

Relazione di Laboratorio di Astrofisica – il Transito di Mercurio

di Francesco Castiglioni e Domenico Cicogna

Indice

Introduzione	2
Strumentazione e procedimento di studio.....	5
Questione dell'errore	5
Tabelle dei dati.....	7
Tabelle Germania 1 (Dr. Björn Kattentidt).....	7
Tabelle Perù (Dr. José Ricra)	10
Tabelle Grecia (Dr. Emmanouil Kardasis)	13
Tabelle Paesi Bassi (Dr. Henk de Groot).....	14
Tabelle Germania 2 (Dr. Wolfgang Beisker).....	16
Tabelle Germania 3 (Dr. Wolfgang Beisker).....	18
Tabelle MIT (Dr. Tim Brothers).....	20
Analisi dati	23
Fase d'ingresso	27
Fase di uscita	27
Errore sul tempo	28
Risultati e conclusioni	29
Metodo alternativo	32

Introduzione

La seguente relazione di Laboratorio di Astrofisica verte sullo studio del transito di Mercurio, avvenuto il giorno 9 Maggio 2016, al fine di effettuare una misura del diametro solare e in particolare valutare se vi è stata una qualche variazione significativa rispetto al valore standard.

Questo evento è stato il quinto transito del secolo, e il terzo di questo specifico pianeta, in quanto gli altri due riguardavano Venere. Volendo mettere a confronto i transiti dei due pianeti, quello di Venere ha presentato una fase di ingresso e uscita di circa 20 minuti, mentre le fasi del transito di Mercurio non eccedono oltre i 4 minuti, rendendo di fatto lo studio in questione più complicato.

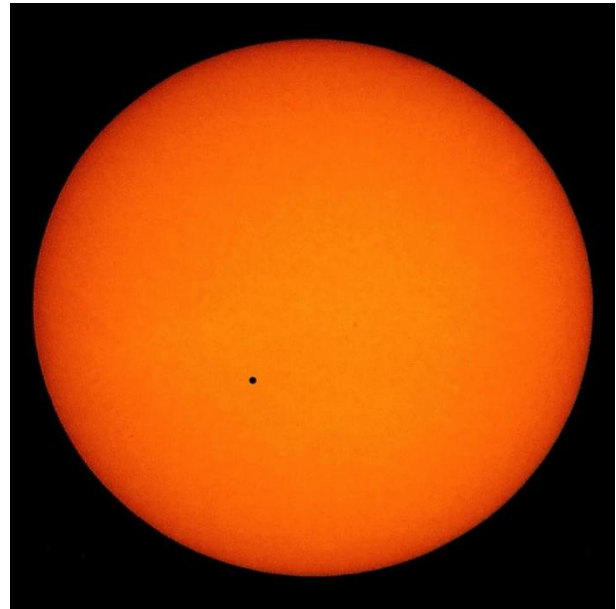
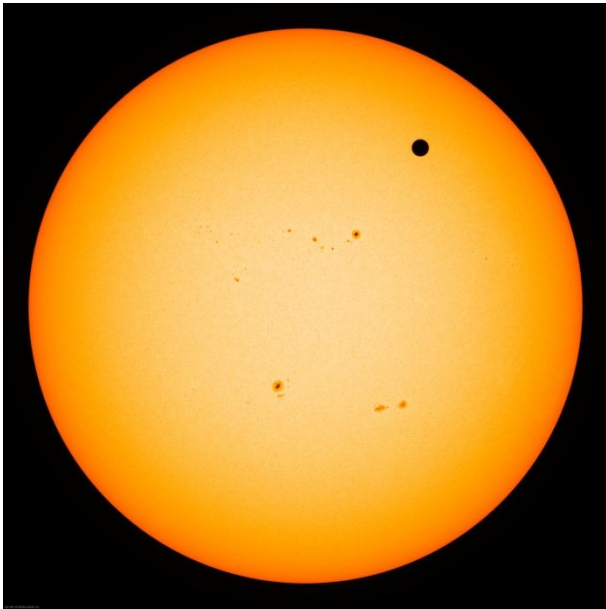
Il raggio solare nei modelli teorici è definito come la regione fotosferica dove la profondità ottica è uguale all'unità. Nella pratica però non vi è un unico metodo per stimare questa regione. Le due più usate sono l'analisi dei modi f dell'eliosismologia ed il punto d'inflessione della Limb Darkening Function. A seconda del metodo usato, la differenza può essere tra i 200 e i 300 km (0.276 – 0.414 ").

I valori moderni in letteratura per il raggio solare variano in un range che spazia da 958.54 ± 0.12 " a 960.62 ± 0.02 ". Nella pratica si prende come valore standard 959.63 ", utilizzato anche in questo studio.

Per capire l'importanza di studi di questo tipo che coinvolgono la fisica solare, sono illuminanti le parole del professor Egidio Landi degli Innocenti: *“È interessante osservare che in questo ultimo mezzo secolo abbiamo assistito in astrofisica a una notevolissima fase di scoperte che può a buon diritto essere chiamata fase di serendipità”*, dove, con quest'ultimo vocabolo, si intende la possibilità di compiere importanti scoperte sostanzialmente per “colpi di fortuna”. Esempi caratteristici ed eclatanti sono le scoperte della radiazione di fondo a 3 K, delle pulsar, delle sorgenti a raggi X, dei jet extragalattici, dei buchi neri, dei burst di raggi γ , ecc.. Tale fase di scoperte è coincisa con l'apertura di nuove “finestre” dello spettro elettromagnetico che erano rimaste, per così dire, oscurate prima di allora. Bisogna però riflettere sul fatto che non esistono più nuove finestre da aprire ed è quindi abbastanza logico aspettarsi che, nel futuro, possa avvenire una sorta di “ripiegamento” verso la Fisica Solare proprio perché i meccanismi fisici che sono alla base di gran parte della fenomenologia osservata (dalle instabilità dinamiche e magnetoidrodinamiche ai meccanismi di accelerazione di particelle, alla conversione di energia magnetica o dinamica in energia raggiante) possono essere studiati sulla stella Sole con maggior dettaglio e precisione.

La possibilità che il raggio solare abbia variazioni è una domanda importante, la cui risposta ha implicazioni sulle nostre conoscenze delle strutture sia dinamiche che statiche dell'interno del Sole. Inoltre può anche fornire nuove argomentazioni su fenomeni che riguardano direttamente la Terra, come il problema del riscaldamento globale.

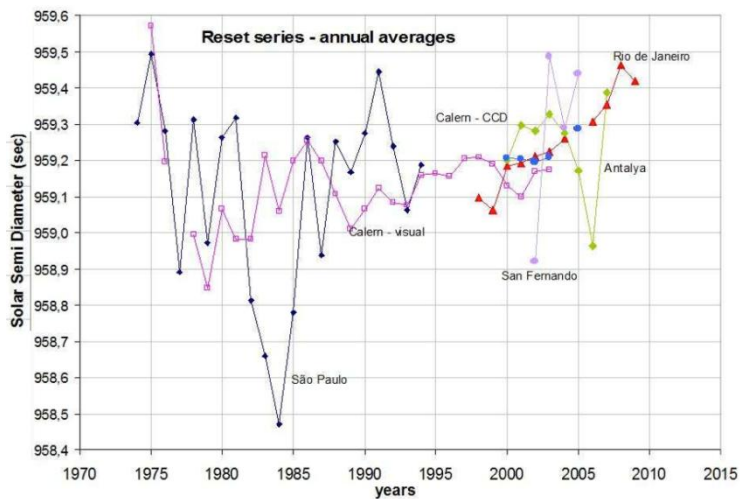
Lo studio del tempo impiegato da un pianeta a transitare davanti al Sole fornisce, in linea di principio, uno dei metodi più accurati per misurare il diametro solare e le sue potenziali variazioni. Rispetto al transito di Venere, che nel 2015 ha presentato una fase di ingresso e una di uscita di circa 20 minuti, le fasi del transito di Mercurio non eccedono i 4 minuti, rendendo di fatto più complicata l'analisi.



Le misure da terra, con cui si è condotto questo studio, rispetto a quelle da satellite, sono limitate dalla risoluzione spaziale con cui si può determinare l'istante di ingresso di Mercurio nel disco solare, a causa del seeing atmosferico che riduce l'accuratezza nelle derivazioni.

Negli ultimi 250 anni sono state compiute circa 2400 osservazioni su 30 transiti di Mercurio. Lo studio complessivo condotto da Parkinson, Manison & Stephenson negli anni '80, volto a determinare le variazioni della rotazione terrestre e fornire un'altra conferma del moto relativistico del perielio di Mercurio, grande conquista della teoria della relatività generale di Einstein, ha fornito numerosi dati sul diametro del Sole, che si è visto diminuire di 0.14 ± 0.08 " dal 1723 al 1973, consistente con i valori teorici dell'analisi di Shapiro, che forniscono una decrescita di 0.15 " per secolo. C'è da dire però come studi teorici paralleli (Sveshnikov et al. 2002) hanno trovato come questa decrescita non ecceda i 0.06 ± 0.03 " per secolo.

Alcuni studi (Sigismondi et al. 2015) hanno inoltre evidenziato come il raggio solare ed il ciclo di 11 anni di attività del Sole presentino una forte anti-correlazione. Questo suggerisce un diametro maggiore in presenza di minor attività, con un comportamento simile a quello del Minimo di Dalton (periodo di bassa attività solare che andò dal 1790 al 1830 circa. Fu così chiamato dal nome del meteorologo inglese John Dalton che lo osservò. La causa precisa del calo sotto la media delle temperature, registrato durante il periodo del minimo, non è ancora del tutto compresa, ma una delle tesi più accreditate afferma che, vista la concomitanza dei flare con le macchie solari, in questi periodi di minimo diminuisca anche l'energia emanata).



Questa possibile correlazione tra dimensioni del raggio solare e periodo di attività ribadisce quanto già detto sull'importanza di fare misure prolungate e ben cadenzate nel tempo sul diametro solare, misure di interesse ed implicazioni tutt'altro che puramente accademiche.

In questo studio l'eventuale variazione del diametro solare viene misurata confrontando i dati sperimentali con quelli teorici delle effemeridi, sotto l'approssimazione di Sole sferico, attraverso l'analisi dei video del transito di Mercurio ottenuti da vari osservatori a terra.

Purtroppo non si è riusciti ad avere i video da satellite (ad esempio da Soho, telescopio lanciato nel 1995 dalla NASA con lo scopo di studiare il Sole) in grado di ridurre sensibilmente gli errori, eliminando il seeing atmosferico, né a supportare l'analisi diretta del transito con una basata sul calo in luminosità del Sole durante il transito, riprendendo il metodo usato per trovare eventuali pianeti extrasolari.

