

DARWIN TRA LE STELLE

Lucio Crivellari

INAF – Osservatorio Astronomico di Trieste ed Instituto de Astrofísica de Canarias

Prefazione

Scriveva Einstein nel 1915 a Moritz Schlick ¹:

Avete già visto come questa corrente di pensiero [il positivismo] è di grande influenza sui miei sforzi, in particolare E. Mach e soprattutto Hume, di cui ho studiato con entusiasmo ed ammirazione il suo 'Saggio sull'Intelletto Umano' poco prima della scoperta della relatività. È ben possibile che, senza questi studi filosofici, non sarei pervenuto alla soluzione.

Nel suo libro *The Conceptual Developemnts of Quantum Mechanics* (JAMMER, 1966), Max Jammer afferma che il contesto filosofico dell'epoca in cui uno scienziato vive ha sovente un'influenza determinante sull'origine dei concetti innovativi da lui introdotti.. Se questo punto di vista è largamente condiviso, personale è la sua successiva osservazione che le considerazioni filosofiche di uno scienziato non sono per lui espliciti orientamenti, ma agiscono sul suo pensiero come una corrente sotterranea. Per altro, la natura stessa del metodo scientifico lo porta necessariamente a confrontare i suoi preconcetti filosofici con l'evidenza dei dati di fatto. Ogni teoria originale apre nuovi cammini all'indagine, indipendentemente dal fatto che possa essere confutata più tardi proprio dai risultati sperimentali a cui essa stessa ha fornito l'accesso. In questo articolo desidero ricordare la figura di Norman Lockyer, uno dei pionieri dell'astrofisica nella seconda metà del XIX secolo. Il suo cospicuo apporto, in particolare nell'ambito dell'applicazione della spettroscopia all'interpretazione degli spettri stellari, che segna la nascita dell'astrofisica, è un perfetto esempio della precedente affermazione.



Fig. 1. Joseph Norman Lockyer (1836 – 1920). Astronomo inglese, è uno dei padri dell'astrofisica. A partire dal 1867 iniziò sistematiche osservazioni spettroscopiche delle macchie solari che lo portarono all'identificazione di una regione negli strati più esterni del sole, da lui denominata cromosfera. Indipendentemente dall'astronomo francese Jules Jansen, nel 1868 giunse alla conclusione che una riga gialla osservata nello spettro solare era dovuta ad un elemento chimico sino ad ora non identificato, che battezzò elio dal nome greco del sole. Fu anche un pioniere dell'archeoastronomia. Nel 1869 fondò la rivista Nature. Membro della Royal Society dal 1869, venne condecorato nel 1897 con il titolo di Knight Commander of the Bath Order.

¹ Moritz Schlick (1882 – 1936) Filosofo tedesco, studiò fisica ad Heidelberg, Losanna ed a Berlino con Max Planck. Fondatore del *Cicolo di Vienna*, fu un promotore dell'empirismo logico.

Cercherò nel seguito di riassumere le sue intuizioni e teorie, frutto di un'ingente mole di lavori sperimentali e di osservazioni astronomiche, e di mettere in evidenza quanto è rimasto confermato dai successivi sviluppi della fisica atomica, a differenza della sua congettura sull'evoluzione stellare, smentita dalle teorie odierne. Particolare attenzione sarà dedicata al suo libro *Inorganic Evolution as Studied by Spectral Analysis* (LOCKYER, 1900).

L'evoluzionismo alla fine del XIX secolo

La teoria dell'evoluzione di Darwin è senza dubbio un'altra 'rivoluzione copernicana' nella storia del pensiero occidentale. Dopo la pubblicazione nel 1859 di *The Origin of Species*, non senza riserve e controversie principalmente di ordine teologico, il Darwinismo si sviluppò come una corrente che andava estendendo le idee evoluzionistiche ad un sempre più vasto ambito, tanto filosofico come socio-politico. Si deve soprattutto ad Herbert Spencer l'aver portato l'evoluzionismo al centro del dibattito intellettuale nelle ultime decadi del XIX secolo, non solo teorizzandolo nei suoi termini più generali, ma considerando anche le sue applicazioni a svariati campi della realtà sociale e della ricerca scientifica.

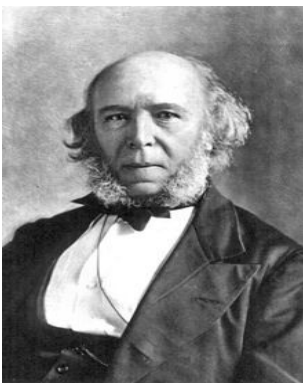


Fig. 2. *Herbert Spencer (1820 – 1903). Filosofo, biologo, antropologo e sociologo inglese. Fu Spencer ad introdurre il concetto che l'evoluzione abbraccia il progressivo sviluppo del mondo fisico, degli organismi biologici e della mente umana, così come della cultura e delle società umane. Sua è la famosa espressione 'la sopravvivenza del più forte'. Figura dominante nel panorama europeo alla fine del XIX secolo, la sua influenza declinò rapidamente dopo il 1900.*

