_0 \rho g D^4 \quad (1)$$

con f_0 fattore di forma: $f_0 = \frac{1}{24} \pi$ per una semisfera di diametro D ;
 $f_0 = 1$ per un cubo di lato D .

In definitiva la relazione che lega l'energia cinetica al diametro è del tipo:

$$K = A \cdot D^B \quad (2)$$

con $A = f_0 \rho g$ e $B = 4$.

Se D è espresso in km e K in Joule, per la Terra si ha: $A = 3.5 \times 10^{15}$, mentre per la Luna $A = 5.7 \times 10^{14}$.

Altre valutazioni semiempiriche più accurate, relative a crateri terrestri, hanno trovato una legge dello stesso tipo ma con:

$$A = 9.1 \times 10^{17} \text{ e } B = 2.59 \text{ (Hughes, 2003)}$$

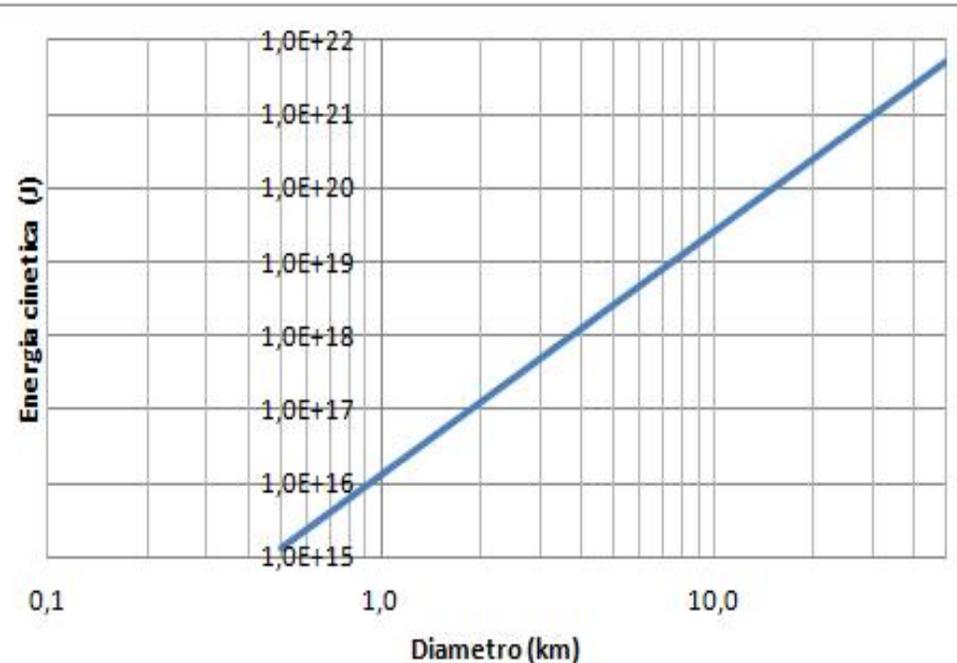
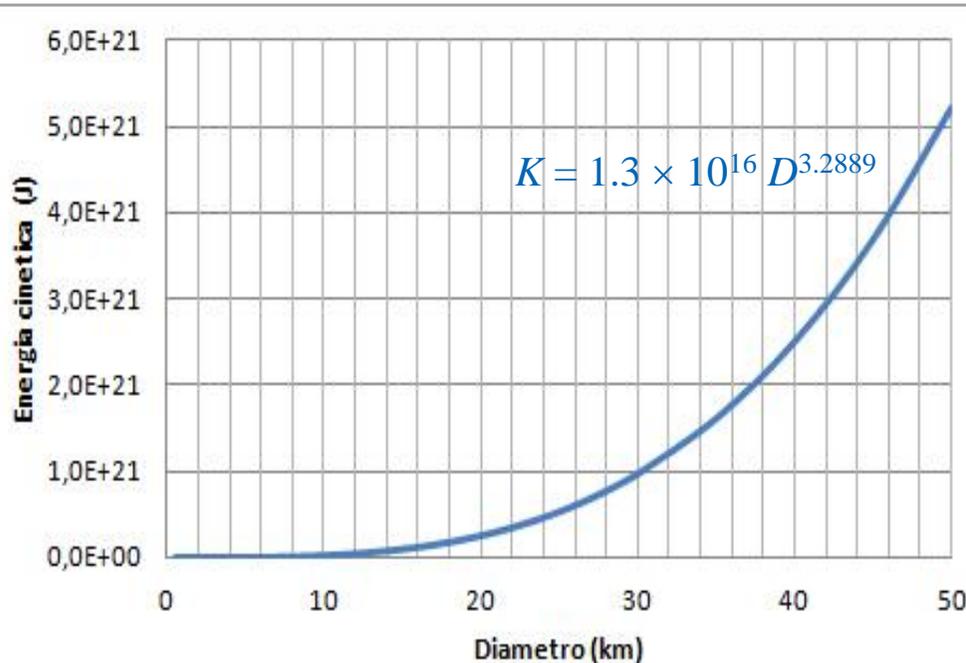
$$A = 8.5 \times 10^{15} \text{ e } B = 3.89 \text{ (Melosh, 1999)}.$$

