

Analisi preliminare di misure di polarizzazione della luce lunare ottenute mediante reflex digitale e filtro polarizzatore lineare.

Renato Polloni

La luce e la sua polarizzazione.

La descrizione della fisica classica per un'onda elettromagnetica, di cui la luce visibile è l'esempio più noto, è basata su un modello che possiamo brevemente riassumere come segue:

- un'onda elettromagnetica è composta da un campo elettrico ed un campo magnetico
- le intensità dei due campi oscillano nel tempo in contro fase tra loro, ossia una è minima quando l'altra è massima
- le direzioni di oscillazione dei campi sono tra loro perpendicolari, ed entrambe sono perpendicolari alla direzione di propagazione dell'onda
- l'onda si propaga nello spazio vuoto con velocità costante "c" (circa 300000 km/s).

L'onda quindi si sposta nello spazio vuoto, ossia privo di materia, sino a distanza infinita dalla sorgente e la sua energia totale non diminuisce, ma si distribuisce in conseguenza della propagazione su superfici sempre più grandi; a distanza R dalla sorgente, l'energia totale dell'onda nello spazio vuoto è costante ma si distribuisce sulla superficie sferica di raggio R che la circonda, con una intensità in ogni punto di tale sfera inversamente proporzionale ad R elevato al quadrato.

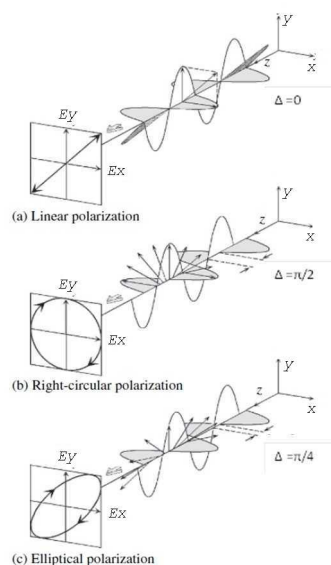
Nel caso della luce visibile, la frequenza di oscillazione del campo elettrico che la compone corrisponde alla nostra caratteristica soggettiva del "colore", con frequenze ed energie che diminuiscono passando dal blu al rosso; viceversa le lunghezze d'onda aumentano, essendo legate alla frequenza tramite la velocità dell'onda con relazione inversa.

Manca ancora una caratteristica dell'onda sempre presente, oltre a frequenza ed energia: la direzione in cui è orientato il suo campo elettrico oscillante, che viene indicata come polarizzazione lineare se tale direzione non cambia nel tempo.

Se invece il vettore del campo elettrico "ruota" attorno alla direzione di propagazione dell'onda, tale direzione varia continuamente nel tempo, con verso della rotazione orario od antiorario: in questo caso si parla di polarizzazione circolare od ellittica.

Per inciso, anche nella trattazione quantistica dell'elettromagnetismo, ove si parla di fotoni e non di onde, frequenza e polarizzazione sono caratteristiche quantistiche intrinseche del fotone:

- la frequenza permette di esprimere il concetto di stato ad energia definita del fotone
- per la polarizzazione si definisce uno stato di polarizzazione del fotone.



L'immagine precedente (credit Merve Karakaya, Research Gate, 2014) è una rappresentazione dei tre possibili stati di polarizzazione di un'onda elettromagnetica, e le relazioni che dei campi elettrico e

magnetico che la compongono.

Per una descrizione quantistica della polarizzazione del fotone, una semplice grafica idealizzata non è di molto aiuto. Nel seguito “dimenticheremo” quindi il fotone, anche se i nostri dispositivi di ripresa ed i nostri occhi “sentono”, per così dire, i fotoni piuttosto che le onde elettromagnetiche.

La polarizzazione delle sorgenti naturali di luce.

Definiti quindi i concetti di onda e della sua polarizzazione, consideriamo la luce emessa dal Sole.

In questo caso, non è più applicabile il concetto di singola onda, poiché, nella teoria, una singola onda ha alla sua origine una singola particella elettricamente carica che oscillando la genera.

Un corpo esteso come il Sole (o meglio la sua superficie luminosa, formata da un numero enorme di particelle che emettono luce) non emette quindi una singola onda ma un insieme di onde, aventi ognuna la propria polarizzazione differente; le differenze della polarizzazione delle onde dipendono in definitiva dalle condizioni fisiche della particella emittente. Nella realtà, questa descrizione è molto idealizzata, non esistono “singole” onde ma insiemi di onde, “pacchetti d'onda” o “treni d'onda”, di cui non parleremo ulteriormente.