Strumentazione e procedimento di studio

Si è lavorato con una serie di video e foto dell'evento, acquisite da sei diversi osservatori nel mondo, elencati qui di seguito:

1. Osservatorio Astronomico AFAR, Tarma, Perù, Dr. José Ricra
2. IOTA/ES, Francoforte sul Meno, Germania, Dr. Wolfgang Beisker
3. Osservatorio K71, Neutraubling, Germania, Dr. Björn Kattentidt
4. Osservatorio C39, Nijmegen, Paesi Bassi, Dr. Henk de Groot
5. Dr. Emmanouil Kardasis
6. Osservatorio Astrofisico MIT, Boston, USA, Dr. Tim Brothers

Per l'estrazione e l'analisi dei dati sono stati adoperati i seguenti programmi: VLC Media Player, per visionare i video ed estrarre i fotogrammi, Paint, per effettuare misure su immagini e fotogrammi, Excel, per la raccolta dati, ed Origin 9.1, per l'analisi dati. Infine per i dati teorici dalle Efemeridi si è usato il programma Helios, che li fornisce in base alle coordinate geografiche (dell'osservatorio) inserite.

Il procedimento di studio consisteva nel prendere le immagini del transito, attraverso i fotogrammi dei video inviati o le foto stesse, con tanto di tempo in UTC, ed effettuare per ogni fotogramma la misura della distanza tra la superficie del Sole e il punto di Mercurio più lontano in direzione ortogonale alla superficie stessa; si precisò che, date le dimensioni ridotte di Mercurio rispetto a quelle del Sole, 6" del raggio di Mercurio contro i 959,63" di quello solare (standard), si è potuto approssimare la superficie del Sole come fosse stata rettilinea.

Dopodiché, effettuando l'analisi dei dati, dividendoli in base all'osservatorio di provenienza e quindi studiandoli separatamente, e il fitting, sono stati ricavati i tempi dei quattro contatti (ove possibile), i quali sono stati poi confrontati con quelli teorici delle Efemeridi.

Questione dell'errore

Occorre parlare della questione dell'errore. Per quanto riguarda i tempi, l'errore era dell'ordine del millisecondo, mentre per quanto riguardava le distanze, la questione era più complessa. Infatti, vi erano ben quattro fattori che davano origine all'errore sulle distanze:

- risoluzione dei video e delle foto
- seeing
- limb darkening
- black-drop

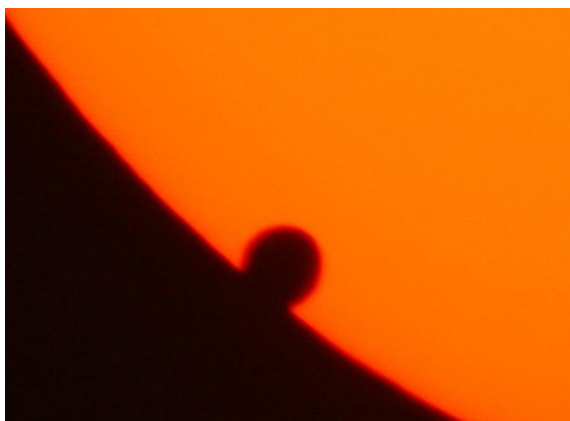
La risoluzione dipendeva dalla qualità delle immagini a nostra disposizione e dalla precisione con cui si riusciva a effettuare la misura; dato che si usava Paint per effettuare le misure sulle immagini, tale errore era dell'ordine del pixel, poi trasformato nel corrispondente errore in arcosecondi, confrontando il valore in pixel del diametro di Mercurio con quello standard in arcosecondi. Ovviamente, si è ottenuto un errore di misura diverso per ogni set di immagini, proveniente da un diverso osservatorio.

Il seeing è legato all'atmosfera e di conseguenza assume un valore diverso a seconda della località e delle condizioni climatiche. Tuttavia, non si aveva a disposizione le informazioni necessarie a ricavare, a priori, un valore del seeing da associare a ciascun osservatorio. Comunque, l'effetto del

seeing era compreso nelle fluttuazioni presenti nelle misure fatte, pertanto non è stato necessario includere un valore del seeing.

Osservando il Sole in maniera quantitativa, risulta evidente il fenomeno dell'oscuramento al bordo o limb darkening, per il quale l'intensità della radiazione solare diminuisce in maniera notevole man a mano che ci si sposta dal centro verso l'esterno. In luce integrata, l'intensità del bordo solare è circa due quinti di quella del centro. Questo fenomeno, ovviamente osservabile solo sul Sole, è stato il primo ad essere interpretato attraverso la teoria del trasporto radiativo, che si è poi notevolmente evoluta ed è oggi alla base dell'interpretazione degli spettri astronomici.

Dato che il nostro studio si concentrava esclusivamente sul bordo del Sole, e considerando le ridotte dimensioni di Mercurio, il fenomeno del limb darkening non ha sortito alcun effetto sulle nostre misure.



Effetto del black-drop, dal transito di Venere

L'effetto del black-drop è un fenomeno ottico visibile durante il transito di un pianeta davanti al Sole. Subito dopo il II contatto e subito prima del III, durante il transito, una piccola goccia scura connette il bordo del pianeta al contorno del Sole, rendendo di fatto impossibile stabilire l'esatto momento in cui avvengono i due contatti.

Osservando l'effetto nei transiti di Venere, si è per lungo tempo ritenuto che fosse legato all'atmosfera del pianeta. Successivamente, dopo averlo osservato anche durante il transito di Mercurio, avente un'atmosfera trascurabile, si


ritenne che fosse dovuto all'effetto combinato dell'atmosfera terrestre e del limb darkening. Ma l'osservazione dell'effetto del black-drop, durante i transiti di Venere e Mercurio anche da parte del satellite Soho, hanno confutato la dipendenza dall'atmosfera terrestre. Ancora oggi resta un problema aperto, senza una spiegazione unanimemente accettata, ma si ritiene che sia esclusivamente un fenomeno ottico dovuto alle imperfezioni degli strumenti d'osservazione e al limb darkening solare.

Comunque questo effetto, che inficia l'osservazione diretta del II e del III contatto, grazie al procedimento di studio, illustrato in precedenza, lo si è potuto trascurare.

Si dovrebbe tenere conto anche del fatto che tutti gli strumenti astronomici, pur trovandosi nello spazio, sono limitati dalla figura di diffrazione; tuttavia, nel caso specifico di questo studio, l'errore associato a tale figura è di alcuni ordini di grandezza minore degli altri contributi, e per questo lo si è potuto completamente trascurare.

Tabelle dei dati

Tabelle Germania 1 (Dr. Björn Kattentidt)



- Risoluzione: 0,22 "
- Tempo di campionamento: 2,961 s

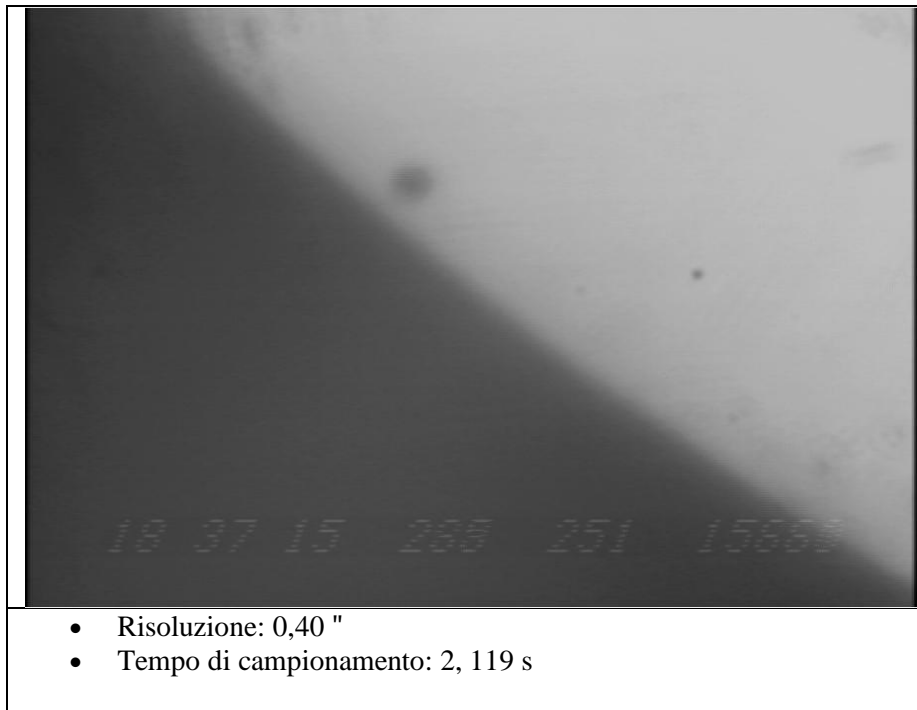
- Notare che i video di questo osservatorio, sono stati gli unici ad avere il tempo locale invece del tempo universale.

Tempi (h:m:	s)	Tempi (s)	Distanza (pixel)	Distanza (")
11:12	36,234	36,234	10,00	2,20
	39,109	39,109	11,00	2,42
	42,171	42,171	11,00	2,42
	45,281	45,281	11,00	2,42
	48,078	48,078	12,00	2,64
	51,171	51,171	14,00	3,08
	54,171	54,171	14,00	3,08
	57,281	57,281	15,00	3,30
11:13	0,234	60,234	14,00	3,08
	1,828	61,828	17,00	3,74
	3,515	63,515	18,00	3,96
	6,906	66,906	16,00	3,52
	9,109	69,109	21,00	4,62
	11,968	71,968	20,00	4,40
	13,515	73,515	21,00	4,62
	16,089	76,089	23,00	5,06
	18,421	78,421	21,00	4,62
	21,968	81,968	24,00	5,28

