

L'eclisse del 1919: un esperimento di grande delicatezza.

L'accuratezza degli strumenti e le tecniche impiegate furono adeguati?

Note a complemento dell'articolo di D. Kennefick: "Testing Relativity from the 1919 Eclipse – a Question of Bias"

Guido Pegna, Dipartimento di Fisica, Università di Cagliari

1. Introduzione

Le polemiche intorno alla correttezza dell'esperimento del 1919 sulla deflessione della luce al passaggio in prossimità del Sole, concepito per discriminare fra la teoria classica della gravità di Newton e la nuova relatività generale di Einstein non si sono mai sopite [1]. Anche recentemente la questione è stata riesaminata [2,3,4] con una dettagliata descrizione sia delle tecniche di riduzione dei dati impiegate che con un esame approfondito degli atteggiamenti degli astronomi nei confronti dei problemi inattesi che si presentarono nella conduzione dell'esperimento. I sostenitori della sostanziale correttezza dell'esperimento [2,4] tentano di dimostrare che è falsa l'accusa ricorrente che i risultati che non verificavano la nuova teoria di Einstein furono deliberatamente scartati, e sostengono che l'accuratezza degli strumenti e delle tecniche impiegate erano adeguati allo scopo; inoltre forniscono giustificazioni logiche sul punto più delicato, l'aver scartato un consistente gruppo di dati. Si ritiene utile presentare qui tutte le informazioni disponibili che non appaiono negli articoli citati in relazione alla strumentazione impiegata, alla accuratezza che sarebbe stata necessaria e a quella che in effetti fu, e tutti i dettagli sperimentali di cui si è a conoscenza per valutare quanto le polemiche che seguirono – e che seguono – siano o meno giustificate.

2. Le spedizioni

Per l'impresa dell'eclisse del 29 Maggio 1919 fu richiesto al Comitato Governativo inglese per la ricerca dell'epoca, e concesso, un finanziamento di 100 Sterline per gli strumenti e di 1000 Sterline per i viaggi e altre spese.

A causa del poco tempo a disposizione fra la fine delle ostilità della Prima Guerra Mondiale e il tempo limite per la partenza, che avvenne nel Febbraio, i preparativi dovettero essere affrettati.

L'equipe di Greenwich, costituita dagli astronomi Crommelin e Davidson fu inviata da Dyson, astronomo reale e direttore dell'Osservatorio Reale di Greenwich, a Sobral, nel Nord del Brasile. Il lavoro sull'eclisse, che con la sua durata di 410 secondi era una delle più lunghe, venne svolto in condizioni favorevoli, anche grazie alla collaborazione logistica degli astronomi brasiliani. La Figura 1 mostra tutti i partecipanti all'eclisse brasiliana. Questa si verifica di prima mattina, il tempo è abbastanza buono. Vengono riprese fotografie dell'eclisse sia con lo strumento munito dell'obiettivo da 4 pollici che con lo strumento astrografico. Ma quest'ultimo, che era stato messo a fuoco durante la notte, produce immagini sfuocate. L'equipe si ferma a Sobral per due mesi, il tempo necessario per riprendere immagini di confronto dello stesso campo stellare, quello delle Iadi, in assenza del Sole. Una delle riprese eseguite a Sobral con lo strumento con l'obiettivo da 10 cm di diametro è riportata in Figura 3, nella quale si vedono le stelle sulle quali fu eseguita l'elaborazione al centro delle coppie di sottili trattini orizzontali neri.



Figura 1. Equipe brasiliana e inglese a Sobral, Brasile. Seduti, A.C.D. Crommelin è il quarto da sinistra, e C.R. Davidson è il quinto. Il direttore del team brasiliano è Henrique Morite, il quarto in piedi da sinistra.

