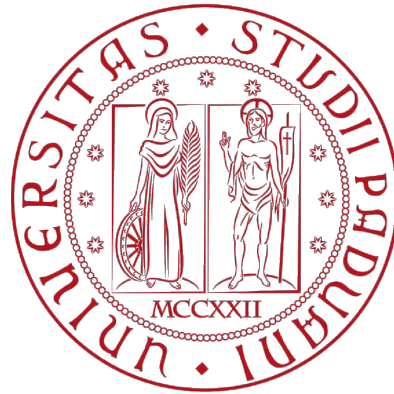


Università degli Studi di Padova  
Facoltà Di Scienze MM.FF.NN.  
Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”



TESI DI LAUREA TRIENNALE IN ASTRONOMIA

Analisi statistica  
dei crateri d'impatto di Mercurio

Relatore: Prof. Francesco MARZARI

Correlatore: Dr.ssa Elena Martellato

Laureando: Marco PAGLIARO

Matricola: 1196475

ANNO ACCADEMICO 2022 – 2023



# ABSTRACT

## Contesto.

Le collisioni di asteroidi e comete con superfici planetarie hanno come risultato finale un cratere. Il processo geologico dell'impatto si basa sul trasferimento dell'energia cinetica del proiettile alla superficie. Si origina quindi un flusso di escavazione che (i) apre una cavità poi modificata sotto l'effetto di collassi gravitativi, e (ii) lancia in traiettoria balistica materiale della superficie che si deposita poi attorno al cratere formato.

Se il proiettile è una cometa o un asteroide idrato, il suo contenuto di ghiaccio d'acqua potrebbe sopravvivere durante le prime fasi di formazione della cavità, per poi ricondensarsi e depositarsi nel fondo del cratere finale, se l'impatto è poco energetico. Tale deposito di ghiaccio d'acqua può sopravvivere su lunghi tempi scala geologici, se le condizioni termiche lo consentono. Una di queste zone favorevoli sono le *Permanent Shadowed Regions* (PSRs) nelle regioni polari di Mercurio, che si trovano proprio all'interno di crateri.

## Goal.

L'obiettivo di questa tesi è di studiare la geometria dell'impatto che ha prodotto il Fuller, un cratere di 27 km di diametro localizzato a latitudini superiori a 80°N di Mercurio, valutare se le condizioni dell'impatto siano favorevoli alla sopravvivenza dell'eventuale ghiaccio d'acqua contenuto nel proiettile che l'ha generato, e dare una stima della quantità di ghiaccio d'acqua che potrebbe essere stata depositata nel suo fondo.

## Metodi.

Nel sistema informativo geografico open source QGIS, sono stati identificati i crateri secondari nel deposito di ejecta relativo al cratere Fuller. Gli ejecta sono infatti uno dei pochi strumenti che permettono di avere informazioni riguardo all'impattore. Tali crateri secondari sono stati selezionati a mano usando la forma geometrica dell'ellisse. L'applicazione di un programma Python ha poi permesso di discriminare i soli crateri secondari creati dal Fuller, secondo la regola di avere l'asse maggiore  $\pm 10^\circ$  rispetto alla direzione radiale verso il centro del cratere primario.

## Risultati.

I crateri secondari sono 88, con una distribuzione spaziale che prevede una zona proibita a forma di "V" nella direzione NW, individuato come la direzione dell'impatto. Secondo i modelli presenti in letteratura, l'angolo d'impatto compreso tra 20° e 45°.

## Conclusioni.

Si sono applicate leggi di scala per la stima del proiettile a partire dal cratere, utilizzando come input dati pubblicati in letteratura (velocità d'impatto di 30 km/s) e l'angolo massimo suggerito da questo studio (45°). Se il proiettile che ha prodotto il cratere Fuller ha almeno il 6% di ghiaccio d'acqua, la massa di ghiaccio che potrebbe sopravvivere all'impatto e depositarsi all'interno del cratere è di  $\sim 1.5 \times 10^{12}$  g.



# Indice

ABSTRACT .....	3
Indice .....	5
Introduzione.....	7
1. Crateri d’impatto .....	9
1.1 Processo d’impatto.....	9
1.2 Crateri d’impatto.....	13
1.3 Ejecta .....	16
1.4 Impatti obliqui .....	18
2. Mercurio .....	19
2.1 Missioni Spaziali .....	19
2.2 Il pianeta .....	24
2.2.1 Moto di Mercurio.....	25
2.2.2 Massa e dimensioni di Mercurio .....	26
2.2.4 Atmosfera di Mercurio .....	28
2.2.5 La superficie di Mercurio .....	29
2.2.6 Ghiaccio d’acqua .....	29
2.3 Crateri d’impatto su Mercurio .....	30
3. Ghiaccio d’acqua su Mercurio .....	31
3.1 Ghiaccio d’acqua nelle Regioni Permanentemente in Ombra.....	31
3.2 Processi di deposizione del ghiaccio .....	32
3.3 Fuller crater .....	35
3.4 Goal della tesi.....	37
4. Dati .....	39
4.1 Camera MDIS.....	39
4.2 Immagini .....	39
5. Metodi .....	41
5.1 Ambiente di lavoro QGIS.....	41
5.2 Selezione dei crateri e conteggio.....	42
6. Risultati .....	43
6.1 Area di Analisi.....	43
6.2 Selezione dei crateri secondari .....	43
6.3 Analisi dati .....	44
6.4 Il ghiaccio d’acqua di Fuller .....	47
7. Conclusioni.....	49

Bibliografia.....51

# Introduzione

I processi collisionali sono meccanismi fondamentali per la formazione e l'evoluzione di pianeti e corpi minori nel Sistema Solare. Dopo la fase di aggregazione dei planetesimi in proto-pianeti, numerosi corpi planetari continuarono a bombardare i pianeti appena formati. La Luna stessa è un esempio di una mega collisione da parte di un corpo planetario delle dimensioni di Marte con la Terra primordiale (Canup & Aspaug, 2001). L'intenso flusso iniziale d'impattori, dominato dai planetesimi, ha prodotto la maggior parte dei grandi bacini sulle superfici della Luna e dei pianeti terrestri. Alcuni di questi si sono formati relativamente tardi, e alcuni modelli dinamici li associano ad un intenso evento di bombardamento (detto "*Late Heavy Bombardment*", LHB), avvenuto verso i ~4 Gyr fa. Dopo questa fase, il flusso di impattori, dominato principalmente da asteroidi e in misura minore da comete, è andato diminuendo, sia in termini di numerosità della popolazione, che delle dimensioni dei singoli oggetti (e.g., Nesvorný et al., 2023, Orgel et al., 2020). Il risultato di questo processo è ancora visibile nella superficie della Luna e degli altri pianeti terrestri nella forma di crateri da impatto (e.g., Melosh, 1989, Collins & Melosh, 2012). La combinazione dell'analisi statistica della popolazione di crateri unita a modelli cronologici rappresenta uno strumento importante per determinare l'età di una superficie planetaria, e i particolari processi geologici che l'hanno modificata nel corso del tempo (e.g., colate laviche, attività tettonica, o crateri stessi) (e.g., Neukum et al., 2001).

Le nozioni fondamentali sulla morfologia dei crateri d'impatto e la fisica del processo che li genera sono ancora materia di investigazione: la nostra attuale comprensione deriva dalla combinazione di esperimenti di laboratorio e modellizzazione numerica. Gli esperimenti a piccola scala hanno permesso di studiare in particolare le fasi iniziali del processo di formazione di un cratere e la distribuzione del materiale espulso attorno ad esso (deposito di *ejecta*), e come la morfologia di cratere ed *ejecta* possa essere influenzata dalle proprietà del corpo impattore come dimensione, materiale, velocità, ma soprattutto dalla geometria dell'impatto, ovvero dalla non-perpendicolarità dell'impattore quando collide la superficie (e.g., Pierazzo & Melosh, 2000).

In tempi recenti, la modellizzazione numerica è diventata un mezzo efficace per lo studio del processo di craterizzazione, in quanto permette di simulare condizioni ben oltre il limite degli esperimenti (dimensioni e velocità dell'impattore) (e.g., Pierazzo & Melosh, 2000). A questa, si aggiungono anche esperimenti a scala "quasi-planetaria", che tuttavia sono molto limitati per i loro costi: si tratta della collisione con un corpo planetario di impattori artificiali ad-hoc (Deep Impact, LCROSS, DART) o di sonde spaziali alla fine della loro vita operativa (SMART-1, MESSENGER).

Tuttavia, la componente "osservativa" rimane un importante strumento per validare ed interpretare i risultati delle simulazioni sperimentali e teoriche. Sul nostro pianeta, sono stati finora identificate e confermate ~190 strutture d'impatto, un numero sotto-rappresentativo, in parte dovuto al fatto che la maggior parte degli impatti sulla Terra avvengono in acqua, e solo in caso di bassi fondali potrebbero formarsi anomalie gravitazionali o magnetiche. D'altra parte, anche sulla terraferma, i crateri non sono facilmente identificabili, in quanto la struttura prodotta dal processo d'impatto è poi soggetta a pesanti cambiamenti morfologici per gli effetti cumulativi di erosione, trasporto e deposizione da parte degli agenti atmosferici (e.g., acqua, vento), e di processi endogeni o tettonici, oltre che alla presenza di vegetazione. I crateri della Luna hanno rappresentato quindi una valida alternativa di studio, in quanto, in mancanza di una atmosfera e di processi geologici attivi, sono soggetti ad una degradazione minore e più lenta rispetto a quelli terrestri (e.g., smussamento del bordo del cratere, erosione delle strutture lungo le pareti, diminuzione della profondità, e aumento della larghezza del fondo del cratere), e potevano essere osservati a risoluzioni (relativamente) alta da telescopi terrestri prima dell'era spaziale.

Oltre alle immagini acquisite sia dai telescopi a Terra sia dalle camere a bordo delle sonde spaziali inviate verso numerosi corpi planetari del nostro Sistema Solare, una serie di dati ricavati con altre tecniche osservative possono venire a supporto. Per esempio, le osservazioni radar da Terra delle regioni polari di Luna e Mercurio avevano evidenziato la presenza di depositi altamente riflettenti, che sono stati associati alla presenza di ghiaccio d'acqua. Tali depositi si trovano in regioni permanentemente in ombra (*Permanently Shadowed Regions*, PSRs), a loro volta localizzate all'interno di crateri che, per effetto dell'inclinazione del corpo con il Sole, non ricevono flusso radiativo (e.g., Chabot et al., 2014). Tali PSRs rappresentano quindi un ambiente termicamente stabile per garantire la sopravvivenza del ghiaccio d'acqua in (quasi) superficie su tempi scala geologici (e.g., Paige et al., 2013). Nel caso di Mercurio, una delle ipotesi è che il ghiaccio d'acqua nelle PSRs abbia origine esogena, con condizioni d'impatto ottimali perché il materiale volatile contenuto nell'impattore riesca a ricondensarsi. Uno studio recente sul cratere Hokusai di Mercurio (57.80°N, 16.72°E, D=97 km) ha messo in evidenza che parte del ghiaccio d'acqua rimane vincolato alla gravità del pianeta se l'impatto avviene a bassa velocità e obliquamente (Ernst et al., 2018).

Un altro candidato che possa essersi formato per mezzo di un impatto cometario è il cratere Fuller, 27 km di diametro, a latitudini superiori al parallelo 80°N di Mercurio. È quindi importante ottenere delle informazioni sulla geometria dell'impatto, in modo da determinare se parte del ghiaccio d'acqua sia sopravvissuto all'impatto e si sia poi depositato nel fondo del cratere. Il goal di questa tesi è di analizzare la distribuzione dei crateri secondari negli *ejecta* del cratere Fuller, che sono l'unico strumento per avere indicazioni sulla geometria dell'impatto.

La tesi è suddivisa in sei capitoli, oltre a questa introduzione:

- 1) Nel primo capitolo, vengono introdotti i concetti base della fisica del processo d'impatto, generalmente suddiviso in tre fasi, e il prodotto finale di tale processo geologico, il cratere (cavità circondata da una coltre di *ejecta*), con particolare enfasi agli impatti obliqui.
- 2) Nel secondo, viene data una overview delle missioni spaziali passate e future che hanno visitato o visiteranno Mercurio, insieme ad una descrizione del pianeta.
- 3) Nel terzo capito, vengono introdotti i processi di formazione e deposizione del ghiaccio d'acqua ai poli, con particolare attenzione ai crateri Hokusai e Fuller, quest'ultimo oggetto di studio in questa tesi.
- 4) Nel quarto capitolo, vengono elencati i dati di remote sensing presi dalla sonda MESSENGER, e qui utilizzati.
- 5) Nel quinto capitolo, vengono descritti i sistemi GIS, in particolare QGIS utilizzato in questa tesi, che sono strumenti generalmente utilizzati nell'analisi delle superfici (planetarie), e alla loro classificazione cartografica, oltre all'indagine quantitativa di elementi di interesse.
- 6) Nel sesto capitolo, verranno mostrati e discussi i risultati ottenuti dall'analisi dei crateri secondari del cratere Fuller.
- 7) Nel settimo e ultimo capitolo, sono presentate le conclusioni di questo lavoro di tesi.



# 1. Crateri d'impatto

In questo capitolo si vuole descrivere il processo d'impatto e mostrare una panoramica delle diverse tipologie di crateri che si possono formare. La natura quasi istantanea di questo evento, che prevede variazioni elevatissime di pressione, temperatura, deformazione, e cambiamento di stato dei materiali, rende il processo di impatto diverso da qualsiasi altro processo geologico. Questa improvvisa e breve esposizione a forze e temperature estreme provoca modifiche peculiari alle rocce e minerali, chiamati effetti metamorfici. L'alterazione è maggiore per il materiale più vicino al punto di impatto, dove si registrano i valori più alti di pressione e temperatura, che causano la vaporizzazione e fusione del materiale, mentre le rocce della superficie planetaria più lontane dal punto d'impatto sono principalmente deformate, fratturate, e/o spostate. Tali effetti sono permanenti: le rocce risultanti, dette impattiti, sono la cartina di tornasole usata dai geologi per stabilire se una certa struttura sulla Terra sia un cratere da impatto.

## 1.1 Processo d'impatto

Il processo d'impatto, descritto per esempio in Melosh (1989), Collins & Melosh (2012), e French (1998), vede coinvolti due oggetti protagonisti: l'impattore (o *proiettile*) che collide su di un altro corpo o superficie planetaria (*target*). In questo paragrafo, vengono riassunte le fasi principali del processo assumendo che l'impatto sia verticale, su di una superficie omogenea almeno localmente, in un pianeta privo di atmosfera (come nel caso di Mercurio).

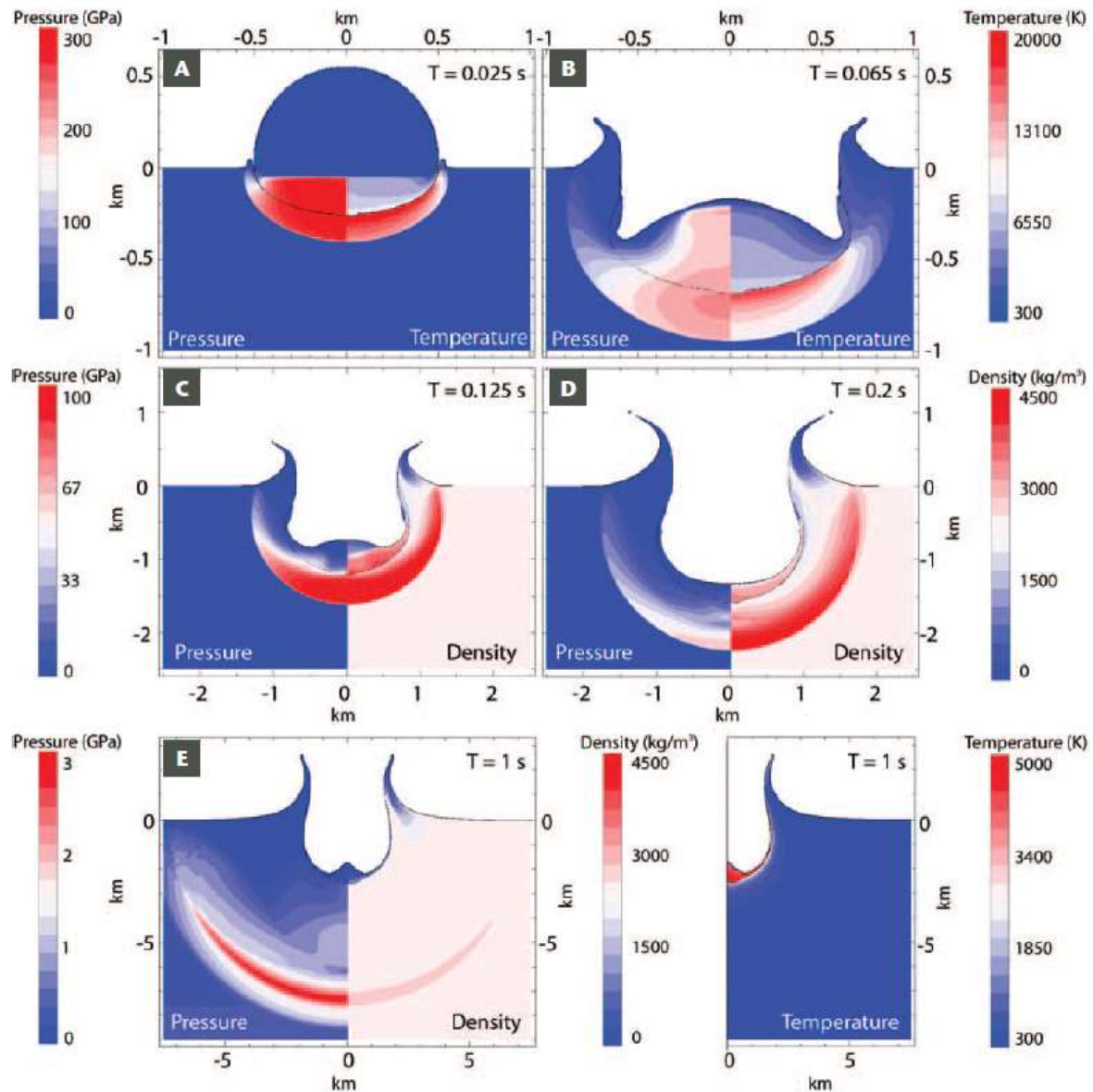
Il processo inizia quando un proiettile, asteroide o cometa, colpisce la superficie di un pianeta e termina quando tutti i frammenti escavati si sono depositati nell'intorno del cratere. L'intero processo è estremamente rapido, svolgendosi in tempi che vanno da poche frazioni di secondo a pochi minuti. Per meglio descrivere un fenomeno così veloce, esso viene suddiviso in tre fasi che, nella realtà, non dovranno essere considerate discrete e a sé stanti, ma come fasi che in parte si sovrappongono e si influenzano a vicenda.

- 1) **Contatto e compressione.** Il primo stadio inizia non appena il proiettile entra in contatto con la superficie del target, generando onde d'urto che si propagano in entrambi i corpi, causando un rapido cambiamento ad entrambe le velocità dei due corpi: il proiettile comprime ed accelera il target, a sua volta la resistenza del materiale del target decelererà l'impattore. Lungo l'interfaccia tra i due corpi, pressione e temperatura aumentano in maniera rapida e significativa: l'ordine di grandezza per la pressione è quella delle centinaia di GPa, molto superiore alle forze di coesione dei materiali, mentre le temperature raggiungono e/o superano la decina di migliaia di gradi Kelvin. Le superfici a contatto sono compresse e distorte, mentre il resto del proiettile prosegue nel suo moto all'interno del target (Fig. 1a).

Mentre il proiettile continua la sua immersione (Fig. 1b e 1c), le onde d'urto raggiungono il retro del proiettile, dove vengono riflesse come onda di rarefazione, riportando le pressioni ai valori iniziali secondo una trasformazione quasi-adiabatica (Fig. 1d), mentre le temperature sono ancora elevate, causando la fusione o la vaporizzazione dei materiali (Fig. 1e).

Questa fase termina quando le onde di rarefazione riportano il proiettile alle pressioni iniziali. Il tempo stimato per un impatto di un proiettile di 1 km che viaggia a 18 km/s è di 0.2 s circa, calcolato secondo la relazione  $\tau = \frac{L}{v}$ , dove  $L$ =diametro in km,  $v$ =velocità in km/s del proiettile. Il risultato netto di questa fase è la conversione dell'energia cinetica del proiettile in energia interna

dei materiali (che porta all'aumento di temperatura dei materiali) e in energia cinetica del target, che verrà utilizzata nella fase successiva per mettere in moto il materiale del target stesso (sospingerlo in profondità in direzione radiale rispetto al punto d'impatto, oppure espellerlo attorno alla cavità in formazione).



**Fig. 1.** Prime sequenze di una simulazione numerica dell'impatto di un proiettile dunitico di 1 km di diametro, con velocità di 18 km/s. La figura, presa da Collins et al. (2012), riporta le variazioni di pressione e temperatura durante le fasi di compressione del proiettile (da notare il cambiamento nelle scale di lunghezza, pressione e temperatura tra i diversi pannelli).