La conservazione della materia, la continuità del movimento e la persistenza della forza sono per Spencer i principi più ampi cui è pervenuta la scienza. Essi, per altro, vanno unificati in quello più generale della redistribuzione continua della materia e del movimento secondo un progressivo mutamento di stato, che Spencer identifica con la legge dell'evoluzione: un cambiamento che parte da una forma meno coerente per arrivare ad una più coerente. Non si deve però ignorare – dice Spencer – che una trasformazione ancor più rilevante è quella per cui ogni tutto si suddivide in parti. Se nella prima trasformazione si passa da uno stato diffuso ad uno concentrato, nella seconda si va da uno stato omogeneo ad uno eterogeneo: i componenti della materia, mentre si integrano, nello stesso tempo si differenziano. L'evoluzione è dunque per Spencer, oltre che un passaggio dell'incoerente al coerente, una mutazione dall'uniforme al multiforme. Tale legge generale vale nella differenziazione del sistema solare in vari corpi celesti, nelle differenze che si vanno determinando all'interno della massa terrestre, nell'articolarsi degli organismi viventi, così come nei gruppi e classi all'interno della società.

Lockyer e l'analisi spettrale

L'analisi spettrale è uno strumento fondamentale nello studio dell'emissione ed assorbimento della radiazione luminosa ed offre – come si comprese fin dagli inizi – la chiave per dedurre la composizione chimica e lo stato fisico dei corpi celesti. Prima di riassumere la sua lunga e fruttuosa attività, è opportuno menzionare gli sviluppi delle tecniche spettroscopiche nell'arco di tempo che abbraccia le osservazioni di Lockyer, dagli inizi fino alla pubblicazione dei risultati che presenteremo nel seguito, perchè il progresso tecnologico è intrinsecamente legato con quello delle teorie scientifiche. Dall'uso del prisma come mezzo disperdente, nella prima metà del secolo XIX si passò ad utilizzare reticoli di trasmissione prima (introdotti da Fraunhofer nel 1814) e successivamente di riflessione. Si deve la loro introduzione ad Andres J. Ångstrom nel 1869; Henry A. Rowland negli ultimi due decenni del secolo portò la tecnica d'incisione al suo culmine. Fondamentale fu l'introduzione della lastra fotografica, collocata come ricettore dietro allo spettroscopio.

Le righe spettrali 'rinforzate' ed i proto-elementi

Verso la metà del XIX secolo le ricerche di Kirchhoff e Bunsen stabilivano i fondamenti per lo studio quantitativo della radiazione termica, cioè quella emessa da un corpo a spese della sua energia interna e quindi funzione della sua temperatura. Sulla base dei loro risultati, l'idea generalmente accettata era che ad ogni elemento corrisponde uno spettro. Soggiacente a tale congettura stava l'ipotesi che gli elementi fossero costituiti da atomi 'chimici' indivisibili, definiti dal loro peso atomico, o da molecole, combinazioni dei precedenti. Tale ipotesi era però viziata dal fatto che gli spettri osservati in laboratorio erano ottenuti da sorgenti di radiazione termica a basse temperature (fiamme). L'introduzione di correnti elettriche (arco voltaico o bobine d'induzione) per eccitare il campione esaminato permise di ottenere spettri (di scarica o di scintilla) corrispondenti a temperature più elevate di quelle raggiungibili con un becco Bunsen.

A partire dal 1865 Lockyer cominciò ad applicare i principi dell'analisi spettrale ai corpi celesti, ottenendo risultati che – come egli stesso scrisse – dimostrano la perfetta armonia dei fenomeni osservati nelle stelle, nella cromosfera solare ed in laboratorio. In particolare, si dedicò allo studio dei cambiamenti negli spettri di metalli e gas, prodotti in laboratorio a differenti temperature. Osservò che per metalli di basso peso atomico, come il litio ed il sodio, una fiamma è sufficiente per produrre uno spettro. Però nel caso di metalli come il rame o lo zinco era necessario ricorrere ad un arco voltaico. Nemmeno questo bastava per metalli di elevato peso atomico, quali il magnesio, il calcio o il ferro, il cui spettro poteva essere ottenuto solamente per mezzo di una scarica prodotta da una bobina d'induzione ad alto voltaggio. Il risultato più importante ottenuto e riportato da Lockyer, confermato più tardi dagli sviluppi della fisica atomica, è la scoperta che, passando dallo spettro di arco a quello di scintilla (e giocando in questo caso con tensioni crescenti), appaiono nuove righe o le righe presenti anteriormente risultano più intense. Lockyer chiamò queste ultime *righe rinforzate*. Commenta successivamente Lockyer che il conseguimento di righe rinforzate richiede si mantenga la regione di formazione entro gli elettrodi al riparo dell'abbassamento della temperatura. Nel caso di un gas questo risulta impossibile nella pratica di laboratorio, però possono essere osservate nelle atmosfere stellari.