	23,343	83,343	25,00	5,50
	26,906	86,906	26,00	5,72
	28,859	88,859	27,00	5,94
	31,843	91,843	28,00	6,16
	33,140	93,140	27,00	5,94
	36,906	96,906	29,00	6,38
	38,687	98,687	32,00	7,04
	41,968	101,968	31,00	6,82
	43,406	103,406	33,00	7,26
	46,906	106,906	31,00	6,82
	50,625	110,625	35,00	7,70
	54,000	114,000	34,00	7,48
	56,656	116,656	35,00	7,70
11:14	1,968	121,968	33,00	7,26
	4,968	124,968	41,00	9,02
	9,078	129,078	39,00	8,58
	13,531	133,531	40,00	8,80
	16,921	136,921	41,00	9,02
	18,078	138,078	41,00	9,02
	24,062	144,062	42,00	9,24
	28,453	148,453	44,00	9,68
	34,453	154,453	47,00	10,34
	38,484	158,484	46,00	10,12
	44,187	164,187	50,00	11,00
	48,093	168,093	50,00	11,00
	53,765	173,765	50,00	11,00
	58,437	178,437	52,00	11,44
11:15	3,546	183,546	54,00	11,88
	8,062	188,062	55,00	12,10
	13,171	193,171	58,00	12,76
	18,125	198,125	56,00	12,32
	23,140	203,140	60,00	13,20
	28,437	208,437	60,00	13,20
	32,906	212,906	65,00	14,30
	36,765	216,765	70,00	15,40
	38,500	218,500	66,00	14,52
	41,562	221,562	70,00	15,40
	42,218	222,218	65,00	14,30
	45,593	225,593	67,00	14,74
	48,234	228,234	67,00	14,74
	51,218	231,218	71,00	15,62
	54,296	234,296	70,00	15,40
	57,203	237,203	72,00	15,84
11:16	0,312	240,312	73,00	16,06
	3,171	243,171	74,00	16,28
	7,406	247,406	77,00	16,94
	10,265	250,265	78,00	17,16
	13,39	253,390	76,00	16,72
	16,296	256,296	74,00	16,28
	19,671	259,671	77,00	16,94
	24,093	264,093	84,00	18,48
	27,421	267,421	84,00	18,48
	32,218	272,218	84,00	18,48
	35,39	275,390	82,00	18,04

	40,281	280,281	84,00	18,48
	40,984	280,984	87,00	19,14
	41,625	281,625	87,00	19,14
	45,609	285,609	89,00	19,58
	48,453	288,453	90,00	19,80
	51,578	291,578	90,00	19,80
	53,187	293,187	92,00	20,24
	57,218	297,218	92,00	20,24
11:17	1,625	301,625	94,00	20,68
	4,062	304,062	94,00	20,68
	8,734	308,734	98,00	21,56
	11,375	311,375	96,00	21,12
	13,453	313,453	98,00	21,56
	16,265	316,265	99,00	21,78
	17,484	317,484	101,00	22,22
	18,984	318,984	99,00	21,78
	20,546	320,546	97,00	21,34

Table Perù (Dr. José Ricra)



Tempi (h:m:)	s)	Tempi (s)	Distanza (pixel)	Distanza (")
18:36:	30,725	30,725	65,30	26,12
	32,135	32,135	61,07	24,43
	35,195	35,195	59,55	23,82
	37,268	37,268	58,00	23,20
	39,200	39,200	59,67	23,87
	41,104	41,104	59,41	23,76
	43,203	43,203	60,88	24,35
	45,232	45,232	56,64	22,66
	47,345	47,345	62,29	24,92
	49,143	49,143	57,28	22,91
	51,145	51,145	60,21	24,08
	53,280	53,280	58,80	23,52
	55,383	55,383	56,85	22,74
	57,150	57,150	59,67	23,87
	59,353	59,353	59,03	23,61
18:37:	1,434	61,434	57,45	22,98
	3,590	63,590	58,00	23,20
	5,125	65,125	58,90	23,56
	7,584	67,584	53,26	21,30
	9,280	69,280	55,97	22,39
	11,164	71,164	54,45	21,78
	13,104	73,104	52,80	21,12
	13,668	73,668	56,57	22,63
	15,088	75,088	55,90	22,36
	17,204	77,204	54,20	21,68
	19,208	79,208	53,26	21,30

	21,044	81,044	53,07	21,23
	23,148	83,148	53,04	21,22
	25,045	85,045	49,92	19,97
	27,043	87,043	55,32	22,13
	29,146	89,146	53,76	21,50
	31,084	91,084	50,45	20,18
	33,120	93,120	53,15	21,26
	35,055	95,055	50,33	20,13
	37,050	97,050	46,67	18,67
	39,086	99,086	52,63	21,05
	41,184	101,184	49,20	19,68
	43,196	103,196	46,69	18,68
	45,232	105,232	50,99	20,40
	47,034	107,034	50,45	20,18
	49,036	109,036	44,82	17,93
	51,508	111,508	45,97	18,39
	53,090	113,090	48,92	19,57
	55,243	115,243	48,27	19,31
	56,248	116,248	47,38	18,95
	56,743	116,743	48,79	19,52
	58,543	118,543	40,31	16,12
18:38:	0,013	120,013	43,14	17,26
	2,236	122,236	45,28	18,11
	4,184	124,184	48,08	19,23
	6,159	126,159	45,25	18,10
	8,055	128,055	45,28	18,11
	10,225	130,225	43,84	17,54
	12,236	132,236	45,25	18,10
	15,088	135,088	40,31	16,12
	18,483	138,483	42,43	16,97
	20,200	140,200	41,04	16,42
	23,500	143,500	39,62	15,85
	26,840	146,840	37,54	15,02
	29,048	149,048	40,36	16,14
	33,834	153,834	41,72	16,69
	36,650	156,650	41,04	16,42
	40,384	160,384	36,8	14,72
	42,973	162,973	42,45	16,98
	45,042	165,042	39,62	15,85
	48,112	168,112	38,16	15,26
	51,148	171,148	40,31	16,12
	54,184	174,184	38,16	15,26
	57,087	177,087	37,48	14,99
	59,256	179,256	37,48	14,99
18:39:	1,092	181,092	38,16	15,26
	4,094	184,094	36,07	14,43
	7,198	187,198	36,12	14,45
	10,734	190,734	36,80	14,72
	13,103	193,103	33,97	13,59
	15,406	195,406	33,97	13,59
	18,275	198,275	35,38	14,15
	20,145	200,145	33,24	13,30
	23,144	203,144	30,48	12,19
	25,083	205,083	31,83	12,73

	27,685	207,685	29,70	11,88
	28,952	208,952	31,14	12,46
	29,320	209,320	31,11	12,44
	32,189	212,189	27,66	11,06
	35,160	215,160	29,73	11,89
	38,162	218,162	29,73	11,89
	41,165	221,165	26,25	10,50
	44,235	224,235	28,32	11,33
	47,638	227,638	30,41	12,16
	50,142	230,142	24,04	9,62
	52,376	232,376	28,32	11,33
	55,246	235,246	28,28	11,31
	58,183	238,183	25,46	10,18
18:40:	1,118	241,118	21,21	8,48
	4,156	244,156	25,46	10,18
	7,758	247,758	19,80	7,92
	10,094	250,094	22,63	9,05
	13,164	253,164	17,69	7,08
	15,166	255,166	22,63	9,05
	15,533	255,533	19,10	7,64
	18,168	258,168	22,63	9,05
	21,305	261,305	19,10	7,64
	24,242	264,242	15,56	6,22
	27,278	267,278	18,38	7,35
	30,214	270,214	18,38	7,35
	33,184	273,184	18,38	7,35
	36,154	276,154	15,56	6,22
	39,290	279,290	16,97	6,79
	42,260	282,260	14,87	5,95
	45,096	285,096	15,56	6,22
	48,300	288,300	13,45	5,38
	51,201	291,201	14,14	5,66
	54,205	294,205	12,73	5,09
	57,242	297,242	15,56	6,22
18:41:	0,144	300,144	12,73	5,09
	3,282	303,282	12,73	5,09
	7,118	307,118	9,22	3,69
	10,154	310,154	8,49	3,40
	13,124	313,124	8,49	3,40
	17,328	317,328	7,81	3,12
	21,833	321,833	9,22	3,69

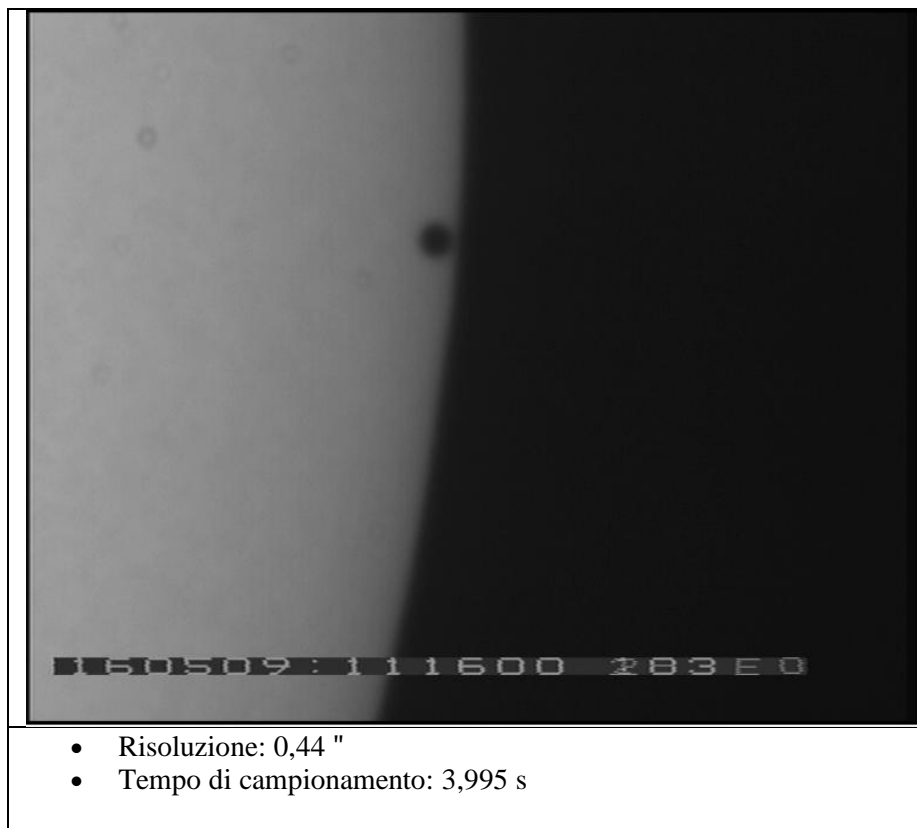
Tabelle Grecia (Dr. Emmanouil Kardasis)



- Risoluzione: 0,25 "
- Tempo di campionamento: 4,444 s

Tempi (h:m:	s)	Tempi (s)	Distanza (pixel)	Distanza (")
11:14:	42,102	42,102	39,00	9,75
	45,034	45,034	39,00	9,75
	49,933	49,933	41,00	10,25
	55,014	55,014	42,00	10,50
	59,879	59,879	42,00	10,50
11:15:	2,062	62,062	43,00	10,75
	5,012	65,012	46,00	11,50
	10,010	70,010	47,00	11,75
	15,008	75,008	48,00	12,00
	19,690	79,690	47,00	11,75