Il processo fisico così brevemente descritto, viene espresso in modo semplice dicendo che il Sole emette luce “non polarizzata”, ma preferisco parlare di luce polarizzata casualmente.

Per quanto detto, si potrebbe pensare che il “gioco” sia finito, prima di iniziare ... ossia se la luce solare è polarizzata casualmente un rivelatore di polarizzazione, non rileverà nulla, ossia un grado di polarizzazione della luce a uguale a 0.

Ci sono però processi fisici che modificano la polarizzazione della luce, ossia le interazioni luce-materia, ossia i processi genericamente definiti come “scattering”.

Non stiamo a descriverli, sono ancora una volta, complessi ... anche se io amo dire che la fisica non è complicata, poiché con una manciata di regolarità naturali si descrive praticamente tutto; la complessità è solo caratteristica degli indispensabili strumenti che usiamo per descriverla, ossia, nelle parole di Galilei, il linguaggio matematico.

Alcuni esempi di questi fenomeni di scattering che danno luogo ad una polarizzazione totale o parziale della luce sono ad esempio:

- la luce blu emessa dal cielo diurno, ossia lo scattering Rayleigh dei fotoni luminosi in arrivo dal Sole con le molecole dell'azoto molecolare dell'atmosfera terrestre, che è infatti fortemente polarizzata; per questo motivo esistono gli occhiali da sole polarizzanti, utili però solo ovviamente se è bel tempo, altrimenti ci pensano le nubi, che diffondono la luce solare diminuendone l'intensità senza alterne la polarizzazione...
- la comune riflessione dagli oggetti, che fornisce luce polarizzata con percentuali differenti, a seconda dei seguenti fattori:
 - struttura del materiale
 - caratteristiche superficiali dell'oggetto riflettente
 - frequenza dell'onda elettromagnetica
 - angolo di incidenza sulla superficie .

Nell'ultima categoria sopra indicata rientra anche la luce solare riflessa dalla Luna.

Perché la polarizzazione? E perché quella lineare?

Utilizzando strumenti di rilevazione abbastanza comuni (fotocamere di ripresa digitali, filtri polarizzatori, pc e software per l'analisi statistica dei dati, ho provato ad eseguire alcune osservazioni del grado di polarizzazione della luce lunare, distribuite su varie lunazioni consecutive.

La scelta della polarizzazione lineare è dovuta semplicemente alla natura della polarizzazione della luce riflessa, che è tipicamente lineare.

Anche se i colori delle immagini ricavate mediante gli apparati digitali non sono assolutamente comparabili con le bande di colore utilizzate nella fotometria astronomica, il problema per una indagine semi quantitativa della polarizzazione non è importante, in quanto non mi sono occupato di luminosità e magnitudini, ma solo di percentuali di polarizzazione della luce nelle bande di colore di cui il nostro occhio ha esperienza diretta.

Infine, causa le modalità di ripresa delle immagini necessarie, alle misurazioni non è associato l'errore sperimentale dei dispositivi utilizzati.

Una stima degli eventuali errori è comunque possibile, tramite l'applicazione di metodi statistici all'insieme

dati estratto dalle immagini, utilizzando la deviazione standard ricavata dai dati stessi.

Acquisizione immagini.

Le immagini sono state riprese mediante reflex digitale Pentax KP, dotata di un sensore CMOS da 24.3 Mpixel, posta su un semplice cavalletto fotografico; essendo la Luna molto luminosa i tempi di ripresa sono compresi tra 1/100 - 1/640 secondi, a seconda della fase lunare al momento della ripresa. La brevità dei tempi di esposizione non ha reso necessario alcun dispositivo di inseguimento.

L'ottica utilizzata è un teleobiettivo Pentax DA 50 - 200 mm, impiegato sempre alla massima focale disponibile; con questa focale su un singolo punto sull'immagine della superficie lunare ha dimensioni di circa 4 km.

La polarizzazione è stata misurata utilizzando un comune filtro fotografico Hoya posto davanti all'obiettivo, riprendendo quindi 4 immagini con il polarizzatore ruotato di 45° ad ogni successiva immagine, partendo dalla direzione 0° (intensità della luce polarizzata massima, ossia direzione del campo elettrico dell'onda luminosa parallelo alla direzione di trasmissione del polarizzatore) sino ad un angolo di 135° (passando per il valore 90° corrispondente alla intensità minima della luce polarizzata).