Sulla base delle sue sistematiche osservazioni, fin dal 1879 Lockyer mostrò la convinzione che gli atomi costituenti gli elementi chimici non erano le componenti ultime ed indivisibili della

materia. Al contrario, per effetto di temperature molto elevate o di forti scariche elettriche, potevano spezzarsi in componenti più elementari, da lui chiamati *proto-elementi*. In quello stesso periodo il

chimico francese Marcel Berthelot (BERTHELOT, 1878) affermava che lo studio approfondito delle proprietà fisiche e chimiche di quelli che venivano classificati come corpi semplici portava sempre più a considerarli non come atomi indivisibili ed omogenei, ma come strutture complesse dotate di moti interni.

Nel 1897 Pickering ² scoprì negli spettri di ζ Pup una serie di righe non identificate ed attribuite in un primo tempo ad un elemento ancora sconosciuto. Rydberg ³ dimostrò per primo che le lunghezze d'onda della nuova serie potevano essere ottenute assegnando valori interi e semi-interi all'indice intero della formula di Balmer. Pickering e Kayser attribuirono le righe ad una nuova forma di idrogeno, non osservata in laboratorio perchè prodotte da una temperatura estremamente elevata. Lockyer si rese conto che la relazione tra le nuove serie e quelle ordinaria è analoga alla relazione osservata tra le righe proto-metalliche e metalliche, e non esitò a chiamare proto-idrogeno la nuova sostanza. Solamente i successivi lavori di Fowler, Evans e Parker tra il 1914 ed il 1916, alla luce della teoria atomica di Bohr, stabilirono che la serie di Pickering era dovuta all'elio ionizzato

L'evoluzione dei corpi celesti secondo l'ipotesi meteorica

Nel suo libro *The Meteoritic Hypothesis* (LOCKYER, 1890) Lockyer avanza l'ipotesi che i corpi celesti sono il risultato di un processo evolutivo, a partire da meteoriti primigenie. Il processo inizia con la formazione di nebulose, il prodotto di costanti collisioni interne dentro sciame di meteoriti. In una prima fase di condensazione si va sviluppando un nucleo, sul quale vanno cadendo le meteoriti, attratte dal crescente campo gravitazionale della massa che si va accumulando nel centro dello sciame. Dall'analisi degli spettri delle nebulose, dominati dalle righe di elementi allo stato gassoso (H, He, composti carbonici) e con scarse righe dei metalli, la cui presenza è certificata dalle meteoriti terrestri, Lockyer trasse la conclusione che le nebulose sono un coacervo di gas e vapori metallici, risultato delle collisioni. La presenza di righe metalliche e l'assenza di righe rinforzate erano per Lockyer la prova di una temperatura relativamente bassa dell'insieme.

Indipendentemente dalla sua estensione e forma iniziale, ogni nebulosa deve contraersi gravitazionalmente, e tutte le meteoriti cadere verso il centro di condensazione. Al crescere l'efficacia degli impatti la temperatura della condensazione centrale aumenta, ed alla fine tutto il materiale originariamente contenuto nello sciame è ridotto e si mantiene allo stato gassoso. Il risultato finale è una sfera di gas, il cui centro ad altissima temperatura è circondato da un'atmosfera più fredda che ne assorbe la radiazione emessa. Nella terminologia dell'epoca quest'atmosfera esterna veniva chiamata lo *strato assorbente*. A partire dal momento in cui il processo di accrescimento termina per esaurimento del materiale meteorico disponibile, inizia una seconda fase, nella quale l'evoluzione termica della massa di gas che costituisce la stella è quella di un corpo che si raffredda. Lockyer chiamò *ascendente* la prima delle due fasi, *discendente* la seconda.

Un importante corollario della teoria era la differente struttura delle atmosfere delle stelle nella sequenza ascendente ed in quella discendente. Nel primo caso, per effetto del bombardamento

2 William Henry Pickering (1858 – 1938) Astronomo statunitense, fu direttore per tre decenni dell'Harvard College Observatory ed il padre della classificazione spettrale di Harvard pubblicata nell'*Henry Draper Catalogue*.

3 Johannes Rydberg (1854 - 1919) Fisico svedese. Il suo più importante contributo alla spettroscopia atomica fu la generalizzazione ad altri elementi della formula di Balmer per le righe spettrali dell'idrogeno.

meteoritico, tutta la massa dell'atmosfera sarebbe costituita da vapori eterogenei a temperature differenti, che si muovono con velocità diverse nelle differenti regioni. Nel caso di un corpo già condensato ed in fase di raffreddamento l'atmosfera si troverebbe invece in uno stato di relativa quiete, caratterizzata da una distribuzione graduale dei vapori con la profondità. Ne consegue – secondo Lockyer – che le differenze osservate negli spettri sarebbero dovute principalmente al diverso grado di condensazione ed alla temperatura del materiale, differenze da attribuire a differenti meccanismi di assorbimento della radiazione e non ad un'essenziale differenza di composizione chimica.