Il team di Cambridge, capeggiato dallo stesso Eddington, direttore dell'osservatorio di Cambridge, si reca a Principe, un'isola appartenente al Portogallo a 120 miglia della costa africana del Golfo di Guinea, nell'Africa occidentale. Nei 19 giorni prima dell'eclisse il tempo è ventoso ma buono, ma il giorno dell'eclisse, che si verifica a metà giornata, piove. Miracolosamente, negli ultimi 10 secondi le nuvole si diradano tanto da permettere due fotografie utili con lo strumento astrografico. A causa di uno sciopero della compagnia navale che si preannuncia durare mesi, il team deve ripartire 13 giorni dopo per l'Inghilterra, e questo impedisce loro di attendere a Principe i sei mesi che sarebbero stati necessari per riprendere le lastre di confronto della stessa parte del cielo. Al suo ritorno, a chi gli chiedeva come era andata la spedizione, Eddington rispondeva: "*Ho fatto delle bellissime fotografie del cielo nuvoloso!*". Per la riduzione dei dati Eddington disponeva solamente delle due riprese di Principe, delle lastre di confronto riprese precedentemente a Principe ma di una

differente porzione di cielo, e di lastre di test riprese a Cambridge prima della partenza, anch'esse in condizioni completamente differenti da quelle dell'eclisse.

Il numero di Giugno dell'Observatory, un giornale che riporta le notizie sui meeting della Società Astronomica Reale e argomenti connessi, contiene una notizia pervenuta al momento di andare in stampa. Erano arrivati due telegrammi. Il primo era di Crommelin da Sobral: "ECLIPSE SPENDID". Il secondo, di Eddington, era di disappunto: "THROUGH CLOUD. HOPEFUL".

In conclusione, ambedue le spedizioni tornarono in Inghilterra con molti meno materiali di quanto avessero previsto e desiderato sui quali effettuare la riduzione dei dati.

Un fatto poco noto riguarda Eddington. La partecipazione all'osservazione di quella eclisse di Sole lo salvò dalla corte marziale. Infatti, da quacchero devoto, aveva rifiutato di arruolarsi nell'esercito durante la Prima Guerra mondiale: *"La mia opposizione alla guerra si fonda su ragioni religiose... Quand'anche l'astensione degli obiettori di coscienza facesse la differenza tra la vittoria e la sconfitta, non possiamo giovare alla nazione disobbedendo deliberatamente alla volontà divina"*. Ciò lo aveva portato ad un passo dal campo di detenzione. A salvarlo fu Dyson, l'astronomo reale, che affrontò di petto l'Ammiragliato britannico sostenendo che sarebbe stato un peccato rischiare la vita di Eddington sui campi della Somme, mentre avrebbe potuto servire meglio il suo Paese organizzando e guidando una delle spedizioni per l'osservazione dell'eclisse del 29 maggio 1919 (!).

3. Gli strumenti

Gli strumenti principali sui quali le spedizioni facevano affidamento erano i tubi astrografici. I telescopi astrografici sono strumenti adatti per fotografare porzioni di cielo assai più ampie di quelle ottenibili con i telescopi e sono quindi gli strumenti ideali per le eclissi. Per le spedizioni furono velocemente approntati dei tubi di acciaio smontabili in due parti e adattati agli obiettivi di 3,43 m di lunghezza focale e del diametro di 25 cm smontati dagli osservatori di Oxford e di Greenwich. Poiché nelle lontane località scelte per le riprese non sarebbe stato possibile disporre dei sistemi per il puntamento di tubi così lunghi e pesanti, fu deciso di tenere fissi gli strumenti e di effettuare l'inseguimento del campo di ripresa per mezzo di celostati. Questi sono specchi di opportuno diametro che vengono lentamente ruotati per mezzo di un sofisticato e precisissimo dispositivo meccanico ad orologeria attorno ad un asse da determinare con la più grande precisione. Una precauzione presa all'ultimo momento fu quella di portare a Sobral anche un telescopio dato in prestito dal Padre Cotie, un religioso dell'Accademia Reale Irlandese, costituito da un tubo di legno a sezione quadrata dotato di un obiettivo da 10 cm di diametro e 5,8 m di lunghezza focale, da usare come riserva. Questi strumenti furono installati in orizzontale nelle postazioni approntate per l'eclisse, con i celostati posizionati di fronte ad essi, come si vede in una delle fotografie dell'articolo [2] citato.