La ripresa delle quattro immagini è necessaria per la successiva valutazione della percentuale di polarizzazione della luce lunare riflessa effettuata mediante il software Iris.

L'angolo viene valutato tramite un anello graduato ottenuto con stampa 3D, con indicate le posizioni angolari 0°, 45°, 90°, 135°; l'anello è inserito sul corpo dell'obiettivo, posteriormente al filtro polarizzatore, avvitato sull'obiettivo. Il riferimento della posizione 0° è stato valutato riprendendo immagini di luce riflessa da uno specchio e/o dalla luce diurna del cielo polarizzata, allineando un indicatore sul filtro rotante con quello della scala angolare fissa.

Elaborazione immagini.

Poiché i tempi di esposizione sono estremamente brevi, non è stata effettuata alcuna correzione di tipo "dark field", necessaria in caso di tempi di ripresa lunghi per eliminare varie tipologie di disturbo dalle immagini.

Non è stata applicata nessuna correzione per i difetti geometrici dovuti all'apparato di ripresa (vignettatura, difetti cosmetici del sensore a livello di singolo pixel, eventuale sporco sulle lenti/sensore, false letture dei valori del sensore dovute alla radiazione cosmica di fondo), definiti come "flat field"; questa scelta è dovuta alla maggiore complessità di ripresa di immagini correttive nel caso della luce polarizzata. Le immagini di "flat field" vengono solitamente riprese su uno sfondo luminoso uniforme (ad esempio il fondo cielo al tramonto) che in questo caso però non è adatto per vari motivi, tra cui:

- il campo di ripresa di una reflex alla focale di 200 mm sul fondo cielo introduce disuniformità a causa delle sue dimensioni
- la rotazione del filtro nella ripresa delle 4 immagini rende necessaria la ripresa eventuale di 4 immagini "flat field", una per ogni orientazione del polarizzatore
- il fondo cielo è un emettitore di luce polarizzata con caratteristiche differenti da quelle della luce lunare e quindi è inadatto per un utilizzo di questo tipo.

Non avendo a disposizione un dispositivo con cui riprendere "flat field" indipendentemente dal fondo cielo, ho deciso quindi di non effettuare questo tipo di correzione.

Le immagini riprese con le 4 differenti orientazioni del polarizzatore, vengono quindi sottoposte alla seguente procedura tramite il software Iris:

1. mutuo allineamento geometrico delle 4 immagini
2. separazione per le componenti R, G, B delle delle 4 immagini allineate al punto 1); i colori considerati appartengono allo spazio di colore (standard internazionale) della reflex, che non fornisce letture numeriche paragonabili a quelle di un sistema fotometrico utilizzato nella fotometria astronomica)
3. le 12 immagini ottenute al punto 2) vengono sovrapposte creando due "mappe" della polarizzazione lunare, contenenti rispettivamente:
 - la percentuale di luce polarizzata riflessa dalla Luna
 - la direzione dell'angolo di polarizzazione della luce riflessa rispetto al piano definito dall'immagine.

Analisi dei dati.

Generalità.

Le immagini (nei tre canali di colore descritti sopra) contengono una mole notevole di informazione. Per una lettura efficiente del valore di ogni singolo punto della superficie lunare sarebbe necessario automatizzare l'intera procedura.

Lo sviluppo un software automatizzato di questo tipo è comunque un lavoro estremamente complesso, causa la natura del problema, ossia:

- necessaria definizione di un sistema di riferimento comune a tutte le immagini
- roto-traslazione delle immagini
- variazione di scala delle immagini, essendo le dimensioni angolari della Luna variabili nel tempo (spesso impercettibilmente per una osservazione ad occhio nudo), a causa del moto orbitale ellittico della Luna attorno alla Terra.

In tal modo i dettagli superficiali lunari sarebbero ricondotti a posizione, orientamento (coordinate luna-centriche) e dimensione univoche ed invarianti, indipendenti quindi dal corso di una particolare lunazione e dalle particolari condizioni ed orario di ripresa.

Ma questa analisi automatizzata dell'intera superficie lunare non è attualmente possibile.