La classificazione 'chimica' delle stelle

Dopo la presentazione della memoria di Kirchhoff davanti all'Accademia delle Scienze di Berlino nel l'ottobre del 1859 (KIRCHOFF, 1859), vari astronomi cominciarono a studiare sistematicamente gli spettri stellari. Anche se le tre leggi dell'analisi spettrale, dedotte da Kirchhoff e Bunsen, permettevano una spiegazione qualitativa delle righe osservate da Fraunhofer nello spettro solare, rimaneva aperta la questione di quale fosse il reale significato fisico delle differenze spettrali osservate nei singoli oggetti celesti. In particolare, era lecito chiedersi se ogni stella avesse il suo proprio spettro, o se invece famiglie di stelle distinte condividessero le medesime caratteristiche. È ben noto che Angelo Secchi fu un precursore nella classificazione spettrale delle stelle, basandosi sulla variazione del 'colore' del loro spettro continuo e la presenza di determinate righe spettrali. In due successive *Memorie della Società Italiana delle Scienze* (SECCHI, 1867 e 1869) egli introdusse una classificazione nella quale si individuavano quattro gruppi con caratteristiche ben definite, che egli interpretò correttamente come dovute ad una sequenza di temperature. Negli stessi anni Hermann Vogel all'Osservatorio di Postdam era giunto indipendentemente a risultati e conclusioni analoghe.

In una nota letta davanti alla Royal Society nel 1899, Lockyer affermava che i più recenti progressi nella 'chimica delle stelle' permettevano di stabilire uno schema generale di classificazione, in accordo con la sua teoria dell'evoluzione cosmica. Il confronto tra lo spettro della cromosfera solare, osservata nelle eclissi, con quello di una stella più calda come α Cygni e con quelli di stelle che, per l'estensione del loro spettro continuo, dovevano esser ancora più calde, confermava che a differenti temperature corrispondevano ben distinte caratteristiche spettrali. La presenza e l'aspetto delle righe visibili negli spettri stellari, confrontati con quelli generati in laboratorio da sorgenti a temperature via via crescenti, portò Lockyer a definire una sequenza termometrica crescente, secondo il criterio che alle temperature più alte corrisponde la 'chimica' più semplice. Nelle intenzioni di Lockyer tale classificazione spettrale doveva sostenere la sua ipotesi meteorica. I criteri spettroscopici per la determinazione della temperatura (LOCKYER, 1899) sono riassunti nella Tabella 1⁴. Si basano sul principio che a temperature più elevate corrisponde la chimica più semplice.

La classificazione 'chimica', schematizzata in Fig. 3, raggruppa quelli da lui chiamati 'generi' (oggi tipi spettrali) in quattro grandi famiglie di stelle: gassose, proto-metalliche, metalliche e carboniche. Pur con rimarcabili differenze, a grandi linee la classificazione di Lockyer è affine a quella di Secchi.

4 Nella Tabella 1 è menzionato l'asterium. Dopo che Ramsay nel 1895 ebbe estratto in laboratorio l'elio dalla cleveite (minerale radiativo dell'uranio), Paschen e Runge registrarono uno spettro completo dell'elio, nel quale osservarono una serie di doppietti ed una di righe singole. Pensarono che l'elio fosse un composto di due gas differenti: *ortoelio* e *paraelio*; Lockyer battezzò *asterium* il secondo. Oggi (stabilito grazie ad una maggiore risoluzione che i doppietti sono in realtà tripletti) sappiamo che le differenti serie dell'ortoelio e paraelio si devono ai livelli energetici dell'atomo di elio, determinati secondo il principio di esclusione di Pauli dall'allineamento degli spin dei due elettroni.

	Argoniane (γ^2 Vel)	
	predominanti: H e proto-idrogeno deboli: He, proto-Mg, proto-Ca, asterium	
	Alnitamiane (ϵ Ori)	
	predominanti: H, He, proto-Si, deboli: asterium, proto-H, proto-Mg, proto-Ca, C, N, O	
Sequenza ascendente		Sequenza discendente
righe proto-metalliche allargate righe H sottili		righe proto-metalliche sottili righe H allargate
Crociane (β Cru)	predominanti: H, He, asterium, C, N, O deboli: proto-Mg, proto-Ca, proto-Si, Si	Achernariane (α Eri)
Tauriane (ζ Tau)		Algoliane (β Per)
predominanti: H, proto-Ca, proto-Mg, asterium deboli: proto-Ca, Si, C, N, O, proto-Fe, proto-Ti		predominanti: H, proto-Mg, proto-Ca, He, Si deboli: proto-Fe, asterium, C, proto-Ti, proto-Cu, proto-Mn, proto-Ni
Rigeliane (β Ori)		Markabiane (α Peg)
predominanti: H, proto-Ca, proto-Mg, He, Si deboli: asterium, proto-Fe, C, N, proto-Ti		predominanti: H, proto-Ca, proto-Mg, Si deboli: proto-Fe, He, asterium, proto-Ti, proto-Cu, proto-Mn, proto-Ni, proto-Cr
Cigniane (α Cyg)		Siriane (α CMa)
predominanti: H, proto-Ca, proto-Mg, proto-Fe, Si, proto-Ti, proto-Cu, proto-Cr deboli: proto-Ni, proto-V, proto-Mn, proto-Sr, righe arco Fe		predominanti: H, proto-Ca, proto-Mg, proto-Fe, Si deboli: righe di altri proto-metalli, righe arco Fe, Ca, Mn
Polariane (α UMi)	predominanti: proto-Ti, H, proto-Mg, proto-Fe, righe arco Ca, Fe e Mn deboli: altri proto-metalli e metalli presenti nel genere Siriano	Procioniane (α CMi)
Aldebaraniane (α Tau)		Arturiane (α Boo)
	predominanti: proto-Ca, righe arco Fe, Ca, Mn, proto-Sr, H deboli: proto-Fe, proto-Ti	
Antariane (α Sco)		Pesciane (19 Psc)
predominanti: scanalature del Mn deboli: righe dell'arco degli elementi		predominanti: scanalature del C