In ambedue le spedizioni, dopo alcune lastre preliminari di test, ambedue gli obiettivi astrografici mostrarono difetti di astigmatismo e vennero diaframmati ad un diametro di 20 cm per migliorare la qualità delle immagini.

In Figura 2 sono indicate le stelle che potevano venire registrate sulle lastre da 20 x 25 cm del telescopio e su quelle da 16 x 16 cm dello strumento astrografico. Sono indicate anche le deflessioni trovate su due stelle in una delle fasi intermedie della elaborazione dei dati.

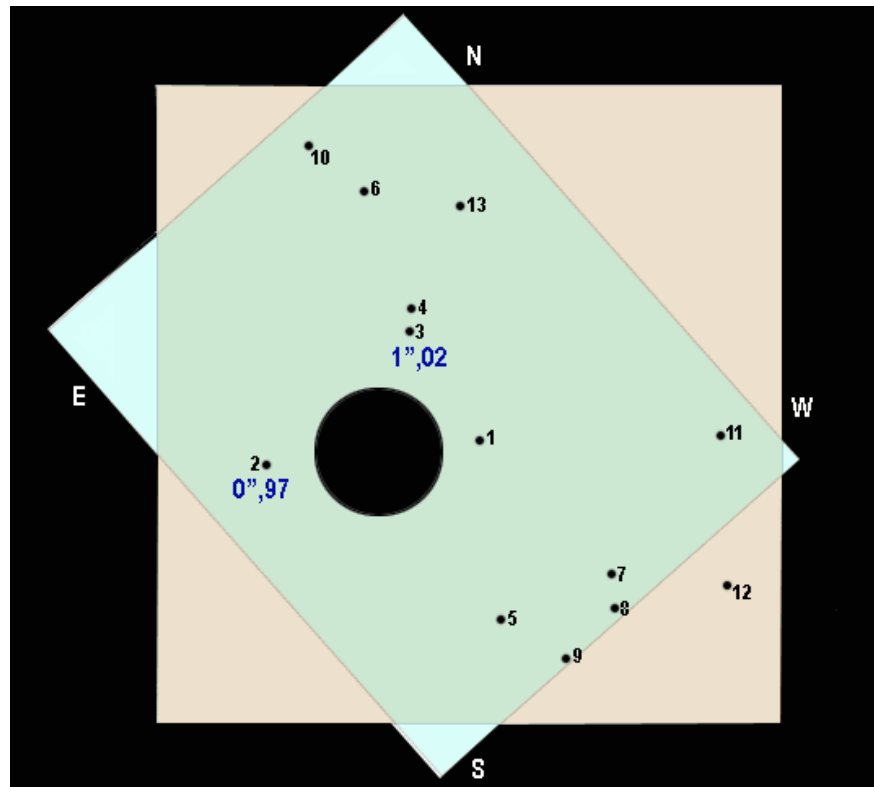


Figura 2. Le stelle che entravano nel campo utile per la fotografia nei due strumenti. Il rettangolo inclinato indica il campo delle Iadi fotografabile sulle lastre da 20 x 25 cm con il telescopio, mentre il quadrato indica il campo registrabile sulle lastre di 16 x 16 cm dello strumento astrografico.