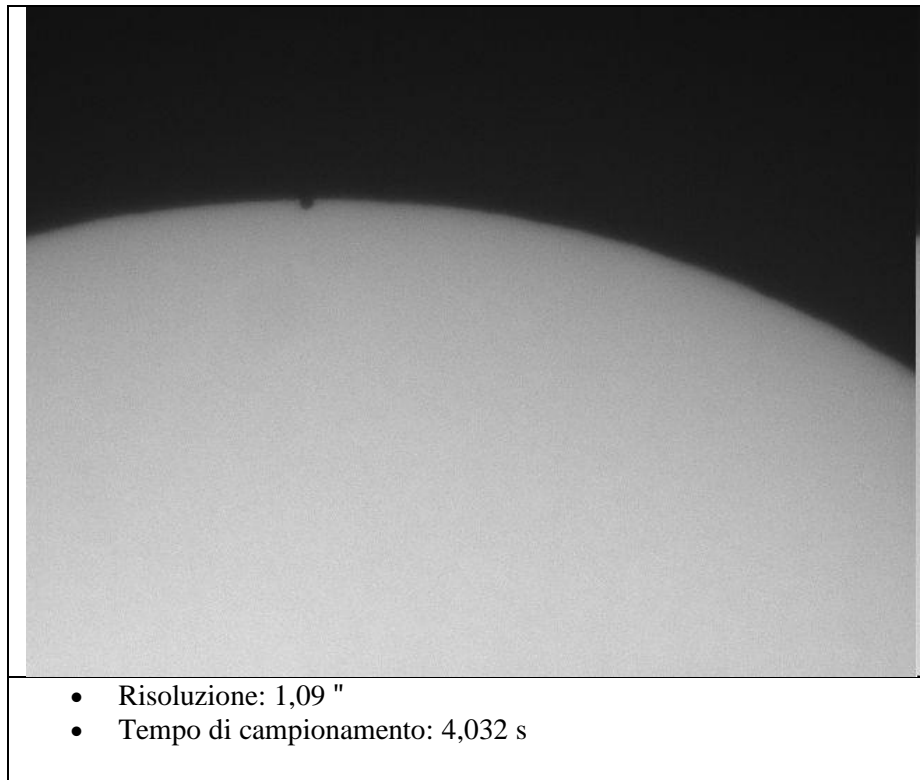
Table Paesi Bassi (Dr. Henk de Groot)



Tempi (h:m:	s)	Tempi (s)	Distanza (pixel)	Distanza (")
11:13	5,301	5,301	6,00	2,64
	9,761	9,761	8,00	3,52
	13,261	13,261	9,00	3,96
	16,681	16,681	11,00	4,84
	21,281	21,281	11,00	4,84
	26,281	26,281	10,00	4,40
	31,081	31,081	11,00	4,84
	36,581	36,581	12,00	5,28
	40,481	40,481	13,00	5,72
	45,881	45,881	13,00	5,72
	50,361	50,361	16,00	7,04
	55,881	55,881	15,00	6,60
11:14	0,681	60,681	15,00	6,60
	5,682	65,682	15,00	6,60
	10,682	70,682	17,00	7,48
	15,282	75,282	19,00	8,36
	20,682	80,682	18,00	7,92
	25,502	85,502	18,00	7,92
	30,282	90,282	19,00	8,36
	35,482	95,482	20,00	8,80
	40,582	100,582	22,00	9,68
	45,482	105,482	21,00	9,24
	51,082	111,082	23,00	10,12

	55,282	115,282	23,00	10,12
11:15	0,282	120,282	25,00	11,00
	6,082	126,082	26,00	11,44
	11,583	131,583	25,00	11,00
	15,703	135,703	27,00	11,88
	20,263	140,263	26,00	11,44
	25,483	145,483	26,00	11,44
	30,083	150,083	25,00	11,00
	35,303	155,303	27,00	11,88
	40,483	160,483	27,00	11,88
	45,683	165,683	29,00	12,76
	50,103	170,103	31,00	13,64
	55,963	175,963	30,00	13,20
11:16	0,283	180,283	32,00	14,08
	5,283	185,283	31,00	13,64
	10,083	190,083	32,00	14,08
	15,903	195,903	34,00	14,96
	20,084	200,084	35,00	15,40
	25,284	205,284	34,00	14,96
	30,364	210,364	36,00	15,84
	35,264	215,264	36,00	15,84
	40,684	220,684	38,00	16,72
	45,504	225,504	38,00	16,72
	50,304	230,304	39,00	17,16
	54,084	234,084	40,00	17,60

Tabelle Germania 2 (Dr. Wolfgang Beisker)

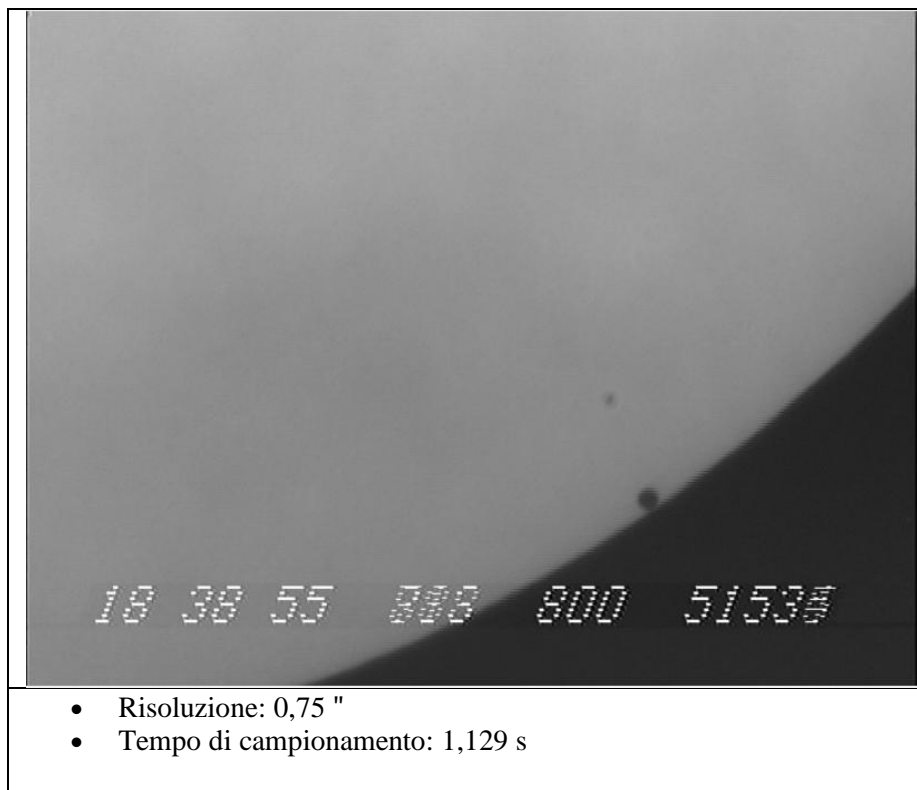


- Notare come in questo caso si trattava di immagini e non di video, e che il tempo non era compreso nell'immagine, al contrario degli altri fotogrammi; tuttavia il tempo era compreso nel nome del file.

Tempi (h:m:	s)	Tempi (s)	Distanza (pixel)	Distanza (")
11:14	2,928	2,928	8,00	8,72
	6,871	6,871	7,00	7,63
	10,746	10,746	8,00	8,72
	14,999	14,999	8,00	8,72
	18,781	18,781	8,00	8,72
	22,637	22,637	8,00	8,72
	26,744	26,744	8,00	8,72
	30,189	30,189	9,00	9,81
	34,676	34,676	9,00	9,81
	38,329	38,329	10,00	10,90
	42,916	42,916	9,00	9,81
	47,052	47,052	9,00	9,81
	50,047	50,047	9,00	9,81
	55,097	55,097	10,00	10,90
11:15	0,083	60,083	10,00	10,90
	5,171	65,171	9,00	9,81
	10,844	70,844	10,00	10,90
	15,541	75,541	10,00	10,90
	20,710	80,710	12,00	13,08
	25,187	85,187	12,00	13,08
	30,207	90,207	13,00	14,17

	35,513	95,513	13,00	14,17
	40,851	100,851	12,00	13,08
	45,568	105,568	13,00	14,17
	50,323	110,323	13,00	14,17
	55,614	115,614	14,00	15,26
11:16	0,966	120,966	13,00	14,17
	5,442	125,442	13,00	14,17
	10,708	130,708	15,00	16,35
	14,326	134,326	14,00	15,26

Tabelle Germania 3 (Dr. Wolfgang Beisker)

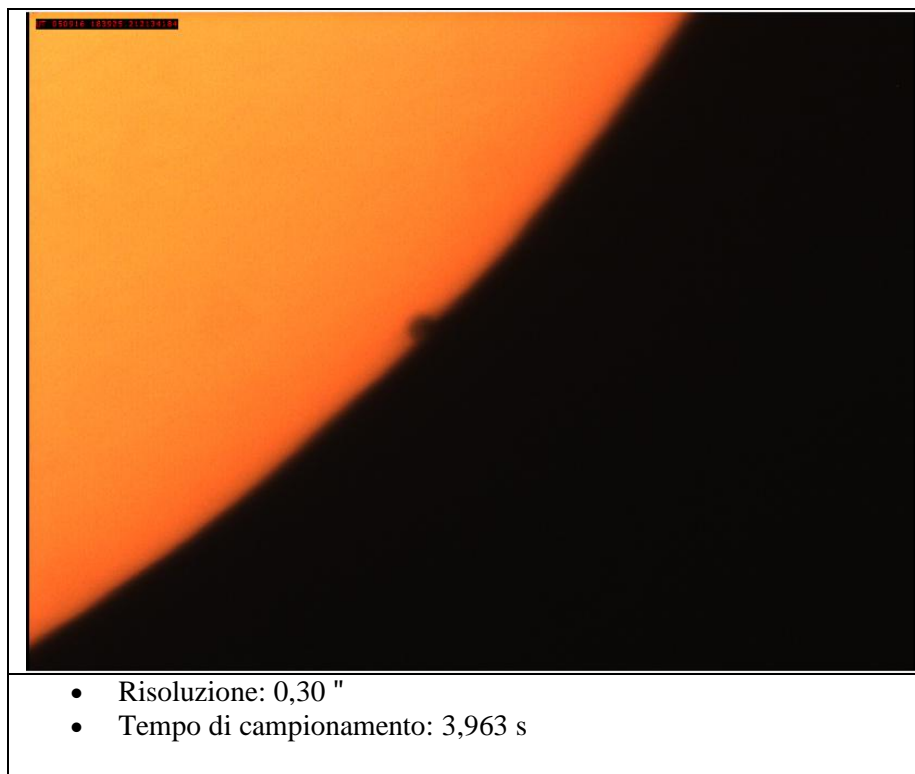


Tempi (h:m:)	s)	Tempi (s)	Distanza (pixel)	Distanza (")
18:38	53,285	53,285	19,21	14,41
	54,299	54,299	18,03	13,52
	55,800	55,800	18,03	13,52
	56,300	56,300	16,64	12,48
	57,802	57,802	15,00	11,25
	58,802	58,802	17,69	13,27
	59,804	59,804	17,20	12,90
18:39	0,805	60,805	17,80	13,35
	1,806	61,806	15,00	11,25
	2,808	62,808	16,64	12,48
	3,309	63,309	15,26	11,45
	4,310	64,310	15,62	11,72
*				
	18,825	78,825	15,26	11,45
	19,826	79,826	14,21	10,66
	20,327	80,327	14,42	10,82
	21,328	81,328	13,04	9,78
	22,329	82,329	13,60	10,20
	23,330	83,330	13,60	10,20
	34,831	94,831	14,21	10,66
	25,833	85,833	12,21	9,16
	26,834	86,834	14,21	10,66
	27,834	87,834	15,26	11,45
	28,835	88,835	11,31	8,48