- 2) **Escavazione ed espulsione del materiale.** Il processo di escavazione consiste nell'espansione delle onde d'urto, prodotte nella precedente fase di compressione, e la loro graduale attenuazione. La velocità residua della fase precedente è usata per instaurare un flusso di escavazione, che scava e sposta il materiale del target emisfericamente rispetto ad un punto, detto centro equivalente  $d_{eq}$  (posto ad una profondità pari a circa un diametro del proiettile rispetto alla superficie di pre-impatto). Quindi, la regione del target più in profondità viene ulteriormente sospinta verso il

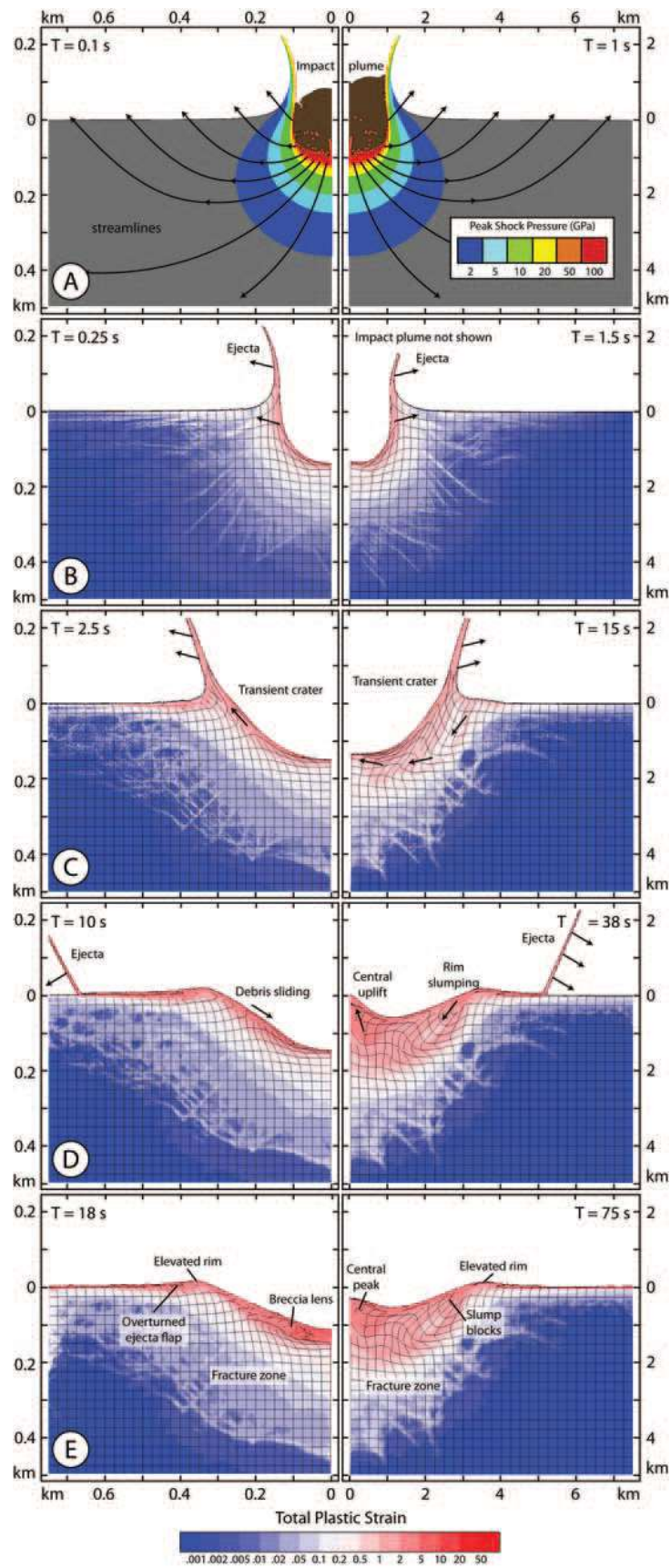
basso, mentre a quella più superficiale viene impartito anche un movimento orizzontale, causando la sua espulsione secondo una traiettoria balistica (Fig. 2a).

Durante le fasi iniziali dell'espansione della crateri, la cavità ha una forma approssimativamente emisferica (Fig. 2b). Infatti, anche se la gravità tende ad accelerare il materiale escavato, la resistenza delle rocce contrasta tale movimento, in maniera tanto minore quanto più il materiale è vicino alla superficie. Il risultato è che il primo arresto nell'espansione del cratere si ha nella profondità ( $H_{at}$ ), e successivamente nel diametro ( $D_{at}$ ), portando la cavità ad assumere una forma di paraboloide (Fig. 2c).

Oltre al processo di escavazione, questa fase prevede il lancio balistico di parte del materiale del target nell'intorno del cratere sotto l'azione della forza gravitazionale (oppure fuggire nello spazio se la sua velocità di lancio è superiore alla velocità di fuga del pianeta). Poiché la velocità con cui viene espulso il materiale del target è massima vicino al punto d'impatto ma decresce rapidamente mano a mano che ci si allontana, la deposizione del materiale espulso segue una relazione stratigrafica inversa rispetto al punto d'impatto (Fig. 2d). Quindi, sopra la superficie vicino al bordo del cratere si deposita una coltre continua di materiale espulso a velocità inferiori. Il materiale più vicino al punto d'impatto è invece soggetto a maggiori pressioni iniziali, con la conseguenza di venire frammentato e lanciato a velocità di espulsione maggiore (e quindi con una maggiore gittata), che può dare origine a sua volta altri crateri, detti secondari.

Il risultato di questa fase è una cavità parabolica, definita come “cratere transiente”, con diametro diverse volte superiore a quello del proiettile. Il rapporto profondità-diametro  $\frac{H_{at}}{D_{at}}$  del cratere transiente è compreso tra  $\frac{1}{4}$  e  $\frac{1}{3}$ .

Con la formazione del cratere transiente, convenzionalmente, si considera conclusa la seconda parte della formazione di un cratere, ma la forma e le dimensioni definitive devono ancora tenere conto degli effetti della gravità che causano collassi sulle pareti e bordi. Il tempo necessario a questa fase è proporzionale a  $g^{-\frac{1}{2}}$ .



**Fig. 2:** Sequenza da modellizzazione numerica del processo di escavazione e collasso durante la formazione di un cratere semplice (*sinistra*) da parte di un proiettile di 50 m, e di un cratere complesso (*destra*) da parte di un proiettile di 500 m. In entrambi i casi la velocità è di 12 km/s. Da notare le differenze di scala di tempo in ogni scenario (Figura tratta da Collins et al., 2012).

- 3) **Modificazione e collasso.** Il cratere prodotto alla fine della fase di escavazione è una cavità instabile, e collassa sotto l'effetto della gravità (Fig. 2d). Il grado di modifica del cratere transiente dipende dall'energia cinetica iniziale, e la transizione tra le due morfologie principali è proporzionale a  $g^{-1}$ , che è quindi caratteristica del corpo planetario dove avviene l'impatto.

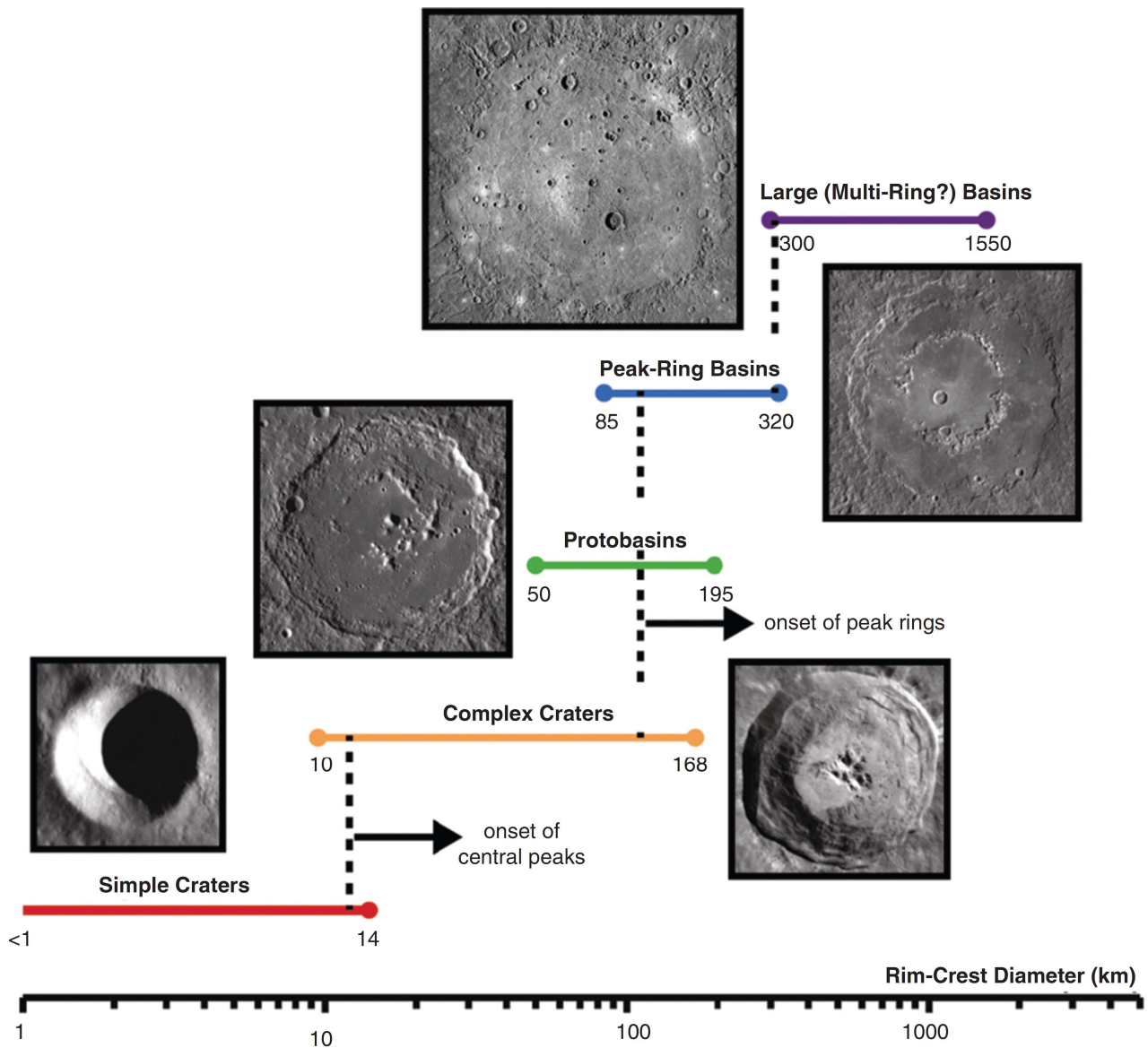
Per crateri di piccole dimensioni, detti *crateri semplici* (diametro <10 km su Mercurio, Fig. 2e, pannello sinistro), la modifica consiste principalmente nel collasso del materiale interno delle pareti più ripide verso il fondo del cratere, formando una lente di materiale brecciato, composto da materiale altamente fratturato mescolato con quello fuso dall'impatto. La forma finale è quindi molto simile al cratere transiente (forma a scodella). Il collasso fa infatti diminuire la pendenza delle pareti, fino a che il materiale raggiunge l'angolo di riposo, portando la struttura del cratere finale ad assumere un rapporto profondità/diametro di circa  $\frac{1}{5}$ .

Per crateri di maggiori dimensioni, detti *crateri complessi* (diametro >10 km, Fig. 2e, pannello destro), il collasso è molto più considerevole: il materiale del target si comporta in modo fluido, causando il sollevamento del centro del cratere fino a  $\frac{1}{10}$  del suo diametro, formando uno (o più) picchi centrali o un anello centrale, mentre il materiale delle pareti frana verso il basso dando origine a pareti terrazzate. In questo caso il rapporto profondità/diametro sarà molto minore di quello dei crateri semplice.

Si definiscono *crateri di transizione* quelli che presentano proprietà intermedie tra le due morfologie descritte in precedenza, con un notevole cedimento delle pareti interne dando origini a una conformazione molto rassomigliante le pareti terrazzate, ma senza un picco centrale.

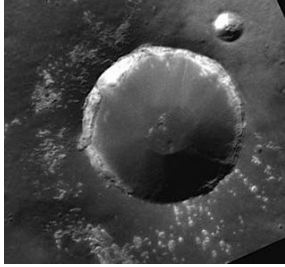

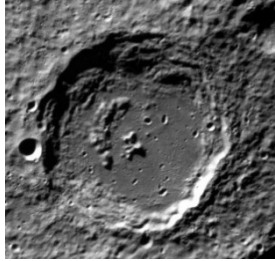
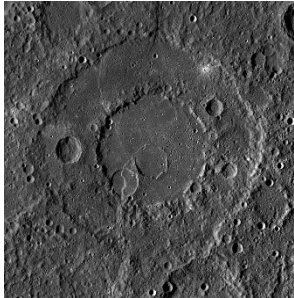
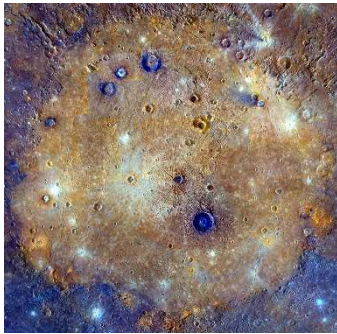
## 1.2 Crateri d'impatto

In Figura 3 viene riportata la sequenza dei crateri da impatto all'aumentare del diametro, oltre ad essere indicato il valore di transizione da una morfologia all'altra: a ~12 km si passa dai crateri semplici a quelli complessi a picco centrale (Susorney et al., 2016), che diventano complessi ad anello centrale a ~126 km (Baker et al., 2011), con una possibile ulteriore morfologia intermedia, detta proto-bacino, che presenta sia il picco che l'anello centrale (e.g., Head et al., 2010). A diametri più grandi (~300 km), si trovano i bacini a multi-anello (e.g., Orgel et al., 2020). Mercurio possiede il più alto numero di bacini ad anello centrale (110) e proto-bacini (70) con anelli di punta di qualsiasi altro corpo del Sistema Solare (Chapman et al., 2018).



**Fig. 3.** Rappresentazione schematica della variazione della morfologia dei crateri da impatto su Mercurio all'aumentare delle dimensioni. Da notare la sovrapposizione delle diverse morfologie di crateri, in un range di valori più o meno ampio, in corrispondenza alla transizione da una struttura all'altra. Le immagini delle varie struttura da impatto sono mosaici di immagini acquisite dai due telescopi Narrow Angle Camera (NAC) e Wide Angle Camera (WAC), che compongono il sistema ottico MESSENGER Mercury Dual Imaging System (MDIS) a bordo del MESSENGER: cratere semplice (senza nome,  $D=10$  km,  $40.2^{\circ}N$ ,  $26.5^{\circ}E$ ); cratere complesso a picco centrale (Fonteyn,  $D=29$  km,  $32.85^{\circ}N$ ,  $95.7^{\circ}E$ ); proto-bacino (Velázquez,  $D=123$  km,  $37.7^{\circ}N$ ,  $304.4^{\circ}E$ ); bacino a picco centrale (Raditladi,  $D=263$  km,  $27^{\circ}N$ ,  $119^{\circ}E$ ); bacino multi-anello (Caloris,  $D=1550$  km,  $31^{\circ}N$ ,  $160^{\circ}E$ ). Figura presa da Chapman et al. (2018).

**Tab. 1.** Variazione morfologica dei crateri da impatto su Mercurio all'aumentare del diametro.

Tipologia	Range di diametri	Esempi †	Dettagli	Caratteristiche
Cratere semplice	$D \lesssim 12 \text{ km}^a$		Cratere senza nome D=9 km	<ul style="list-style-type: none"> <li>• forma a scodella</li> <li>• bordo rialzato</li> <li>• profondità/diametro = 1/5</li> </ul>
Cratere complesso	$10 \text{ km}^b \lesssim D \lesssim 147 \text{ km}^b$		Munch D=58 km	<ul style="list-style-type: none"> <li>• picchi al centro</li> <li>• terrazze lungo le pareti</li> <li>• fondo piatto</li> </ul>
Proto-bacino	$75 \text{ km}^c \lesssim D \lesssim 172 \text{ km}^c$		Van Gogh D=99 km	<ul style="list-style-type: none"> <li>• presenza sia di picco che di anello centrale</li> </ul>
Bacino ad anello centrale	$84 \text{ km}^c \lesssim D \lesssim 320 \text{ km}^d$		Renoir D=220 km	<ul style="list-style-type: none"> <li>• anello di montagne al centro</li> <li>• pareti terrazzate</li> <li>• fondo piatto</li> </ul>
Bacino multi-anello	$D \gtrsim 320 \text{ km}^d$		Caloris D=1525 km	<ul style="list-style-type: none"> <li>• il bordo è composto da montagne irregolari</li> <li>• serie di anelli esterni al bordo del bacino</li> <li>• l'interno è composto da pianure di natura vulcanica</li> <li>• presenza sia di fratture radiali che concentriche</li> <li>• formazione durante il Late Heavy Bombardment</li> </ul>

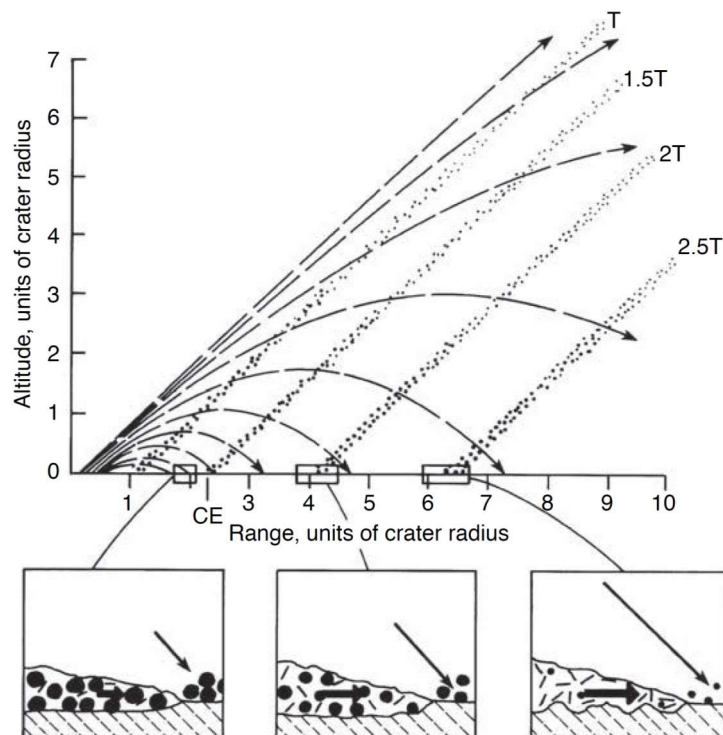
†NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington

<sup>a</sup> Susorney et al. (2016) (Immagine dalla Narrow Angle Camera di MESSENGER, 2011)<sup>b</sup> Herrick et al. (2018) (Immagine dalla Narrow Angle Camera di MESSENGER, 2012)<sup>c</sup> Baker et al. (2011)<sup>d</sup> Head et al. (2010)

### 1.3 Ejecta

L'*ejecta* è il materiale scavato dagli strati interni della superficie a opera del flusso di escavazione instaurato dall'impatto, e quindi espulso verso l'esterno in direzione radiale rispetto alla profondità equivalente  $d_{eq}$ .

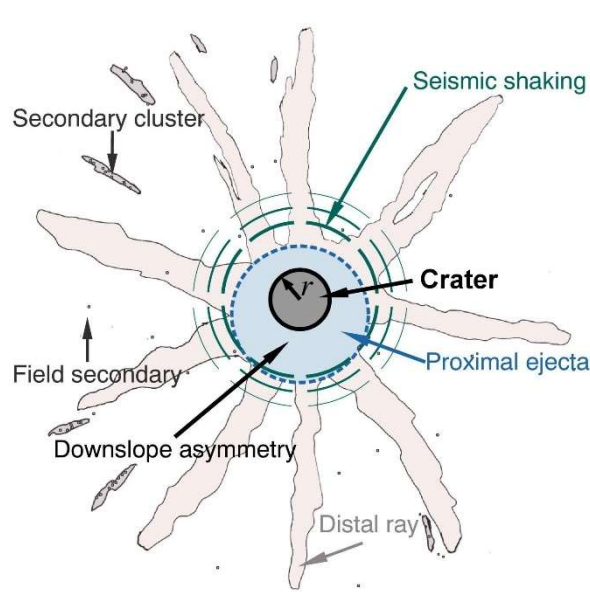
La deposizione degli ejecta è un processo ordinato (cf. Fig. 4): il materiale più vicino al punto di impatto (e quindi soggetto ad un più elevato grado di shock) viene lanciato per primo, su traiettoria balistica, con velocità ed angoli di lancio maggiori, raggiungendo quindi una distanza maggiore dal cratere. Il materiale più distante dal punto di contatto viene espulso successivamente e a velocità inferiori, e quindi cade vicino al bordo del cratere.



**Fig. 4.** Diagramma illustrativo della sedimentazione balistica della coltre di ejecta. Figura presa da Melosh et al. (1989).