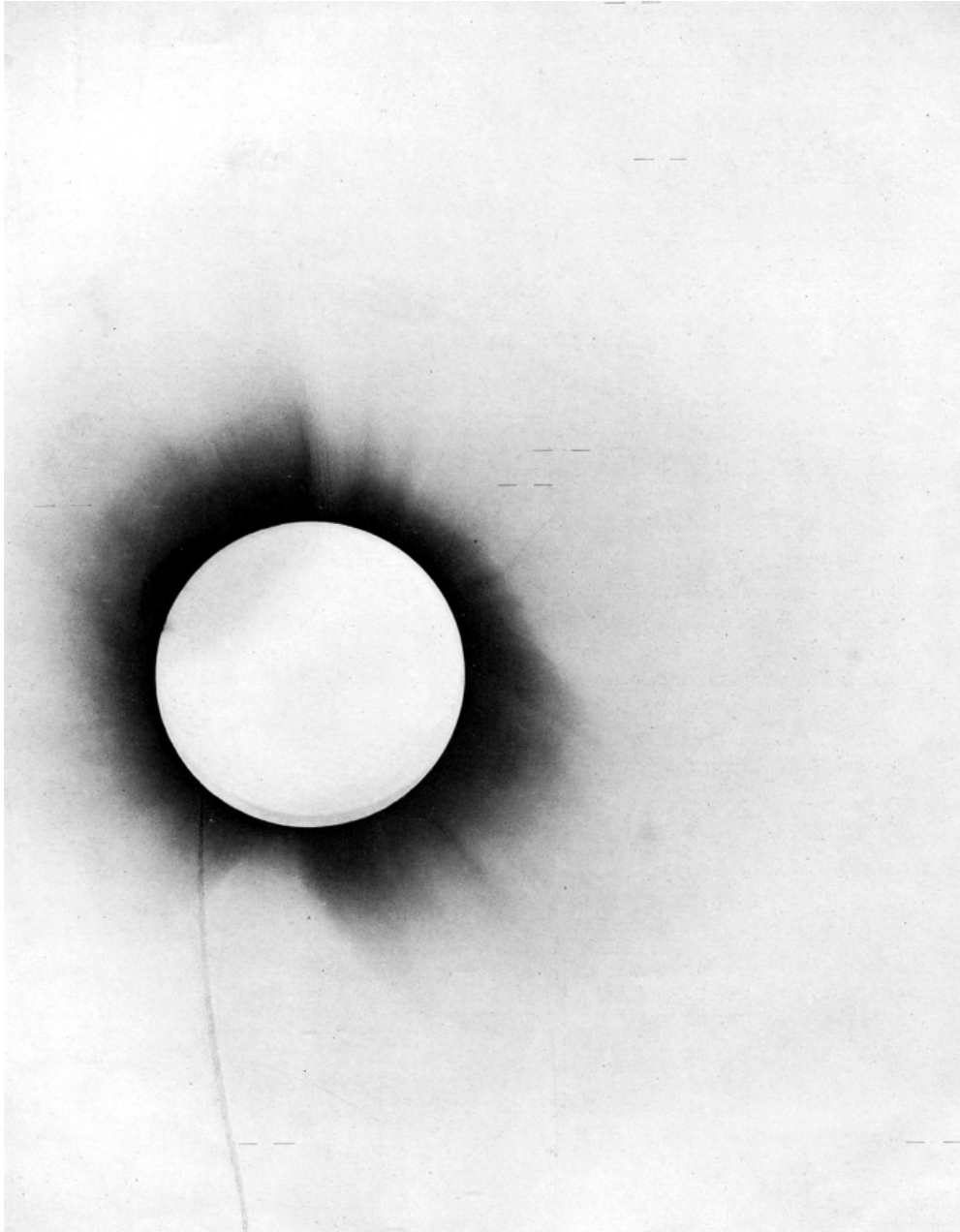


Figura 3. Questa è una riproduzione a mezzi toni di una delle negative riprese a Sobral, Brasile, con il telescopio con l'obiettivo da 10 cm., nella quale sono indicate, fra coppie di trattini orizzontali, le posizioni delle stelle. La lastra ha il formato di 20 e 25 cm. Questa immagine dell'eclisse è l'unica riportata nel rapporto finale congiunto [5].