**				
18:41	15,950	195,950	5,00	3,75
	17,952	197,952	5,00	3,75
	19,952	199,952	5,00	3,75
	21,456	201,456	4,24	3,18
	23,457	203,457	4,24	3,18
	25,460	205,460	5,00	3,75
	27,961	207,961	2,83	2,12
	29,964	209,964	4,24	3,18
	31,465	211,465	2,83	2,12
	33,467	213,467	2,83	2,12
	35,469	215,469	3,61	2,71
	36,473	216,473	2,24	1,68

- * il motivo di tale salto temporale è il passaggio di una nuvola davanti allo strumento che ha oscurato la visuale.
- ** il motivo di tale salto temporale è che i dati dal 41esimo minuto in poi appartengono ad un secondo video, diverso dal primo, e non si disponeva di un video intermedio tra il 39esimo e il 41esimo minuto.

Tabelle MIT (Dr. Tim Brothers)

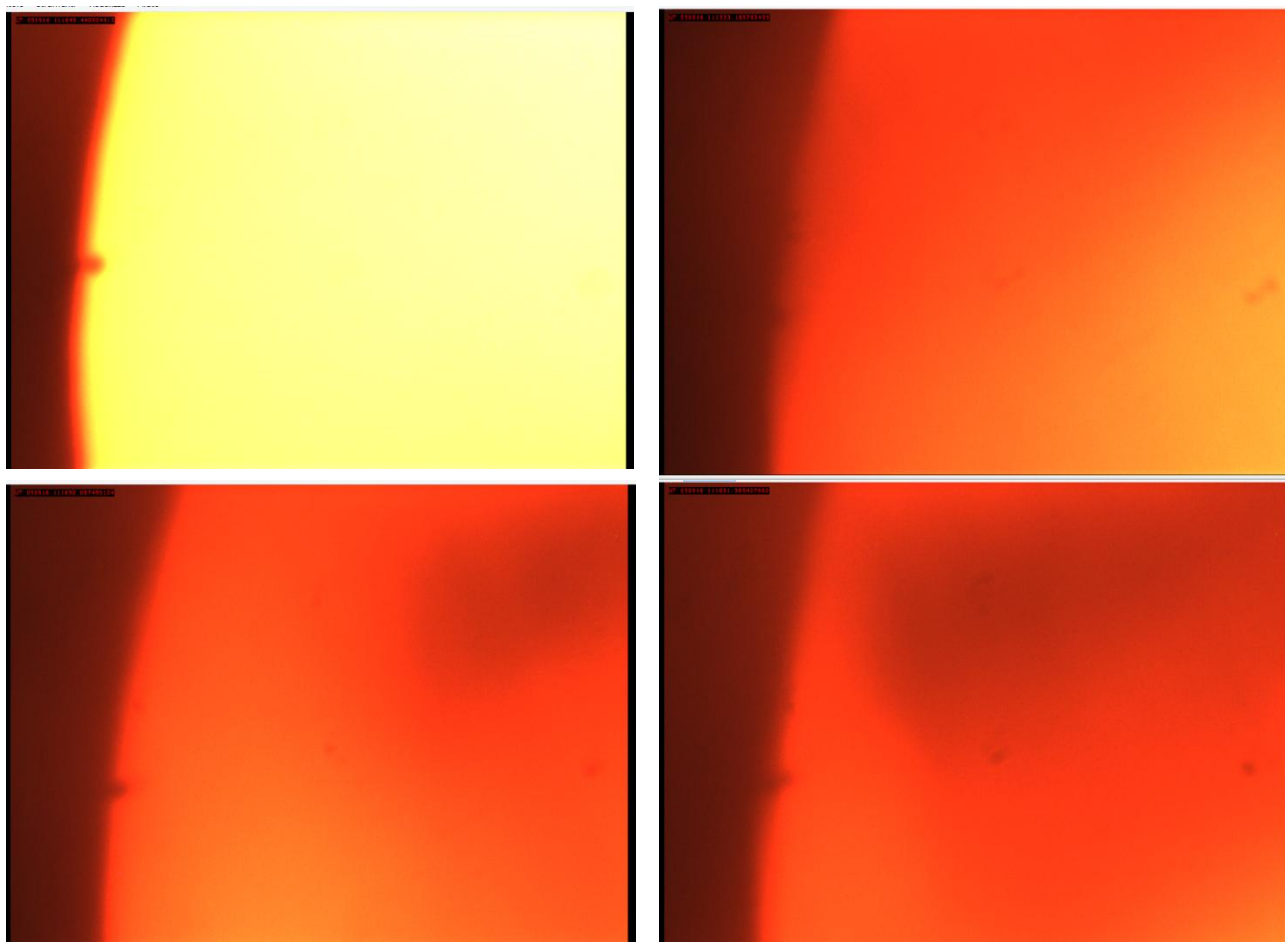


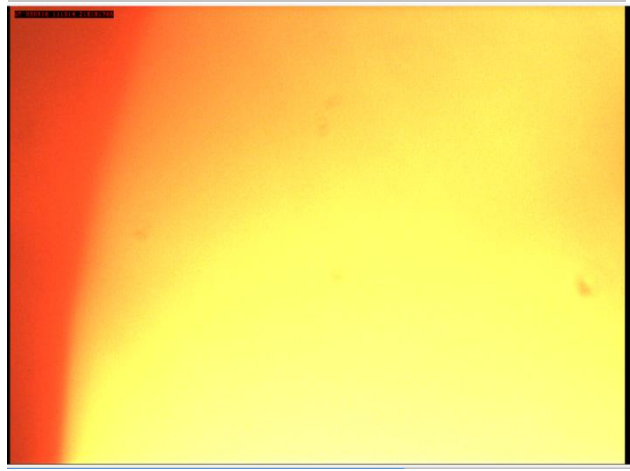
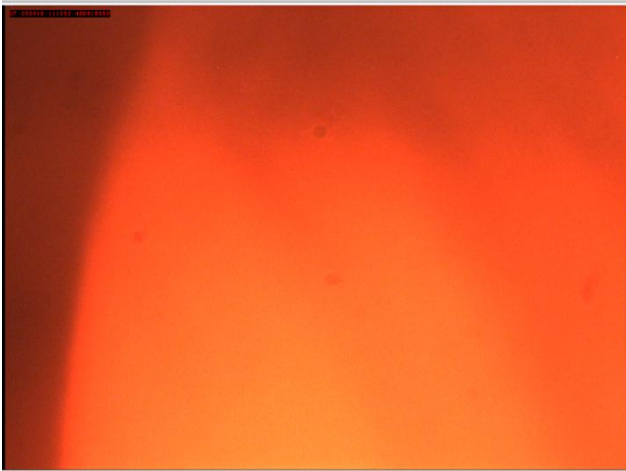
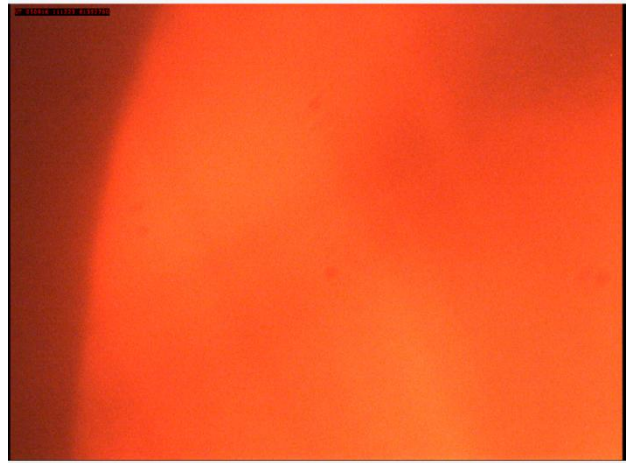
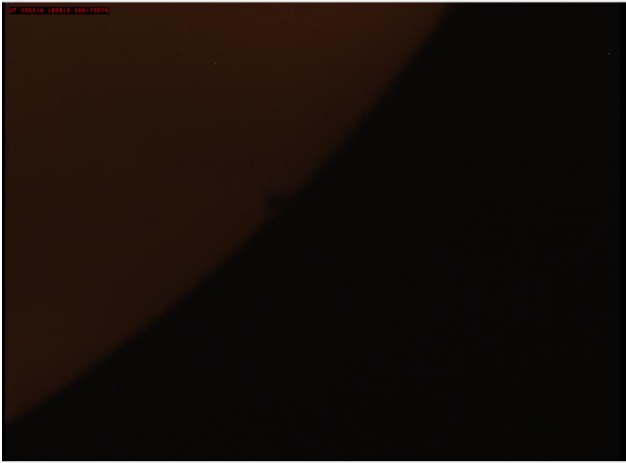
- Notare che i video dell' MIT presentavano una precisione temporale dell'ordine del nanosecondo; tuttavia, per lo studio dei dati ci si è limitati al millisecondo.

Tempi (h:m: s)	Tempi (s)	Distanza (pixel)	Distanza (")
18:38	32,297	36,12	10,84
	35,297	35,35	10,61
	37,424	35,35	10,61
	39,388	33,24	9,97
	42,225	34,71	10,41
	45,226	32,53	9,76
	47,191	33,94	10,18
	49,481	33,24	9,97
	52,645	31,83	9,55
	54,177	33,11	9,93
	57,828	31,83	9,55
18:39	1,591	61,591	31,83
	4,482	64,482	29,73
	6,391	66,391	29,70
	8,410	68,410	28,28
	10,428	70,428	31,11
	13,265	73,265	30,41
	15,452	75,452	28,28
	18,011	78,011	27,59
	20,576	80,576	26,17
	23,141	83,141	27,59

	24,177	84,177	24,08	7,22
	27,505	87,505	27,59	8,28
	29,413	89,413	26,17	7,85
	32,304	92,304	26,17	7,85
	34,104	94,104	25,46	7,64
	37,213	97,213	25,49	7,65
	39,996	99,996	20,52	6,16
	42,287	102,287	24,76	7,43
	44,196	104,196	22,63	6,79
	47,307	107,307	22,63	6,79
	49,215	109,215	20,52	6,16
	54,343	114,343	17,03	5,11

- In verità si potevano contare su un numero maggiore di fotogrammi, ma purtroppo si è dovuto scartare quasi tutti i video a disposizione a causa della loro bassa qualità che rendeva difficile se non impossibile individuare il pianeta Mercurio e stabilire la sua distanza dal bordo del Sole.
- In particolare, dai video è chiaro che i filtri, applicati al telescopio, sono stati rimossi e/o cambiati durante la ripresa dell'evento, con conseguenti effetti quali l'eccessiva luminosità della fotosfera, che "oscurava" la presenza di Mercurio, l'apparente fluttuare del bordo del Sole o la presenza di "ombre" che coprivano (totalmente o parzialmente), la fotosfera.
- Le immagini qui sotto sono estratti dai video scartati e possono dare l'idea del perché siano stati giudicati inutilizzabili:





Analisi dati

Tramite Origin 9.1 si è effettuata l'analisi dei dati, dividendoli in gruppi in base all'osservatorio di provenienza.

