

Il Sole e la Terra: l'Apocalisse come e quando

R. Caimmi

29 dicembre 2009

1 Introduzione

In senso etimologico, “apocalisse” significa “rivelazione”, letteralmente “sollevamento di un velo”. La rivelazione per eccellenza, riferita alla fine del mondo, compare nella parte del Nuovo Testamento titolata, per l'appunto, “apocalisse”. Per tale motivo, il significato del termine si è discostato dall'etimologia originaria, fino a denotare un evento su grande scala in grado di portare mutamenti sostanziali e definitivi nell'ambiente dove ha operato, come si riconosce dagli esempi che seguono.

Su scala interregionale, si può considerare apocalittica la penetrazione del mare Mediterraneo (attraverso gli stretti di Dardanelli e del Bosforo) nella depressione che si estendeva al di là, comportante la formazione del mar Nero.

Su scala intercontinentale, si può considerare apocalittico il riscaldamento globale attualmente in atto, comportante un rapido aumento dell'effetto serra e lo scioglimento delle calotte glaciali.

Su scala interplanetaria, si può considerare apocalittico l'esaurimento del combustibile nucleare (costituito dall'idrogeno) all'interno del Sole, comportante un rapido aumento della luminosità e del raggio, fino a vaporizzare i pianeti più interni e il suo stesso inviluppo (pari a poco meno di metà della massa totale), destinato a disperdersi nella Via Lattea, mentre la massa restante si contrarrà fino a generare una nana bianca, con dimensioni comprese tra quelle della Terra e quelle di Marte.

Su scala interstellare, si può considerare apocalittico l'incontro ravvicinato (previsto fra circa un miliardo di anni) tra la Via Lattea e la galassia

di Andromeda, comportante la formazione di una galassia ellittica in seguito alla fusione dei due sistemi.

Su scala intergalattica, si può considerare apocalittica l'espansione dell'universo, comportante una riduzione progressiva della regione direttamente accessibile alle osservazioni (universo osservabile), destinata a ridursi ai soli membri del Gruppo Locale.

Su scala cosmica, si può considerare apocalittico l'aumento del tasso di espansione dell'universo dovuto a una particolare forma di energia oscura (energia fantasma), comportante la riduzione oltre ogni limite dell'universo osservabile, fino all'epoca del cosiddetto "strappo grosso" (prevista quando l'età del cosmo sarà all'incirca raddoppiata), oltre la quale la materia sarà ridotta ai suoi costituenti ultimi, infinitamente distanziati gli uni dagli altri.

Le considerazioni seguenti si limiteranno all'apocalisse su scala interplanetaria, riguardante in quanto tale il futuro della Terra e del Sole, e in generale del sistema solare.

2 Concezione del Sole nella tradizione indo-europea

Nella tradizione indo-europea, che più da vicino ci riguarda, il Sole è inteso essenzialmente quale divinità benefica, ma una più attenta analisi mostra che le cose non stanno proprio così. Senza alcuna pretesa di esaustività, le considerazioni svolte si limiteranno ai culti medioorientali e dell'antico Egitto, lasciando agli esperti in materia una trattazione di maggiore portata e competenza.

Secondo la cosmogonia medioorientale (successivamente acquisita dall'Ebraismo e quindi dal Cristianesimo e dall'Islamismo), l'entità primordiale è la dea Tiamtu o Tiamat (etimologicamente, "abisso", "profondità"), rappresentata in forma di gigantesco serpente marino, abitatore delle acque e della notte. Da Tiamtu successivamente si origina ogni cosa e ogni creatura, sia malefica (in forma di demoni e dragoni) che benefica (in forma di dei). Ben presto le forze del Male, guidate da Tiamtu, entrano in conflitto con le forze del Bene, guidate dal dio Sole, Belus o Bel-Marduk. Alla fine queste ultime prevalgono sulle schiere malefiche costituite da demoni e dragoni, la cui pre-

senza nel cielo oscura la Luna¹. Per rendere stabile e duratura la vittoria del Bene sul Male, Belus chiede agli altri dei di tagliare la testa a Tiamtu, affinché il sangue sgorgato dalla ferita fecondi la Terra, creando in tal modo la stirpe degli animali che la preserveranno dalla distruzione.

La contrapposizione tra il Bene e il Male risulta maggiormente delineata nella concezione dell'oltretomba propria dello Zoroastrismo, dove l'anima del defunto si trova a dover oltrepassare il ponte di *Colui che dà il rendiconto* (cinvato pertush), il quale si stende tra il Picco del Giudizio e il Sacro Monte Albortz, al di sopra dell'Abisso degli Inferi. Se il defunto, nel corso della vita, si è comportato in modo pio e caritatevole, il ponte si mantiene largo quanto nove giavellotti allineati, consentendo un transito agevole verso i luoghi di beatitudine. Se il defunto, nel corso della vita, si è comportato in modo empio e malvagio, il ponte si restringe progressivamente fino a ridursi alla lama di un rasoio, rendendo inevitabile la caduta nell'abisso e la successiva permanenza nei luoghi di dannazione, alla mercè del malefico dio mentitore, Ahriman.