Con questi soli dati: la lunghezza focale degli obiettivi e le immagini della lastra, possiamo già dedurre molte informazioni interessanti. Il Sole viene visto dalla terra sotto un angolo di circa $30' = 8,7$ mrad, e sotto un uguale angolo, per una fortunata coincidenza, anche la Luna, e questo permette il fenomeno delle eclissi totali di Sole. Sulla lastra fotografica l'immagine del Sole creata da un obiettivo di 5,8 m di lunghezza focale ha un diametro di 5,2 cm. Le lastre usate nelle due spedizioni erano del formato di 20 x 25 cm sui telescopi con obiettivi da 10 cm e di 16 x 16 cm sugli strumenti astrografici. I tempi di esposizione furono fra i 3 e i 10 secondi per i tubi astrografici, e di 60 secondi per quelli con il telescopio.

La deflessione della luce che rasenta il bordo del Sole, come riportato nell'articolo di Kennefick [3], sarebbe di 0,8 secondi d'arco secondo la teoria newtoniana, e del doppio, 1,7" secondo la relatività generale. Consideriamo quest'ultimo valore. È immediato calcolare, conoscendo la lunghezza focale dell'obiettivo, che questo angolo produce sulla lastra fotografica dello strumento astrografico uno spostamento di circa 27 micron dell'immagine di una stella rispetto alla posizione che avrebbe la stessa stella quando il Sole non fosse nel suo campo stellare, e di 47 micron sulla lastra del telescopio. Lo spostamento dell'immagine di una stella che deve essere apprezzato sulla lastra fotografica è quindi di circa 1/13.000 del diametro del Sole su quella lastra. Queste devono essere state le valutazioni preliminari di fattibilità effettuate dagli astronomi in fase di progettazione dell'esperimento. Ma il problema che avevano gli astronomi era molto più complesso. Si trattava di misurare piccole differenze fra le posizioni della stessa stella su differenti lastre, riprese in tempi differenti, in condizioni di differente temperatura dei telescopi, di differente rifrazione atmosferica per il differente gradiente atmosferico verticale di temperatura, in condizioni probabilmente differenti di trattamento chimico delle lastre, anche nell'ipotesi che tutto avesse funzionato a dovere, con particolare riguardo ai celostati. Un ulteriore elemento di possibile incertezza che fu preliminarmente esaminato la eventuale deviazione della luce per rifrazione all'attraversamento dei gas caldi, anche se non più luminosi, dell'estremo lembo della corona solare. Eddington discute questo [5] punto e dimostra che tale effetto è irrilevante.

4. Considerazioni sulle riprese e sulle tecniche fotografiche

A Sobral durante i quasi 7 minuti della totalità dell'eclisse vennero esposte 19 lastre nello strumento astrografico, con tempi di posa alternati di 5 e di 10 secondi, e 8 lastre nel telescopio, queste con il tempo di posa di 28 secondi. Il numero di stelle utili su ogni lastra era fra le 5 e le 7 stelle. Due mesi dopo, dal 10 al 17 Luglio, a Sobral furono esposte le lastre di confronto dello stesso campo stellare: 17 lastre con lo strumento astrografico e 8 con il telescopio. Gli strumenti erano stati lasciati esattamente nelle stesse posizioni. Una delle lastre del 17 Luglio fu ripresa "attraverso il vetro", cioè con l'emulsione dalla parte opposta rispetto all'obiettivo, ed è indicata come "scale plate", lastra di scala. Essa costituì la lastra di confronto per tutte le altre, sia quelle dell'eclisse che quelle di riferimento. Questo è un espediente ingegnoso: le lastre di lavoro possono essere messe a contatto diretto, emulsione contro emulsione con la lastra di scala, annullando così l'errore di parallasse dei micrometri nelle determinazioni attraverso lo spessore del vetro.

La lastra di scala fu fondamentale per la determinazione di tutti i cambiamenti di scala, l'elemento di maggiore delicatezza dell'intera operazione, e per la misura degli spostamenti delle stelle.

