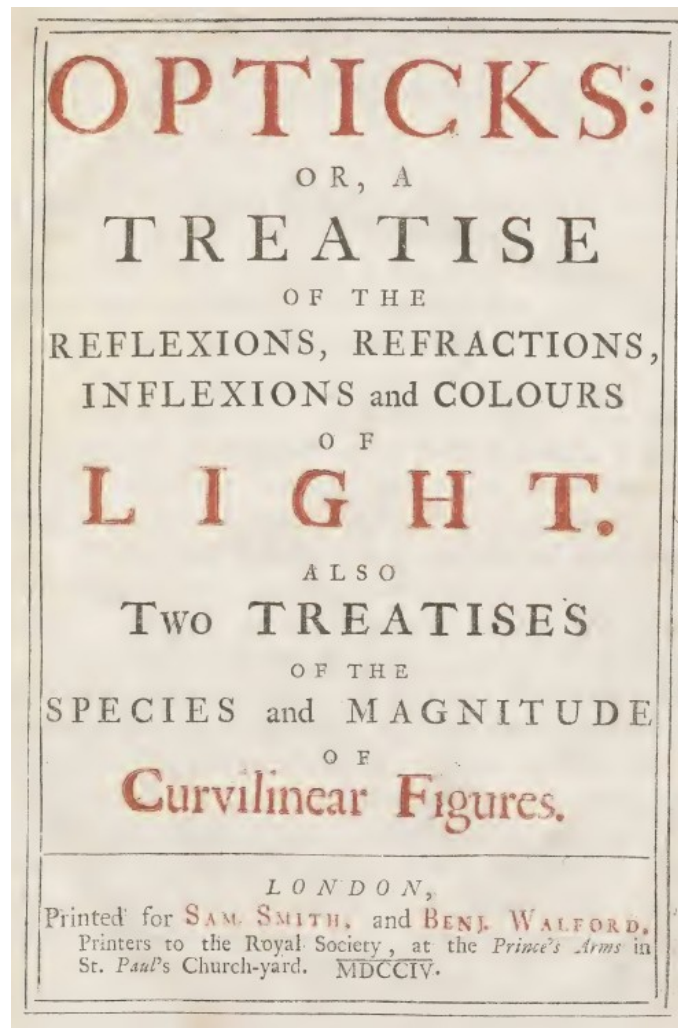




Cecilia Payne scopre di cosa sono fatte le stelle

Nel 1704 Isaac Newton pubblica "*Opticks*" il suo trattato sulla luce [1]



e lo inizia con queste parole [2]:

"Il mio scopo in questo libro non è spiegare le proprietà della luce mediante ipotesi, ma proporle e dimostrarle mediante la ragione e gli esperimenti..."

[1] Isaac Newton. *Opticks: or, A treatise of the reflexions, refractions, inflexions and colours of light*. London, Printed for Sam. Smith, and Benj. Walford, MDCCIV. |PDF|

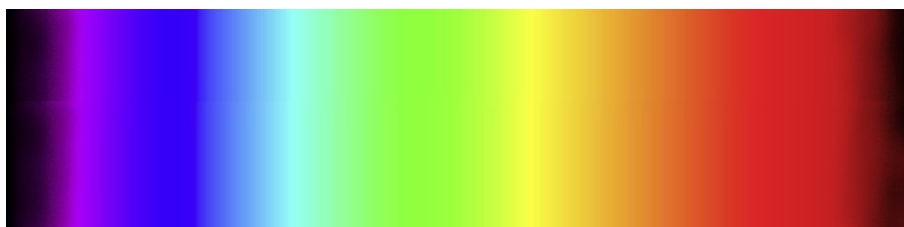
<https://dn790009.ca.archive.org/0/items/opticksortreatis1730newt/opticksortreatis1730newt.pdf>

[2] "MY Design in this Book is not to explain the Properties of Light by Hypotheses, but to propose and prove them by Reason and Experiments..." *Opticks*. The first book. part I. p. 1.