Tabella 1. I criteri della classificazione chimica. Dall'alto in basso, secondo una sequenza decrescente di temperature dedotta dalla presenza e dall'intensità di determinate righe spettrali, riportiamo i gruppi individuati da Lockyer (dei quali conserviamo la sua nomenclatura originale, ispirata dalla terminologia degli strati geologici) ed indichiamo in parentesi la stella rappresentativa da cui prendono il nome. Con l'eccezione delle stelle più calde, per le quali non si può determinare la separazione, le stelle del ramo ascendente sono riportate nella colonna di sinistra, quelle del ramo discendente nella colonna di destra.

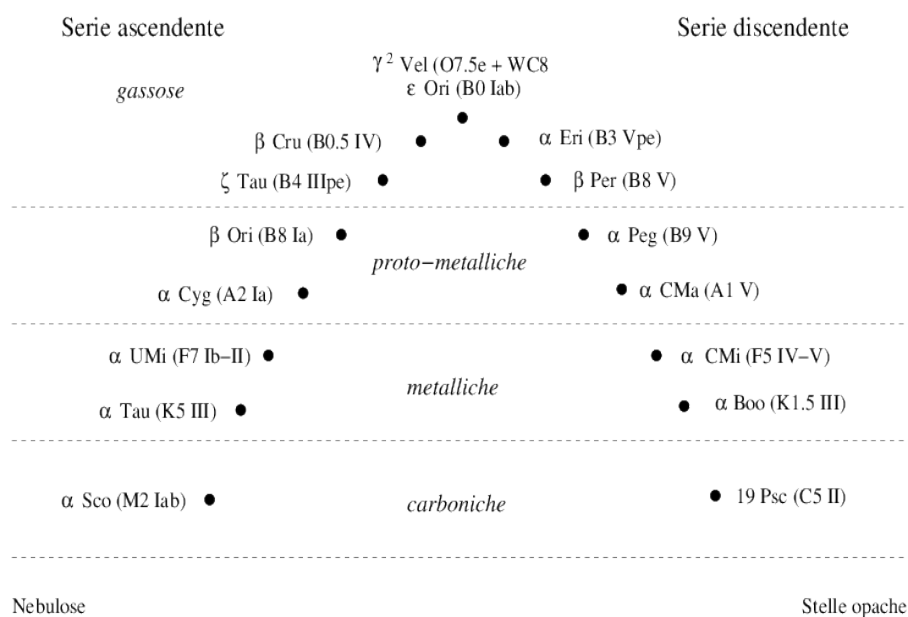


Fig. 3. Schema della classificazione chimica di Lockyer. Le stelle rappresentative dei tipi spettrali sono ordinati dall'alto verso il basso secondo una sequenza decrescente di temperatura, dedotta dai criteri spettrali elencati in Tabella 1. Nella figura ad ogni circolo corrisponde un genere (tipo spettrale), individuato dalla sua stella rappresentativa, della quale è indicata in parentesi la classificazione attuale. La presente figura è stata elaborata sulla base della Figura 4 di LOCKYER, 1888.

Una ulteriore ed importante osservazione di Lockyer fu che a parità di temperatura media, dedotta dalla presenza di certe righe spettrali, l'aspetto di queste ultime può essere differente. Per esempio, nello spettro di ζ Tau le righe dell'idrogeno sono ben definite, e non molto larghe, mentre altre, specialmente quelle dell' He neutro sono allargate al punto di risultare quasi invisibili. Dentro l'ipotesi meteorica questo si spiegava con la grande differenza di velocità e direzione dei flussi meteorici. Lo spettro di ζ Tau era la chiave interpretativa delle differenze osservate nell'aspetto delle righe degli spettri di Sirio (sequenza discendente) ed α Cyg (sequenza ascendente), e di quelli di Procione (discendente) e γ Cyg (ascendente), riprodotti in Fig. 4. Resta allora definito un ulteriore criterio spettroscopico, che permette di discriminare le stelle della sequenza ascendente da quelle della sequenza discendente. Nel suo schema originale Lockyer definisce esplicitamente i criteri per separare i due gruppi dentro un intervallo di temperature che va dalla coppia di stelle gassose più calde (ζ Tau, β Per) a quella di stelle metalliche più fredde (α Umi, α Cmi): le stelle della sequenza ascendente presentano righe *proto-metalliche* allargate e righe dell'idrogeno sottili; per quelle della sequenza discendente vale il contrario. È significativo mettere in risalto che le righe 'rinforzate' di Lockyer coincidono con le righe intense identificate da Miss Maury⁵ nel suo gruppo 'c'. Come si può vedere nella Fig. 3, le stelle del ramo ascendente