A Principe le cose non andarono bene come a Sobral. Il giorno dell'eclisse pioveva, ma schiarite si verificarono proprio durante l'eclisse, e pare proprio a causa

dell'eclisse. Eddington ottenne 16 lastre esposte con tempi variabili fra 3 e 20 secondi. Di queste solamente due furono utilizzabili per la riduzione dei dati, avendo registrato rispettivamente 2 e 3 stelle.



Figura 4. Questa è una fotografia di una delle stelle riprese a Sobral. L'immagine è stata ingrandita 281 volte. La scritta a mano nella parte inferiore dice infatti: "This image is magnified 281 times, reimaged [?] with glass plate.". Si vede l'immagine di una stella e, con il trattino verticale in alto verso destra è indicata la posizione dove la stella avrebbe dovuto trovarsi se il Sole non fosse stato presente (per concessione dell'Osservatorio Reale di Greenwich).

Vediamo quali informazioni si possono ricavare da questa figura. È noto l'immagine di un oggetto puntiforme situato all'infinito (una stella) produce nel fuoco di una lente una figura di diffrazione costituita da un disco luminoso centrale circondato da anelli alternativamente scuri e chiari ma di intensità luminosa molto minore e decrescente: questa è la figura di Airy. L'84% della potenza luminosa si concentra nel disco centrale. Il raggio d del disco centrale della figura di Airy è dato da (formula di Rayleigh):

$$d = 1,22 \cdot \lambda \cdot f / D$$

dove f è la lunghezza focale della lente, D è il diametro della lente λ è la lunghezza d'onda. Tale valore di d è anche, secondo il criterio di Rayleigh, ciò che definisce il potere risolutivo di uno strumento. Lo spostamento previsto per la posizione della stella deve dunque essere superiore al potere risolutivo degli strumenti impiegati, e anche queste valutazioni dovettero certamente essere tenute in primissimo piano dagli astronomi in fase di preparazione della spedizione. La

dimensione dell'immagine di una stella sulla lastra fotografica del tubo astrografico diaframmato al diametro di 200 mm e alla lunghezza d'onda di a 0,5 μm di lunghezza d'onda è quindi :

$$d_{\text{astr}} = (1,22 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6} \cdot 3,5 \cdot 10^3 / 200) \text{ mm} = 0,0105 \cdot 10^{-3} \text{ mm} = 10,5 \mu\text{m}$$

mentre per il telescopio con la lente da 10 cm e alla stessa lunghezza d'onda si ha:

$$d_{\text{telesc}} = (1,22 \cdot 5,8 \cdot 10^3 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6}) \text{ mm} = 0,035 \cdot 10^{-3} \text{ mm} = 35 \mu\text{m}$$

Riassumiamo nella Tabella I questi dati:

TABELLA I		
(Tutti i valori in micron)		
	Strum. Astrografico	Telescopio
Diametro della stella	21	70
Spostamento per 1,7''	27	47

Il problema di determinare la deflessione che la luce subisce durante l'eclissi consiste dunque nell'apprezzare, su due distinte lastre fotografiche, quella dell'eclisse e quella di confronto, uno spostamento di 27 micron dell'immagine di una stella che ha il diametro di 21 micron oppure uno spostamento di 47 micron di una stella che ha il diametro di 70 micron. Questi dati lasciano perplessi, ed apparentemente mettono fuori gioco il telescopio. Appare comunque evidente l'estrema delicatezza dell'impresa. Anche alla luce delle possibilità odierne, un esperimento eseguito con quegli strumenti apparirebbe difficile. L'unico modo per avere qualche possibilità di successo è, come sempre, quello di avere molti dati fra i quali operare medie adeguate.