Il fenomeno della rifrazione, banalmente quello per cui anche un semplice bastone immerso nell'acqua appare piegato, era noto dall'antichità, già Euclide lo aveva trattato attorno al 300 a.e.v. nella sua "*Ottica*" [3], in forma geometrica. Claudio Tolomeo attorno all'anno 150 aveva riportato nella sua "*Ottica*" [4] le misure dei rapporti tra angoli di incidenza e angoli di flessione ("*fractio*", "*flexio*" nella traduzione latina) per l'acqua. Attorno al 980 Ibn Sahl aveva a sua volta riportato quella che oggi viene ritenuta la prima formulazione della legge di rifrazione [5]. Che durante il medioevo si era persa, ed era stata riscoperta ai primi del 1600 da Snellius [6] e subito dopo da Cartesio che la riporta nella "*Diottra*" – pubblicata nel 1637 con Il discorso sul metodo (*Le Discours de la méthode*), Le Meteore (*Les Météores*) e La Geometria (*La Géométrie*) [7].

Ma ecco che Newton nell'esperimento che riporta, condotto con un prisma di vetro, ottiene la scomposizione della luce del sole in uno spettro di colori:

"... lo spettro ... appare tinto di queste serie di colori, violetto, indaco, blu, verde, giallo, arancio, rosso, insieme a tutti i loro gradi intermedi in una continua successione..." [8] .



E il tema della rifrazione fa un salto di qualità cruciale, perché è da qui che bisogna partire per arrivare a scoprire di cosa sono fatte le stelle. Newton ha appena aperto, senza saperlo, una finestra sull'universo.

[3] Harry Edwin Burton. *The optics of Euclid*. Journal of the Optical Society of America, 1945, vol. 35, n. 5. |PDF|

<https://philomatica.org/wp-content/uploads/2013/01/Optics-of-Euclid.pdf>

[4] L'OTTICA DI CLAUDIO TOLOMEO - DA EUGENIO Ammiraglio di Sicilia Scrittore del Secolo XII RIDOTTA IN LATINO SOVRA LA TRADUZIONE ARABA DI UN TESTO GRECO IMPERFETTO ORA PER LA PRIMA VOLTA conforme a un codice della Biblioteca Ambrosiana PER DELIBERAZIONE DELLA R. ACCADEMIA DELLE SCIENZE DI TORINO pubblicata DA GILBERTO GOVI Socio della stessa Accademia. TORINO STAMPERIA REALE DELLA DITTA G. B. PARAVIA E C. DI I. VIGLIARDI, 1885. |PDF|

<https://play.google.com/books/reader?id=PTUQSZfan98C>

[5] Zghal, Mourad & Bouali, Hamid-Eddine & Lakhdar, Zohra & Hamam, Habib. (2007). The first steps for learning optics: Ibn Sahl's, Al Haytham's and Young's works on refraction as typical examples. 10.1364/ETOP.2007.ESB2. |PDF|

<https://www.researchgate.net/publication/237325371>

[6] Willebrord Snel van Royen o Snellius (Leida, 1580 – Leida, 1626)