Il duplice ruolo del Sole nella mitologia è evidenziato nella tradizione dell'antico Egitto. Il Sole, inteso quale Principio Creatore, è identificato nel dio Ra², e il disco solare nel dio Ammon. Per decisione del faraone Akenaton (XVIII dinastia), il disco solare (con la denominazione mutata in Aton) viene adorato come unico dio. La concezione del Sole quale Principio Creatore è mirabilmente espressa nell'inno fatto incidere da Akenaton su una parete della tomba del padre della propria sposa Nefertiti:

O Disco Solare Vivente,
quanto sei bello,
grande, splendente!
I Tuoi raggi circondano le terre
fino al limite di tutto ciò
che hai creato.
Come sono numerose le Tue opere,

¹È interessante notare come un simbolismo analogo si ritrovi nell'Apocalisse di San Giovanni, dove Maria (secondo l'interpretazione cattolica) o l'organizzazione di Dio (secondo altre interpretazioni), insidiata dal Dragone Satana, ha sotto i piedi la Luna e una corona di stelle in capo.

²È interessante notare come, nella tradizione dell'Induismo, il Principio Creatore si identifichi nel dio Brahma.

o Dio Unico,
a cui nessuno è uguale.
Hai creato la terra secondo il Tuo desiderio
e gli uomini e il bestiame,
e tutto ciò che è nel cielo.
Quando riposi la terra è nell'oscurità
come se fosse morta,
tutti i leoni escono dalla loro tana
tutti i serpenti mordono.

da confrontarsi con il Salmo 104 della Bibbia, posteriore di circa tre secoli
ma attinto probabilmente dalla stessa tradizione orale:

O Signore mio Dio
quanto sei grande!
Di maestà e di gloria Ti rivesti
quanto numerose sono le Tue opere
o mio Dio,
le hai fatte tutte con sapienza;
piena è la terra
delle Tue creazioni
Tu ordini le tenebre
ed è notte
e i giovani leoni ruggiscono
in cerca di prede.
Quando spunta il sole
si ritirano e si coricano nelle loro tane.

Nell'oltretomba egizio, il luogo di dannazione riservato alle anime di coloro
che condussero una vita empia e malvagia è l'Amenti, ricettacolo di spiriti
maligni e demoni, primo tra tutti Apep, serpente gigantesco divorato da una
fame insaziabile, al punto da voler mangiare il Sole ogniqualvolta la barca di
Ra transita per poi sorgere all'orizzonte dando inizio a un nuovo giorno. Ad
impedire che questo avvenga è il Sole stesso inteso come Principio Distruttore,
identificato nel dio Seth o Set³: ogniqualvolta Apep riesce ad ingoiare il Sole,

³È interessante notare come, nella tradizione dell'Induismo, il Principio Distruttore sia
identificato nel dio Shiva; nella tradizione del Cristianesimo, in Satana.

Seth gli stringe una catena al collo, in modo tale da farglielo rigettare. Nei rari momenti in cui Apep temporaneamente prevale, si ha un'eclisse di sole. In definitiva, Seth è il dio del sole che inaridisce la terra, causa la sete febbrile che precede la morte, tramonta cedendo spazio alla notte, distrugge i corpi e le cose.

Dalle considerazioni esposte intorno alla concezione del Sole negli antichi culti di cui si è fatto cenno, discendono due conclusioni principali. In relazione al mondo dei vivi, il Sole è inteso sotto una duplice veste: come Principio Creatore, identificabile nella Luce, e come Principio Distruttore, identificabile nel Fuoco. In relazione all'oltretomba, il Principio Creatore, o Luce, è presente nei luoghi di beatitudine, mentre il Principio Distruttore, o Fuoco, è presente nei luoghi di dannazione. Nella preservazione della Luce e del Fuoco nel mondo ultraterreno, si potrebbe ravvisare la traccia di un Principio Conservatore⁴.

Una tale dicotomia viene ulteriormente esaltata nella tradizione medievale, con particolare riferimento alla concezione dantesca dell'oltretomba, dove il Paradiso è sede della Luce e l'Inferno del Fuoco (pur comparando anche acqua e ghiaccio, a seconda della pena da scontare), come efficacemente espresso dai versi seguenti:

“(...) Noi siamo usciti fore
del maggior corpo al ciel ch'è pura luce:

luce intellettual, piena d'amore;
amor di vero ben, pien di letizia;
letizia che trascende ogni dolzore.”