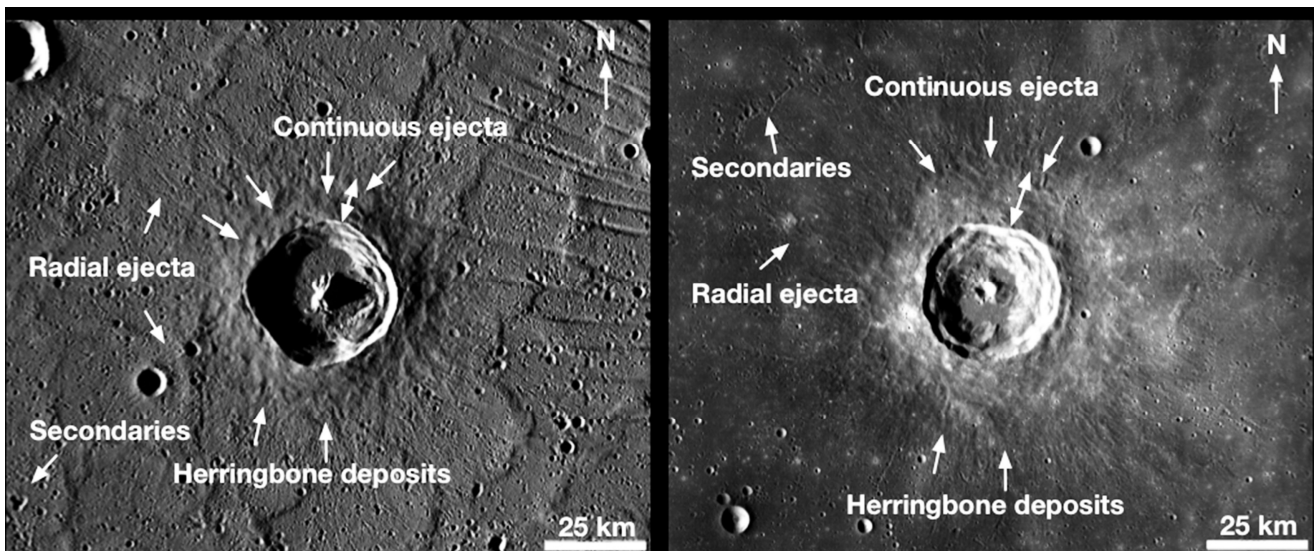
Il risultato finale di questo processo è una coltre di ejecta con una composizione e stratigrafia inversa rispetto alla struttura del target prima dell'impatto. Come rappresentato nel diagramma in Fig. 5, all'aumentare della distanza dal cratere si incontrano diverse tipologie di depositi di ejecta, dovuti proprio alla differenza di deposizione appena illustrata. Inizialmente, si trova il deposito "continuo" (o ejecta prossimale, in inglese *proximal ejecta*), collinoso, con uno spessore maggiore vicino al bordo per poi diminuire mano a mano che ci si allontana fino a circa un raggio (1R) del cratere. Oltre 1R, il deposito degli ejecta diventa discontinuo: si iniziano a trovare il campo di crateri secondari (in raggruppamenti a cluster o catene) e gli ejecta "distali" (in inglese *distal ejecta*). Come introdotto nel §1.1, i crateri secondari si formano dal materiale espulso dal target. La velocità di lancio di questo materiale è (relativamente) bassa, raggiungendo al più il decimo della velocità iniziale dell'impattore, anche se varia notevolmente non solo dalla posizione di lancio del frammento di target, ma anche dalle proprietà del materiale della superficie (e.g., Luo et al., 2022). Essendo la velocità di soli alcuni km/s, i secondari presentano una forma più irregolare (ellittica) rispetto al cratere genitore.





**Fig. 5.** Diagramma illustrativo della variazione morfologica degli *ejecta* all'aumentare della distanza dal centro del cratere. La figura, modificata da Minton et al. (2019), fa riferimento al caso di impatto obliquo (si veda anche §1.4).

La morfologia del deposito degli *ejecta* dipende anche dal pianeta (e quindi dalla gravità) in cui avviene l'impatto. Come osservato in Fig. 6, maggiore è la gravità del pianeta, più vicino al cratere si osservano le varie unità appena descritte. Per esempio, il pattern a spina di pesce (*herringbone pattern* in inglese) ha origine vicino al bordo del cratere ed è di lunghezza limitata nel caso di crateri su Mercurio (cf. Fig. 6, sinistra), mentre sulla Luna, si irradia fino a lunghezze molto maggiori (Fig. 6, destra).



**Fig. 6.** Confronto tra il cratere Cunningham (D=36 km, 30.4°N, 202.9°E) su Mercurio (a sinistra) e il cratere lunare Timocharis (D=34 km, 26.7°N, 246.9°E) a destra. Figura presa da Chapman et al. (2018).

## 1.4 Impatti obliqui

Nei precedenti paragrafi si era assunto che il proiettile impattasse con direzione perpendicolare alla superficie, tuttavia tali impatti verticali (così pure come quelli radenti) sono rari, essendo l'angolo d'impatto più probabile pari a  $45^\circ$ . Infatti, per un flusso isotropico di impattori, la probabilità di impatto tra un angolo  $\theta$  e  $\theta + d\theta$  risulta essere:

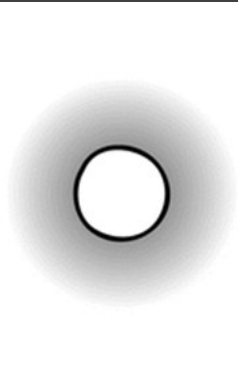
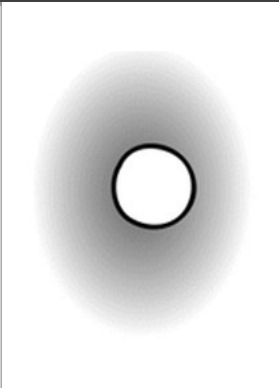
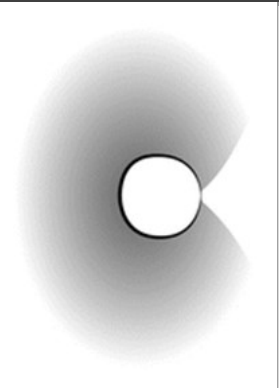
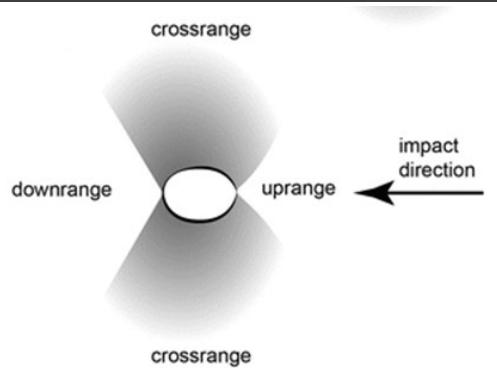
$$dP = 2 \sin \theta \cos \theta d\theta$$

indipendentemente dalla gravità del pianeta in cui avviene l'impatto (e.g., Shoemaker, 1977).

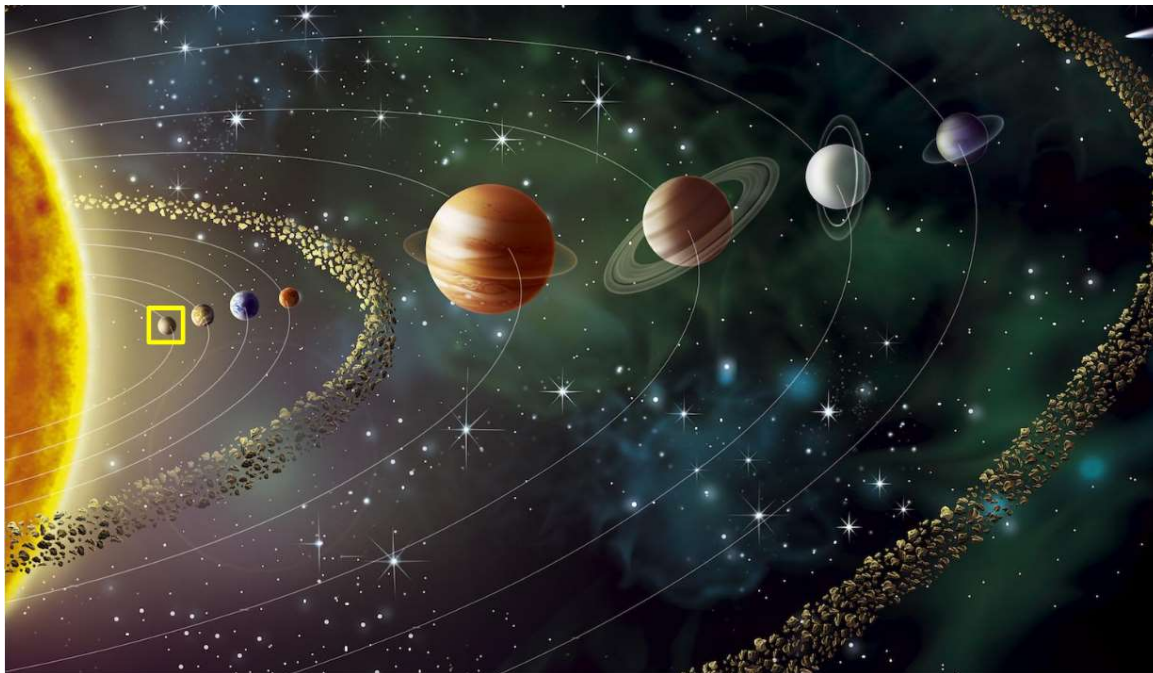
La forma di un cratere risulta circolare fino ad angoli d'impatto bassi, in quanto l'onda d'urto si propaga velocemente in modo emisferico all'interno del target. Quando il valore dell'angolo rispetto alla superficie è di circa  $10^\circ$ , allora il cratere inizia ad assumere una forma elongata. Per esempio, nella survey proposta da Herrick et al. (2012), la percentuale di crateri con ellitticità  $e > 1.2$  è circa il 3%, mentre per quelli con  $e > 1.5$ , la percentuale scende a 0.5%, con un valore massimo di  $e > 1.9$  per il cratere Sveindóttir ( $2.8^\circ\text{S}$ ,  $100.3^\circ\text{E}$ , dimensioni  $220 \times 120$  km). Il caso limite è rappresentato dai "ricochet", per i quali il proiettile viene rimbalzato dalla superficie.

A differenza della forma della cavità, che non risente della direzione del proiettile, la distribuzione degli *ejecta* intorno al cratere dipende fortemente dall'angolo d'impatto, divenendo quindi uno strumento chiave per ottenere informazioni sulla geometria dell'impatto. Infatti, per un impatto verticale, la morfologia degli *ejecta* è simmetrica rispetto al cratere. Al diminuire dell'angolo, il deposito assume una forma sempre più asimmetrica, secondo la sequenza in Tab. 2, in quanto, in fase di escavazione, il materiale viene espulso nella direzione preferenziale perpendicolare alla traiettoria del proiettile, e solo una quantità esigua viene lanciata nella direzione opposta a quella di volo.

**Tab. 2.** Variazione della morfologia degli *ejecta* al variare dell'angolo d'impatto (immagini prese da Herrick, 2015).

$\theta = 90^\circ$	$90^\circ < \theta < 45^\circ$	$45^\circ \leq \theta \leq 20^\circ$	$\theta < 20^\circ$
			
ejecta simmetrica	ejecta asimmetrica	comparsa di una "zona proibita" a forma di V nella direzione da cui arriva il proiettile	presenza di due "zone proibite", entrambe nella direzione di volo: tale configurazione è detta "ali di farfalla"

## 2. Mercurio



**Fig. 7.** Rappresentazione artistica del sistema solare, con evidenziato il pianeta Mercurio dal quadrato giallo. Crediti: web.

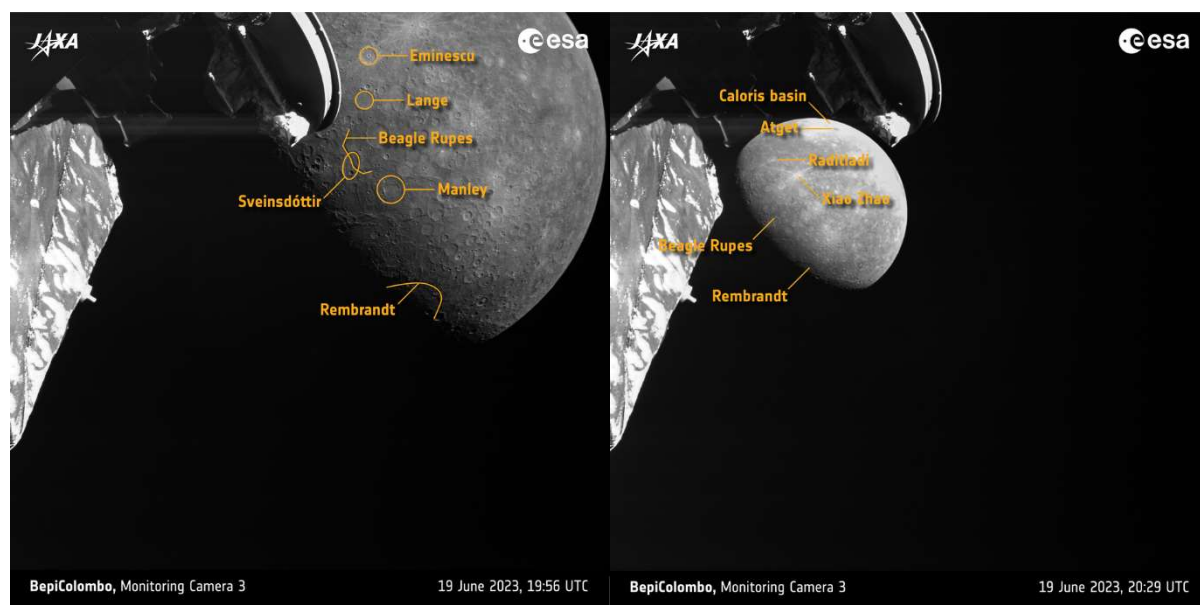
### 2.1 Missioni Spaziali

Nonostante la vicinanza di Mercurio con la Terra (che varia tra 0.5 e 1.4 AU), per molto tempo si è conosciuto molto poco del pianeta. Questo perché le osservazioni da Terra non sono facili da effettuare, in quanto ha una elongazione molto bassa all'orizzonte, e quindi può essere osservato solo per brevi periodi temporali. D'altra parte, l'alternativa rappresentata dalle missioni spaziali non è facilmente realizzabile, sia (i) perché il pianeta è molto vicino al sole e serve un notevole quantitativo di carburante per frenare la sonda, sia (ii) perché, una volta in orbita attorno a Mercurio, la sonda e la strumentazione è soggetta ad un ambiente molto ostile in termini di temperature e radiazione solare.

Al momento di scrittura di questa tesi, due missioni spaziali sono state completate attorno a Mercurio. Si tratta di due missioni della NASA, il Mariner 10, che tra il 1974 e il 1975 ha effettuato tre fly-by con il pianeta, e il MERcury SURFACE, SPACE, ENvironment, GEOchemistry and RANGING (MESSENGER), che dopo tre flyby nel 2008–2009, fu il primo veicolo spaziale ad entrare in orbita e rimanervi per circa quattro anni (e.g., Solomon & Byrne, 2019), mappando tutta la superficie, fino al 2015, quando è stato fatto impattare nella regione settentrionale Suisei Planitia. Alla progettazione della missione Mariner partecipò Giuseppe Colombo, professore ordinario di Meccanica applicata presso la facoltà di Ingegneria di Padova, il quale nel 1970 propose una modifica determinante al concetto di fionda gravitazionale proposta al JPL da uno studente. Colombo constatò che il periodo dell'orbita della sonda dopo il fly-by con Mercurio sarebbe coinciso con il doppio del periodo di rivoluzione del pianeta stesso, e suggerì quindi di sfruttare tale risonanza per programmare molteplici sorvoli di Mercurio. Tale modifica venne implementata nel piano di missione, permettendo tre sorvoli di Mercurio. Dopo il secondo fly-by, la sonda ha iniziato a sperimentare problemi con lo star tracker, e dopo il terzo, l'esaurimento del propellente per il controllo d'assetto ha causato rotazioni incontrollate, con conseguente perdita delle comunicazioni con la Terra, e quindi la fine della missione. Per questo

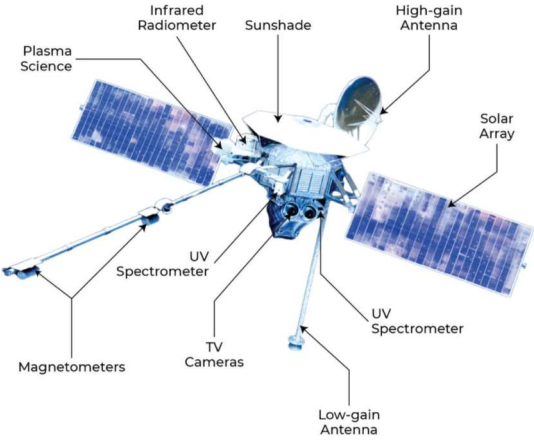
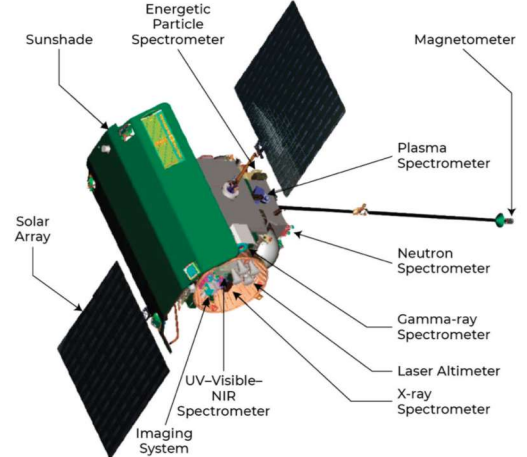
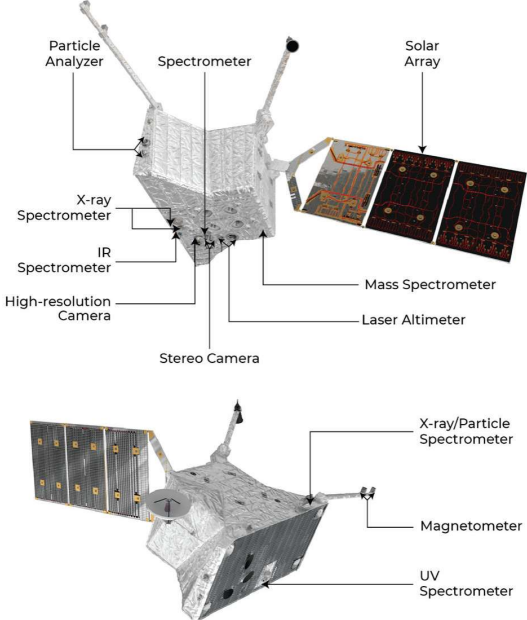
determinate contributo alla missione Mariner 10, la missione su Mercurio approvata da ESA nel 2000 è stata intitolata in onore a Giuseppe "Beppe" Colombo.

Questa terza sonda BepiColombo è frutto della collaborazione ESA e JAXA. E' è stata lanciata con successo nell'ottobre 2018, e dopo sei fly-by con Mercurio (tre dei quali già effettuati con successo) entrerà in orbita nel dicembre 2025 ([link\\_ESA\\_1](#)). Gli ultimi dati di Mercurio sono stati acquisiti il 20 giugno 2023, quando la sonda ha fatto il suo terzo fly-by, passando ad una distanza di 230 km dal pianeta nel suo lato non illuminato dal Sole. In Fig. 8, sono riportati due delle immagini acquisite, che mostrano parte del pianeta il giorno precedente al fly-by ([link\\_ESA\\_1](#), [link\\_ESA\\_2](#)).



**Fig. 8.** Una serie di immagini acquisite dalla camera di monitoraggio, montata esternamente al Mercury Transfer Module (MTM) di BepiColombo, il 19 giugno 2023. *Sinistra:* immagine scattata a distanza di circa 4000 km da Mercurio. *Destra:* immagine scattata a circa 11780 km dalla superficie. Oltre al pianeta, si vede in primo piano la parte posteriore dell'antenna ad alto guadagno del Mercury Planetary Orbiter (MPO) e parte del corpo della sonda.