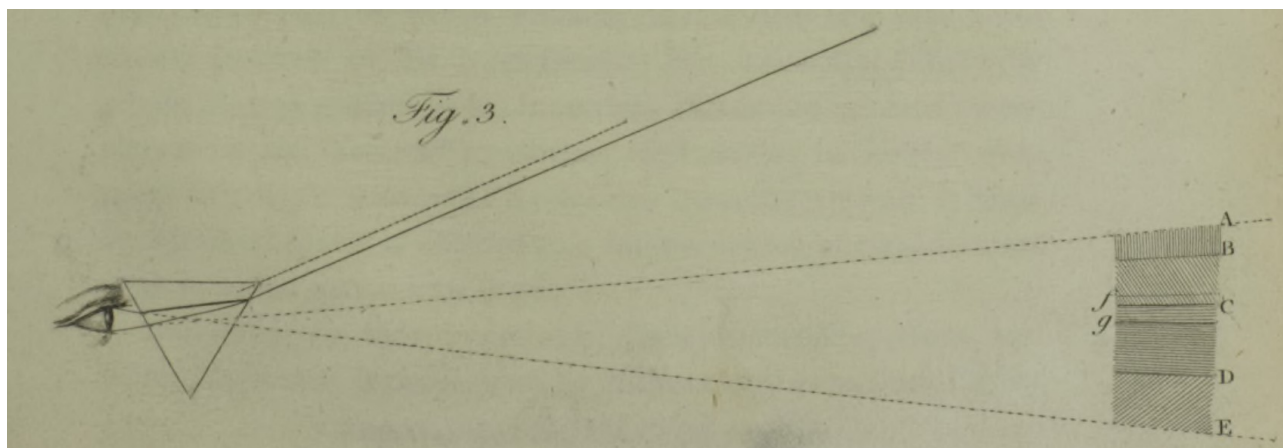
[7] René Descartes. DISCOURS DE LA METHODE Pour bien conduire la raison, & chercher la verité dans les sciences plus LA DIOPTRIQUE, LES METEORES ET LA GEOMETRIE. Qui jont des effais de cete METHODE. A LEYD. De l'Imprimerie de IAN MAIRE. CID ID C XXXVII. |PDF|

<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b86069594>

[8] "... the Spectrum ... appear tinged with this Series of Colours, violet, indico, blue, green, yellow, orange, red, together with all their intermediate degrees in a continual fucceffion...". *Opticks*. The first book, part II. PROP. II. THEOR. II. pp. 87-88.

Un centinaio di anni dopo, nel 1802, William Wollaston in un lavoro sugli indici di rifrazione [9] osserva, nello spettro della luce solare, alcune righe nere ben distinte, che così descrive, senza però essere in grado di interpretarne la natura:

"La linea A che delimita il lato rosso dello spettro è un po' confusa, il che sembra dovuto in parte alla scarsa capacità dell'occhio di convergere la luce rossa. La linea B, tra il rosso e il verde, in una certa posizione del prisma, è perfettamente distinta; così come D ed E, i due limiti del viola. Ma C, il limite del verde e del blu, non è così chiaramente segnato come il resto; e ci sono anche, su ciascun lato di questo limite, altre linee scure distinte, f e g, entrambe le quali, in una visione imperfetta, potrebbero essere scambiate per il confine di questi colori" [10].



Quindici anni dopo Joseph Fraunhofer porta la prova definitiva che le linee osservate da Wollaston non sono artefatti, ma che in uno spettro della luce solare, ottenuto con una strumentazione che nel frattempo è stata migliorata, di righe ve ne sono addirittura centinaia [11] (da allora in spettroscopia sono indicate come le *linee di Fraunhofer*).

[9] William Hyde Wollaston: *A method of examining refractive and dispersive powers, by prismatic reflection*. In: Philosophical Transactions of the Royal Society. Band 92. London 1802. **[PDF]**

<https://royalsocietypublishing.org/rstl/article-pdf/doi/10.1098/rstl.1802.0014/1463283/rstl.1802.0014.pdf>

[10] *"The line A that bounds the red side of the spectrum is somewhat confused, which seems in part owing to want of power in the eye to converge red light. The line B, between red and green, in a certain position of the prism, is perfectly distinct; so also are D and E, the two limits of violet. But C, the limit of green and blue, is not so clearly marked as the rest; and there are also, on each side of this limit, other distinct dark lines, f and g, either of which, in an imperfect might be mistaken for the boundary of these colours"*, p. 378.