(Dante, *Divina Commedia*, Paradiso XXX, vv. 38-42)

“(...) egli subito osserva quell'aspro e pauroso e desolato luogo,
quella prigione orribile e attorno fiammeggiante,
come una grande fornace, e tuttavia da quelle
fiamme nessuna luce, ma un buio trasparente, una tenebra
nella quale si scorgono visioni di sventura,

⁴È interessante notare come, nella tradizione dell'Induismo, il Principio Conservatore sia identificato nel dio Vishnu.

regioni di dolore e ombre d'angoscia, e il riposo e la pace non si troveranno, né mai quella speranza che ogni cosa solitamente penetra; e solo una tortura senza fine urge perenne, e un diluvio di fiamme nutrito di zolfo sempre ardente, mai consunto (...)"

(John Milton, *Paradiso Perduto*, libro I, vv. 59-69)

La concezione dell' Inferno come sede del Fuoco, è espressa più volte nel Nuovo Testamento:

“Ma la bestia fu catturata e con essa il falso profeta che alla sua presenza aveva operato quei portenti con i quali aveva sedotto quanti avevan ricevuto il marchio della bestia e ne avevano adorato la statua. Ambedue furono gettati vivi nello stagno di fuoco, ardente di zolfo.”

(Ap, 19,20)

“Se il tuo occhio ti scandalizza, cavalo: meglio per te entrare nella vita orbo, che essere gettato con due occhi nella Geenna, dove il loro verme non muore e il fuoco non si estingue.”

(Mc, 9,47-48)

“Il Figlio dell'uomo manderà i Suoi angeli, i quali raccoglieranno dal Suo Regno tutti gli scandali e tutti gli operatori di iniquità, e li getteranno nella fornace ardente dove sarà pianto e stridore di denti.”

(Mt, 13,41-42)

mentre la Fine del Mondo, e con essa l'Apocalisse, sono descritti con dovizia di particolari nel Corano:

“Il giorno in cui la terra e le montagne verranno scosse, sì che le montagne diverranno un ammasso di polvere dispersa.”

(Sura 73, vv. 14-15)

“Quando i mari ribolliranno.”

(Sura 81, v. 6)

“Quando il cielo si fenderà. Quando gli astri saranno dispersi.
Quando le acque dolci e quelle salate si mescoleranno.”

(Sura 82, vv. 1-3)

In base alle considerazioni precedentemente esposte, la concezione del Sole nella tradizione indo-europea si riflette sia nel mondo dei vivi che nell'oltretomba. In un quadro cosmogonico, all'inizio del Mondo il Sole si manifesta come Principio Creatore:

“Dio disse: -Sia la luce!-. E la luce fu. Dio vide che la luce era cosa buona e separò la luce dalle tenebre e chiamò la luce giorno e le tenebre notte.”

(Gen., 3-5)

seppure dopo una fase iniziale indifferenziata:

“La terra era informe e deserta, le tenebre ricoprivano l'abisso, e lo Spirito di Dio aleggiava sulle acque.”

(Gen., 1-2)

mentre alla fine del Mondo il Sole si manifesta come Principio Distruttore:

“Il giorno in cui il cielo produrrà un fumo visibile a tutti il quale avvolgerà tutti gli uomini.”

(Sura 44, vv. 9-10)

“Allora si scinderà il cielo, diventando scarlatto come il cuoio rosso.”

(Sura 55, v. 37)

“Il giorno in cui il cielo, sarà come bronzo fuso.”

(Sura 70, v. 8)

In un quadro ultraterreno, il Sole si manifesta come Principio Creatore (Luce) nei luoghi di beatitudine:

“e vidi lume in forma di rivera
fulvido di fulgore, intra due rive
dipinte di mirabil primavera.

Di tal fiumana uscian faville vive,
e d’ogne parte si mettien ne’ fiori,
quasi rubin che oro circunscrive;

poi, come inebriate da li odori,
riprofondavan sé nel miro gurge,
e s’una intrava, un’altra n’uscia fori.”

(Dante, *Divina Commedia*, Paradiso XXX, vv. 61-69)

e come Principio Distruttore (Fuoco) nei luoghi di dannazione:

“Poi dirà a quelli alla sua sinistra: -Via, lontano da me,
maledetti, nel fuoco eterno, preparato per il diavolo e per i suoi
angeli.-”

(Mt, 25,41)

“Se la tua mano ti scandalizza, tagliala: è meglio per te entrare nella vita monco, che con due mani andare nella Geenna, nel fuoco inestinguibile.”

(Mc, 9,43)

A questo punto, riesce naturale chiedersi se la duplice concezione del Sole, come Luce e come Fuoco, possa trovare qualche riscontro in relazione all'evoluzione del Sole come stella, nell'ambito del sistema solare.