5 All'eminente astronoma statunitense Antonia Maury, nipote di Henry Draper e collaboratrice di Edward Pickering all'Harvard College Observatory, si deve la classificazione spettrale raccolta nel Draper Catalogue (Maury e Pickering, 1897). Il più originale contributo di Maury fu la suddivisione dei tipi spettrali in tre gruppi, contraddistinti dalle lettere *a*, *b* e *c*, a seconda dell'apparenza nitida o diffusa delle righe osservate.

Sirio (α Cma)
 Deneb (α Cyg)
 Procione (α CMi)
 Sadr (γ Cyg)

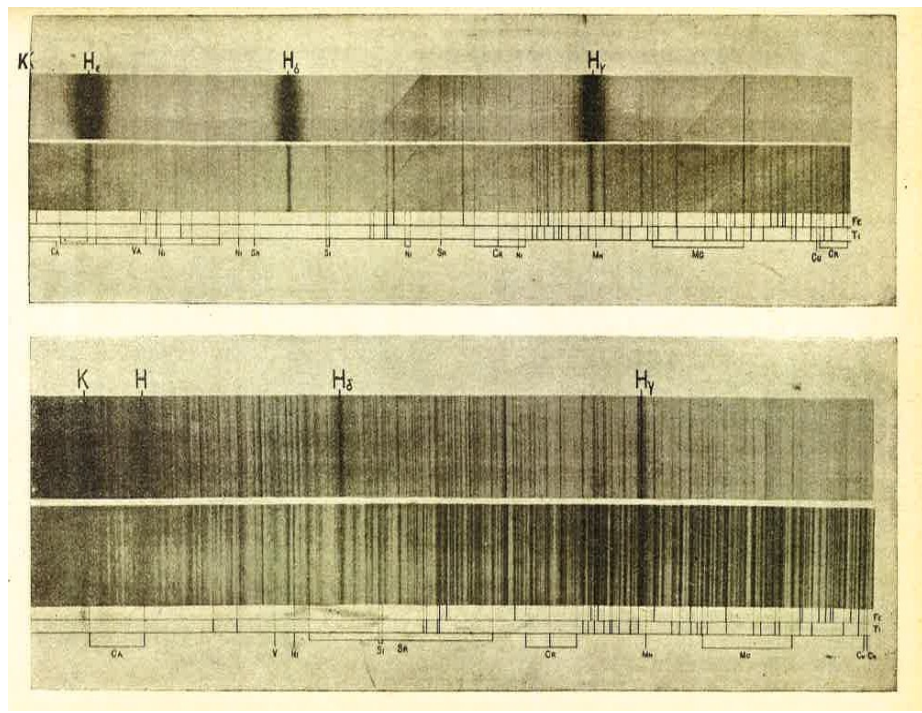


Fig. 4. Nella parte superiore sono riportati gli spettri di Sirio (A1 V) e Deneb (A2 Ia), in quella inferiore gli spettri di Procione (F5 IV-V) e Sadr (F8 Iab). Le prima e la terza, collocate da Lockyer sulla sua sequenza discendente, sono attualmente classificate come stelle nane; la seconda e la quarta, sulla sequenza ascendente, come supergiganti. Nei primi due spettri si nota il differente aspetto delle righe H ϵ , H δ ed H γ della serie di Balmer dell'idrogeno. Nella parte di destra dello spettro di Sadr (lunghezze d'onda minori) il numero e l'intensità delle righe metalliche (Sr, Cr, Mn, Mo, etc.) sono notevolmente diversi rispetto a Procione. (Riproduzione dalle figure originali 28 e 29 dell' *Inorganic Evolution*)

(con l'eccezione di β Cru) sono oggi classificate come stelle giganti o supergiganti, quelle del ramo discendente (con l'eccezione di α Boo) come stelle nane.

L'evoluzione inorganica

Nell'ultima parte dell' *Inorganic Evolution* Lockyer riconsidera l'insieme dei dati osservativi raccolti per il sole e le stelle da un punto di vista che giustifica il titolo del presente articolo: i fenomeni non sono più esaminati alla luce della sua teoria della dissociazione, bensì da un punto di vista evolutivo. L'evoluzione organica viene da lui definita come la produzione di nuove forme a partire da altre preesistenti, di modo che le piante ed animali attuali discendono da un numero limitato di prototipi più semplici attraverso una lunga serie di modifiche e trasformazioni, sequenziali o simultanee. Caratteristica essenziale del processo evolutivo è il passaggio dal semplice al complesso per effetto di cause naturali. Accettata come un dato di fatto l'evoluzione del mondo organico, Lockyer postula che anche gli elementi chimici siano il risultato di un processo evolutivo, governato dalla temperatura. Per effetto del calore gli elementi si dissociano o si ricombinano a seconda dei cambiamenti di temperatura. I differenti gradi di dissociazione rivelano i modi in cui la ricombinazione ha prodotto quello che può essere successivamente dissociato. In tale prospettiva il prodotto ultimo della dissociazione per effetto di un'elevata quantità di calore somministrata deve costituire la forma chimica primitiva. Al contrario l'abbassamento della temperatura conduce alla