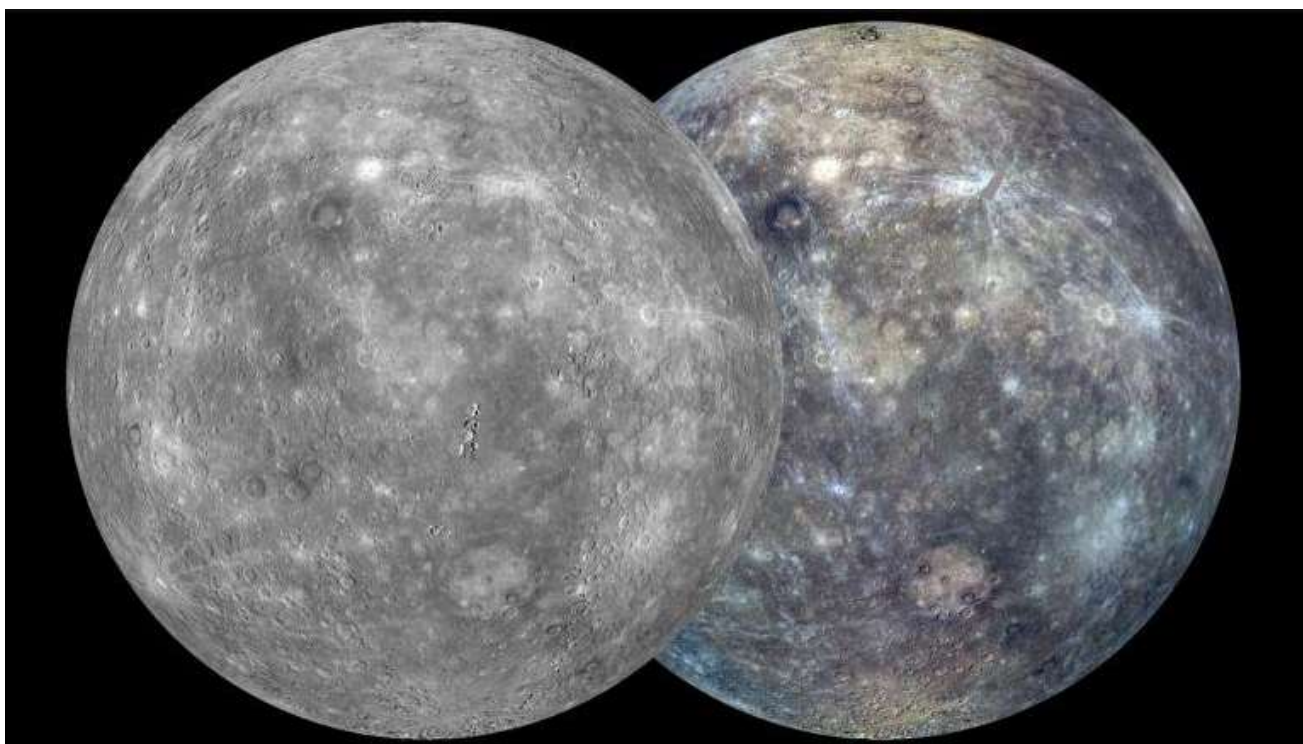
**Tab. 3.** Confronto delle due missioni spaziali NASA Mariner 10 e MESSENGER, e della missione ESA-JAXA BepiColombo, tutte aventi il pianeta Mercurio come target principale della missione. Dati presi dal sito [link\\_NASA\\_1](#), [link\\_NASA\\_2](#), [link\\_NASA\\_3](#), [link\\_NASA\\_4](#), [link\\_ESA\\_3](#), Benkhoff et al. (2021), e Solomon & Byrne (2019).

Nome Missione	Mariner 10	MESSENGER	BepiColombo
			
Agenzia Spaziale	NASA	NASA	ESA – JAXA
Obiettivi scientifici	Studio dell'ambiente, della superficie e dell'atmosfera, proprietà fisiche, esperimenti sul mezzo interplanetario	Mappatura di Mercurio >90% della copertura, con una risoluzione migliore di 250 m; Studio della composizione chimica della superficie, la storia geologica, il campo magnetico, la natura del nucleo, dell'esosfera e della magnetosfera	Studio dell'origine e dell'evoluzione di Mercurio, la sua forma, la struttura interna, l'origine e le dinamiche della magnetosfera, composizione e dinamiche dell'esosfera, la sua superficie (fornendo anche un modello 3D globale), studio dell'origine e composizione dei depositi polari, test sulla teoria della Relatività Generale

Dimensioni della sonda	1.4×0.5 m + 2.5×2.5 di pannelli solari	1.44×1.28×1.85 m + 2-54×1.82 m di scudo solare + 6.14 m in lunghezza di due pannelli solari	S/C: 3.9×3.6×6.3 m (~30 m con i pannelli solari aperti) MPO: 2.4×2.2×1.7 m Mio: 1.8 m (diametro)×1.1 m (altezza)
Massa	502.9 kg (80 kg per il P/L)	1107 kg (507.6 del dry S/C+P/L)	4100 kg (MPO P/L: 80 kg; Mio P/L: 45 kg)
Strumenti	<b>Telescope System</b> <b>Infrared radiometer</b> <b>Ultraviolet Airglow Spectrometer</b> <b>Ultraviolet Occultation Spectrometer</b> <b>Magnetometer</b> <b>Charged Particle Telescope</b> <b>Plasma Analyzer</b>	<b>MDIS</b> (Mercury Dual Imaging System) <b>GRNS</b> (Gamma-Ray and Neutron Spectrometer) <b>XRS</b> (X-Ray Spectrometer) <b>MAG</b> (Magnetometer) <b>MLA</b> (Mercury Laser Altimeter) <b>MASCS</b> (Mercury Atmospheric and Surface Composition Spectrometer) <b>EPPS</b> (Energetic Particle and Plasma Spectrometer) <b>RS</b> (Radio Science Experiment)	<b>MPO</b> (Mercury Planetary Orbiter): <b>BELA</b> (BepiColombo Laser Altimeter) <b>ISA</b> (Italian Spring Accelerometer) <b>MPO-MAG</b> (Magnetic Field Investigation) <b>MERTIS</b> (Mercury Radiometer and Thermal Imaging Spectrometer) <b>MGNS</b> (Mercury Gamma-Ray and Neutron Spectrometer) <b>MIXS</b> (Mercury Imaging X-ray Spectrometer) <b>MORE</b> (Mercury Orbiter Radio science Experiment) <b>PHEBUS</b> (Probing of Hermean Exosphere), <b>SERENA</b> (Search for Exosphere Refilling and Emitted Neutral Abundances) <b>SIMBIO-SYS</b> (Spectrometers and Imagers for MPO BepiColombo Integrated Observatory - HRIC, STC, VIHI) <b>SIXS</b> (Solar Intensity X-ray and particle Spectrometer)  <b>Mio</b> (Mercury Magnetospheric Orbiter): <b>MMO-MGF</b> (Mercury Magnetometer) <b>MPPE</b> (Mercury Plasma Particle Experiment) <b>PWI</b> (Mercury Plasma Wave Instrument) <b>MSASI</b> (Mercury Sodium Atmospheric Spectral Imager) <b>MDM</b> (Mercury Dust Monitor)

Data di lancio	3 Novembre 1973	3 Agosto 2004	20 Ottobre 2018
Veicolo di lancio	Atlas Centaur (AC-34 / Atlas 3D no. 5014D / Centaur D-1A)	Delta II 7925H-9.5	Ariane V
Periodo di crociera	1.4 anni	6.5 anni	7.2 anni
Altri corpi osservati	Venere	Terra Venere	Terra Venere
No. Fly-by con Mercurio	3 (29 Marzo 1974, 21 settembre 1974, 16 marzo 1975)	3 (14 Gennaio 2008, 6 Ottobre 2008, 29 settembre 2009)	6 (1 Ottobre 2021, 23 Giugno 2022, 19 Giugno 2023, 5 Settembre 2024, 2 Dicembre 2024, 9 Gennaio 2025)
Orbita della sonda	–	9300×200 km, in 12 ore	<b>MPO:</b> orbita polare 480×1500 km, in 2.3 ore <b>Mio:</b> orbita polare 590×11640 km, 9.3 ore
Periodo in Orbita	–	dal 18 Marzo 2011	dal 5 Dicembre 2025
Data di Fine missione	24 Marzo 1975	30 Aprile 2015	1 Maggio 2027 (missione nominale) 1 Maggio 2028 (se estesa)
Principali scoperte	Debole campo magnetico dipolare; Tenue atmosfera; Nucleo solido ricco di ferro; 45% superficie mappata; Evidenza di una superficie craterizzata; Bacino multi-anello Caloris (osservato parzialmente); Misura della temperatura superficiale	Mappatura globale della superficie; Pianure molto estese di origine vulcanica; Presenza di ghiaccio d'acqua nelle regioni permanentemente in ombra ai poli; Contrazione del pianeta; Conferma di un nucleo di ferro liquido; Modello 3D della magnetosfera; Caratterizzazione degli elementi volatili	–

## 2.2 Il pianeta



**Fig. 9.** Il pianeta Mercurio. Il globo a sinistra e quello a destra sono stati creati dalle acquisizioni del telescopio MDIS con filtro monocromatico e undici filtri nel VIS e NIR (da 395 a 1040 nm), rispettivamente. Latitudine centrale: 0°; Longitudine centrale: 75°E. Crediti: NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington.

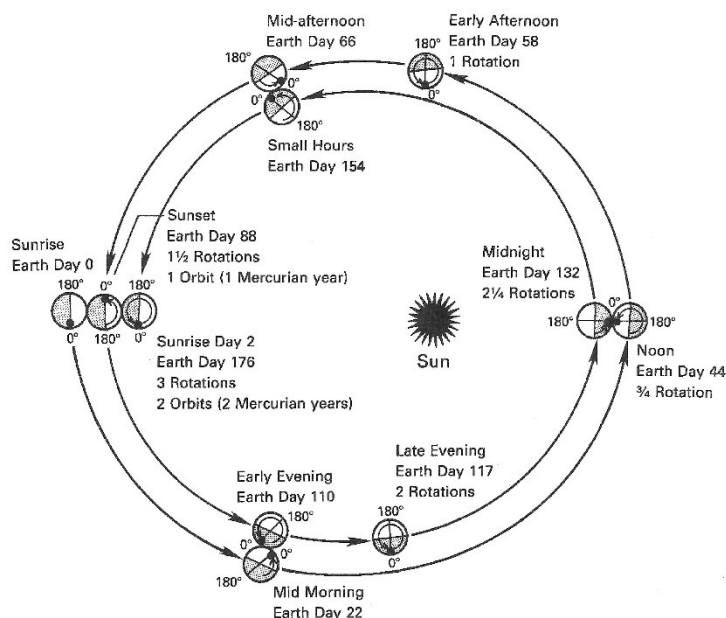
**Tab. 4.** Dati riassuntivi di Mercurio. Valori presi da Strom & Sprague (2003).

Parametri	Valori
Diametro	$4879.4 \times 10^3 \text{ m}$
Massa	$3.3 \times 10^{23} \text{ kg}$
Densità	$5430 \text{ kg/m}^3$
Nucleo	Fe - Ni
Accelerazione gravità	$3.7 \text{ m/s}^2$
Velocità di fuga	$4.3 \times 10^3 \text{ m/s}$
Distanza dal Sole	$0.387 \text{ AU}$
Raggio orbitale medio	$5.8 \times 10^{10} \text{ m}$
Inclinazione asse rotazione	0.1°
Inclinazione su eclittica	7°
Periodo di rotazione	59 days
Periodo di rivoluzione	88 days
Eccentricità	0.2056
Albedo visuale	0.138
Temperatura superficiale	da 90° K a 725° K
Campo Magnetico	$0.3 \mu\text{T}$
Pressione atmosferica	$10^{-16} \text{ atm}$



In questi anni di osservazioni, abbiamo ottenuto il seguente profilo per il pianeta Mercurio: da come si può vedere nella tabella riassuntiva delle sue principali caratteristiche (Tab. 4), può essere considerato il pianeta degli “estremi”.

### 2.2.1 Moto di Mercurio.



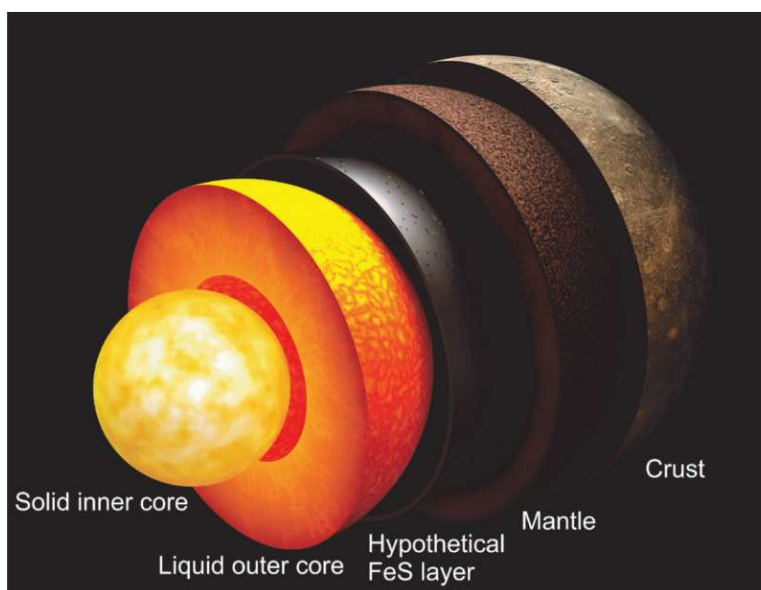
**Fig. 10.** Accoppiamento spin-orbita 3:2 di Mercurio: dopo due orbite, il pianeta ha ruotato sul suo asse tre volte e ha trascorso uno giorno solare. Crediti: immagine presa da Strom & Sprague (2003).

Mercurio è il primo pianeta del Sistema Solare (cf. Fig. 7), orbitando ad una distanza media dal Sole di 0.387 AU ( $57.9 \times 10^6$  km), con un periodo di 87.97 giorni. La distanza del perielio è di 0.3075 AU, mentre quella dell'afelio è di 0.4667 AU. Essendo la sua eccentricità pari a 0.20563, l'orbita di Mercurio è la più ellittica del Sistema Solare. La sua vicinanza al Sole causa l'avanzamento di  $\approx 43$  arcsec del perielio per secolo, che non sono inclusi nel conteggio degli effetti di precessione causati dalla forza gravitazionale degli altri pianeti. Tale disallineamento è risolto per mezzo della relatività generale. Infatti, considerando che la massa del sole curva lo spazio, l'elevata ellitticità di Mercurio porta ad avere uno spazio molto più curvo mentre è al perielio di quando si trova all'afelio.

Mercurio ruota sul proprio asse in 58 giorni, con una inclinazione di solo  $0.01^\circ$  rispetto al piano orbitale, che comporta l'assenza di stagioni. Ha una risonanza orbitale-rotazionale di 3:2 (Fig. 10). Questo particolare accoppiamento spin-orbita porta Mercurio ad avere un giorno solare lungo quando due anni del pianeta, e quindi uno stesso emisfero mostra la stessa faccia al sole ogni due passaggi al perielio, una particolarità unica fra i pianeti. Si pensa che la sua peculiare risonanza spin-orbita sia stata acquisita nel tempo: infatti, l'iniziale velocità orbitale di Mercurio (più elevata rispetto al valore medio attuale di  $\approx 47$  km/s) è diminuita in tempi relativamente brevi (una decina di milioni di anni) come conseguenza dei processi dissipativi.

L'escursione termica di Mercurio è la più elevata del Sistema Solare. Le caratteristiche combinate di estrema vicinanza al sole, risonanza 3:2, e mancanza di una atmosfera che regoli gli scambi di calore portano il pianeta ad avere temperature molto alte nella parte illuminata (circa 700 K) e molto basse nella parte non illuminata (90 K).

### 2.2.2 Massa e dimensioni di Mercurio



**Fig. 11.** Illustrazione della struttura interna di Mercurio: una crosta relativamente spessa (~40 km) sovrasta il mantello relativamente sottile (~400 km). La parte interna di Mercurio è composta da un nucleo interno solido (raggio <1000 km) circondato da un nucleo esterno liquido (raggio ~2000 km). Tra il nucleo e il mantello potrebbe esistere uno strato di solfuro di ferro. Figura presa da Charlier & Namur (2019).

Mercurio è il più piccolo pianeta del Sistema Solare. Con un diametro equatoriale di 4879 km, poco più grande di un terzo della Terra (0.383 volte), con un volume di 1/18 di quello terrestre. La sua massa è di  $0.33 \times 10^{24} \text{ kg}$ , e nonostante sia 30% più piccolo di Marte, la combinazione della sua grande massa e piccole dimensioni lo porta ad avere una gravità superficiale simile ( $3.7 \text{ m/s}^2$ ). Tale combinazione massa-dimensione è indicativa anche di una elevata densità.

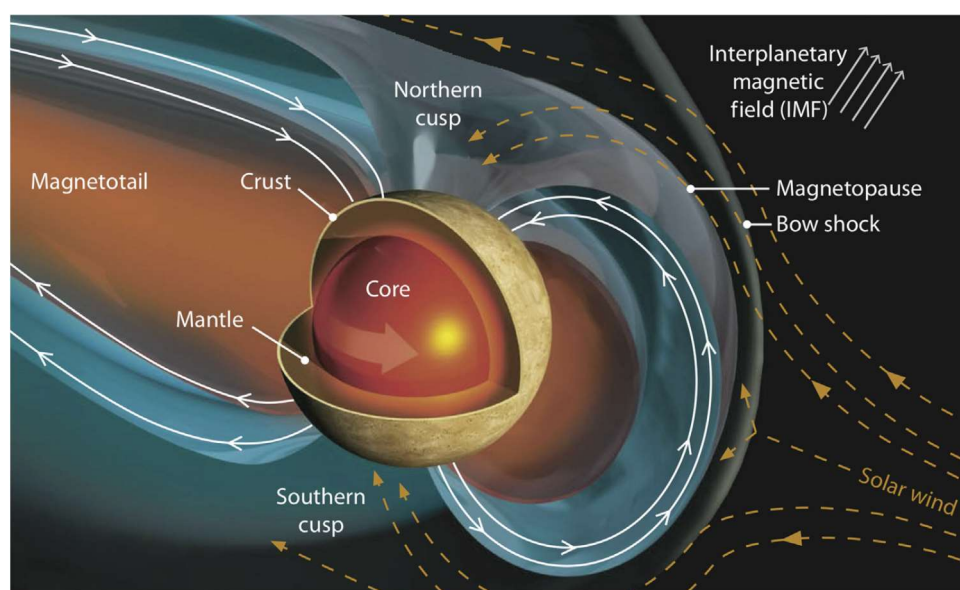
In generale, la densità di un pianeta fornisce indicazioni della sua composizione, ma dipende anche delle dimensioni del corpo, in quanto la densità aumenta all'aumentare della pressione applicata (infatti gli atomi di una certa sostanza sono vincolati in uno spazio più piccolo). La densità di Mercurio è pari a  $5429 \text{ kg/m}^3$ , paragonabile a quella terrestre ( $5513 \text{ kg/m}^3$ ). Tuttavia, le pressioni interne di Mercurio e Terra sono diverse, essendo i due pianeti di dimensioni diverse, e quindi la densità non-compressa di Mercurio ( $5300 \text{ kg/m}^3$ ) risulta molto maggiore di quella terrestre ( $4400 \text{ kg/m}^3$ ), e la più alta tra i pianeti terrestri. Un valore così alto di densità può essere spiegato se si assume che almeno il 60% in massa (corrispondente a circa il 75% del raggio del pianeta) sia composto da un nucleo ricco in elementi pesanti, come il ferro metallico e il nichel (con aggiunta di zolfo e silicio).

La struttura interna di Mercurio (cf. Fig. 11) si è evoluta nel tempo come conseguenza del raffreddamento del pianeta. Lo stato iniziale di completa fusione ha portato alla separazione dei materiali in base alla densità (processo di differenziazione), in cui i materiali più pesanti sprofondarono verso il centro del pianeta a formare il nucleo metallico, mentre i materiali più leggeri come il silicio, il magnesio e l'alluminio rimasero negli strati superiori a formarne il mantello e la crosta. Tutti i pianeti di tipo terrestre hanno una struttura interna simile, ma la particolarità di Mercurio è che il diametro del suo nucleo sia circa il 75% del diametro totale del pianeta (~4000 km), e circa il 42% del suo volume (nel caso della Terra, il nucleo è il 54% del suo diametro ma solo il 16% del suo volume).

L'elevata densità (e quindi anche l'elevato rapporto di figura) di Mercurio rispetto agli altri pianeti terrestri è stata spiegata mediante tre teorie principali, ciascuna che predice una differente composizione delle rocce presenti in superficie (e.g., Charlier & Namur 2019; Ebel & Stewart, 2018):

- 1) **Teoria del Frazionamento Metalli–Silicati nella nebula.** Negli stadi iniziali della formazione del Sistema Solare, il gas della nebula nelle regioni vicino al sole sono state ordinate meccanicamente in grani metallici e silicati, e questi ultimi sono spiraleggiati nel sole. Mercurio si è quindi andato a formare in questo ambiente ricco di materiale metallico.
- 2) **Modello della Vaporizzazione Post-Accrescimento.** Nella nebula solare, elevate temperature hanno vaporizzato parte degli strati esterno del proto-Mercurio, lasciando il pianeta povero di materiale volatile, come Na e K.
- 3) **Processi Collisionali.** Un impatto gigante, successivo alla formazione e differenziazione del proto-Mercurio, ha eroso la crosta primordiale e il mantello superiore. Il risultato è che la superficie attuale di Mercurio sia formata di rocce povere di quegli elementi che erano concentrati in tale crosta, come Al e Ca.

### 2.2.3 Campo magnetico di Mercurio



**Fig. 12.** Rappresentazione artistica del campo di dipolo magnetico di Mercurio, e la sua interazione con il vento solare. Figura presa da Murchie et al. (2013).