3 Struttura del Sole e delle stelle

3.1 Il Sole e le stelle come centrali nucleari

In tutta generalità, si definisce come stella ogni corpo celeste dove avvengano spontaneamente, o siano avvenute in passato, reazioni nucleari di fusione. Al riguardo, riesce utile ricordare che ogni elemento della scala periodica è caratterizzato dal numero atomico, ossia dal numero di protoni presenti nel nucleo dell'atomo, e dal numero di massa, ossia dal numero di nucleoni (protoni e neutroni) presenti nel nucleo dell'atomo. Le reazioni di fusione nucleare consistono nella produzione di elementi con numero di massa maggiore rispetto agli elementi di partenza. Al contrario, le reazioni nucleari di fissione consistono nella produzione di elementi con numero di massa minore rispetto agli elementi di partenza. Su queste ultime reazioni si basa il funzionamento delle centrali nucleari, utilizzate per la produzione di energia elettrica.

Una centrale nucleare è strutturata in quattro parti principali: camera di reazione, camera di raffreddamento, camera di conversione, camera di erogazione. Nella camera di reazione si trova il reattore nucleare vero e proprio, dove avvengono le reazioni nucleari di fissione. L'energia termica che ne deriva, viene utilizzata per riscaldare un fluido (solitamente acqua) e quindi farlo passare dallo stato liquido allo stato di vapore. Il vapore così prodotto, muovendosi entro un circuito chiuso, si porta nella camera di conversione dove, a contatto con le pale di una turbina, ne mantiene stabile la rotazione. Successivamente il vapore si porta nella camera di raffreddamento, dove si condensa tornando allo stato liquido, e sotto questa forma fa ritorno nella camera di reazione, per ripetere il ciclo già descritto. All'estremità opposta dell'asse della turbina si trova un generatore di corrente, posto nella camera di erogazione, dove l'energia elettrica così prodotta viene opportunamente trasformata e quindi immessa nella rete, per usi domestici e industriali.

Le stelle possono considerarsi come particolari classi di centrali nucleari,

| caratteristica | centrali nucleari | stelle |
|-----------------------|-------------------|---------|
| reazioni nucleari | fissione | fusione |
| controllo esterno | presente | assente |
| camera di conversione | presente | assente |
| camera di erogazione | presente | assente |

Table 1: A differenza delle centrali nucleari, nelle stelle le reazioni nucleari sono di fusione, non c'è modo di controllarne il tasso agendo dall'esterno, e manca sia la camera di conversione che la camera di erogazione, per cui viene prodotta soltanto energia termica.

le cui caratteristiche principali, evidenziate in Tab. 1, sono le seguenti: 1) le reazioni nucleari sono di fusione anziché di fissione; 2) non si può esercitare alcun controllo dall'esterno sul tasso di reazioni nucleari; 3) manca la camera di conversione; 4) manca la camera di erogazione. Più in dettaglio, il reattore nucleare è costituito dal nucleo della stella, dove la pressione e la temperatura sono talmente elevate da innescare le reazioni nucleari. Il tasso di reazioni nucleari potrebbe essere controllato dall'esterno, qualora si fosse in grado di variare il volume del nucleo della stella, e con esso la pressione e la temperatura, la qual cosa manifestamente è impossibile. In relazione al Sole, si può provvedere alla mancanza della camera di conversione e della camera di erogazione, costruendole sulla Terra, con la denominazione di impianto a energia solare, dove l'energia termica solare viene trasformata in energia elettrica ad opera di reazioni chimiche o fotovoltaiche anziché a mezzo di una turbina.

Il nucleo stellare è circondato da un involucro inerte, dove i valori della pressione e della temperatura scendono al di sotto della soglia di innesco delle reazioni nucleari. L'involucro termina nella fotosfera, la quale definisce il raggio della stella, sormontata dalla cromosfera, dove possono riscontrarsi ulteriori caratteristiche: facole, spicole, macchie, protuberanze, tutte ben note nel caso particolare del Sole.

3.2 Il Sole e le stelle come sistemi in (quasi) equilibrio

Con buona approssimazione, una stella si può considerare come una distribuzione di massa a simmetria sferica, ossia le superfici di ugual densità (che coincidono con le superfici di ugual pressione e di ugual temperatura) sono sfere concentriche, di cui una in particolare coincide con la superficie della stella, identificata nella fotosfera, mentre gli strati sovrastanti si possono considerare alla stregua di un'atmosfera. Ogni elemento di massa, costituito da una corona sferica limitata da due superfici di ugual densità e di spessore molto piccolo rispetto alla distanza dal centro, si trova in condizioni di equilibrio idrostatico. In una tale configurazione, la forza di gravità (dovuta alla massa della stella sottostante l'elemento considerato) tenderebbe a far contrarre l'elemento di massa, avvicinandolo al centro della stella, mentre la forza di pressione (dovuta alla differenza di pressione alla superficie interna e alla superficie esterna della corona sferica) tenderebbe a far espandere l'elemento di massa, allontanandolo dal centro della stella. Il bilancio di queste due forze è nullo, per cui l'elemento di massa si mantiene in equilibrio dove si trova.