[11] *Bestimmung des Brechungs-und Farbenzerstreuungs-Vermögens verschiedener Glasarten, in Bezug auf die Vervollkommnung achromatischer Fernröhre*. Von Joseph Fraunhofer, in Benedictbaiern. In: DENKSCHRIFTEN DER KÖNIGLICHEN AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN ZU MÜNCHEN FÜR DIE JAHRE 1814 und 1815. AGERON, BAND V, MÜNCHEN, auf Kosten der Akademie, 1817. **[PDF]**

<https://www.biodiversitylibrary.org/item/42276>

Il lavoro in estratto **[PDF]** si trova su:

https://www.zobodat.at/pdf/Denk-Aka-Wiss-Muenchen_05_0193-0226.pdf

Ecco cosa scrive sullo spettro della luce solare:

"In A, una linea nettamente definita è chiaramente visibile; tuttavia, questa non è il confine del colore rosso, ma si estende notevolmente oltre. In a, diverse linee sono raggruppate insieme, formando una sorta di banda. B è nettamente definita e di spessore considerevole. Nello spazio da B a C, si possono contare nove linee molto sottili e nettamente definite. La linea C è di spessore considerevole e, come B, molto nera. Nello spazio tra C e D, si possono contare circa 30 linee molto sottili; tuttavia, queste, ad eccezione di due, così come quelle tra B e C, possono essere viste chiaramente solo con un forte ingrandimento o con prismi altamente divergenti; sono, inoltre, molto nettamente definite. D è costituito da due linee spesse, separate solo da una linea chiara. Tra D ed E, si possono contare circa 84 linee di spessore variabile. E è costituito da diverse linee, quella centrale è leggermente più spessa delle altre. Tra E e b, ci sono circa 24 linee. In b ci sono 3 linee molto intense, 2 delle quali sono separate solo da una linea sottile e chiara; sono tra le più intense nell'immagine a colori. Nello spazio tra b e F, si contano circa 52 linee. F è piuttosto intensa. Tra F e G ci sono circa 185 linee di intensità variabile. In G, sono raggruppate molte linee, molte delle quali si distinguono per la loro intensità. Nello spazio da G a H, si contano circa 190 linee di intensità molto diversa.

Le due bande in H sono le più peculiari; sono entrambe quasi identiche e composte da molte linee; al centro c'è una linea intensa, di un nero intenso. Da H a I, le linee sono ugualmente numerose. Pertanto, nello spazio tra B e H si possono contare circa 574 linee, di cui, tuttavia, solo le più intense sono indicate nel disegno. Le distanze tra le linee più intense sono state misurate con un teodolite e riportate nel disegno approssimativamente secondo queste proporzioni. Tuttavia, le linee deboli sono state disegnate semplicemente in base all'immagine a colori, senza misurazioni precise." [12].

Questa è l'immagine riportata da Fraunhofer, che nella parte superiore illustra la curva di sensibilità ai colori dell'occhio umano e nella parte inferiore riporta lo spettro con le

[12] *"In A ist eine scharf begrenzte Linie gut zu erkennen; doch ist hier nicht die Grenze der rothen Farbe, sondern sie geht noch merklich darüber weg. Bey a sind mehrere Linien angehäuft, die gleichsam einen Streifen bilden. B ist scharf begrenzt und von merklicher Dicke. Im Räume von B nach C können 9 sehr feine, scharf begrenzte Linien gezählt werden. Die Linie C ist von beträchtlicher Stärke und so wie B sehr schwarz. Im Raume zwischen C und D zählt man ungefähr 30 sehr feine Linien; doch können diese, zwey ausgenommen, wie auch die zwischen B und C, nur mit starken Vergrößerungen oder stark zerstreuenden Prismen deutlich geschen werden; sie sind übrigens sehr scharf begrenzt. D besteht aus zwey starken Linien, die nur durch eine helle Linie getrennt sind. Zwischen D und E zählt man ungefähr 84 Linien von verschiedener Stärke. E selbst besteht aus mehrern Linien, wovon die in der Mitte etwas stärker ist als die übrigen. Zwischen E und b sind ungefähr 24 Linien. Bey b sind 3 sehr starke Linien, wovon 2 nur durch eine schmale helle Linie getrennt sind; sie gehören zu den stärksten im Farbenbilde. Im Räume zwischen b und F zählt man ungefähr 52 Linien. F ist ziemlich stark. Zwischen F und G sind ungefähr 185 Linien von verschiedener Stärke. Bey G sind viele Linien angehäuft, worunter sich mehrere durch ihre Stärke auszeichnen. Im Räume von G nach H zählt man ungefähr 190 Linien von sehr verschiedener Stärke.*