Uno dei principali risultati della missione Mariner 10 è stato di misurare l'esistenza di un campo magnetico, di tipo dipolare come quello terrestre, che supporta la presenza di un nucleo solido e uno esterno allo stato liquido, che muovendosi a velocità diverse tra loro innescano la dinamo magnetica. Nel caso di Mercurio, il campo magnetico è più debole rispetto a quello terrestre ( $\approx 1\%$ ), con intensità  $\leq 300$  nT all'equatore. La missione MESSENGER ha permesso poi una caratterizzazione della magnetosfera di Mercurio grazie alla sua orbita altamente ellittica. Essendo il pianeta molto vicino al Sole, risente maggiormente della pressione del vento solare, che ne distorce la geometria. La parte rivolta verso il Sole arriva a 1.5 raggi dalla superficie, mentre la parte opposta arriva a 15 raggi di lunghezza.

### 2.2.4 Atmosfera di Mercurio

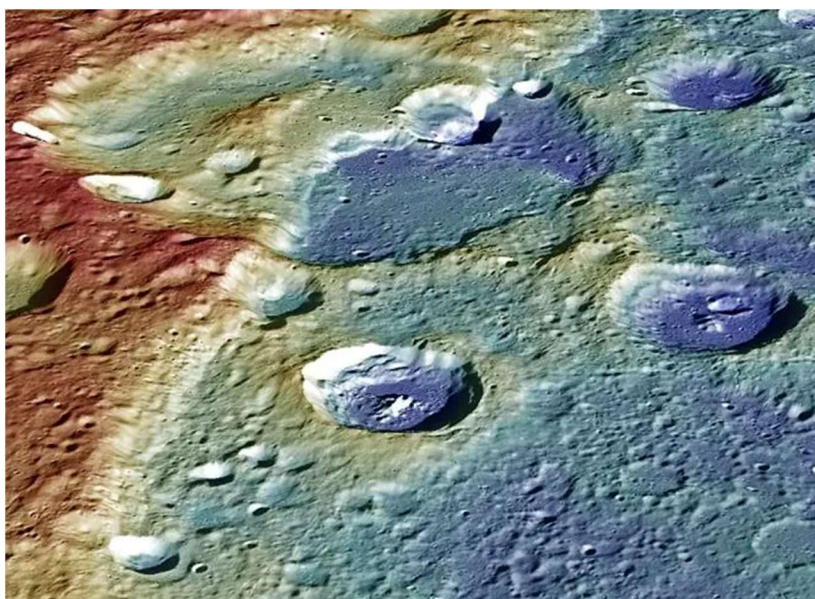


**Fig. 13.** La coda di sodio ripresa nel 2020: il bagliore giallo è particolarmente brillante. La luce solare libera queste molecole e le allontana. Crediti Andrea Alessandrini (<https://apod.nasa.gov/apod/ap200708.html>).

L'unica atmosfera di Mercurio è una esosfera con pressioni dell'ordine di  $10^{-16} atm$ , composta quasi interamente da atomi anziché da molecole, poiché queste vengono rapidamente foto-dissociate a causa della luce solare. La sonda MESSENGER ha rivelato che l'esosfera è formata da ossigeno (42%), sodio (29%), idrogeno (22%), elio (6%), calcio e potassio (0,5%). I fenomeni noti per la continua ricostruzione dell'esosfera di Mercurio sono tre:

- **Processo di evaporazione:** la luce solare riscalda la superficie, rompe i legami dei materiali superficiali, ed espelle gli atomi. Essendo un processo a bassa energia, gli atomi espulsi seguono traiettorie balistiche, rimanendo relativamente vicini alla superficie e ricadendo quindi nelle vicinanze; in questo modo ridistribuiscono il materiale volatile sulla superficie di Mercurio, trasferendolo gradualmente dalle regioni più calde ed equatoriali alle regioni polari più fredde.
- **Processo di sputtering:** gli ioni del vento solare o della magnetosfera di Mercurio colpiscono la superficie, liberando specie volatili come il Na. Questo è un processo ad alta energia, portando ad un maggior rilascio di materiale: gli atomi espulsi hanno velocità maggiori e seguendo traiettorie balistiche si posizionano più in alto e più lontano degli atomi rilasciati attraverso processi termici. Poiché questi atomi rimangono più a lungo nell'esosfera essi sono influenzati da altri due processi: il primo è la pressione della radiazione solare, e il secondo la fotoionizzazione e la cattura nel campo magnetico. Gli atomi di Na formano una coda, visibile anche da terra (Fig. 13)
- **Processo di impatto dei micro-meteoroidi:** un afflusso continuo e costante di particelle di polvere impattano sulla superficie: l'energia di queste collisioni vaporizza sia le particelle di polvere che parte della superficie, rilasciando atomi ad alta energia.

### 2.2.5 La superficie di Mercurio



**Fig. 14.** Immagine che mostra in vista prospettica della parte centrale della Carnegie Rupes, una struttura tettonica lunga 267 km, che taglia il cratere Duccio (D=132 km). Crediti: NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington.

Le acquisizioni del MESSENGER hanno supportato i modelli di evoluzione del pianeta, con la formazione di una crosta primaria di Mercurio da un oceano di magma fuso, con spessore dell'ordine dei chilometri e con una composizione ricca di zolfo, carbonio (sotto forma di grafite) e magnesio ma povera di ferro, alluminio e calcio (Nittler et al., 2019). La superficie osservata dal MESSENGER è il risultato di un storia evolutiva di (i) vulcanismo effusivo, che ha prodotto grandi volumi di lava, fino a circa 3.5 miliardi di anni fa, in seguito al raffreddamento planetario (Thomas et al., 2019), (ii) processi tettonici, come le scarpate lobate, che possono raggiungere anche centinaia di chilometri di lunghezza, e datate fino a 1.5 miliardi di anni fa (e.g., Watters et al., 2010; cf. Fig. 14), e (iii) crateri da impatto, antichi, largamente erosi e sepolti da caratteristiche più giovani come crateri d'impatto più recenti e relativi ejecta.

I terreni di Mercurio sono pianure lisce, contenute all'interno di grandi bacini, e pianure intercrateriche, regioni relativamente lisce, che si formarono contemporaneamente durante il pesante bombardamento tardivo. Il più giovane e grande bacino da impatto è Caloris, che misura ~1550 km di diametro, il cui interno è caratterizzato da graben radiali e concentrici, e abbraccia quasi un emisfero del pianeta, con dorsali e terreni lineati ai suoi antipodi (e.g., Watters et al., 2010).

Mercurio è ricoperto da una coltre di regolite, costituita da materiale frammentato, formato dall'impatto di meteoroidi nel corso di miliardi di anni.

### 2.2.6 Ghiaccio d'acqua

I dati registrati dalla missione MESSENGER indicano che nelle regioni permanentemente in ombra delle regioni polari o sepolti sotto una coltre di materiale isolante dello spessore di alcune decine di centimetri, ci sia presenza di ghiaccio d'acqua e di altri materiali organici. Il ghiaccio può persistere anche alle medie latitudini sotto una sottile copertura di regolite per isolare il ghiaccio dalle temperature diurne più calde. Si veda §3 per ulteriori dettagli.

## 2.3 Crateri d’impatto su Mercurio

Dalle prime immagini del Mariner 10, la superficie di Mercurio sembrava assomigliare a quella della Luna, portando ad ipotizzare quindi che i due corpi avessero avuto un’evoluzione simile. Gli studi successivi, grazie anche ai nuovi dati della missione MESSENGER, hanno invece evidenziato sostanziali differenze, in particolare per quanto riguardava i crateri d’impatto. Su Mercurio, il tasso di craterizzazione è circa un fattore tre volte superiore rispetto a quello della Luna. Inoltre, le velocità medie di impatto sono superiori, rispettivamente di  $\sim 42$  km/s per gli asteroidi, e 70 km/s per le comete. Per confronto, la velocità media degli asteroidi sulla Luna è  $\sim 18$  km/s, mentre su Marte di  $\sim 10$  km/s (Ivanov, 2008). Questa differenza si traduce nel fatto che Mercurio ha, in media, crateri più grandi. Infatti, la mappatura globale della sua superficie, grazie al MESSENGER, ha evidenziato come il pianeta abbia una delle più numerose popolazioni di bacini ad anello centrale (e.g., Baker et al., 2011).

I crateri che si sono formati da oggetti di natura asteroidale o cometaria sono detti crateri “primari”, e sono così suddivisi:

- i. Crateri di “Popolazione 1”: si sono formati sui terreni più vecchi e craterizzati della superficie di Mercurio, probabilmente durante l’LHB da 4.1 a 3.8 Gyr fa.
- ii. Crateri di “Popolazione 2”: si sono formati nelle pianure più giovani, queste ultime originate da colate laviche dopo la fine dell’LHB; tali crateri sono generalmente caratterizzati da una coltre di ejecta di albedo maggiore rispetto alla superficie circostante, oltre un sistema di raggi ad alta riflettanza, e gruppi di crateri secondari immersi nei raggi.

Come spiegato nel capitolo §1.1, i crateri primari hanno una forma generalmente circolare, però sono state osservate altre morfologie, dovute a proprietà particolari del proiettile o del target:

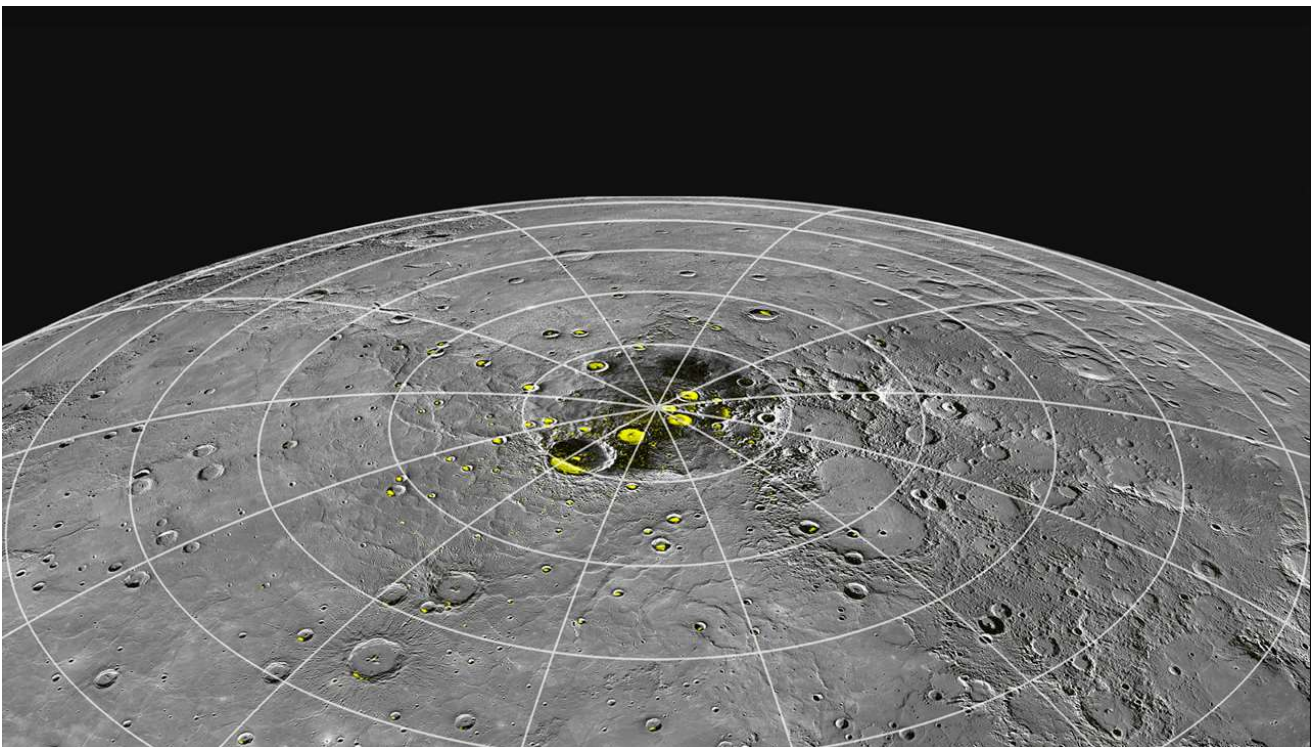
- a) **crateri ellittici**: il 2–4% dei crateri primari è ellittica, come risultato di impatti fortemente obliqui;
- b) **crateri poligonali**: hanno bordi composti da almeno due segmenti dritti, e si formano quando l’espansione o la modifica della cavità è influenzata da eterogeneità nel terreno; su Mercurio, il 10–15% dei crateri è poligonale con diametri che variano da 65 km a 240 km;
- c) **crateri fantasma**: in inglese “*ghost craters*”, sono crateri che sono stati parzialmente o completamente sepolti da colate laviche e/o altro materiale espulso da altri crateri. Per una identificazione plausibile, i crateri fantasma devono avere diametri di almeno 4 km, ma ne sono stati osservati alcuni di diverse centinaia di chilometri (ad esempio, il bacino di Goethe, diametro di  $\sim 317$  km).

## 3. Ghiaccio d'acqua su Mercurio

### 3.1 Ghiaccio d'acqua nelle Regioni Permanentemente in Ombra

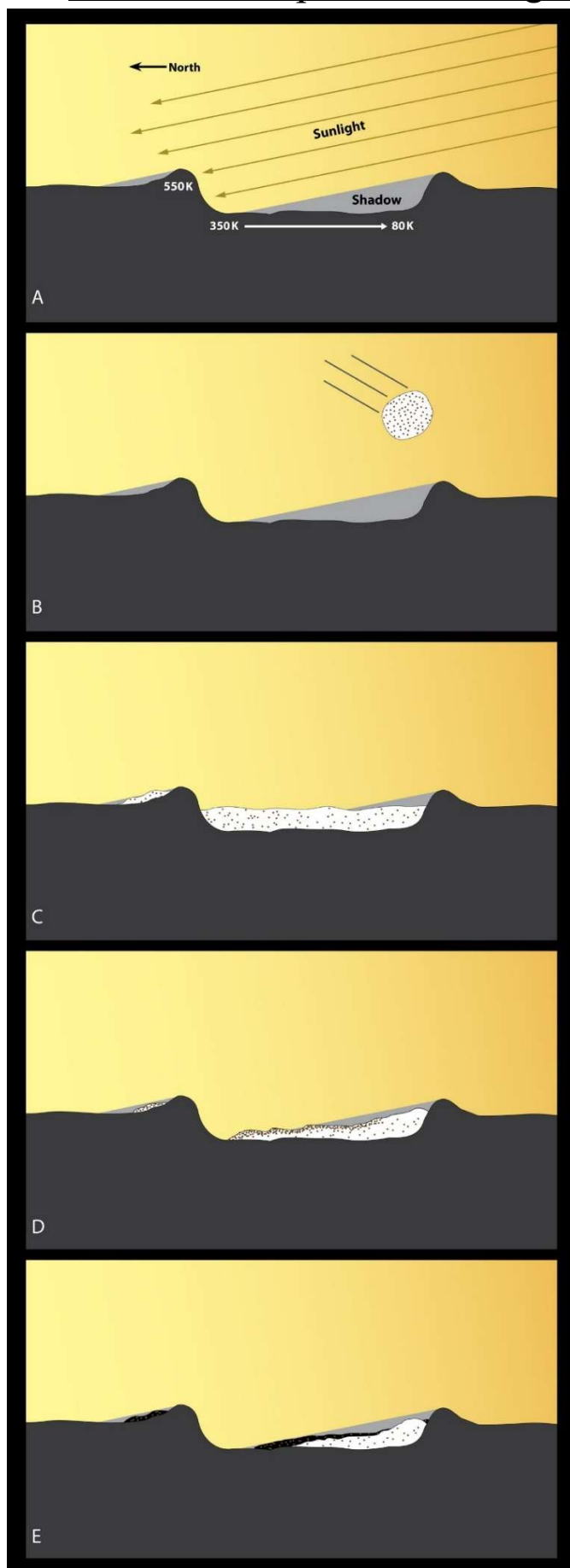
Nonostante la sua vicinanza al Sole, Mercurio possiede ai suoi poli (latitudini  $>80^\circ$ ) delle regioni che non ricevono mai la radiazione solare, grazie alla combinazione dell'obliquità molto bassa del pianeta e la presenza di una "barriera" rocciosa naturale, data dal bordo dei crateri d'impatto (cf. Fig. 15). Si tratta delle Regioni in Ombra Permanente (o con il termine inglese, *Permanently Shadowed Regions*, PSRs). Queste regioni pertanto sono molto fredde e termicamente stabili: le PSRs rappresentano un luogo ideale dove il ghiaccio d'acqua (in superficie e/o vicino alla superficie) potrebbe sopravvivere su tempi-scala geologici molto lunghi.

Le osservazioni radar da terra hanno fornito le prime evidenze della possibile esistenza di depositi di acqua ghiacciata sulla superficie di Mercurio, avendo evidenziato la presenza di materiale altamente riflettente. Questo infatti aveva proprietà simili al materiale presente nelle calotte polari di Marte. Allo stesso tempo, anche la sonda MESSENGER ha effettuato numerose acquisizioni delle regioni polari. I dati dello spettrometro hanno misurato alte concentrazioni di idrogeno nelle PSR, mentre immagini nel visibile e infrarosso hanno rilevato la presenza di depositi contigui, con confini ben definiti, ad alta e bassa riflettanza, che sono una possibile indicazione di un deposito di ghiaccio d'acqua in parte ricoperto da uno strato di materiale organico.



**Fig. 15.** In giallo sono contrassegnate le regioni permanentemente in ombra sul Polo Nord di Mercurio. Crediti: NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington.

### 3.2 Processi di deposizione del ghiaccio



La formazione dei depositi di ghiaccio d'acqua nelle PSRs potrebbe avere diverse origini. Le ipotesi proposte in letteratura supportano una (i) natura endogena del ghiaccio, oppure una natura esogena, e in questo caso derivare o (ii) da un bombardamento continuo di micro-meteoriti, o da (iii) un unico, grande e recente evento d'impatto. Indipendentemente dal modello, il ghiaccio d'acqua depositato viene poi preservato dalla luce diretta e indiretta (riflessa da strutture geologiche) su lunghi tempi scala, eventualmente anche sotto un sottile strato di materiale regolitico (Fig. 16).

Qui di seguito viene data una breve descrizione dei possibili meccanismi di deposizione. In particolare, la determinazione della composizione chimica dei ghiacci è essenziale per capire la loro origine poiché la concentrazione di volatili intrappolati varieranno a seconda della loro origine. Tali concentrazioni si possono poi confrontare con le concentrazioni di materiale volatile in altri oggetti del Sistema Solare come gli asteroidi, le comete, gli oggetti della fascia di Kuiper.

Modelli e misure recenti suggeriscono che la quantità di ghiaccio nelle PSRs di Mercurio sia dell'ordine di  $10^{13} - 10^{15} kg$ , la cui relativa purezza potrebbe indicare che sono stati depositati in un breve intervallo di tempo (e.g., Deutsch et al., 2019). D'altra parte, i confini netti della regione a bassa e alta albedo suggeriscono che il ghiaccio d'acqua potrebbe essere stato posizionato in tempi relativamente recenti.

**Fig. 16.** Rappresentazione della formazione di un deposito di ghiaccio in una PSR: A) i crateri polari, grazie alla bassa inclinazione di Mercurio rispetto al sole, hanno regioni che sono permanentemente in ombra; B) arrivo di una cometa; C) deposizione di ghiaccio e materiale organico; D) vaporizzazione del ghiaccio d'acqua nelle zone più calde; E) deposito di ghiaccio d'acqua stabile su lunghi tempi scala. Crediti: NASA/UCLA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington.



### 1) Origine endogena:

Secondo Head et al. (2011), è avvenuta la condensazione nelle trappole fredde (*cold traps* in inglese) di materiale volatile fuoriuscito durante una intensa attività vulcanica.

### 2) Flusso micro-meteoritico continuo:

Una seconda possibile fonte di ghiaccio d'acqua sono gli impatti di micro-meteoroidi sulla superficie di Mercurio. La quantità di ghiaccio d'acqua che si deposita effettivamente ai poli dipende da diversi fattori, quali la tipologia del proiettile (asteroidi, comete, e polvere interplanetaria (*Interplanetary Dust Particles*, IDPs, in inglese) che ne determina il contenuto in massa, il flusso (quante particelle effettivamente arrivano al suolo), e la percentuale in massa di sopravvivenza all'impatto.

Oltre all'effettivo quantitativo di acqua contenuto nelle polveri, la velocità d'impatto è un fattore determinante per la frazione del proiettile (e quindi d'acqua) trattenuto: per impatti ad alta velocità, i corpi perderanno la maggior parte del materiale nello spazio (come per le comete di tipo Halley), mentre il materiale derivante dagli impatti più lenti verrà trattenuto in modo più efficiente (asteroidi, comete di breve periodo, e IDPs). Infatti, la velocità dell'impatto dipende principalmente dai parametri orbitali: l'alta ellitticità, tipica delle comete a lungo periodo, e l'alto angolo d'impatto favoriscono un'elevata velocità di impatto. Si stima che per velocità d'impatto fino a 45 km/s, almeno il 20% del materiale viene trattenuto sulla superficie, per velocità superiori a 60 km/s, tutto il materiale del proiettile viene disperso nello spazio. L'acqua che sopravvive all'impatto e che rimane legata alla gravità di Mercurio migrerà su tutta la superficie, e solo una parte di questa verrà catturata ai poli. Si stima che l'efficienza di questo processo sia del 5%–15% (percentuale di molecole che sopravvivranno per raggiungere le regioni polari fredde prima di essere dissociate dalla radiazione ultravioletta).