In realtà, non si può dire che una stella si trovi in equilibrio idrostatico nel senso rigoroso del termine. Infatti in seguito alle reazioni nucleari di fusione che avvengono all'interno della stella, si formano due tipi di particelle che comportano perdita di energia: fotoni e neutrini. I fotoni interagiscono fortemente con la materia, presente nella stella sotto forma di gas ionizzato (elettroni e nuclei atomici), e pertanto impiegano molto tempo per portarsi alla superficie della stella e quindi disperdersi nello spazio interstellare, rendendo possibile l'osservazione della stella d'origine. Al contrario, i neutrini interagiscono molto debolmente con la materia⁵, e pertanto si portano pressoché istantaneamente alla superficie della stella, per poi disperdersi nello spazio interstellare. In entrambi i casi, la stella perde energia: in piccola parte per quanto riguarda i fotoni, essendo il resto utilizzato per preservare la temperatura della stella, e in massima parte per quanto riguarda i neutrini. In seguito a questo fatto, lo stato di equilibrio della stella viene compromesso, nel senso che la forza di gravità tende a prevalere leggermente sulla forza di pressione. Un'ulteriore causa comportante lo stesso effetto, è costituita dal progressivo esaurimento del combustibile nucleare nella parte

⁵Si pensi che, per “fermare” un neutrino, sarebbe necessaria una lastra di piombo con spessore pari alla distanza tra il Sole e Plutone.

interna della stella. L'unico rimedio al riguardo è fornito da un aumento del tasso di reazioni nucleari, e dal conseguente aumento di temperatura e di pressione, che si ottiene in seguito alla contrazione del nucleo della stella, comportante un aumento della sua densità. In seguito all'aumento di temperatura, la forza di pressione prevale leggermente sulla forza di gravità nell'involuppo della stella, provocandone una leggera espansione per il ristabilimento dell'equilibrio.

In conclusione, è più corretto considerare una stella come una struttura in quasi equilibrio anziché in equilibrio, in quanto tale caratterizzata da un progressivo aumento del raggio e della luminosità, conseguenti all'aumento del tasso di reazioni nucleari all'interno della stella.

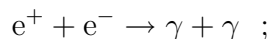
3.3 Reazioni nucleari di fusione nel Sole e nelle stelle

La presenza delle reazioni nucleari di fusione all'interno del Sole e delle stelle, costituisce una condizione necessaria per la presenza di vita nei pianeti, per due ordini di motivi. In primo luogo, l'energia termica conseguente al verificarsi delle reazioni nucleari di fusione garantisce l'equilibrio della stella, e quindi un tempo di vita sufficientemente lungo (nel caso di stelle di piccola massa) da consentire l'evoluzione biologica. In secondo luogo, tutti gli elementi riscontrabili in natura, a prescindere da: idrogeno (a tutti gli effetti coevo all'universo), deuterio, elio, e tracce di litio, berillio, boro (sintetizzati quando l'età dell'universo era di circa tre minuti), sono stati prodotti nei nuclei delle stelle. Le reazioni nucleari di fusione che avvengono al loro interno, si dividono in due classi principali: la catena protone-protone (pp) e il ciclo carbonio-azoto-ossigeno (CNO).

Per quanto riguarda la catena pp, il primo passo consiste nella formazione del deuterio (^2H) a spese dell'idrogeno ($^1\text{H}=\text{p}$):

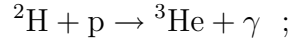


dove p è il protone, e^+ il positrone (elettrone a carica positiva), e ν_e il neutrino elettronico. A questo punto, il positrone si annichila immediatamente con un elettrone, e^- , producendo energia termica sotto forma di due fotoni (γ), che contribuisce a riscaldare il nucleo della stella:



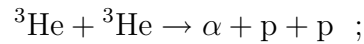
mentre il neutrino abbandona pressoché istantaneamente la stella.

Successivamente il nucleo di deuterio si combina con un altro protone, producendo un isotopo leggero dell'elio (${}^3\text{He}$):



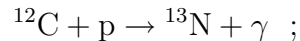
dove il fotone contribuisce a riscaldare il nucleo della stella.

Infine si ha la produzione dell'elio secondo quattro modalità differenti, la cui frequenza dipende dalla massa e dalla composizione della stella. Nel caso del Sole, la reazione dominante è costituita dalla combinazione di due nuclei del summenzionato isotopo leggero dell'elio, che fornisce un nucleo di elio (${}^4\text{He}=\alpha$) e due protoni:

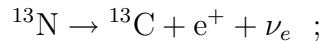


dove α è la particella α . Tenendo presente che si hanno due catene identiche per produrre ciascun isotopo leggero dell'elio, in totale sono stati utilizzati sei protoni per produrre una particella α e due protoni, ossia quattro protoni per produrre una particella α .