Ho quindi deciso di seguire nel corso di più giorni e lunazioni, un certo numero di strutture lunari particolarmente interessanti, per le caratteristiche topografiche e fotometriche; ho cercato il più possibile di "campionare" la superficie lunare regolarmente, in longitudine e latitudine, pur tenendo conto delle differenze superficiali lunari, ossia presenza di "mari" e "terre", crateri e suddivisione dell'emisfero lunare a noi visibile in "terre alte" e "terre basse", in termini di nomenclatura lunare.

La seguente tabella 1 fornisce l'elenco ed alcune macro caratteristiche delle strutture lunari esaminate.

Nome	Longitudine Est(°)	Latitudine Nord(°)	ΔVisibilità(età)	Morfologia	
Grimaldi	-68.363	-5.375	14 – 23	cratere	scuro
Mons Hansteen	-50.215	-12.195	14 – 23	monte	chiaro
Aristarchus	-47.49	23.73	12 – 23	cratere	chiaro
Letronne A	-39.099	-12.148	12 – 23	cratere	chiaro
Mare Humorum	-38.572	-24.478	12 – 23	mare	scuro
Encke	-36.683	4.571	12 – 23	cratere	chiaro
Dunthorne	-31.706	-30.119	12 – 23	cratere	chiaro
Pytheas	-20.594	20.587	12 – 23	cratere	chiaro
Copernicus	-20.079	9.621	12 – 23	cratere	chiaro
Pitatus	-13.527	-29.882	12 – 23	cratere	scuro
Plato	-9.383	51.619	9 – 22	cratere	chiaro
Mons Pico	-8.867	45.825	9 – 22	monte	chiaro
Mons Piton	-0.923	40.717	9 – 22	monte	chiaro
Manilius	9.074	14.452	9 – 19	cratere	chiaro
Menelaus	15.929	16.259	7 – 19	cratere	chiaro
Dionysius	17.293	2.773	7 – 18	vulcano	chiaro
Censorinus	32.691	-0.417	7 – 18	cratere	chiaro
Gutenberg A	39.911	-9.028	7 – 18	cratere	chiaro
Proclus	46.894	16.088	1 – 18	cratere	chiaro
Tralles A	47.03	27.423	1 – 17	cratere	chiaro
Endymion	56.483	53.607	1 – 17	cratere	scuro
Mare Crisium	59.104	16.177	1 – 17	mare	chiaro
Langrenus	61.038	-8.86	4 – 17	cratere	chiaro
Condorcet	69.583	12.1	4 – 15	cratere	scuro
Mare Humboldt	81.543	56.922	4 – 15	mare	scuro

Tabella 1

Le latitudini/longitudini sono riferite ad un sistema di riferimento fissato nel centro della Luna e per questo indicate infatti in precedenza come luna-centriche; le coordinate sono state ricavate dall'atlante lunare software Virtual Moon Atlas, un prodotto freeware creato dallo stesso gruppo di astrofili francesi che ha sviluppato il software Iris.

Record dati di una misurazione.

Per ogni singolo elemento sono stati ricavati i valori percentuali della polarizzazione parziale (forniti direttamente da Iris), selezionando un'area di lettura circolare avente diametro in pixel consistente con le dimensioni visibili a video della struttura topografica.

La successiva Tabella 2 presenta un esempio di queste misurazioni.

Data	Δ Data	i (°)	Età della Luna	b	g	r	pixel		<g>	<r>
22.09.2021	0	22.239	16.6	1261	1134	1051	49	25.735	23.143	21.449
24.09.2021	2	44.470	18.4	146	129	126	49	2.980	2.633	2.571
30.09.2021	8	102.435	23.2	1381	1490	1075	81	17.049	18.395	13.272
19.10.2021	27	10.799	14	693	611	538	49	14.143	12.469	10.980
22.10.2021	30	24.624	16.8	57	55	39	49	1.163	1.122	0.796

Tabella 2

Nelle righe della tabella 2 sono codificati vari tipi di informazione, in forma numerica e mediante colori che evidenziano sezioni differenti della tabella.

Una riga nella tabella (record) rappresenta una misurazione alla data indicata.

La struttura di un record è suddivisa idealmente in due sezioni, una contenente i dati identificativi dell'osservazione e l'altra contenente i valori dell'osservazione e grandezze da loro derivate.