In Tab. 5, si riassumono i valori trovati dai modelli numerici di Frantseva et al. (2022), dove si può notare che il quantitativo di acqua apportato dalle IDPs è un ordine di grandezza superiore alla somma delle quantità d'acqua fornita da comete e asteroidi. Su una scala temporale di  $\sim 1$  Gyr, questo è sufficiente per fornire la quantità minima di acqua richiesta dalle osservazioni radar e dalle osservazioni di MESSENGER.

**Tab. 5.** Quantità d'acqua che viene consegnata a Mercurio secondo i modelli numerici di Frantseva et al. (2022).

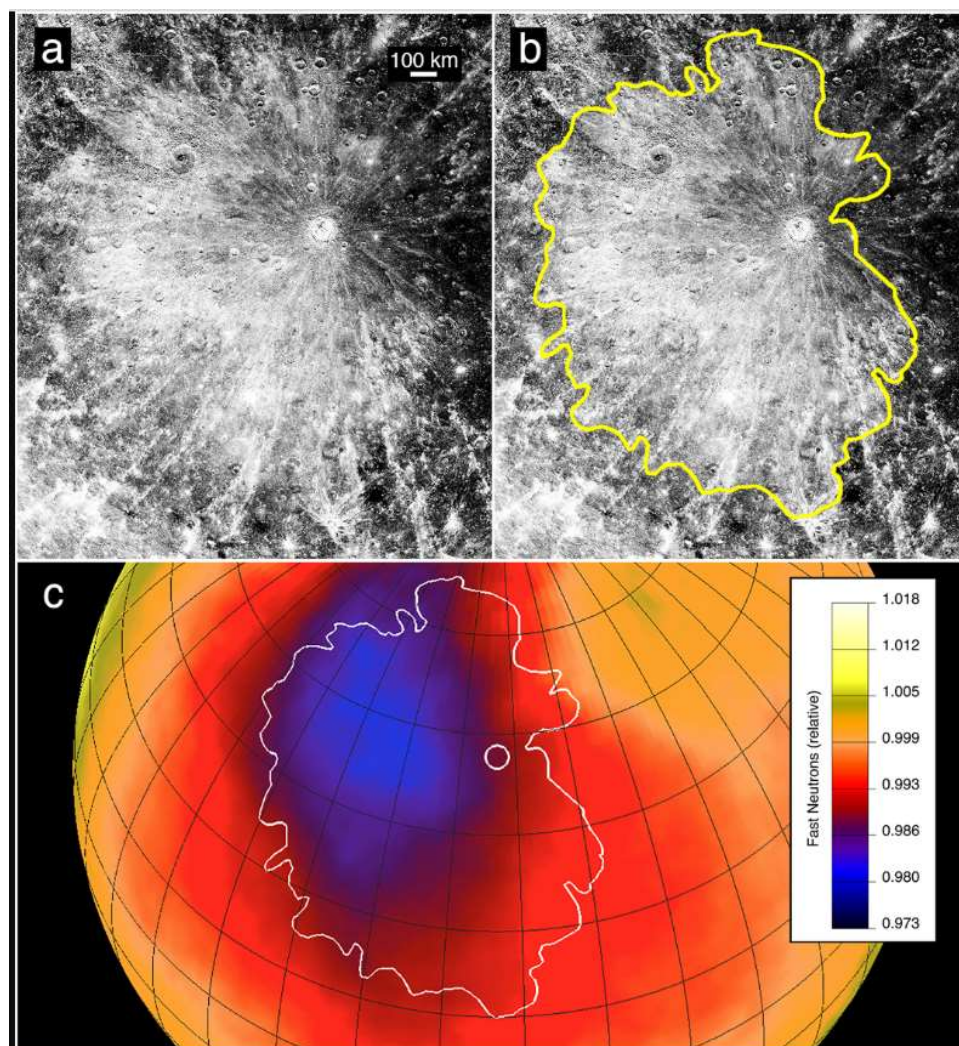
Polveri	Flusso delle polveri	Contenuto d'acqua delle polveri [% in massa]	Massa di acqua a Mercurio [kg/yr]	Massa d'acqua sopravvissuta all'impatto [kg/yr]	Acqua migrata ai poli [kg/yr]
<i>Asteroidi (tipo C)</i>	3.7 impatti/Myr	10	$\approx 0.032 \times 10^6$	$\approx 0.014 \times 10^6$	$1 \times 10^3$
<i>Comete</i>	0.0029 impatti/Myr	3 – 90	$\approx 0.044 \times 10^6$	$\approx 0.011 \times 10^6$	$1 \times 10^3$
<i>IDPs</i>	1–75% di IDPs idrati del totale ( $6 \times 10^6$ kg/yr)	1 – 40	$\approx 0.500 \times 10^6$	$\approx 0.207 \times 10^6$	$16 \times 10^3$

### 3) Impatto unico e recente:

Secondo Ernst et al. (2018), il ghiaccio è stato portato da un singolo, grande, e recente evento d'impatto. Questa ipotesi è supportata dal fatto che il deposito di ghiaccio d'acqua sembra essere particolarmente puro. Osservazioni da Terra indicano che il tasso della componente silicatica è minore del 5% in volume, suggerendo che il periodo di deposizione è avvenuto in un intervallo temporale molto breve.

Gli autori hanno identificato tale impatto con il cratere Hokusai (57.7°N, 16.8°E, diametro di 97 km, Fig. 17). Una delle sue caratteristiche più ragguardevoli è un sistema di raggi a scala globale (di lunghezza anche di diverse migliaia di chilometri), che essendo ben visibile è in favore dell'ipotesi di una formazione recente del cratere. Inoltre, tale sistema di raggi è asimmetrico, con una maggiore concentrazione di raggi nella direzione sud-ovest, supportando quindi l'obliquità dell'impatto che l'ha generato.

La distribuzione del sistema di raggi presenta solo un zona proibita a forma di "V", suggerendo un angolo di impatto compreso tra ~20° e 45°. Poiché gli ejecta prossimali sono quasi-simmetrici, tale intervallo è stato ristretto a 30°-40°.



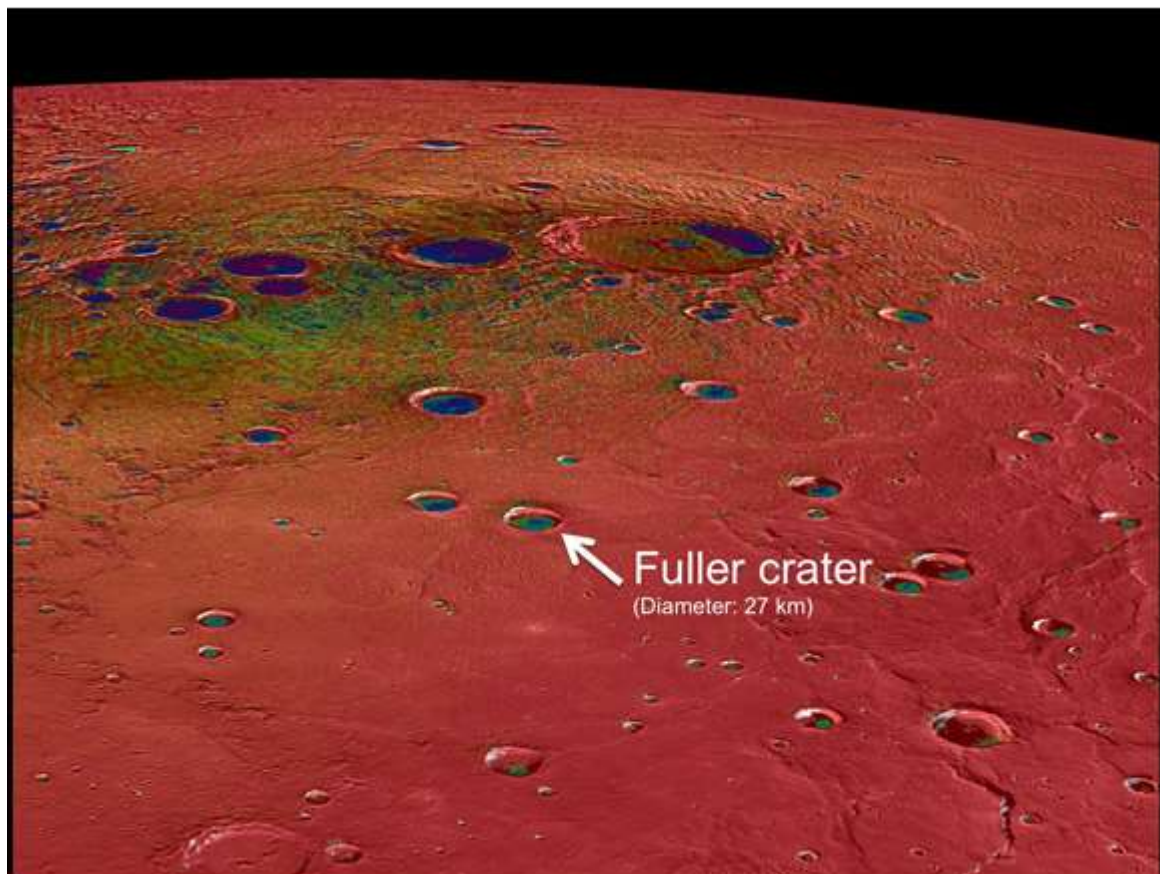
**Fig. 17.** A) Mosaico MDIS in proiezione ortografica, con il deposito di ejecta distale di Hokusai, più luminosa della superficie circostante. B) Delimitazione in giallo dell'ejecta distale. C) Contorno dell'ejecta distale (in bianco il bordo del cratere Hokusai è indicato dal cerchio bianco). Figura presa da Ernst et al. (2018).

Perché tale impatto possa aver apportato l'effettivo quantitativo di ghiaccio d'acqua deve tenere conto di alcune assunzioni:

- a) il proiettile deve essere una cometa o un asteroide contenente acqua: dalla composizione delle condriti, un asteroide idrato potrebbe contenere ~5–10% di acqua;
- b) l'acqua sopravvive all'impatto: simulazioni numeriche hanno mostrato che durante l'impatto di una cometa (diametro=2 km, velocità=30 km/s, angolo=45°) sulla superficie della Luna il 3% dell'acqua viene trattenuta (Ong et al., 2010);
- c) l'acqua sopravvive alla migrazione verso le *cold traps*: simulazioni di tipo Monte Carlo prevedono un tasso di sopravvivenza di 5–15% per Mercurio, e 20–50% per la Luna.

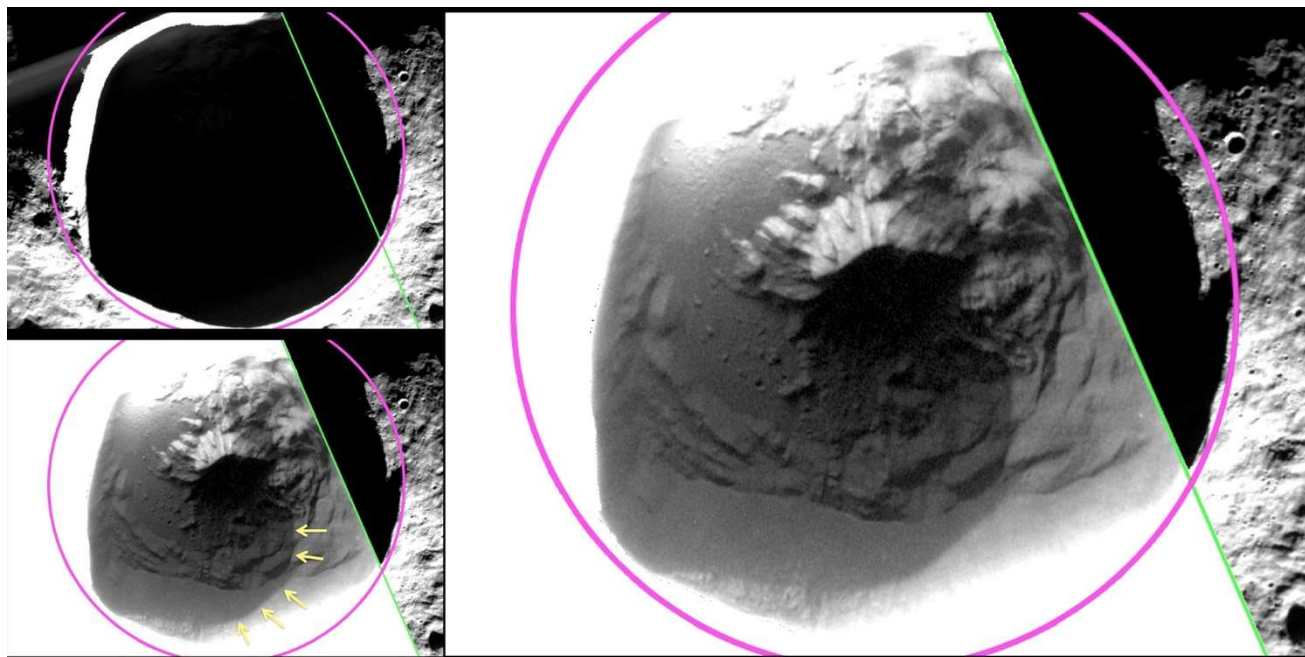
Ernst et al. (2018) hanno quindi verificato che, se l'impatto di Hokusai è avvenuto a una velocità  $\lesssim 30 \text{ km/s}$  e un angolo di  $\sim 35^\circ$ , il diametro del proiettile era nel range di 6 e 31 km. Per entrambi i due tipi di composizione, gli autori hanno verificato che l'impatto dell'Hokusai avrebbe potuto apportare  $> 10^{13} \text{ kg}$  di acqua nelle *cold traps* di Mercurio, in accordo con le misure del MESSENGER.

### 3.3 Fuller crater



**Fig. 18.** Mappa delle temperature semestrali della regione polare nord, che varia da 50 K (viola) nelle zone all'interno dei crateri a  $>400 \text{ K}$  (rosso) nelle aree illuminate dal Sole. Il cratere Fuller è evidenziato nella foto. Crediti: NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington.

Un'altra struttura d'impatto che potrebbe essere stato formato da una cometa (o asteroide contenente un elevato budget di acqua) è il Fuller. Si tratta di un cratere, di 27 km di diametro, situato nella regione polare nord ( $82.63^{\circ}\text{N}$ ,  $317.35^{\circ}\text{E}$ ). Misure radar da terra hanno indicato la presenza di una regione ad elevata riflettanza, pari a circa il 18% dell'intero basamento del cratere (Bertoli et al., 2022; Chabot et al. 2014). Come mostrato in Fig. 18, il suo interno presenta temperature basse, e quindi una zona dove il ghiaccio potrebbe rimanere stabile a lungo termine (link\_NASA\_6).



**Fig. 19.** Pannello in alto a sinistra: cratere Fuller ( $D=27$  km,  $82.63^{\circ}\text{N}$ ,  $317.35^{\circ}\text{E}$ ), dove la circonferenza rosa delinea il suo bordo, mentre la linea verde delimita una immagine acquisita da MDIS a bassa altitudine, con un filtro a banda larga. Pannello a destra: la stessa immagine con applicato uno stretch che mette in evidenza l'interno del cratere. Pannello in basso a sinistra: la stessa immagine precedente, dove è stato indicato il bordo a più bassa albedo. Crediti: NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington.

La sonda MESSENGER ha osservato il cratere con una risoluzione di 46 m/px (Fig. 19). Nel pannello a destra, viene riportata l'immagine con applicato uno stretch che mette in evidenza la morfologia della superficie in ombra all'interno di Fuller, e che rivela una zona con una riflettanza inferiore, delimitata da un confine netto ben definito. I modelli di temperatura superficiale vicino alla superficie hanno mostrato che questa regione a bassa albedo permette di ospitare ghiaccio d'acqua sotto la superficie su lunghi tempi scala, ma è troppo calda per supportare il ghiaccio d'acqua in superficie (link\_NASA\_7). Infatti, questa zona a bassa riflettanza ha le caratteristiche termiche previste per un deposito di materiale regolitico ricco di sostanze organiche che si sovrappone, e protegge, il deposito di ghiaccio d'acqua.

L'analisi dell'età del Fuller basata sul conteggio di crateri (e.g., Bertoli et al., 2022) ha evidenziato che si è formato in tempi recenti (0.3 Gyr fa), mentre il suo fondo ha subito un ringiovanimento (età stimata di 0.04 Gyr).

### 3.4 Goal della tesi

Come mostrato in questo capitolo, i depositi di acqua nelle PSRs potrebbero essersi formati in seguito ad impatti di oggetti, con dimensioni dal  $\mu\text{m}$  al km, contenenti acqua. Tutti i modelli presenti in letteratura sono concordi nell'identificazione nella velocità d'impatto uno dei parametri fondamentali per la sopravvivenza dell'acqua. Tuttavia, osservando un cratere già formato, possiamo avere delle informazioni sull'energia cinetica dell'impatto in tutt'uno, ma non è semplice separare le varie componenti (composizione dell'impattore, dimensione, velocità, e angolo d'impatto). Invece la morfologia del deposito di ejecta dipende dall'angolo di impatto, permettendo di avere informazioni sulla geometria dell'impatto che ha generato il cratere primario osservato. Un minore angolo d'impatto implica che la componente verticale della velocità dell'impattore (che è il valore effettivo nel budget dell'energia cinetica) sia più piccola, aumentando la probabilità di sopravvivenza dell'acqua.

Obiettivo di questo lavoro di tesi è lo studio del deposito di ejecta del cratere Fuller, in modo da poter estrapolare indicazioni sulla geometria dell'impatto che lo ha creato.

Più in dettaglio, si andranno a selezionare i crateri che potrebbero essersi formati a seguito dell'impatto che ha creato il Fuller (crateri secondari), e ad analizzare la loro distribuzione spaziale rispetto al cratere primario. Quindi si confronteranno i risultati ottenuti con forme teoriche mostrate in §1.4, Tab. 2, in modo da ricavare indicazioni sulla direzione e angolo rispetto alla superficie dell'impattore. Come scritto nell'introduzione, questo studio permetterà di determinare la sopravvivenza o meno del ghiaccio portato dall'oggetto che ha generato il Fuller.



## 4. Dati

### 4.1 Camera MDIS

Lo strumento Mercury Dual Imaging System (MDIS) a bordo della sonda MESSENGER aveva il compito di mappare la morfologia del terreno, tracciare le variazioni spettrali della superficie, e raccogliere informazioni topografiche.

MDIS era uno strumento multispettrale, composto da una camera ad ampio angolo (la *Wide Angle Camera*, WAC), e a stretto angolo (la *Narrow Angle Camera*, NAC), entrambe basate su dispositivi CCD. Lo strumento aveva la possibilità di ruotare, in questo modo poteva riprendere la superficie da varie angolazioni (utili per poi effettuare la ricostruzione 3D del terreno), senza che la sonda stessa ruotasse.

La camera WAC aveva un campo di vista di  $10.5^\circ \times 10.5^\circ$  e poteva osservare Mercurio attraverso un pancromatico e 11 diversi filtri nell'intervallo di lunghezze d'onda da 395 a 1040 nm (dal visibile al vicino infrarosso). La camera NAC poteva acquisire immagini nel pancromatico con il suo campo di vista di  $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ .

### 4.2 Immagini

Per questo progetto, il mosaico globale di Mercurio, in proiezione polare, è stato integrato con una serie di immagini acquisite dalla MDIS/WAC, e riportate in Tab. 6.