Per quanto riguarda il ciclo CNO, il primo passo consiste nella produzione di un isotopo instabile dell'azoto (${}^{13}\text{N}$) a spese del carbonio (${}^{12}\text{C}$) e di un protone:

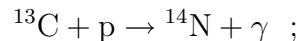


che in seguito a decadimento radioattivo produce un isotopo del carbonio (${}^{13}\text{C}$), un positrone, e un neutrino elettronico:

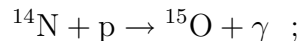


dove il fotone prodotto nella reazione precedente contribuisce al riscaldamento del nucleo della stella, mentre il neutrino prodotto nella reazione seguente abbandona pressoché istantaneamente la stella.

Successivamente, il summenzionato isotopo del carbonio si combina con un protone, producendo azoto (${}^{14}\text{N}$):



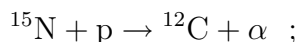
il quale a sua volta si combina con un protone, producendo un isotopo instabile dell'ossigeno (${}^{15}\text{O}$):



che in seguito a decadimento radioattivo fornisce un isotopo dell'azoto (^{15}N), un positrone, e un neutrino elettronico:



infine il summenzionato isotopo dell'azoto, in seguito alla combinazione con un protone, produce carbonio ed elio, ossia una particella α :



visto che il carbonio era preesistente, in totale sono stati utilizzati quattro protoni per produrre una particella α .

In generale, la catena pp e il ciclo CNO (purché siano presenti gli ingredienti necessari) coesistono nelle stelle e il rispettivo contributo alla produzione di energia termica dipende dalla massa e dalla composizione iniziale della stella, dove la catena pp tende a dominare nelle stelle di piccola massa e/o bassa abbondanza in elementi a numero atomico elevato, mentre il ciclo CNO tende a dominare nelle stelle di grande massa e/o alta abbondanza in elementi a numero atomico elevato. Esiste inoltre una zona di transizione, dove i due contributi sono tra loro confrontabili. Le prime stelle, in quanto di composizione primordiale, almeno all'inizio della loro evoluzione, sono state interessate dalla sola catena pp.

3.4 Diagramma HR ed evoluzione stellare

In base alle considerazioni esposte, l'equilibrio (o meglio, il quasi equilibrio) di una stella è garantito dalle reazioni nucleari di fusione che avvengono nel suo nucleo, fornendo l'energia termica necessaria a generare la forza di pressione che in ogni elemento di volume bilancia la forza di gravità, impedendo così la contrazione della stella. Per conseguenza, sia la luminosità (energia emessa dalla stella per unità di tempo), sia la temperatura efficace (definita come la temperatura della fotosfera) si preservano inalterate, di modo che ad ogni stella corrisponde un punto su un piano cartesiano dove si ponga la temperatura efficace sull'asse orizzontale (orientato da destra a sinistra), e la luminosità sull'asse verticale.

Si trova che le stelle, soddisfacenti ai requisiti richiesti, si dispongono approssimativamente lungo una retta a pendenza negativa, dove si passa con continuità dalle stelle a massa elevata, situate sulla parte alta, alle stelle

a massa piccola, situate sulla parte bassa. La retta è definita sequenza principale, e la sua rappresentazione sul piano è nota come diagramma di Hertzsprung-Russel o diagramma HR. Durante la quasi totalità della loro evoluzione, le stelle si mantengono sulla sequenza principale, per poi uscirne e concludere in breve tempo la loro esistenza. Il tempo di vita di una stella, a parità di composizione iniziale, risulta inversamente proporzionale alla sua massa: infatti una massa maggiore comporta una maggiore intensità delle forze gravitazionali, che tenderebbero a far contrarre la stella, e quindi un maggior tasso di reazioni nucleari di fusione, che forniscono l'energia termica e quindi le forze di pressione necessarie per garantire l'equilibrio idrostatico. Ne segue che il tempo di vita delle stelle a massa elevata è molto basso, dell'ordine di qualche centinaio di milioni di anni, a differenza del tempo di vita delle stelle a massa piccola, che è dell'ordine di parecchi miliardi di anni.