Sull'asse delle ascisse si sono messi i tempi in secondi, mentre sull'asse delle ordinate si sono messe le distanze misurate in arcosecondi, e si è effettuato il fitting lineare, del tipo: $y = a + b \cdot x$.

Qui sotto le immagini dei grafici con tanto di fit:

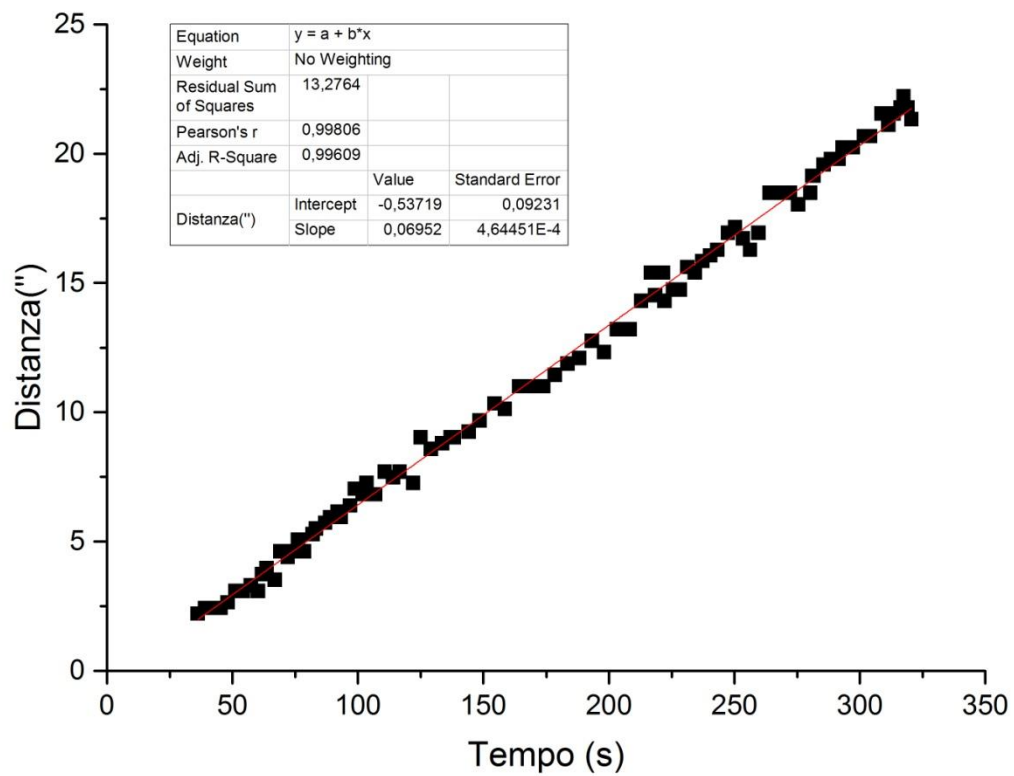


Grafico Germania 1 (Dr. Björn Kattentidt)

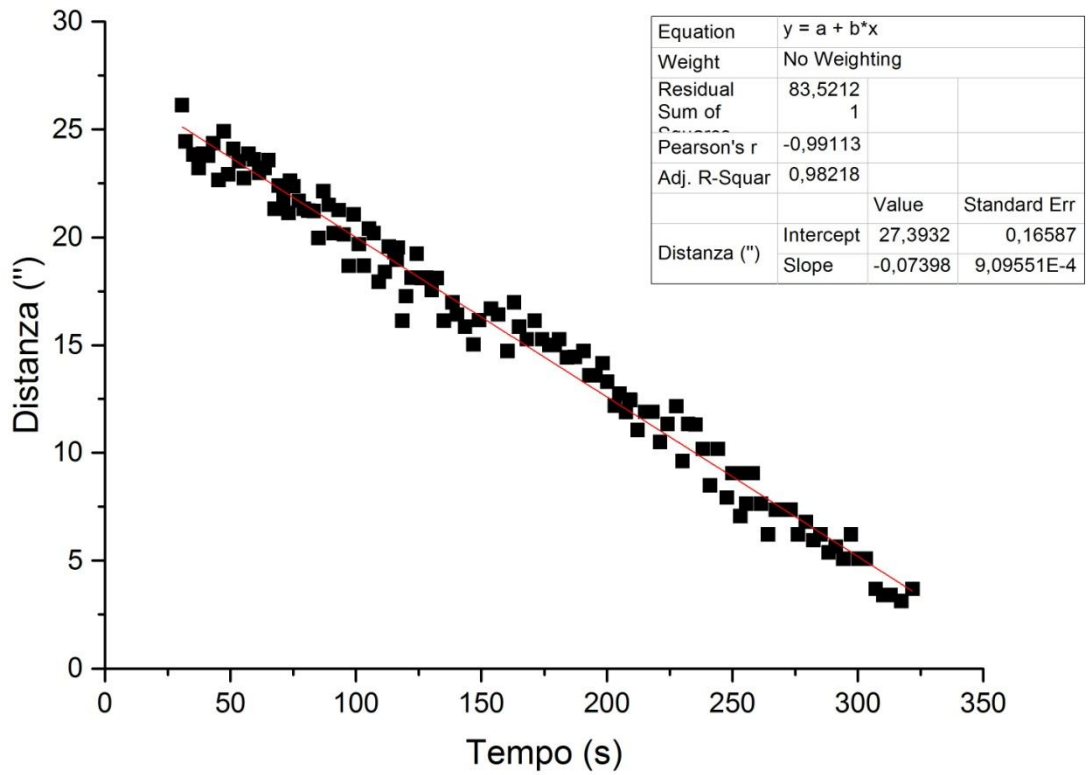


Grafico Perù (Dr. José Ricra)

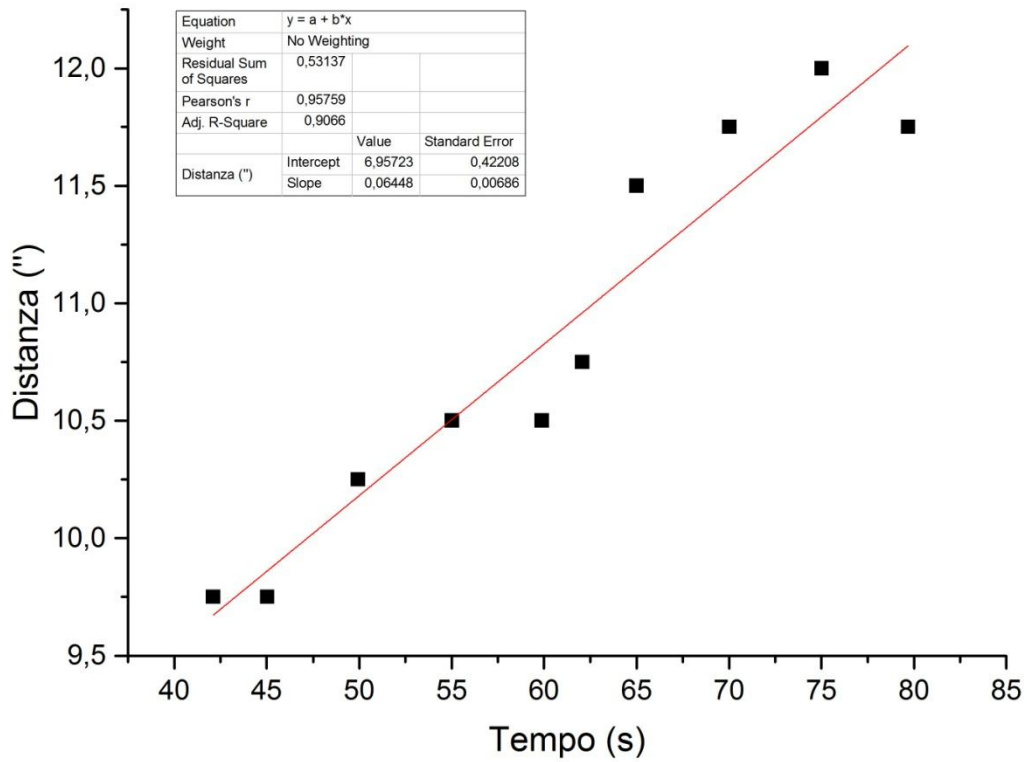


Grafico Grecia (Dr. Emmanouil Kardasis)

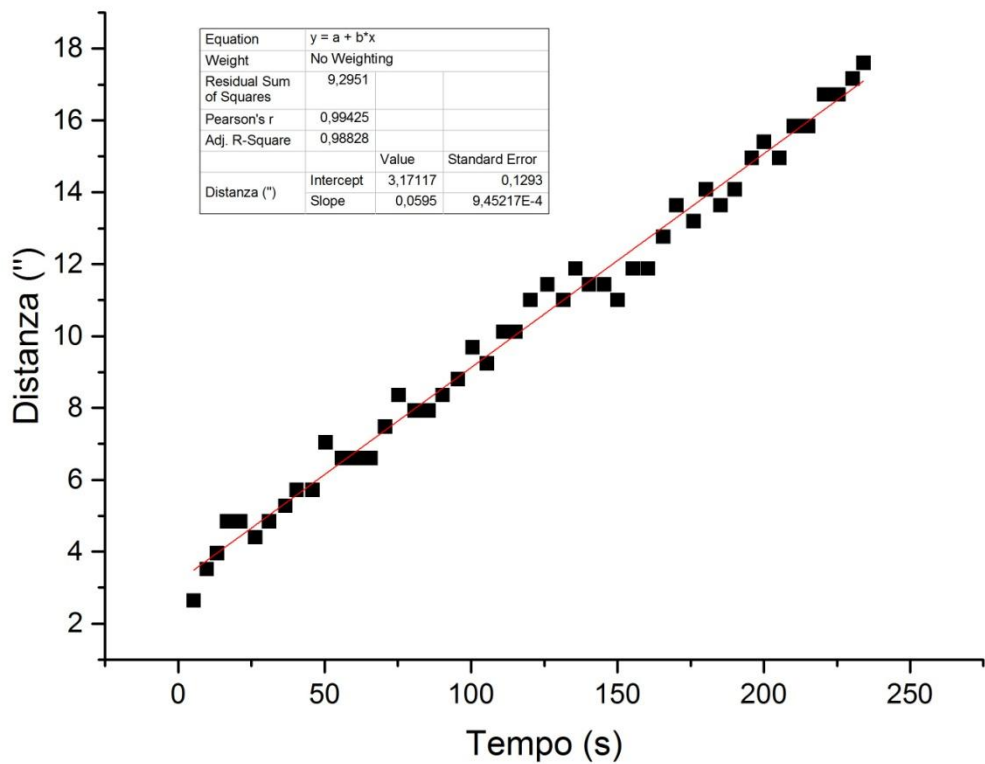


Grafico Paesi Bassi (Dr. Henk de Groot)