Die zwey Streifen bey H sind am sonderbarsten; sie sind beyde fast ganz gleich, und bestehen aus vielen Linien; in ihrer Mitte ist eine starke Linie, die sehr schwarz ist. Von H nach I sind die Linien gleich zahlreich. Es können demnach blofs im Räume zwischen B und H ungefähr 574 Linien gezählt werden, wovon jedoch nur die stärkern in der Zeichnung angedeutet sind. Die Entfernungen der stärksten Linien von einander wurden mit dem Theodolith gemessen, und in der Zeichnung ohngefähr nach diesem Verhältnisse aufgetragen; die schwachen Linien aber wurden blofs nach der Ansicht des Farbenbildes ohne genaues Maafs gezeichnet", pp. 203-204.

linee da lui osservate [13].



Anche Fraunhofer non ha una spiegazione per tutte queste linee che compaiono nello spettro, ma fortunatamente la chimica sta venendo in soccorso.

Nel 1789 Lavoisier nel suo "*Traité Élémentaire de Chimie*" [14] aveva elencato circa 30 "sostanze semplici", che oggi noi sappiamo essere "elementi". La chimica da allora si era sviluppata, e nuovi elementi erano stati identificati, fino ad arrivare alla prima tavola periodica di Dmitrij Ivanovič Mendeleev [15], che ne includeva più di 60.

In questo contesto arriva nel 1860 il chiarimento del significato delle linee di Fraunhofer da parte di Bunsen e Kirchhoff che le impiegano per la loro "*Analisi chimica attraverso osservazioni spettrali*" [16].

In sintesi dicono Bunsen e Kirchhoff: i corpi portati all'incandescenza emettono radiazioni a tutte le lunghezze d'onda; esposto a questa radiazione continua un elemento chimico presenta uno spettro di assorbimento discreto caratterizzato da linee di Fraunhofer specifiche per l'elemento, e identiche a quelle del suo spettro di

[13] Incisione colorata della figura riportata nel testo citato, realizzata dallo stesso Fraunhofer utilizzando un processo sperimentale di stampa a colori.

Deutsches Museum, Archiv, BN 43952, CC BY-SA 4.0

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=119634237>

[14] *Traité élémentaire de chimie*, présenté dans un ordre nouveau, et d'après les découvertes modernes; Avec figures; Par M. Lavoisier, ... |PDF|

<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b8615746s>

<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k9797843p>

[15] *The Principles of Chemistry*, Volume I and II by Dmitry Ivanovich Mendeleev. Credits: The Project Gutenberg Literary Archive Foundation. |HTML|

<https://dev.gutenberg.org/ebooks/51326>

<https://dev.gutenberg.org/ebooks/54210>

[16] *Chemische Analyse durch Spectralbeobachtungen* von G. Kirchhoff und R. Bunsen. *Annalen der Physik und Chemie*, Bd. 110 No. 6, 1860, S. 161-189. |PDF|