Le stelle nascono, in seguito all'instabilità gravitazionale del gas presente nelle nubi molecolari, solitamente in gran numero, costituendo gli ammassi aperti oppure gli ammassi globulari. Dopo una breve contrazione, denominata fase di presequenza, la stella si stabilizza sulla sequenza principale, dove si mantiene in uno stato di quasi equilibrio. Più in dettaglio, la nucleosintesi dell'elio comporta la diminuzione del numero di particelle costituenti il nucleo stellare, e l'aumento della massa media di una particella (si tenga presente che per ottenere un nucleo di elio, α , sono necessari quattro nuclei di idrogeno, p). Ne segue una diminuzione di pressione nel nucleo, e quindi una prevalenza delle forze di gravità sulle forze di pressione, con conseguente contrazione del nucleo al fine di ristabilire l'equilibrio. Nel nucleo, divenuto più denso e più caldo, le reazioni nucleari procedono con tasso maggiore, comportando un aumento del flusso di calore verso l'esterno fino a raggiungere l'involuppo, dove avviene il contrario rispetto a quanto visto nel nucleo: ad opera del maggiore flusso di calore, le forze di pressione prevalgono sulle forze di gravità, con conseguente espansione dell'involuppo al fine di ristabilire l'equilibrio, e quindi una luminosità maggiore e un raggio maggiore per la stella.

Alla fine dell'evoluzione, quando il combustibile comincia a scarseggiare, il nucleo della stella si contrae e l'involuppo si espande a un ritmo molto più rapido. Un tale processo per stelle di massa sufficientemente grande è violento, e culmina in un'esplosione di supernova di tipo II, mentre per le stelle di massa sufficientemente piccola è graduale, comportando la perdita dell'involuppo e la contrazione del nucleo in una nana bianca, che in sistemi

binari stretti può dar luogo a un'esplosione di supernova di tipo Ia.

3.5 Evoluzione del Sole

Il Sole è una stella di piccola massa, caratterizzata dall'evoluzione graduale dei suoi parametri fisici, in particolare la luminosità (attualmente pari a $L_{\odot} = 10^{33}$ erg/s) e il raggio (attualmente pari a $R_{\odot} = 696000$ km), conformemente alla teoria dell'evoluzione stellare. All'inizio della fase di presequenza, che coincide con l'inizio della contrazione, la luminosità del Sole è pari a $L \approx 0,4L_{\odot}$, mentre il raggio è pari a $R \approx 8R_{\odot}$. Nel corso della fase di presequenza, la luminosità aumenta progressivamente fino a raggiungere un valore pari a $L \approx 20L_{\odot}$, ad opera della compressione subita dal gas, quindi diminuisce fino a stabilizzarsi intorno a un valore pari a $L = 0,70L_{\odot}$. D'altra parte, il raggio si riduce progressivamente fino a stabilizzarsi intorno a un valore pari a $R = 0,89R_{\odot}$. A questo punto, il Sole ha raggiunto la configurazione di equilibrio idrostatico, facendo il suo ingresso nella sequenza principale, dove è destinato a restare per dieci miliardi di anni, di cui la parte corrispondente alla sua età, pari a $t = 4.58$ miliardi di anni, già passata. Nel corso della sua permanenza sulla sequenza principale, il Sole aumenta gradualmente sia la propria luminosità che il proprio raggio, a un ritmo sempre crescente, fino a raggiungere valori pari a $L = 1,84L_{\odot}$ e $R = 1,37R_{\odot}$ all'uscita dalla sequenza principale.

A questo punto, il Sole non si trova più in condizioni di equilibrio idrostatico, per cui il nucleo si contrae e l'involuppo si espande fino a raggiungere, dopo un tempo pari a circa $\Delta t = 2,17$ miliardi di anni, una prima configurazione di gigante rossa, caratterizzata da una luminosità massima pari a $L = 2730L_{\odot}$ e in corrispondenza da un raggio pari a $R = 256R_{\odot}$, e infine da una perdita di massa (ossia dalla massa evaporata fino all'istante considerato) pari a circa un terzo della massa iniziale. A questo punto, il Sole ha raggiunto la configurazione di equilibrio idrostatico, facendo il suo ingresso nella sequenza principale dell'elio (in quanto il combustibile nucleare è fornito dall'elio, essendo esaurito l'idrogeno), dove è destinato a restare per centotrenta milioni di anni, con una luminosità pari a $L = 53,7L_{\odot}$ e un raggio pari a $R = 11,2R_{\odot}$.

A questo punto, il Sole non si trova più in condizioni di equilibrio idrostatico, per cui il nucleo si contrae e l'involuppo si espande fino a raggiungere, dopo un tempo di qualche decina di milioni di anni, una seconda configu-

razione di gigante rossa, caratterizzata da una luminosità massima pari a $L = 4170L_{\odot}$ e in corrispondenza da un raggio pari a $R = 179R_{\odot}$, e infine da una perdita di massa pari a poco meno della metà della massa iniziale.