La prima sezione è contenente:

- **Data** (giorno, mese anno)
- **Δ Data** (numero di giorni a partire dall'inizio della serie, 22/09/2021)
- **i** (angolo lunare di fase, gradi e frazioni decimali di grado, ottenuto tramite planetario software freeware Stellarium)
- **Età della Luna** (numero di giorni trascorsi dall'inizio del mese lunare, ottenuto tramite planetario software freeware Stellarium).

Nella seconda sezione si trovano:

- **b** (intensità della polarizzazione per la struttura lunare ricavata tramite Iris, integrati su una superficie di forma circolare e dimensioni in pixel coerenti con quelli della struttura nell'immagine nel canale di colore blu)
- **g** (intensità della polarizzazione per la struttura lunare ricavata tramite Iris, integrati su una superficie di forma circolare e dimensioni in pixel coerenti con quelli della struttura nell'immagine nel canale di colore verde)
- **r** (intensità della polarizzazione per la struttura lunare ricavata tramite Iris, integrati su una superficie di forma circolare e dimensioni in pixel coerenti con quelli della struttura nell'immagine nel canale di colore rosso)
- **pixel** (numero dei pixel utilizzati per la misura ai tre punti precedenti; viene fornito da Iris durante la misurazione)
- **** (media di b, ossia b/pixel)
- **<g>** (media di g, ossia g/pixel)
- **<r>** (media di r, ossia r/pixel).

Significato dei colori nella tabella.

Nella Tabella 2, tramite colori differenti sono state codificate:

- informazioni già presenti nei record stessi, ma che risultano in tal modo più evidenti ad una prima lettura; mediante il colore di fondo delle singole celle contenenti dati temporali, grigio chiaro o bianco alternati nella tabella, è indicata l'appartenenza del giorno indicato ad una lunazione
- informazioni di avviso di coerenza del dato; il colore di fondo delle celle contenenti le misurazioni è giallo quando il dato non è stato utilizzato nelle analisi successive, causa dubbi sulla qualità dell'osservazione stessa (qualità del cielo e condizioni meteo, ad esempio)
- informazione sull'intensità dell'attività solare nel giorno dell'osservazione; per analizzare una eventuale dipendenza della polarizzazione lunare dall'attività solare (vedi sezione successiva, **Risultati Preliminari**), per il colore del campo contenente la data sono stati utilizzati i colori rosso, arancio, verde e bianco, indicativi dell'intensità solare (flusso di particelle emesse dal Sole in arrivo)

sul sistema Terra-Luna), con scala di intensità che aumenta dal colore bianco al rosso.

Risultati preliminari.

Un primo risultato dell'analisi dati è una apparente tendenza alla variazione dei valori della polarizzazione (nel canale di colore blu), nel corso di 4 lunazioni esaminate sino ad ora.