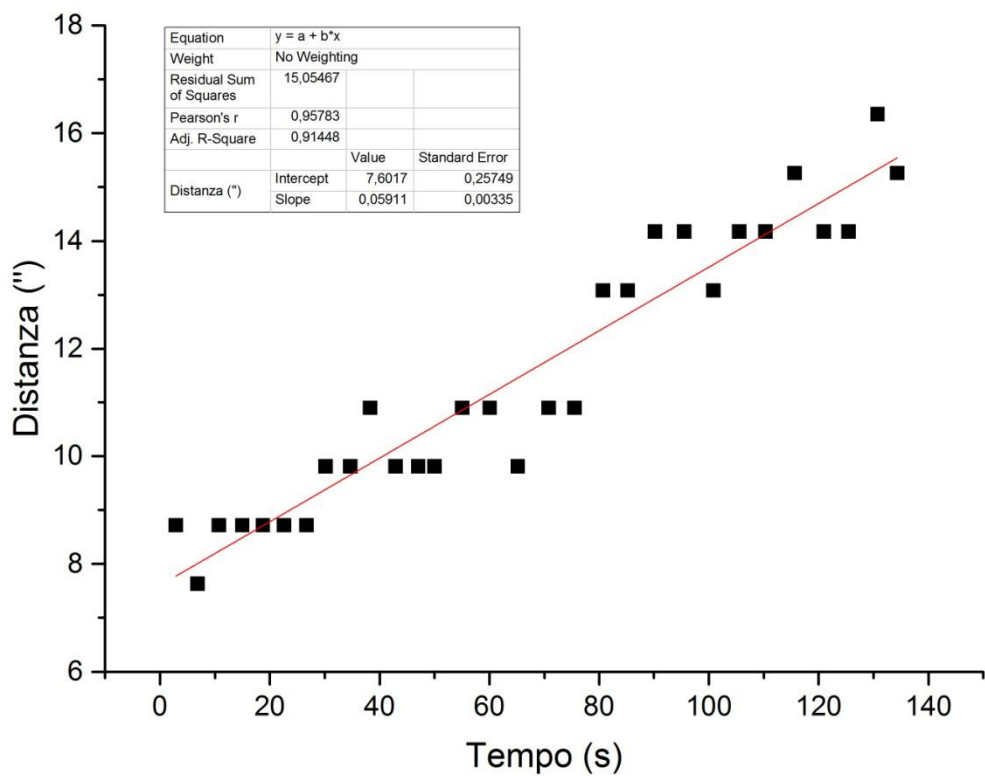


Grafico Germania 2 (Dr. Wolfgang Beisker)

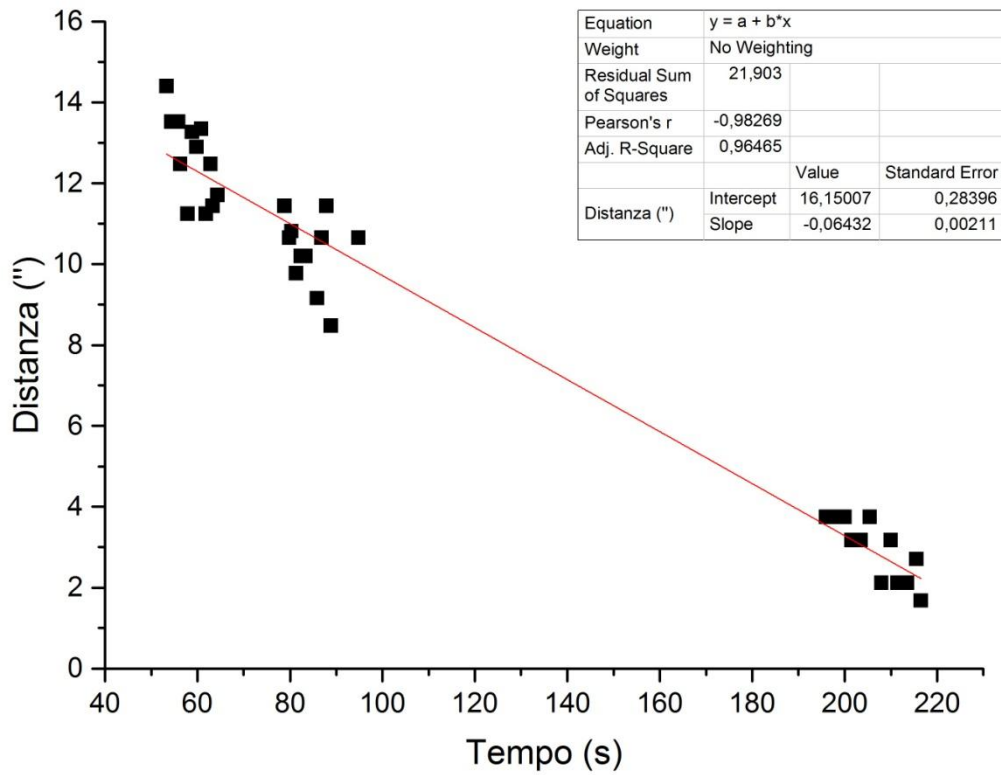


Grafico Germania 3 (Dr. Wolfgang Beisker)

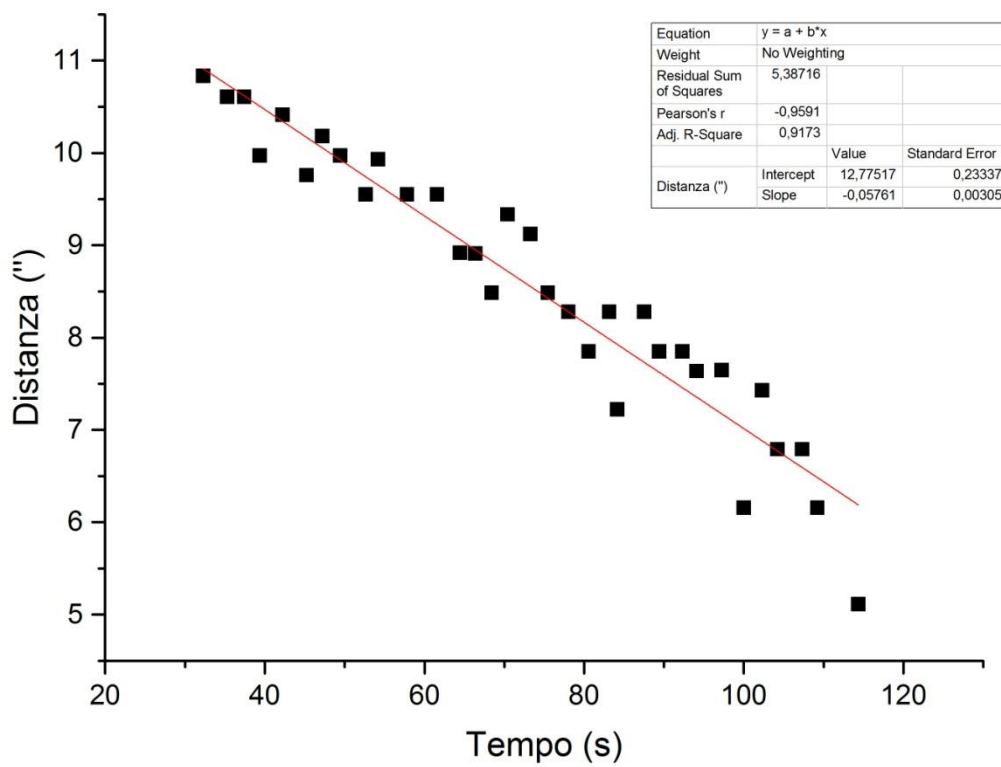


Grafico MIT (Dr. Tim Brothers)

Si riscontra nei grafici un buon andamento lineare, come ipotizzato e supportato dal fitting lineare scelto. Adesso si passa ad esaminare nel dettaglio i vari grafici, dividendoli in base alla fase del transito riportata, e a ricavare i tempi dei contatti interessati.

Fase d'ingresso

Qui si prendono in esame i dati di IOTA/ES, K71, C39 e del Dr. Kardasis, che riguardano la fase d'ingresso del transito di Mercurio.

Per ricavare i tempi di I contatto, si utilizza la funzione del fitting lineare, con i valori delle costanti a (l'intercetta) e b (il coefficiente angolare) ricavati dal fitting stesso; ovviamente (e questo vale anche per la fase di uscita), si sono ottenuti valori diversi per ciascun gruppo di dati.

Se y è la distanza tra la superficie solare e il punto estremo di Mercurio e x è il tempo, in situazione di I contatto $y = 0''$, da cui si ottiene la formula seguente:

$$x = -\frac{a}{b}$$

In tabella i tempi stimati di I contatto:

Osservatorio	Tempo stimato (h:m:s)
Germania 1 (Dr. Björn Kattentidt)	11:12:07,726
Germania 2 (Dr. Wolfgang Beisker)	11:11:51,397
Grecia (Dr. Emmanouil Kardasis)	11:12:12,103
Paesi Bassi (Dr. Henk de Groot)	11:12:06,703

L'errore viene affrontato in seguito.

Fase di uscita

Per ricavare i tempi di IV contatto, si è adoperato lo stesso procedimento illustrato per la fase d'ingresso.

Notare come in fase di entrata, b sia positivo dato che y è monotona crescente, mentre in fase d'uscita b sia negativo essendo y monotona decrescente.