Per i crateri lunari Bond (1982) riporta ancora una legge tipo la (2) ma con:

$$A = 2.7 \times 10^{17} \text{ e } B = 3.045,$$

mentre dalle simulazioni di Potter & Kring (2019) è possibile ricavare una più attendibile relazione data sempre dalla (2) con:

$$A = 1.3 \times 10^{16} \text{ e } B = 3.2889 \text{ (v. in seguito).}$$



Formazione dei crateri – Simulazioni in laboratorio

Un cratere può essere prodotto in laboratorio facendo cadere, partendo da ferma, una sferetta (proiettile) di massa m da un'altezza h su un opportuno substrato.



Per la conservazione dell'energia nel tratto in aria:

$$K = K_f = U_i = m g h$$

Questa energia cinetica, totalmente persa nel substrato ed impegnata a scavare il cratere, è espressa dalla (1). Quindi:

$$f_0 \rho g D^4 = m g h$$

da cui:

$$D = \left(\frac{m}{\rho f_0} \right)^{1/4} h^{1/4} = A_0 \cdot h^C \quad (3)$$

Come per la relazione $K-D$, anche stavolta ci si aspetta che nel caso pratico la legge sia dello stesso tipo della (3), ma con A_0 e C diversi da quanto previsto dalla teoria (caso ideale).

Formazione dei crateri – Simulazioni numeriche

Potter & Kring (2019) hanno simulato impatti di asteroidi con la Luna.

Sono stati considerati asteroidi di tipo roccioso ($\rho = 3300 \text{ kg/m}^3$) e di tipo metallico ($\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$), di vari diametri (D') e con velocità (v) comprese tra 10 e 35 km/s (caso standard $v = 15 \text{ km/s}$) e sono stati determinati il diametro (D) e la profondità (d) dei crateri risultanti.

Dai loro risultati è possibile ottenere le seguenti relazioni:

$$d = (0.24 \pm 0.02) D$$

$$D = (25 \pm 5) D'$$

$$K = (1.3 \times 10^{16}) D^{3.2889} \quad (\text{energia cinetica } K \text{ in Joule se } D \text{ in km})$$

Verifiche e determinazioni osservative sui crateri lunari

- 1) Determinare il diametro (D) e la profondità (d) di un gruppo di crateri lunari tramite l'analisi di un'immagine LROC.
- 2) Verificare, utilizzando quel gruppo di crateri, la legge di proporzionalità $D-d$ trovata con le simulazioni di Potter & Kring (2019) (e confrontarla eventualmente con altri lavori in letteratura).
- 3) Verificare collettivamente, utilizzando i dati di tutti i gruppi, la legge di proporzionalità $D-d$.
- 4) Scelto un cratere rappresentativo del gruppo, determinare il diametro (D'), con relativa incertezza, del corpo impattante (utilizzando il valore $D/D' = 25 \pm 5$ trovato con le simulazioni).

5) Determinare l'energia K liberata nella creazione di quel cratere tramite la legge trovata con le simulazioni (e confrontarla con l'energia liberata nell'esplosione nucleare di Hiroshima e in eventi di caduta di asteroidi sulla Terra).

6) Assumendo $D/D' = 25$ ed utilizzando il valore di K prima ricavato, invertire la formula dell'energia cinetica per ricavare v nei due casi di asteroide roccioso e metallico e verificare che v cada nell'intervallo 10-35 km/s (fare attenzione alle unità di misura). Se la verifica ha esito positivo solo in un caso, la classe dell'asteroide risulta determinata. Se, come in genere accade, entrambe le classi asteroidali danno luogo a velocità accettabili, cercare di individuare il caso più probabile, considerando la prossimità di v al valore standard di 15 km/s e l'abbondanza relativa di asteroidi rocciosi e metallici.