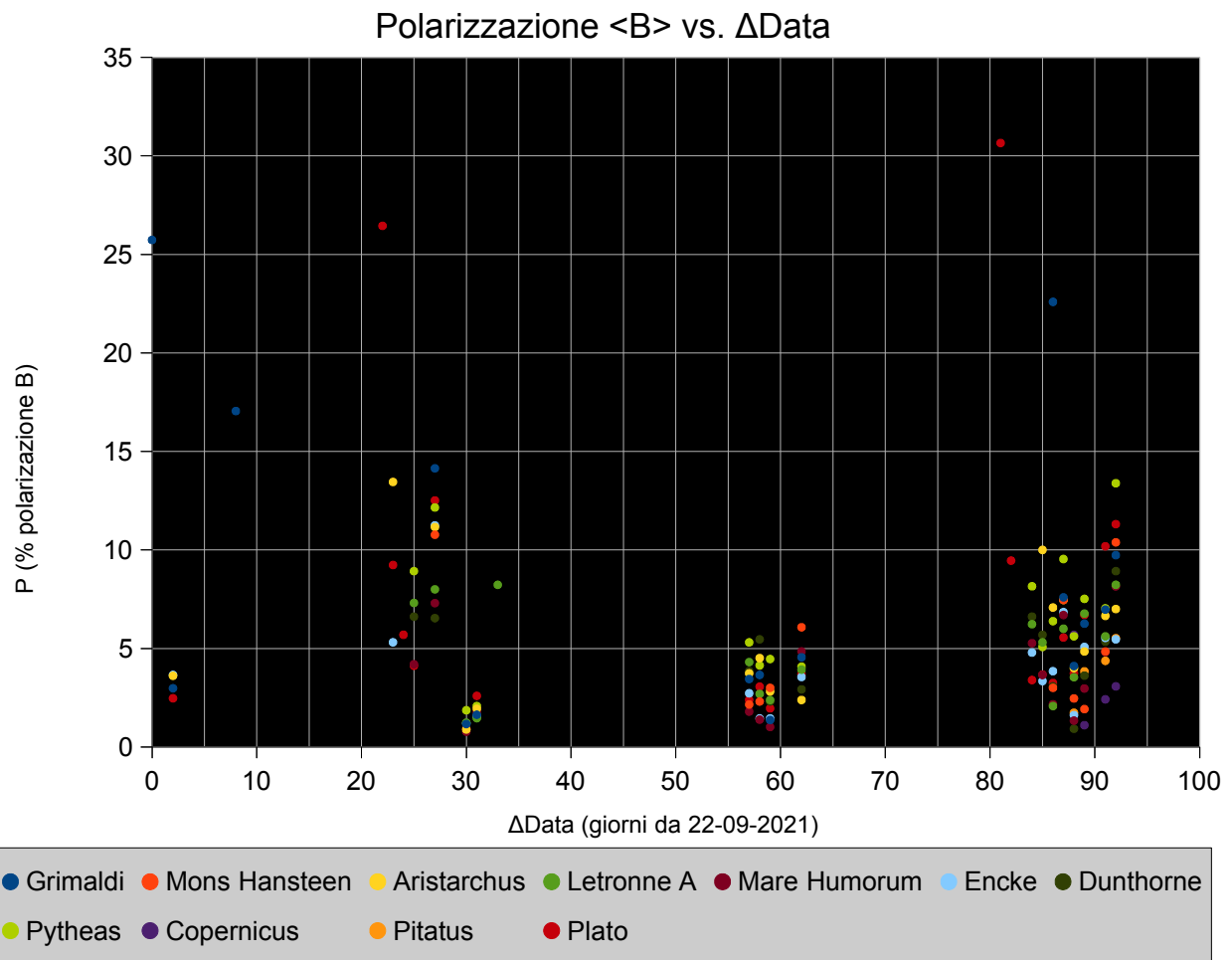
Questa modulazione deve essere verificata esaminando un maggior numero di osservazioni ma ritengo possa essere imputabile agli effetti dell'attività solare che varia in modo non prevedibile con tempi scala dell'ordine del giorno.

Nel corso delle lunazioni considerate, un indice empirico (calcolato a partire dai dati relativi all'attività solare) che descrive l'emissione di particelle cariche e radiazione elettromagnetica di elevata energia dal Sole, è variato nel modo seguente:

Lunazione	1	2	3	4
Plenilunio	21.09.21 giorno 0	20.10.21 giorno 28	19.11.21 giorno 58	19.12.21 giorno 88
indice	3	2.22	1.6	2.77

Tabella 3

L'effetto, particolarmente intenso per alcune formazioni lunari, potrebbe essere collegato ad emissione per fluorescenza di luce polarizzata da parte di alcuni minerali, presenti sulla superficie lunare ed attivati dal flusso di particelle emesse dal Sole nelle ore/giorni precedenti le osservazioni. Eventuali conferme richiederanno il confronto con un maggior numero di lunazioni.



Nel grafico precedente risalta chiaramente il maggior numero di osservazioni eseguite nel mese di dicembre 2021, con la distribuzione dati più regolare e priva dei “buchi” visibili ad esempio nella lunazione 2.

I valori del grado di polarizzazione che si discostano maggiormente rispetto ad un valore “medio ideale” sono quelli dei crateri **Grimaldi** (4 volte superiore) e **Plato** (5 volte superiore), che hanno (vedi Tabella 1) caratteristiche geografiche / geometriche differenti.

Il caso del cratere **Plato** è particolarmente interessante, in quanto mostra su un periodo di alcune lunazioni una variazione apparentemente ripetitiva, per valori dell'angolo di fase di circa 70°; anche questo comportamento è comunque da verificare estendo l'analisi su un maggior numero di lunazioni rispetto a quelle considerate in questa analisi preliminare.

Il cratere **Aristarco** (struttura particolarmente appariscente della superficie lunare a causa della sua brillantezza) non ha mostrato invece variazioni elevate del grado di polarizzazione; fotometria e polarimetria della superficie lunare non appaiono quindi (ad una prima analisi) correlate tra loro.