In tabella i tempi stimati di IV contatto:

Osservatorio	Tempo stimato (h:m:s)
Germania 3 (Dr. Wolfgang Beisker)	18:42:11,964
Perù (Dr. José Ricra)	18:42:10,279

MIT (Dr. Tim Brothers)	18:41:41,753
------------------------	--------------

Errore sul tempo

Per quanto riguarda l'errore sul tempo, si è partiti dall'equazione usata in precedenza per calcolare i tempi di I e IV contatto (dove $y = 0$)

$$x = -\frac{a}{b}$$

, ricavando la seguente formula:

$$\Delta x = |x_1 - x_2|$$

, dove si ha:

$$x_{1,2} = -\frac{a \pm \Delta a}{b}$$

Non si è tenuto conto dell'errore sul coefficiente angolare b , in quanto rappresenta la velocità di Mercurio la quale è considerata costante e nota da 100 e più anni di osservazioni.

In tabella gli errori sul tempo:

Osservatorio	Errore di misura (in secondi)
Germania 1 (Dr. Björn Kattentidt)	2,656
Perù (Dr. José Ricra)	4,484
Grecia (Dr. Emmanouil Kardasis)	13,088
Paesi Bassi (Dr. Henk de Groot)	4,346
Germania 2 (Dr. Wolfgang Beisker)	8,714
Germania 3 (Dr. Wolfgang Beisker)	8,622
MIT (Dr. Tim Brothers)	8,102

Risultati e conclusioni

Trovati i tempi sperimentali, dall'analisi dati delle misure fatte, si è passato a confrontarli con i tempi teorici delle Efemeridi, ottenuti dal programma Helios; qui di seguito sono riportati in tabella, esplicitandone la differenza:

Osservatorio	Tempo sperimentale (h:m:s)	Tempo teorico (h:m:s)	Differenza tempi (in secondi)
Germania 1 (Dr. Björn Kattentidt)	11:12:07,726 ± 2,656	11:12:09,3	-1,574
Perù (Dr. José Ricra)	18:42:10,279 ± 4,484	18:42:26,2	-15,921
Grecia (Dr. Emmanouil Kardasis)	11:12:12,103 ± 13,088	11:11:53,9	18,203
Paesi Bassi (Dr. Henk de Groot)	11:12:06,703 ± 4,346	11:12:16,5	-9,797
Germania 2 (Dr. Wolfgang Beisker)	11:11:51,397 ± 8,714	11:12:13,6	-22,203
Germania 3 (Dr. Wolfgang Beisker)	18:42:11,964 ± 8,622	18:40:32,5	99,464
MIT (Dr. Tim Brothers)	18:41:41,753 ± 8,102	18:41:18,5	23,253

Grazie alle differenze tra i tempi calcolati e i tempi teorici, si può arrivare all'eventuale variazione del raggio solare, che è lo scopo di questo studio, dalla formula:

$$\Delta R = v \cdot \Delta t$$

dove v è la velocità di Mercurio che, come già detto, possiamo considerare costante durante due contatti successivi.

Per ricavare la velocità v , si è fatta la differenza tra i tempi (teorici) di II e I contatto, e di IV e III contatto, per poi dividere il diametro di Mercurio per questi intervalli temporali; i valori ottenuti sono i seguenti:

Osservatorio	Velocità Mercurio ("/s)
Germania 1 (Dr. Björn Kattentidt)	0,0628
Perù (Dr. José Ricra)	0,0630
Grecia (Dr. Emmanouil Kardasis)	0,0629
Paesi Bassi (Dr. Henk de Groot)	0,0627
Germania 2 (Dr. Wolfgang Beisker)	0,0628

Germania 3 (Dr. Wolfgang Beisker)	0,0624
MIT (Dr. Tim Brothers)	0,0627

Come si evince dalla tabella, i valori di velocità calcolati sono molto simili, sarebbero quasi identici se si prendessero solo tre cifre decimali; tuttavia, per maggior correttezza e precisione, si è voluto associare a ciascun osservatorio il corrispondente valore di velocità di Mercurio per il calcolo della variazione del raggio solare, anziché usare una media.

Qui in tabella sono riportati i valori della variazione del raggio solare, ottenuti tramite la formula matematica sopra riportata:

Osservatorio	ΔR (in arcosecondi)
Germania 1 (Dr. Björn Kattentidt)	-0,099
Perù (Dr. Dr. José Ricra)	-1,003
Grecia (Dr. Emmanouil Kardasis)	1,145
Paesi Bassi (Dr. Henk de Groot)	-0,615
Germania 2 (Dr. Wolfgang Beisker)	-1,393
Germania 3 (Dr. Wolfgang Beisker)	6,210
MIT (Dr. Tim Brothers)	1,459

Tuttavia, si è dovuto applicare una particolare convenzione riguardo ai segni di tali valori, in quanto i segni dei valori delle differenze temporali assumono un significato diverso, a seconda che si tratti di I contatto o di IV contatto: prendendo ad esempio, il Δt associato all'osservatorio "Germania 1" ha segno negativo, ossia il tempo calcolato è antecedente a quello teorico, e questo dovrebbe tradursi come un aumento del raggio solare, essendo una situazione di I contatto; volendo definire ΔR come la differenza tra il raggio solare sperimentale e quello standard/teorico, dovrebbe essere positivo in questo caso, ma esso risulta negativo dal mero calcolo matematico. Per contro, se prendiamo il Δt associato al Perù, anch'esso negativo quindi il tempo calcolato è sempre antecedente a quello teorico, essendo in situazione di IV contatto esso corrisponderebbe ad una riduzione del raggio solare, da cui un segno meno per il ΔR , come nel valore ottenuto dal calcolo matematico.

Pertanto, la convenzione seguita è la seguente: a un ΔR , legato ad un aumento del raggio solare, gli viene assegnato un segno positivo mentre nel caso di una diminuzione gli viene assegnato un segno negativo, e questo a prescindere dal segno ottenuto dal calcolo numerico.

In tabella, le variazioni del raggio solare, in base a questa convenzione:

Osservatorio	ΔR (in arcosecondi)
--------------	-----------------------------

Fase d'ingresso (I contatto)	
Germania 1 (Dr. Björn Kattentidt)	0,099
Paesi Bassi (Dr. Henk de Groot)	0,615
Grecia (Dr. Emmanouil Kardasis)	-1,145
Germania 2 (Dr. Wolfgang Beisker)	1,393
Fase d'uscita (IV contatto)	
Perù (Dr. Dr. José Ricra)	-1,003
Germania 3 (Dr. Wolfgang Beisker)	6,210
MIT (Dr. Tim Brothers)	1,459

Gli errori relativi a tali variazioni di raggio solare sono stati ricavati dalla semplice propagazione degli errori applicata alla formula sopra riportata, che ha dato la seguente equazione:

$$\Delta(\Delta R) = \sqrt{v^2(\Delta(\Delta t))^2}$$

In tabella gli errori su ΔR :

Osservatorio	Errore su ΔR (in arcosecondi)
Germania 1 (Dr. Björn Kattentidt)	0,167
Paesi Bassi (Dr. Henk de Groot)	0,273
Grecia (Dr. Emmanouil Kardasis)	0,823
Germania 2 (Dr. Wolfgang Beisker)	0,547
Perù (Dr. Dr. José Ricra)	0,282
Germania 3 (Dr. Wolfgang Beisker)	0,538
MIT (Dr. Tim Brothers)	0,508

Dati tutti i valori ottenuti sulla variazione del raggio solare, e i rispettivi errori, si è effettuata la media pesata sull'inverso dei valori dell'errore temporale:

$$\Delta R^* \pm \Delta(\Delta R^*) = \frac{\sum_i^7 (\Delta R_i \cdot \varepsilon_i)}{\sum_i^7 \varepsilon_i} \pm \frac{\sum_i^7 [\Delta(\Delta R)_i \cdot \varepsilon_i]}{\sum_i^7 \varepsilon_i} = 0,736 \pm 0,331 \text{ ''}$$

con $\varepsilon = \frac{1}{\Delta(\Delta t)}$.

La ragione della media pesata sta nel fatto che ciascun singolo valore sulla variazione del raggio solare è stato ottenuto con precisione e possibilità osservative differenti, cosa influenzata ovviamente dall'errore sul tempo (dovuto, tra l'altro, al seeing); pertanto si è voluto tenere conto di queste differenze in precisione, pesando ciascun valore di ΔR con l'inverso del corrispondente valore dell'errore sul tempo.

In conclusione, dal seguente studio del transito di Mercurio, si è ottenuto un valore del raggio solare pari a:

$$R^* = 960,366 \pm 0,331 \text{ "}$$

il quale può essere confrontato con i valori ottenuti da lavori precedenti (M. Emilio et al) sull'osservazione dei transiti del 2003 e del 2006, effettuati tramite il telescopio satellitare SOHO:

R_{2003}	R_{2006}	R_{2016}^*
$960,03 \pm 0,08 \text{ "}$	$960,07 \pm 0,05 \text{ "}$	$960,37 \pm 0,33 \text{ "}$

Il fatto che le osservazioni del 2003 e del 2006 siano state effettuate nello spazio, quindi in assenza totale di seeing, giustifica gli errori più piccoli rispetto a questa esperienza.

Metodo alternativo

Come controprova, si è adoperato un metodo di analisi dati alternativo, ottenendo risultati simili.

Si è partiti dalla stessa formula del fitting, cioè

$$y = a + b \cdot x$$

, con x il tempo e y la distanza. Questa formula, essendo un'equazione lineare, è invertibile.

Si è quindi effettuata nuovamente l'analisi dei dati tramite Origin 9.1 si è effettuata l'analisi dei dati, questa volta però ponendo sull'asse delle ascisse le distanze e sull'asse delle ordinate i tempi, e si è eseguito nuovamente il fitting lineare, che però assume la forma:

$$x = a^I + b^I \cdot y$$

Volendo calcolare i tempi di I e IV contatto, dove $y = 0 \text{ "}$, il solo valore dell'intercetta a^I , fornito dal fitting, corrisponde proprio ai tempi cercati e il suo errore Δa^I ci dà l'errore su tali tempi.

Osservatorio	Tempo sperimentale (h:m:s)
Germania 1 (Dr. Björn Kattentidt)	$11:12:08,385 \pm 1,277$
Perù (Dr. José Ricra)	$18:42:06,582 \pm 2,713$

Grecia (Dr. Emmanouil Kardasis)	11:12:26,069 ± 16,460
Paesi Bassi (Dr. Henk de Groot)	11:12:08,673 ± 2,905
Germania 2 (Dr. Wolfgang Beisker)	11:12:07,432 ± 10,333
Germania 3 (Dr. Wolfgang Beisker)	18:42:06,514 ± 4,724
MIT (Dr. Tim Brothers)	18:41:29,855 ± 7,373

Procedendo da qui come sopra, si arrivati ad un valore del raggio solare pari a:

$$R_{alternativo}^* = 960,143 \pm 0,220 \text{ "}$$