**Tab. 6.** Immagini usate per il progetto. Viene anche specificato il filtro con cui sono state acquisite.

No. immagine MDIS/WAC †	risoluzione [m/pixel]
EW0227473537G	134.0
EW0227642922G	130.8
EW0241545232G	65.3
EW0242130138F	60.6
EW0253157517I	138.2
EW1067332491B	61.5
EW1017901981B	89.05

† Filter 1 (filename B, wavelength 700 nm); Filter 6 (filename F, wavelength 433.2 nm); Filter 7 (filename G, wavelength 748.7 nm); Filter 9 (filename I, wavelength 996.2 nm)



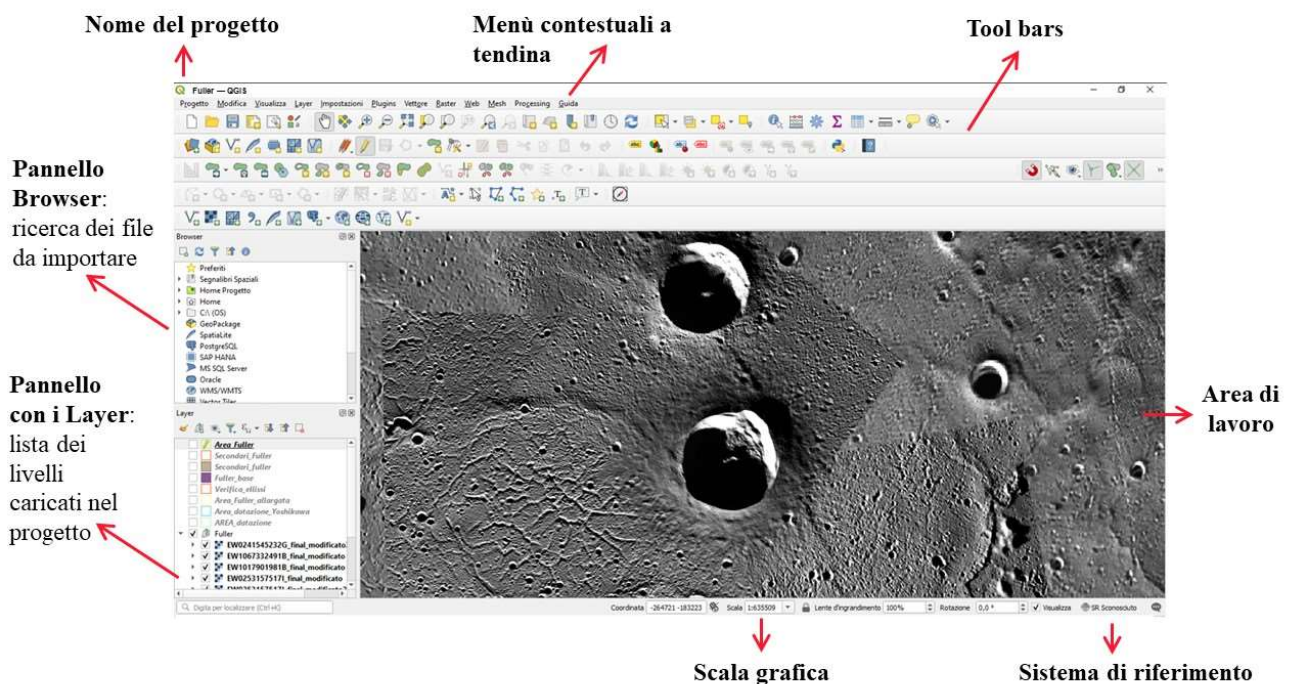


## 5. Metodi

Lo scopo del progetto è di selezionare i crateri secondari negli ejecta del Fuller, che si estendono generalmente dal confine della coltre degli ejecta continui fino a diversi raggi del cratere primario. Tale analisi è stata fatta nell'ambiente di lavoro "GIS" – Geographyc Information System, ovvero un software che permette l'acquisizione, la visualizzazione, e l'analisi di informazioni "geo-riferite", cioè correlate con un sistema di riferimento. In ambito della planetologia, i principali utilizzi di un sistema GIS sono legati alla cartografia digitale, all'analisi geo-spaziale, lo studio di fenomeni naturali sulla superficie planetaria, e alle mappature geologiche.

Per questo lavoro di tesi si è usato il software QGIS, che è una piattaforma open-source (<https://www.qgis.org/it/site/>).

### 5.1 Ambiente di lavoro QGIS



**Fig. 20.** Screenshot del software QGIS, e delle relative aree di lavoro QGIS dove sono evidenziate le sezioni principali

Per rappresentare gli oggetti (qualsiasi cosa che si può vedere nell'area cartografata) QGIS utilizza dati vettoriali. Ogni elemento vettoriale ha una sua forma rappresentata da una geometria: per l'elaborazione dei dati di questa tesi si utilizza una geometria di tipo poligonale, cioè una figura chiusa per delimitare delle aree, nel caso specifico per evidenziare i bordi dei crateri.

Le immagini vettoriali sono formate da poligoni fissati su una griglia che costituiscono delle forme geometriche modificabili generate da funzioni matematiche: per questa caratteristica i file vettoriali possono essere ingranditi o ridimensionati senza perdere i riferimenti geografici. Non si usano immagini raster, cioè quelle formate da pixel, perché possono sgranare se rimpicciolite o ingrandite.

Gli elementi vettoriali sono raggruppati in layer (i.e., in strati). Si possono così mostrare o nascondere tutti gli elementi appartenenti ad uno specifico layer.

I layer sono archiviati come shapefile (.shp) che contiene le informazioni riguardo la forma e gli attributi delle feature geografiche. Lo shapefile è uno standard per il settore della cartografia e spesso si riferisce ad una raccolta di file con lo stesso nome ma diverse estensioni.

## 5.2 Selezione dei crateri e conteggio

La mappatura geologica del cratere Fuller (e quindi l'identificazione della zona "ejecta" che è stata poi utilizzata in questa tesi) è stata elaborata dalla dottoranda Silvia Bertoli nell'ambito della sua tesi di dottorato presso l'Università degli Studi di Padova, e sottomessa nel giornale *Geological Field Trips and Maps* (accepted pending revisions). Tale area, che costituisce uno dei layer del progetto in QGIS, è stata delineata sulla base di considerazioni visive riguardo la morfologia e texture della superficie attorno al cratere Fuller. La definizione dell'unità degli ejecta è stata influenzata anche da altri due fattori: (i) la risoluzione delle immagini (cf. Tab. 6), che può arrivare a ~140 m/px, e (ii) la presenza del cratere Laxness (D=26 km), a circa 50 km dal Fuller in direzione NW, i cui ejecta riconoscibili per un albedo più elevato sono stati depositati sopra quelli del Fuller.

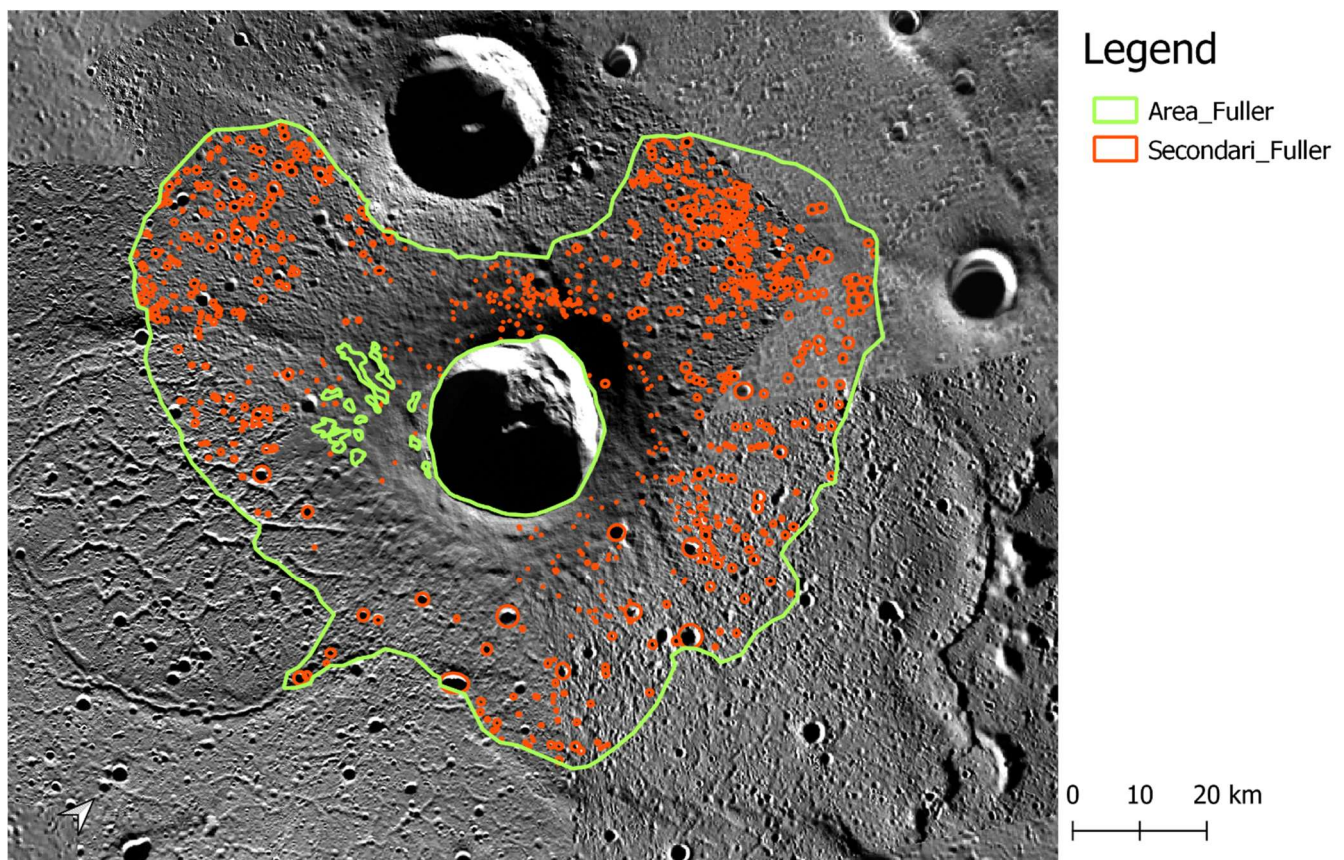
Un secondo layer del progetto corrisponde al layer dei crateri secondari del Fuller, che sono stati definiti come poligoni, e tracciati manualmente come ellissi. Questa particolare forma geometrica ha permesso di valutare l'eventuale direzione preferenziale di impatto del cratere segnato.

Una volta terminata l'attività di individuazione dei secondari si è utilizzato un programma, scritto in Python dal Dr. Adriano Tullo, che permette di elaborare i dati geo-riferiti del layer dei secondari, estraendo la direzione dell'asse maggiore dell'ellisse rispetto al centro del Fuller e la distanza del centro del secondario dal centro del Fuller. Il dato principale del programma che poi verrà utilizzato per l'analisi è l'angolo compreso tra la direzione dell'asse maggiore delle ellissi e la direzione verso il Nord di Mercurio. I dati verranno sempre espressi rispetto al NW (direzione verticale dell'immagine).

Tale programma ha permesso quindi di limitare il numero dei crateri conteggiati a quelli che con più probabilità appartengono al campo dei secondari del Fuller. Infatti, gli ejecta del Fuller sono caratterizzati dalla presenza di cluster e soprattutto catene di secondari che puntano ad altri crateri: nonostante quelli evidenti non siano stati presi in considerazione, altri cluster o catene potrebbero essere stati inclusi nel conteggio.

## 6. Risultati

### 6.1 Area di Analisi



**Fig. 21.** Mappa di Fuller. Legenda: l'area degli ejecta è delimitata in verde, e i crateri conteggiati in questo progetto sono segnati in rosso. In basso a sinistra la freccia indica il nord.

### 6.2 Selezione dei crateri secondari

I crateri secondari sono anch'essi crateri d'impatto: iniziano a formarsi durante la fase di escavazione di un cratere primario, quando il materiale escavato in profondità nel target viene lanciato su traiettoria balistica attorno al cratere originario. I secondari sono generalmente di forma più ellittica rispetto ai crateri primari (e.g., Chapman et al., 2012): infatti i frammenti di *target* che li hanno originati vengono lanciati obliquamente rispetto alla superficie, e ricadono con un angolo simile. Nel caso dei crateri secondari, la forma del cratere risente dell'angolo d'impatto obliquo in quanto le velocità sono molto basse (alcuni km/s).

Inoltre, i crateri secondari possono essere identificabili rispetto ai primari in quanto sono raggruppati in clusters o in catene dalla particolare conformazione a spina di pesce, dovuta all'interazione con altri frammenti di target espulsi o con la regolite parzialmente fluidificata. I singoli crateri all'interno di una catena hanno comunemente bordi irregolari e possono essere allungati a causa degli angoli di espulsione e di impatto poco profondi del materiale espulso.

Le dimensioni dei secondari sono variabili, ma quelli più grandi possono raggiungere dimensioni del 4% del cratere primario (diametro di alcune decine di chilometri). In questo caso, i secondari si sono formati dal materiale espulso vicino al punto di impatto, e quindi impattano sulla superficie a velocità ed angoli maggiori, lontano dal loro cratere primario, generalmente isolati, e per questo sono difficili da attribuire al primario che li ha generati, o comunque distinguibili dai crateri primari di più piccole dimensioni.

Nell'area di conteggio degli ejecta si sono individuati e segnati come secondari 897 crateri, la maggior parte dei quali raggruppati in cluster o in catene. Tali crateri sono di diametro superiore a 4 px. L'affidabilità del conteggio può risentire dalla risoluzione medio-bassa (~60-140 m/px) delle immagini, e dalla presenza di una zona totalmente in ombra (proiettata dal bordo del Fuller). Nel database non sono stati inclusi una ventina di crateri, perché di forma quasi circolari, con il brodo ben definito, e isolati, quindi sono stati classificati come primari. In Fig. 21, si riporta la mappa del conteggio.

### 6.3 Analisi dati

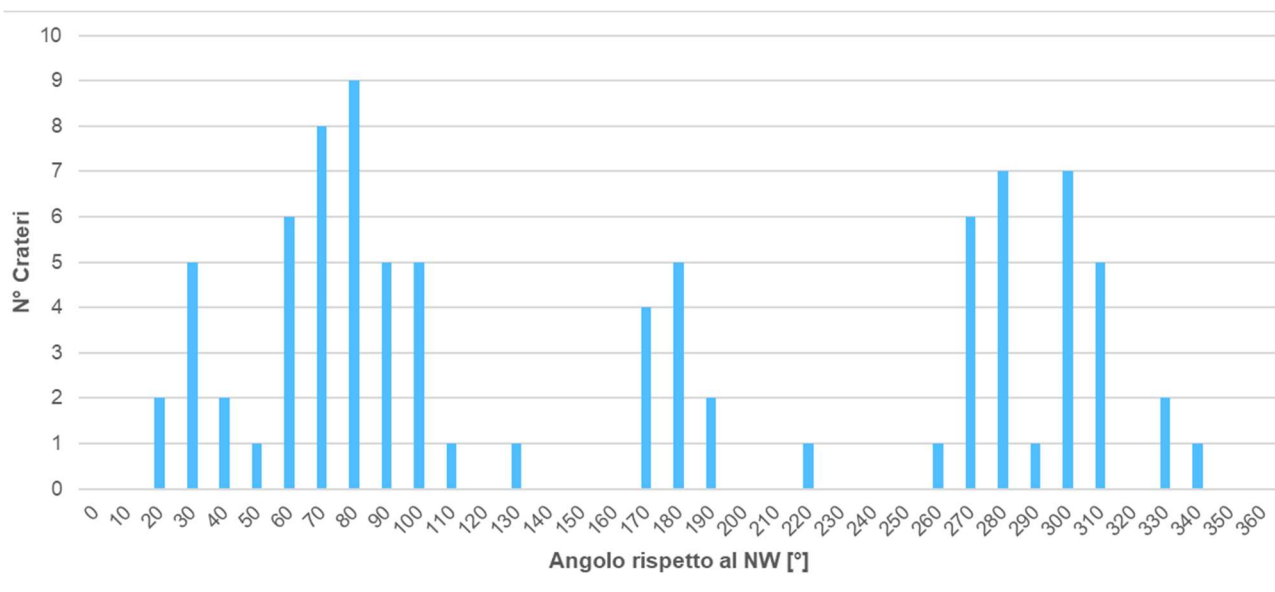
Una volta completato il database dei crateri secondari, è stato applicato il programma in Python per selezionare solo quei crateri che avessero l'asse maggiore in direzione radiale rispetto al centro del cratere Fuller. Come scritto nel paragrafo precedente (cf. §5.2 e §6.2), l'area degli ejecta era di difficile interpretazione per la risoluzione medio-bassa (~60-140 m/px) delle immagini. Quindi, inizialmente si sono considerati gli assi maggiori delle ellissi con un angolo di tolleranza pari a  $\pm 30^\circ$  rispetto alla direzione radiale al centro del Fuller. Si è ripetuto lo stesso calcolo anche considerando valori di tolleranza inferiori, e precisamente  $\pm 20^\circ$  e  $\pm 10^\circ$ . I crateri in questo modo selezionati sono risultati 287, 191, e 88, rispettivamente per i tre casi.

Per tutti e tre questi casi, si sono ottenute distribuzioni spaziali attorno al Fuller molto simili tra di loro, a supporto della bontà del set di dati usati per l'analisi. Di seguito, vengono mostrati solo i risultati relativi all'angolo di tolleranza  $\pm 10^\circ$  che, essendo quello più selettivo, restituisce un valore più vicino a quello vero.

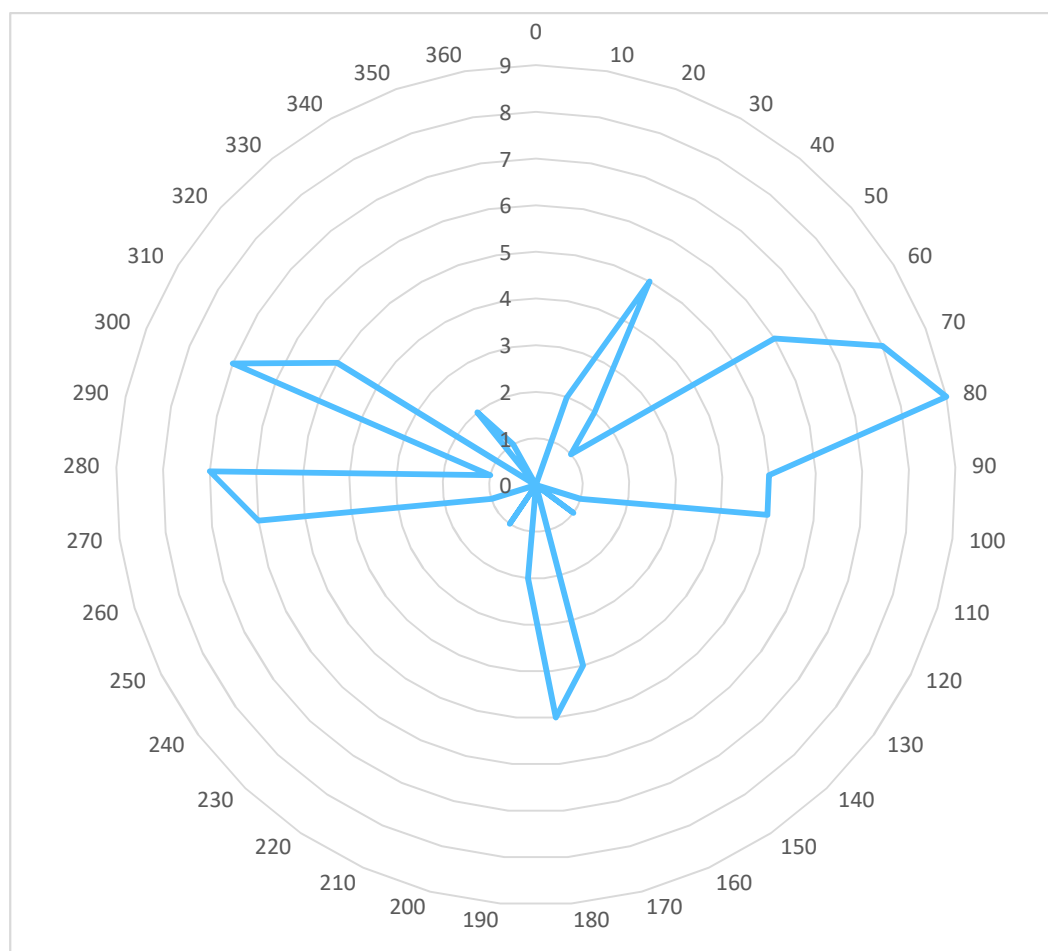
Inizialmente, i dati sono stati rappresentati in un istogramma di frequenza, per valutare la distribuzione dei crateri secondari attorno al cratere (primario) Fuller. Il risultato è in Fig. 22.

Da questo grafico, si osserva la presenza di due massimi, il primo compreso tra  $60^\circ$  e  $100^\circ$  e il secondo tra  $270^\circ$  e  $310^\circ$ . Un terzo picco di secondari, anche se minore in termini sia di numero che di estensione spaziale, si trova a  $180^\circ$ . Questo primo risultato suggerisce che i crateri secondari siano maggiormente concentrati in due regioni rispetto al NW, come evidenziato anche dalla rappresentazione del loro conteggio nel grafico polare in Fig. 23.

La Fig. 23 mette inoltre in evidenza il fatto che la presenza del cratere Laxness e dei suoi ejecta abbia celato il campo di secondari del Fuller, in quanto "l'ala" a  $270^\circ$ – $310^\circ$  è asimmetrica e più piccola rispetto a quella a  $60^\circ$ – $100^\circ$ .