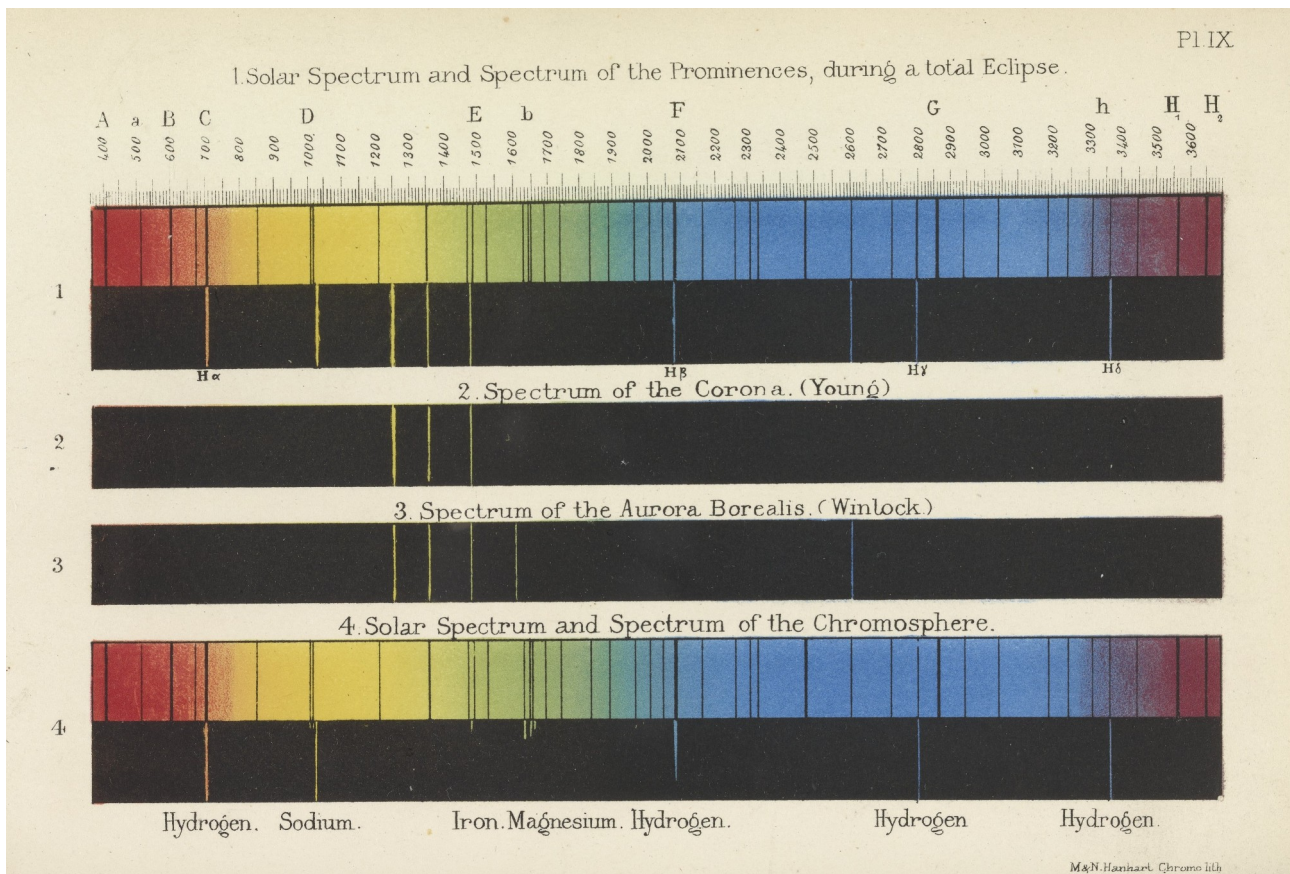
https://archive.org/details/sim_annalen-der-physik_1860_110_6

<https://archiv.ub.uni-heidelberg.de/volltextserver/15657/1/spektral.pdf>

emissione che si ottiene riscaldandolo opportunamente (per la spiegazione delle basi fisiche del fenomeno sarà necessario attendere la fisica quantistica, ma questa è un'altra storia).



I risultati di Bunsen e Kirchhoff innescano una rivoluzione e già pochi anni dopo Heinrich Schellen nel 1872 riporta i risultati dell'applicazione dell'analisi spettrale all'aurora boreale, al sole (cromosfera e corona solare), alla Luna e ai pianeti, alle stelle e alle nebulose [17]. Sta iniziando, seppure in sordina, l'era dell'astrofisica.



Dalle prime osservazioni si passa a esplorazioni del cielo con spettrografi sempre più evoluti, applicati a telescopi sempre più potenti, e dalla ispezione visiva si passa alla

[17] Schellen, Heinrich. *Spectrum Analysis in Its Application to Terrestrial Substances, and the Physical Constitution of the Heavenly Bodies*. London, England, 1872. |PDF|

<https://digital.sciencehistory.org/works/2z10wr268>

registrazione degli spettri sulle lastre fotografiche. Agli inizi del '900 il volume di dati osservativi è imponente. Ma si tratta ora di trasformare i *dati* raccolti in *informazioni* che consentano una migliore *conoscenza* dell'universo.