formazione di elementi più complessi, rivelati dalla crescente complessità dei loro spettri. (Il *coagula et solve* degli alchimisti!) I proto-elementi, prodotto di elevate temperature come dimostrato dall'analisi spettrale, devono pertanto costituire le più semplici specie primigenie.

Lockyer attribuisce a Proust ⁶ la prima idea di un'evoluzione inorganica, quando nel 1815 afferma che l'idrogeno è l'elemento primigenio e tutti gli altri elementi sono aggregati di questo, con pesi atomici multipli di quello dell'idrogeno. La legge periodica degli elementi, suggerita da John Newlands nel 1864 ed elaborata compiutamente da Dmitri Mendeleev nel 1865, conferma che le proprietà chimiche e fisiche degli elementi sono funzioni periodiche del loro peso atomico. Rydberg nel 1889 ritornò all'ipotesi di Proust. Secondo Lockyer l'insieme di questi studi (che però per ammissione dello stesso Lockyer non hanno alcun rapporto con un'eventuale effetto della temperatura) indicherebbero un'azione continua che avrebbe prodotto col tempo trasformazioni da una materia primitiva semplice a forme più complesse. Gli elementi che noi conosciamo non sarebbero quindi il prodotto di una creazione specifica per ciascuno di essi, ma l'azione di una legge generale di evoluzione, come nel caso delle piante e degli animali.

Risulta chiaro che tale evoluzione inorganica non ha una relazione diretta con l'evoluzione stellare. Però le stelle giocano per l'evoluzione inorganica un ruolo analogo agli strati geologici per quella organica. Le forme viventi evolvono con il tempo, e la successione dei giacimenti permette di stabilire una corrispondenza tra l'epoca di formazione dello strato e la fase evolutiva delle specie fossili in esso contenute. L'evoluzione inorganica è il prodotto della temperatura; pertanto lo spettro delle atmosfere stellari, che da questa dipende soprattutto, rivela le specie chimiche esistenti nelle distinte classi di stelle. I due rami, ascendente e discendente, della classificazione chimica sono il prodotto del processo evolutivo risultante dall'ipotesi meteorica. I criteri spettroscopici esaminati precedentemente assegnano una temperatura media a ciascun gruppo di stelle sui due rami, e questo (I Problemi dell'Universo) permette di associare l'evoluzione delle specie chimiche con l'evoluzione temporale delle stelle.

Considerazioni conclusive

La figura di Lockyer rimane oggi immeritadamente in un secondo piano. Anche se la sua ipotesi meteorica venne presto confutata e la sua teoria dell'evoluzione inorganica rimane l'effimero prodotto del clima intellettuale dell'epoca, la sua ipotesi della dissociazione degli elementi chimici, basata sull'evidenza sperimentale delle righe spettrali rinforzate, e la congettura dei proto-elementi trovarono conferma tre decenni dopo negli sviluppi della fisica atomica. Rispetto all'evoluzione inorganica, Lockyer non esita ad affermare esplicitamente che, nelle condizioni ambientali (si legga, temperatura) corrispondenti a ciascun 'genere' di stelle, si mantengono le specie chimiche più adatte. Questa estrapolazione della sopravvivenza delle specie organiche che meglio si adattano al loro medio ambiente riflette una visione ilozoistica della materia, che aveva sperimentato una rinascita nell'ambito del materialismo ottocentesco. Citeremo al riguardo Ernest Haeckel ⁷, che nel suo *Die Welträstel (I Problemi dell'Universo)*, pubblicato nel 1899, aveva avanzato la congettura che gli atomi stessi fossero animati, e la materia e l'etere dotati di sensibilità e di volontà. L'ipotesi di una tale evoluzione inorganica non è sostenibile, perchè la materia non possiede la memoria genetica degli organismi viventi. Oggi, dopo Boltzmann, tutto quello che possiamo dire è che ad una determinata temperatura troviamo la configurazione microscopica più probabile secondo le leggi della meccanica statistica.

6 Joseph Louis Proust (1754 – 1826) Farmaceutico e chimico francese, fu uno dei padri della chimica moderna. Si deve a lui la fondamentale legge delle proporzioni definite.

7 Ernest Haeckel (1834-1919) Naturalista, biologo e filosofo tedesco, divulgò in Germania le teorie di Darwin. I suoi studi di biologia marina lo portarono a postulare un'origine inorganica per le forme organiche più semplici. Nel 1866 anticipò che i fattori ereditari risiedono nel nucleo della cellula.