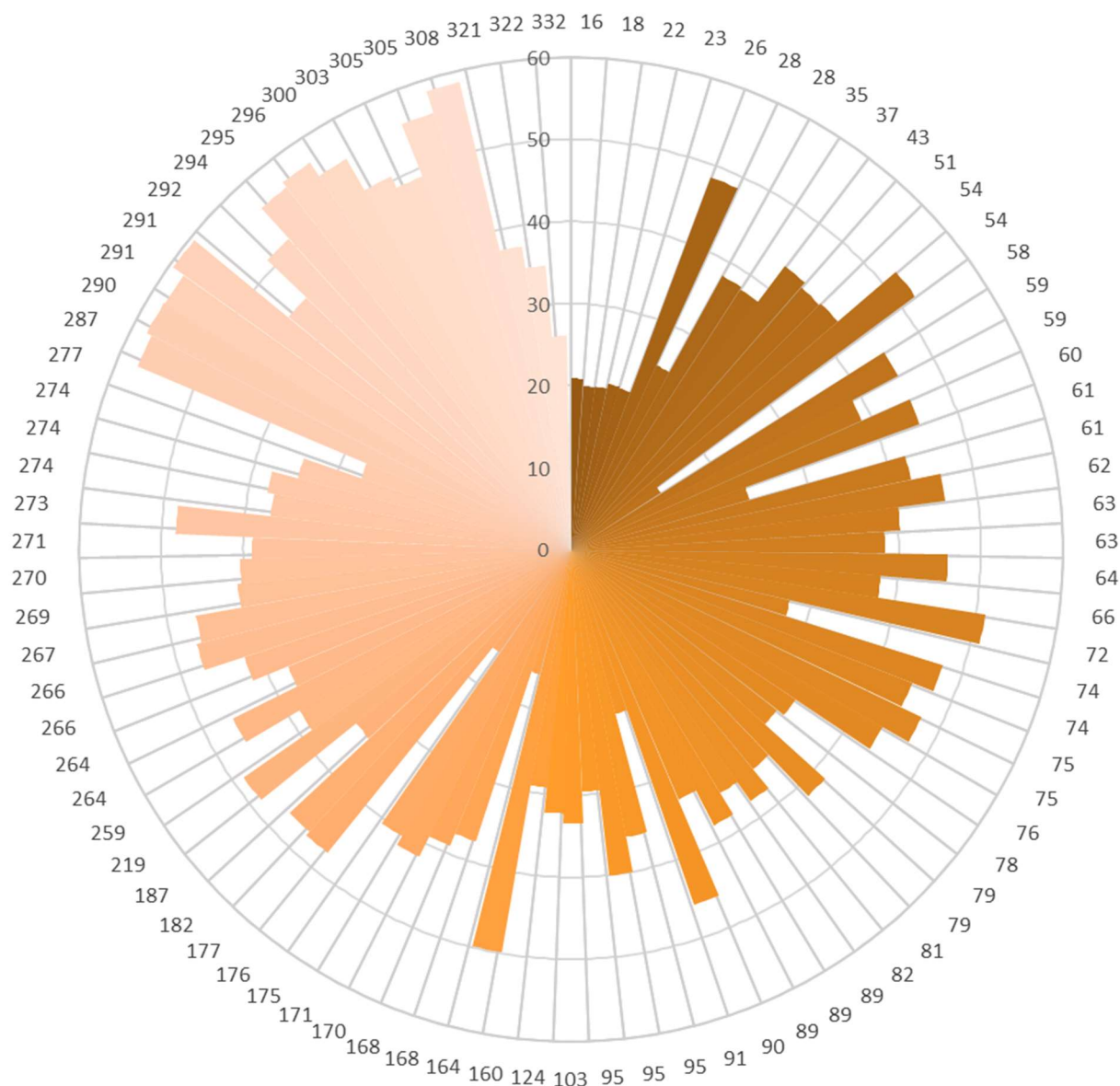


**Fig. 22.** Istogramma di frequenza dei crateri secondari conteggiati, con un asse maggiore di  $\pm 10^\circ$  rispetto alla direzione radiale al centro del Fuller. In ascisse l'angolo tra l'asse dell'ellisse e la direzione centro del Fuller – polo Nord di Mercurio: graficamente, lo zero si trova nel nord del cratere rispetto alla proiezione stereografica (in alto in Fig. 21), che corrisponde alla direzione NW geografica. In verticale, il numero assoluto di crateri conteggiati e poi filtrati dal programma Python per quel di angolo.



**Fig. 23.** Grafico polare che mostra la distribuzione di frequenza dei crateri secondari conteggiati attorno al Fuller, con un asse maggiore di  $\pm 10^\circ$  rispetto alla direzione radiale al centro del cratere primario. Le coordinate polare e radiale corrispondono alle due grandezze (angolo e numero assoluto di crateri) descritte in Fig. 22.

Questa analisi suggerisce che il cratere Fuller sia stato prodotto da un impatto obliquo, con direzione da NW a SE. La distribuzione dei secondari indica un basso angolo di impatto. Anche se la conformazione ottenuta sembra più simile a quella ad "ali di farfalla" tipica di impatto con angolo  $<20^\circ$ , il cratere Fuller è tuttavia circolare, il che esclude angoli radenti. Inoltre, esiste una zona con densità non nulla in direzione opposta all'impatto (SE), che favorisce un angolo di impatto compreso tra  $20^\circ$  e  $45^\circ$  (cf. Tab. 2 in §1.4). Tale ipotesi è supportata anche dalla distribuzione spaziale dei crateri secondari in funzione della loro distanza dal centro del cratere Fuller: come evidenziato in Fig. 24, i crateri secondari sono distribuiti abbastanza omogeneamente attorno a Fuller, eccetto nella zona proibita a forma di "V", in direzione NW (dalla quale è arrivato l'impatto).



**Fig. 24.** Diagramma polare della distribuzione spaziale dei crateri secondari conteggiati attorno al Fuller, con un asse maggiore di  $\pm 10^\circ$  rispetto alla direzione radiale al centro del cratere primario. L'angolo corrisponde alla direzione NW geografica (cf. didascalia di Fig. 22), mentre la direzione radiale corrisponde alla distanza dei secondari dal centro del cratere primario.

## 6.4 Il ghiaccio d'acqua di Fuller

L'analisi degli ejecta del Fuller ha permesso di osservare anche che il cratere è giovane, avendo solo ~20 di crateri primari su di un'area di ~1500 km<sup>2</sup>, in accordo con quanto trovato in lavori precedenti (e.g., Bertoli et al., 2022).

Utilizzando un software di calcolo online basato su leggi di scala che permettono di calcolare le dimensioni del proiettile a partire da quelle del diametro del cratere (<https://www.eaps.purdue.edu/impactcrater/>), si è provato a stimare le dimensioni dell'oggetto che ha dato origine al cratere Fuller. Sono stati ipotizzati i seguenti dati di input: (i) il proiettile ha una composizione di ghiaccio d'acqua misto a roccia (densità compresa tra 910 e 1500 kg/m<sup>3</sup>), (ii) la velocità d'impatto è di 30 km/s (inferiore al valore medio di ~40 km/s su Mercurio, che però è stata utilizzata da Ernst et al., 2018), (iii) l'angolo d'impatto è pari al valore massimo ottenuto dall'analisi precedente (45°), e (iv) la superficie di mercurio è assunta di composizione basaltica. Il software ha restituito un valore di ~1.2 km per il proiettile del cratere Fuller. Variando i valori di input, le dimensioni del proiettile non sono cambiate significativamente (per effetto che il valore della velocità è comunque elevato).

Si è voluto quindi cerca di stimare (ad ordine zero), la frazione di acqua contenuta nell'impattore. La massa totale del proiettile ottenuto dalle leggi di scale è dell'ordine di 10<sup>15</sup> g. Nel caso della Luna, Ong et al. (2010) avevano trovato tramite simulazione numerica che la frazione della massa del proiettile che sopravvive ad un impatto di 30 km/s fosse del 3%. Utilizzando questo valore (non essendoci corrispettivi studi anche per Mercurio), e assumendo un quantitativo di ghiaccio nel proiettile pari al 6% e 33%, si è calcolata una massa di ghiaccio pari ~1.5×10<sup>12</sup> g e ~8.2×10<sup>12</sup> g, rispettivamente, che è sopravvissuto all'impatto del Fuller.





## 7. Conclusioni

Le zone polari di Mercurio sono caratterizzate da regioni permanentemente in ombra (*Permenent Shadowed Regions*, PSRs), grazie alla bassa obliquità del pianeta e la presenza di rilievi forniti per esempio dal bordo di crateri. Osservazioni radar da terra hanno rilevato zone riflettenti in corrispondenza delle PSR, mentre le misure spettrometriche della sonda MESSENGER hanno messo in evidenza elevate concentrazioni di idrogeno, in queste aree. Questi dati insieme a modelli termici sono a favore di temperature molto basse per le PSR (~150 K) e alla sopravvivenza di ghiaccio d'acqua su lunghi tempi scala geologici, eventualmente ricoperto da un deposito regolitico che lo preserverebbe ulteriormente dalla sublimazione.

Una delle ipotesi di deposizione del ghiaccio d'acqua è rappresentata dagli impatti di comete o asteroidi idrati. Questo può avvenire se le condizioni d'impatto sono tali da permettere che una parte del ghiaccio rimanga legato alla gravità del pianeta, e si ricondensi poi sopra il cratere appena formato e/o migri verso i poli di Mercurio, nel caso di un impatto poco energetico (e.g., velocità e/o angoli d'impatto bassi).

Il Fuller (diametro = 27 km, 82.63°N, 317.35°E) è un possibile candidato di cratere con depositi di ghiaccio al suo interno. L'obiettivo di questa tesi è stato quello di ottenere informazioni sulla geometria dell'impatto e verificare se l'eventuale ghiaccio d'acqua sia potuto sopravvivere all'impatto.

La formazione di un cratere d'impatto dipende da un numero elevato di parametri, incluse le proprietà fisiche e dinamiche del proiettile, la gravità del pianeta, e il materiale e struttura della superficie. Dato un cratere non è possibile determinare in modo inequivocabile le caratteristiche dell'impattore, in particolare scompone la componente fisica (dimensione, composizione) e quella dinamica (velocità, angolo), in quanto la sua forma rimane circolare fino ad angoli molto bassi. Tuttavia, alcune indicazioni di possono ottenere dalla forma degli ejecta.

Sono stati quindi conteggiati i crateri secondari negli ejecta del Fuller nel sistema informativo geografico QGIS, e si è poi applicato un programma Python in modo da selezionare le sole strutture relative al cratere d'interesse. La distribuzione spaziale dei crateri secondari ha messo in evidenza che questi sono distribuiti attorno al Fuller eccetto una zona proibita a forma di "V" in direzione NW, che potrebbe rappresentare la direzione da cui arriva l'impattore, oltre che a definire tra 20° e 45° l'intervallo dei possibili angoli d'impatto. Inoltre, la distribuzione quantitativa dei crateri secondari sembra indicare che questi siano maggiormente concentrati in due regioni trasversali rispetto alla direzione d'impatto (aree ad "ali di farfalla"), e in misura minore verso SE, suggerendo angoli d'impatto verso il limite inferiore dell'intervallo proposto.

Utilizzando leggi di scala, si è visto che per un proiettile idrato con almeno il 6% di ghiaccio d'acqua, con una velocità di 30 km/s e angolo d'impatto massimo di 45°, la massa di acqua che sopravvive al processo d'impatto e che potrebbe poi venire depositata nel Fuller è pari a  $\sim 1.5 \times 10^{12}$  g.

I risultati ottenuti in questa tesi possono venire presto migliorati dai nuovi dati attesi dalla missione BepiColombo, un progetto congiunto tra le agenzie spaziali ESA e JAXA. che nel dicembre 2025 entrerà in orbita di Mercurio. L'obiettivo della missione è di ampliare e approfondire le nostre conoscenze riguardo al pianeta, e i depositi di ghiaccio d'acqua nelle PSR sono uno dei principali focus di SIMBIO-SYS, il sistema integrato di osservazione geomorfologica e composizionale della superficie, a guida di italiani dell'Osservatorio Astronomico di Padova dove è stata svolta questa tesi.



# Bibliografia

link\_ESA\_1:

[https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/BepiColombo/A\\_trio\\_of\\_images\\_highlight\\_BepiColombo\\_s\\_third\\_Mercury\\_flyby](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/BepiColombo/A_trio_of_images_highlight_BepiColombo_s_third_Mercury_flyby)

link\_ESA\_2:

[https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2023/06/BepiColombo\\_hugs\\_Mercury\\_annotated](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2023/06/BepiColombo_hugs_Mercury_annotated)

link\_ESA\_3: [https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/BepiColombo](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/BepiColombo)

link\_NASA\_1: <https://www.lpi.usra.edu/publications/newsletters/mercmessenger/issue10.pdf>

link\_NASA\_2: <https://science.nasa.gov/mission/mariner-10/>

link\_NASA\_3: [https://airandspace.si.edu/collection-objects/spacecraft-mariner-10-flight-spares/nasm\\_A19830006000](https://airandspace.si.edu/collection-objects/spacecraft-mariner-10-flight-spares/nasm_A19830006000)

link\_NASA\_4: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=1973-085A>

link\_NASA\_5: <https://messenger.jhuapl.edu/index.html>

link\_NASA\_6: <https://messenger.jhuapl.edu/Resources/Press-Conference/20150316.html>

link\_NASA\_7: <https://www.nasa.gov/image-article/fuller-revealed/>

Baker, D.M.H.; Head, J.W.; Schon, S.C.; Ernst C.M.; Prockter, L.M.; Murchie, S.L.; Denevi, B.W.; Solomon, S.C.; Strom, R.G.: The transition from complex crater to peak-ring basin on Mercury: New observations from MESSENGER flyby data and constraints on basin formation models, *Planetary and Space Science*, Volume 59, Issue 15, 1932–1948 (2011)

Benkhoff, J.; Murakami, G.; Baumjohann, W. et al.: BepiColombo - Mission Overview and Science Goals. *Space Sci Rev* 217, 90 (2021)

Bertoli, S.; Cremonese, G.; Pajola, M.; Lucchetti, A.; Cambianica, P.; Simioni, E.; Martellato, E.; Massironi, M.: Landform Analysis of Craters on the Permanent Shadowed Regions of Mercury, 44<sup>th</sup> COSPAR Scientific Assembly. Held 16-24 (July, 2022). Online at <https://www.cosparathens2022.org/>. Abstract B4.5-0014-22

Bertoli, S.; Lucchetti, A.; Pajola, M.; Martellato, E.; Massironi, M.; Cambianica, P.; Simioni, E.; Cremonese, G.: The Planet Mercury's cartography: high detailed maps of 14 craters located at the North pole. *Geological Field Trips and Maps*, Accepted pending revisions

Canup, R.; Asphaug, E.: Origin of the Moon in a giant impact near the end of the Earth's formation. *Nature* 412, 708–712 (2001)

Chabot, N.L.; Ernst, C.M.; Denevi, B.W.; Nair, H.; Deutsch, A.N.; Blewett, D.T.; Murchie, S.L.; Neumann, G.A.; Mazarico, E.; Paige, D.A.; Harmon, J.K.; Head, J.W.; Solomon, S.C.; Images of surface volatiles in Mercury's polar craters acquired by the MESSENGER spacecraft. *Geology* 42, 1051–1054 (2014)

- Chapman, C.; Baker, D.; Barnouin, O.; Fassett, C.; Marchi, S.; Merline, W.; et al.: Impact Cratering of Mercury. In Solomon, S.; Nittler, L.; & B. Anderson (Eds.), *Mercury: The View after MESSENGER* (Cambridge Planetary Science, pp. 217-248). Cambridge: Cambridge University Press (2018)
- Charlier B.; Namur O.; The Origin and Differentiation of Planet Mercury. *Elements*; 15 (1): 9–14 (2019)
- Collins, G.; Melosh, H.J.; Osinski, G.R.; The Impact-Cratering Process. *Elements*; 8 (1): 25–30 (2012)
- Deutsch, A.N.; Head, J.W.; Neumann G.A.: Age constraints of Mercury's polar deposits suggest recent delivery of ice, *Earth and Planetary Science Letters*, Volume 520, Pages 26-33 (2019)
- Ebel, D.; Stewart, S.: The Elusive Origin of Mercury. In Solomon, S.; Nittler, L. & B. Anderson (Eds.): *Mercury: The View after MESSENGER* (Cambridge Planetary Science, pp. 497-515). Cambridge: Cambridge University Press (2018).
- Ernst C.M.; Chabot N.L.; Barnouin, O.S.: Examining the Potential Contribution of the Hokusai Impact to Water Ice on Mercury. *J. Geophys. Res.: Planets*, V. 123, pp. 2628 – 2646 (2018)
- Frantseva, K.; Nesvornyy, D.; Mueller, M.; van der Tak, F.F.S.; Loes ten Kate, I.; Pokornyy P.: *Exogenous delivery of water to Mercury*. *Earth and Planetary Astrophysics* (2022)
- French, B.M.; *Traces of Catastrophe: A Handbook of Shock–Metamorphic Effects in Terrestrial Meteorite Impact Structures*. LPI Contribution No. 954, Lunar & Planetary Institute, Houston., 120 p. (1998)
- Head, J.; Baker, D.; Fassett, C.; Kadish, S.; Schon, S.; Prockter, L.; Murchie, S.; Robinson, M.; Solomon, S.; Strom, R.: The Transitions from Complex Craters to Multi-Ring Basins on Mercury: New Insights from MESSENGER Data, EGU General Assembly 2010, p.5497 (held 2-7 May, 2010 in Vienna, Austria)
- Herrick, R.R.: Butterfly Ejecta. In: Hargitai, H., Kereszturi, Á. (eds) *Encyclopedia of Planetary Landforms*. Springer, New York, NY (2015)
- Herrick, R. R.; Bateman, E. M.; Crumpacker, W. G.; Bates, D.: Observations from a global database of impact craters on mercury with diameters greater than 5 km. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 123, 2089–2109 (2018)
- Ivanov, B: Size-Frequency Distribution Of Asteroids And Impact Craters: Estimates Of Impact Rate. In: Adushkin, V., Nemchinov, I. (eds) *Catastrophic Events Caused by Cosmic Objects*. Springer, Dordrecht (2008)
- Luo, X.-Z.; Zhu, M.-H.; Ding, M.: Ejecta pattern of oblique impacts on the Moon from numerical simulations. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 127, e2022JE007333 (2022)
- MELOSH, H.J.; *Impact cratering: A geologic process*. New York: Oxford University Press. p 245 (1989)
- Minton, D.A.; Fassett, C.I.; Hirabayashi, M.; Howl, B.A.; Richardson, J.E.: The equilibrium size-frequency distribution of small craters reveals the effects of distal ejecta on lunar landscape morphology, *Icarus*, Volume 326, p 63-87 (2019)

- Murchie, S.L.; Vervack, R.J.; Ernst, C.M.; Strom, R.G.: Chapter 13 - Mercury, Editor(s): Spohn, T.; Breuer, D., Johnson T.V.: Encyclopedia of the Solar System (Third Edition), Elsevier, P 283-304 (2014)
- Nesvorný, D., Roig, F.V.; Vokrouhlický, D.; Bottke, W.F.; Marchi, S.; Morbidelli, A.; Deienno, R.: Early bombardment of the moon: Connecting the lunar crater record to the terrestrial planet formation, *Icarus*, Volume 399, 115545 (2023)
- Neukum, G.; Ivanov, B.A.; Hartmann, W.K.: Cratering records in the inner Solar System in relation to the lunar reference system. *Chronology and Evolution of Mars*, Vol. 96, pp. 55–86 (2001)
- Ong, L.; Asphaug, E.I.; Korycansky, D.; Coker, R.F.: Volatile retention from cometary impacts on the Moon, *Icarus*, Volume 207, Issue 2, Pages 578-589 (2010)
- Orgel, C.; Fassett, C.I.; Michael, G.; Riedel, C.; van der Bogert, C.H.; Hiesinger, H.: Re-examination of the population, stratigraphy, and sequence of Mercurian basins: Implications for Mercury's early impact history and comparison with the Moon. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 125, e2019JE006212 (2020)
- Nittler, L.R., Weider, S.Z.: The Surface Composition of Mercury. *Elements*, 15 (1): 33–38 (2019)
- Paige, D.A.; Siegler, M.A.; Harmon, J.K.; Neumann, G.A.; Mazarico, E.M.; Smith, D.E.; Zuber, M.T.; Harju, E.; Delitsky, M.L.; Solomon, S.C.: Thermal stability of volatiles in the north polar region of Mercury. *Science* 339, 300–303 (2013)
- Pierazzo, E.; Melosh, H.J.: Understanding Oblique Impacts from Experiments, Observations, and Modeling. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 28, 141–167 (2000)
- Solomon, S.C.; Byrne, P.K.: The Exploration of Mercury by Spacecraft. *Elements*; 15 (1): 15–20 (2019)
- Shoemaker, E.M.: Why study impact craters? In: *Impact and Explosion Cratering*, ed. DJ Roddy, RO Pepin, RB Merrill, pp. 1–10. New York: Pergamon. 1301 pp. (1977)
- Susorney H.C.M.; Barnouin, O.S; Ernst, C.M.; Johnson, C.L: Morphometry of impact craters on Mercury from MESSENGER altimetry and imaging. *Icarus* **271**, 180–193 (2016)
- Strom R.G.; Sprague A.L.: *Exploring Mercury: the iron planet*. Springer/Praxis, p. 216 (2003)
- Thomas, R.J.; Rothery, D.A.: Volcanism on Mercury. *Elements*; 15 (1): 27–32 (2019)
- Watters, T.; Nimmo, F.: The tectonics of Mercury. In T. Watters & R. Schultz (Eds.), *Planetary Tectonics* (Cambridge Planetary Science, pp. 15-80). Cambridge: Cambridge University Press (2009).