Nata in Inghilterra nel 1900, Cecilia Payne decide di dedicarsi alla fisica dopo avere seguito una conferenza nella quale Arthur Eddington riportava le prove sperimentali della correttezza della teoria della Relatività generale di Einstein in seguito alle osservazioni effettuate durante l'eclissi di sole del 1919, ma "... *si rese conto presto, durante i suoi anni a Cambridge, che una donna aveva poche possibilità di andare oltre il ruolo di insegnante e nessuna possibilità di conseguire una laurea specialistica. Nel 1923 lasciò l'Inghilterra per gli Stati Uniti, dove visse per il resto della sua vita. Incontrò Harlow Shapley, il nuovo direttore dell'Harvard College Observatory, che le offrì una borsa di studio per laureati. Harvard possedeva il più grande archivio al mondo di spettri stellari su lastre fotografiche...*" [18].

Per la tesi post laurea (Ph.D.) alla Payne viene affidata la redazione di una monografia sull'analisi degli spettri ottenuti dalle atmosfere delle stelle [19]. Il lavoro contiene una ampia revisione della letteratura disponibile sull'argomento, presenta i problemi ancora irrisolti, e contiene un contributo della Payne in merito a questi.

Il dato più interessante è contenuto in una tabella riportata a p. 184 della tesi.

TABLE XXVIII

Atomic Num- ber	Atom	Log a_r	Atomic Num- ber	Atom	Log a_r	Atomic Num- ber	Atom	Log a_r
1	H	11	13	Al	5.0	23	V	3.0
2	He	8.3	14	Si	4.8	24	Cr	3.9
	He+	12		Si+	4.9	25	Mn	4.6
3	Li	0.0		Si+++	6.0	26	Fe	4.8
6	C+	4.5	19	K	3.5	30	Zn	4.2
11	Na	5.2	20	Ca	4.8	38	Sr	1.8
12	Mg	5.6		Ca+	5.0		Sr+	1.5
	Mg+	5.5	22	Ti	4.1	54	Ba+	1.1

La tabella riporta l'abbondanza relativa dei vari elementi identificati nelle stelle,

[18] *Cecilia Payne and the Composition of the Stars. What are the stars made of?*

American Museum of Natural History. Part of the Cosmic Horizons Curriculum Collection. |PDF|

<https://www.amnh.org/learn-teach/curriculum-collections/cosmic-horizons-book/cecilia-payne-profile>

[19] *STELLAR ATMOSPHERES. A CONTRIBUTION TO THE OBSERVATIONAL STUDY OF HIGH TEMPERATURE IN THE REVERSING LAYERS OF STARS BY CECILIA H. PAYNE.* In: HARVARD OBSERVATORY MONOGRAPHS. HARLOW SHAPLEY, EDITOR. No. 1. PUBLISHED BY THE OBSERVATORY, CAMBRIDGE, MASSACHUSETTS, 1925. |PDF|

<https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1925HarMo...1.....P>

espressa in scala logaritmica. Anche ponendo (per eccesso) la media degli altri elementi attorno a 5, la Payne riporta di avere calcolato per idrogeno ed elio nella composizione delle stelle una abbondanza relativa dell'ordine dei milioni (11) e delle decine di milioni di volte (12) superiore.

Il dato era in netto contrasto con quanto si riteneva allora, tanto che nelle conclusioni la Payne rileva che *"... eccezionali discrepanze tra le abbondanze astrofisiche e terrestri sono evidenziate per l'idrogeno e l'elio"*. E per innata prudenza o in seguito a diplomatici suggerimenti aggiunge a titolo conclusivo: *"L'enorme abbondanza derivata per questi elementi nell'atmosfera stellare è quasi certamente falsa"* [20].

Ma in realtà la Payne aveva visto giusto!