È il caso di sottolineare che Lockyer ebbe l'intuizione della dissociazione degli elementi per opera del calore quando la struttura atomica era ancora sconosciuta. L'atomo di elettricità, l'elettrone, fu scoperto nel 1895 grazie agli esperimenti di Joseph J. Thomson, ed è nel 1904 quando questi pubblicò il suo articolo sul modello dell'atomo 'panettone', con gli elettroni liberi di oscillare dentro una distribuzione omogenea di carica elettrica positiva. Solamente nel 1913, dopo i risultati degli esperimenti di Rutherford dell'anno precedente, Bohr formulava la sua teoria dell'atomo, con gli elettroni che descrivono orbite attorno ad un nucleo con carica positiva. Se l'energia fornita è sufficientemente elevata, l'atomo può essere ionizzato come conseguenza dell'espulsione di uno o più elettroni. Su queste basi teoriche Saha ⁸ enunciò nel 1920 la sua legge, che determina il grado di ionizzazione degli elementi in funzione della temperatura e della pressione elettronica. Conseguentemente i proto-elementi di Lockyer poterono essere identificati con i differenti gradi di ionizzazione degli elementi. La ultima parola la disse nel 1925 Cecile Payne-Gaposchkin (PAYNE, 1925), quando fornì un'interpretazione fisicamente consistente della classificazione spettrale di Harvard sulla base della legge di Saha. Il fatto che, a parità di temperatura, la pressione sia differente nelle stelle oggi definite come nane, giganti e supergiganti, fornisce criteri spettroscopici per la loro classificazione, in base alla presenza/assenza ed all'aspetto delle righe osservate nel loro spettro.



Figura 5. Cecile Payne – Gaposchkin (1900 – 1979) Astrofisica inglese, nazionalizzata statunitense. Studiò botanica, fisica e chimica al Newnham College della Università di Cambridge. Di fronte all'impossibilità di dedicarsi agli studi scientifici in Inghilterra per essere una donna, sollecitò ed ottenne una borsa di studio all' Harvard College Observatory, dove svolse la sua straordinaria carriera di ricercatrice. Incoraggiata da Harlow Shapley, scrisse nel 1925 una tesi dottorale che Otto Struve e Velta Zeberg definirono come la più brillante tesi in astronomia scritta fino a quel momento. Indipendentemente dai suoi meriti scientifici, Cecile Payne è anche encomiabile per aver impiegato

le sue non comuni doti nella lotta contro i pregiudizi discriminatori dell'epoca. Sposata con il fisico russo Sergei Gaposchkin, fu molto attiva socialmente in seno alla locale comunità quacchera di Lexington (Massachusetts), dove vivevano con i loro tre figli.

Referenze bibliografiche

- Bertholet M., *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Tome XC, p. 1511, 1878.
 Jammer M., *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, McGraw-Hill, 1966.
 Kirchhoff G., *Monatsberichte Akademie der Wissenschaften*, Berlin, p. 662, 1859.

⁸ Meghnad Saha (1893 – 1956) Fisico indiano. Si deve a lui la legge sulla ionizzazione termica degli elementi, formalizzata nell'equazione che porta il suo nome.

Lockyer, N., *Proc. R. Soc.*, **44**, 1, 1888.

----- *The Meteoritic Hypothesis: A Statement of the Results of a Spectroscopic Inquiry into the Origin of Cosmical Systems*, Macmillan and CO., 1890.

----- *Proc. R. Soc.*, **65**, 387, 1899.

----- *Inorganic Evolution as Studied by Spectral Analysis*, Macmillan and CO., 1900.

Maury, A.C. e Pickering, E.C., *Harvard Observ. Ann.*, **28** (Parte I), 1, 1897.

Payne C., *Stellar Atmospheres. A Contribution to the Observational Study of Bright stars of High Temperature in the Reversing Layers of Stars*, The Observatory of Cambridge, Massachusetts, 1925

Secchi A., *Memorie della Società Italiana delle Scienze*, Serie Terza, Tomo I, Parte I, Firenze, 1867.

----- *Memorie della Società Italiana delle Scienze*, Serie Terza, Tomo II, Firenze, 1869.

Lucio Crivellari si è laureato in Fisica (orientamento Astrofisico) nel 1974 presso l'Università degli Studi di Trieste con M. Hack e R. Stalio. Ha conseguito il PhD in Astrofisica nel 2004 all'Universidad de La Laguna (Tenerife) sotto la direzione di E. Simmoneau, con il quale ha collaborato per tre decenni allo sviluppo di algoritmi numerici per la soluzione dell'equazione del trasporto radiativo nell'ambito delle atmosfere stellari. Ha svolto attività di ricerca all'Osservatorio Astronomico di Trieste, il Queen Mary College (University of London), l'Oservatoire de Paris-Meudon e l'Institut d'Astrophysique de Paris. Attualmente è ricercatore associato dell'INAF, associato senior dell'INFN ed *Investigador Afiliado* dell'Instituto de Astrofísica de Canarias. Per anni ha impartito il corso di spettroscopia atomica nel Master in Astrofisica dell' Universidad de La Laguna.