La Figura 4 riporta un ingrandimento di una parte di una lastra ripresa nella stazione brasiliana e usata per il calcolo della deflessione. Se è corretta la posizione del trattino, che indica dove avrebbe dovuto trovarsi la stella se il Sole non fosse stato presente, con una proporzione fra la distanza del trattino dal centro della stella e il diametro della stella, che conosciamo, si trova che lo spostamento sulla lastra è di 28 micron, che coincide bene con il calcolo che abbiamo fatto per una deflessione einsteniana. Purtroppo di questa immagine non sappiamo se il trattino sia stato posto come riferimento della posizione attesa o se esso sia dove effettivamente una stella fosse su una delle lastre campione.

Il secondo aspetto è strettamente fotografico. Chi si è occupato di fotografia "chimica", sa che ci si scontra sempre su un compromesso: tempi di posa brevi, e quindi necessità di alta sensibilità delle emulsioni, ma grana "grossa", oppure bassa sensibilità e grana fine. Nella Figura 4 la grana dell'emulsione è ben visibile. La luminosità dello strumento astrografico era:

$$L = \text{Diametro Obiettivo} / \text{Lunghezza Focale} = 200/3500 = f/17,5 ,$$

mentre quella del telescopio era $f/58$. Le lastre impiegate erano per l'epoca fra le più rapide, anche se oggi la loro sensibilità sembra ridicola: fra $f/10$ e $f/30$ ASA. Con tali valori della luminosità i tempi di posa per l'eclisse erano necessariamente lunghi, come abbiamo visto. In tali condizioni si verifica il fenomeno noto come effetto di reciprocità: la sensibilità per le luci basse diminuisce rispetto a quella nominale. Potrebbe essere questo il motivo per il quale nella Figura 4 non è visibile il primo anello di Airy attorno alla centrica. Tali emulsioni forniscono risoluzioni intorno a 400 linee/mm, e quindi le dimensioni dei granuli sono mediamente intorno ai 2,5 micron, cosa che appare ben confermata dalla Figura 4.

Un ulteriore effetto dannoso con le emulsioni fotografiche, che aggiunge incertezza alla precisione delle misure di posizione effettuate al limite del potere risolutivo, è il cosiddetto "shrinking". La gelatina a seguito del trattamento di sviluppo si restringe un poco, e tale restringimento può non essere uniforme nelle varie direzioni. Gli astronomi dell'eclisse contrastarono questo effetto trattando le emulsioni in aldeide formica.

Come abbiamo visto, il numero totale di stelle sulle quali fu effettuata la riduzione dei dati fu di circa 150 con lo strumento astrografico e solamente di circa 50 con il telescopio. Quindi la statistica disponibile era assai più ampia con le prime che con le seconde, e la decisione di escludere dal risultato finale le riprese astrografiche fu una delle cause che alimentarono le polemiche, anche se il motivo riportato fu la scarsa qualità delle immagini.

La scritta a mano sulla destra di Figura 4 è illeggibile, ma si intravede, verso la fine, il numero 0,75, di cui è impossibile capire il senso.

5. I risultati complessivi

Riportiamo i risultati finali dell'esperimento. I valori medi pesati della deflessione su tutti i dati disponibili sono i seguenti [5]:

Da Sobral con il telescopio: $\delta = 1'',98 \pm 0'',12$

Da Sobral, con lo strumento astrografico: $\delta = 0'',93$ (nessun errore riportato)

Da Principe, con lo strumento astrografico: $\delta = 1'',61 \pm 0'',30$

Valore calcolato con la relatività generale: $\delta = 1'',75$

Il valore di $0'',93$ è quello che fu scartato.