Oggi sappiamo che il combustibile delle stelle è rappresentato dall'idrogeno (${}^1\text{H}$) e dall'elio (${}^4\text{He}$), che erano già presenti nel materiale primordiale del neonato universo, e che una volta innescatasi nelle stelle la fusione nucleare il processo di nucleosintesi porta alla formazione degli elementi [21] [22] – carbonio (${}^6\text{C}$), azoto (${}^7\text{N}$), ossigeno (${}^8\text{O}$), sodio (${}^{11}\text{Na}$), fosforo (${}^{15}\text{P}$), zolfo (${}^{16}\text{S}$), cloro (${}^{17}\text{Cl}$), potassio (${}^{19}\text{K}$), calcio (${}^{20}\text{Ca}$) – fino all'atomo del ferro (${}^{26}\text{Fe}$). Fino a questo momento la gravità, che tende a compattare una stella, e la pressione del gas e della radiazione dovute alle reazioni nucleari che avvengono a suo interno, che tendono a farla espandere, sono in equilibrio tra loro e la stella risulta stabile.

Quando è arrivata al ferro, in una stella la fusione nucleare non può procedere oltre: terminato il suo combustibile la stella inizia a raffreddarsi, la pressione verso l'esterno diminuisce e possono accadere due cose: se la stella ha una massa modesta si spegne progressivamente e, passando attraverso la fase di gigante rossa, si trasforma in una nana bianca (questo accadrà per il nostro sole), mentre se ha una massa elevata la gravità prende improvvisamente il sopravvento, la stella collassa ed esplode in una supernova [23]: le imponenti reazioni di fusione nucleare generate nell'esplosione producono gli elementi più pesanti del ferro, che vengono scagliati e dispersi nel cosmo con gli strati esterni della stella, mentre il suo nucleo residua sotto forma di una stella di neutroni o di un buco nero.

"Durante la vita della nostra galassia, la Via Lattea, ci sono stati qualcosa come 100 milioni di esplosioni di Supernova, che hanno arricchito la galassia con l'ossigeno che respiriamo, il ferro delle nostre auto, il calcio delle nostre ossa e il silicio delle rocce

[20] *"... outstanding discrepancies between the astrophysical and terrestrial abundances are displayed for hydrogen and helium. The enormous abundance derived for these elements in the stellar atmosphere is almost certainly not real"*, p. 185

[21] Fred Hoyle. *The Synthesis of the Elements from Hydrogen*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 106, Issue 5, October 1946. | [PDF](#) |

<https://doi.org/10.1093/mnras/106.5.343>

[22] E. Margaret Burbidge, G. R. Burbidge, William A. Fowler, and F. Hoyle. *Synthesis of the Elements in Stars*. Rev. Mod. Phys. 29, 547 – Published 1 October, 1957. | [PDF](#) |

<https://doi.org/10.1103/RevModPhys.29.547>

[23] Andrea Pastorello. *Supernove: quando esplodono le stelle*. Media Inaf. Il notiziario online dell'Istituto nazionale di astrofisica.

<https://www.media.inaf.it/2017/07/07/supernove/>

Articoli relativi a Supernove. Media Inaf. Il notiziario online dell'Istituto nazionale di astrofisica.

<https://www.media.inaf.it/tag/supernove/>

sotto i nostri piedi" [24].

Dalle nubi di gas e polveri che permeano il cosmo si generano nuove stelle (attorno a qualcuna di esse le polveri ricche di elementi pesanti generate dalle supernove possono dare origine a sistemi planetari e pianeti come la Terra) e il ciclo ricomincia [25].

L'enorme prevalenza di idrogeno e di elio nella composizione delle stelle è oggi riconosciuta come la base fondante del loro funzionamento e dell'evoluzione dell'universo: e Cecilia Payne aveva davvero scoperto di cosa sono fatte le stelle.



[24] Burrows, A. *Supernova explosions in the Universe*. Nature 403, 727–733 (2000).
<https://doi.org/10.1038/35001501>

[25] *Our Solar System: Facts*.
<https://science.nasa.gov/solar-system/facts/>