6. Conclusioni

Una delle previsioni della relatività generale, la deflessione della luce nell'attraversamento dei campi gravitazionali, è stata confermata da innumerevoli fatti sperimentali. La deflessione della luce in prossimità del Sole è stata misurata nel corso dei decenni con precisione crescente in altre eclissi. I radioastronomi

sono ora in grado di misurare con grande accuratezza la deflessione delle emissioni radio provenienti da lontane quasar che passano dietro il Sole più volte durante ogni anno. Fenomeni macroscopici impressionanti sono le “lenti gravitazionali” per le quali la deflessione avviene in modo clamorosamente evidente, Figura 5. Tuttavia, per quanto abbiamo visto, il primo tentativo pionieristico di verifica del fenomeno avvenne in condizioni talmente al limite delle possibilità tecniche, sperimentali e ambientali che le polemiche che continuarono a verificarsi in relazione alla validità dei risultati appaiono assai giustificate. Polemiche che, come abbiamo visto, anche dopo 90 anni non accennano a placarsi, tanto che continuano ad apparire lavori di rianalisi e di messa a punto dell’intera questione (compreso questo!).

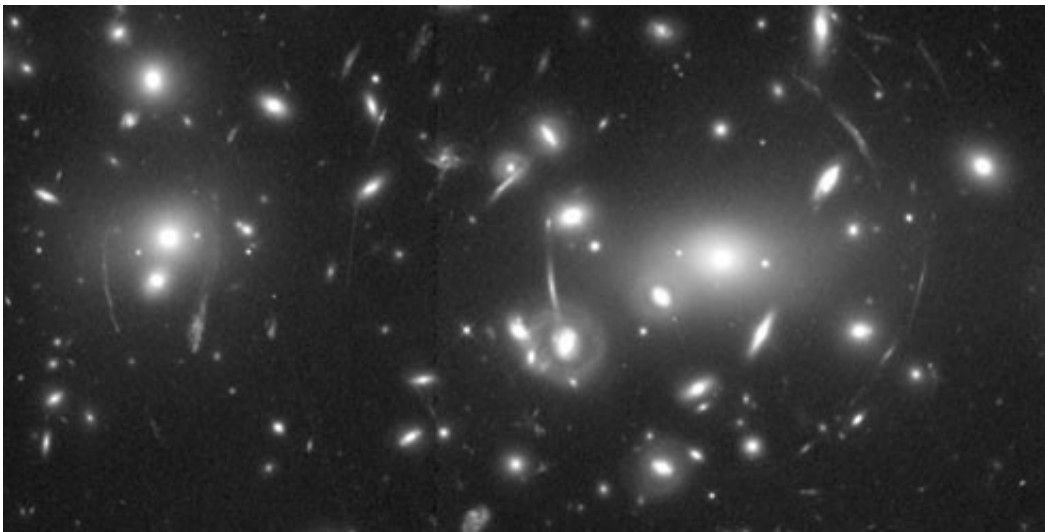


Figura 5. In questa “lente gravitazionale” cosmica un grande ammasso di galassie distorce la luce proveniente da galassie più distanti in strutture ad arco

Bibliografia

- [1] Vedi, per esempio, uno fra tutti: J.R. Minkel: “Did Researchers Cook Data from the First Test of General Relativity?”, *Scientific American* March 2008.
- [2] D. Kennefick: “Testing Relativity from the 1919 Eclipse – a Question of Bias”, *Physics Today* March 2009
- [3] G. Benegiamo: “Un’eclisse molto relativa”, *L’Astronomia* Anno XXIX n. 296 e anche in: <http://www.castfvg.it/articoli/storia/Eddington.htm>
- [4] P. Coles: “Einstein, Eddington and the 1919 Eclipse”, *ASP Conference Series* Vol. 252, 27 Feb. 2001. [arXiv:astro-ph/0102462v1](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0102462v1)
- [5] Il rapporto finale congiunto degli autori dell’esperimento è: F.W. Dyson, F.R.S, A.S. Eddington, F.R.S and C. Davidson, : "A Determination of the Deflection of Light by the Sun's Gravitational Field, from Observations Made at the Total Eclipse of May 29, 1919". *Phil. Trans. Roy. Soc. A* **220**: 291–333. doi:[10.1098/rsta.1920.0009](https://doi.org/10.1098/rsta.1920.0009). L’articolo di 46 pagine in formato PDF può essere scaricato dal sito: <http://astro.if.ufrgs.br/univ/291.full.pdf>