Quello che resta del Sole continuerà a contrarsi, ma senza raggiungere la densità e la temperatura necessarie per innescare il bruciamento del carbonio e quindi stabilizzarsi sulla sequenza principale del carbonio. L'unica pressione, in grado di generare una forza che faccia equilibrio alla forza gravitazionale, è la pressione di Fermi, che trova la sua giustificazione nell'ambito della meccanica quantistica. Pertanto la contrazione progressivamente si arresta, fino al raggiungimento di una configurazione di nana bianca, in equilibrio idrostatico, caratterizzata da un raggio compreso fra quello di Marte e quello della Terra. La nana bianca non può far altro che raffreddarsi gradualmente, anche se impercettibilmente, fino al raggiungimento della configurazione finale di nana nera.

I valori dei parametri relativi ad alcune configurazioni caratteristiche, nel corso dell'evoluzione del Sole, sono elencati in Tab. 2.

4 Evoluzione del sistema solare

Il progressivo aumento della luminosità e del raggio del Sole, è destinato ad avere profonde ripercussioni sull'evoluzione del sistema solare, in particolare per quanto riguarda i pianeti e i relativi satelliti, e in special modo la vita sulla Terra. In assenza di evoluzione del Sole, non si avrebbero ripercussioni degne di nota sugli altri membri del sistema, a prescindere dai crateri da impatto e dalle esplosioni in quota, provocati da meteore, asteroidi, e comete.

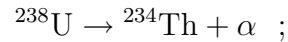
4.1 Il destino della Terra

Secondo le teorie attualmente più accreditate, la proto-Terra (denominata "Teja") è stata interessata da una collisione catastrofica con un pianeta simile a Marte, che successivamente ha dato origine al sistema Terra-Luna. L'interazione gravitazionale dovuta alla Luna comporta, oltre alle maree, un riscaldamento del nucleo terrestre, costituito in prevalenza da ferro e nickel, la cui parte esterna si mantiene allo stato liquido, unitamente allo strato sovras-

| configurazione | $\tau(\text{Gan})$ | $L(L_{\odot})$ | $T_{\text{eff}}(\text{K})$ | $R(R_{\odot})$ | $M(m_{\odot})$ |
|--|--------------------|----------------|----------------------------|----------------|----------------|
| iniziale sulla sequenza principale | 0,00 | 0,70 | 5596 | 0.89 | 1,000 |
| attuale | 4,58 | 1,00 | 5774 | 1,00 | 1,000 |
| più calda sulla sequenza principale | 7,13 | 1,26 | 5820 | 1,11 | 1,000 |
| finale sulla sequenza principale | 10,00 | 1,84 | 5751 | 1,37 | 1,000 |
| prima configurazione di gigante rossa | 12,17 | 2730,00 | 2602 | 256,00 | 0,668 |
| iniziale sulla sequenza principale di elio | 12,17 | 53,70 | 4667 | 11,20 | 0,668 |
| seconda configurazione di gigante rossa | 12,30 | 4170,00 | 3467 | 179,00 | 0,544 |

Table 2: Valori dei parametri relativi ad alcune configurazioni caratteristiche nel corso dell'evoluzione del Sole. Il tempo è espresso in Gigaanni (miliardi di anni), la temperatura in gradi Kelvin, mentre la luminosità, il raggio, e la massa, sono espressi in termini di frazioni dei valori attualmente riscontrati nel Sole.

tante, costituito in prevalenza da magma⁶. Il magma è riscaldato anche dal decadimento dell'uranio:



la quale è una reazione nucleare di fissione che genera calore⁷. Per una curiosa coincidenza, il tempo di dimezzamento dell'uranio, $\tau_{\text{U}} = 4,68 \text{ Gan}$, è dello stesso ordine dell'età del Sole e del sistema solare, $\tau_{\odot} = 4,58 \text{ Gan}$.

Per effetto delle maree, la distanza tra la Terra e la Luna cresce progressivamente, come pure la durata del giorno terrestre. Al tempo stesso, per effetto del decadimento radioattivo, la quantità di uranio al di sotto della superficie terrestre, diminuisce progressivamente. Si vede quindi come, con il passare del tempo, il riscaldamento dello strato di magma sul quale galleggiano i continenti, risulta sempre meno efficiente. Dopo un tempo abbastanza lungo, il sistema Terra-Luna sarà diventato un sistema sincrono, ossia entrambi i corpi si mostreranno reciprocamente sempre la stessa faccia, e nelle viscere della Terra non ci sarà più uranio. Lo strato di magma si solidificherà, rendendo impossibile la deriva dei continenti, quando il Sole si troverà ancora sulla sequenza principale. L'evaporazione degli oceani e il conseguente inspessimento della crosta terrestre in corrispondenza dei fondali più bassi, potrebbe anticipare di qualche miliardo di anni la fine della deriva dei continenti. Nel frattempo, altri eventi rilevanti saranno accaduti.

C'è stata un'epoca, risalente a circa 250 milioni di anni fa, in cui tutti i continenti erano fusi in un'unica massa, denominata Pangea (dal greco pan, tutto, e gea, terra), circondata da un unico oceano, denominato Pantalassa (dal greco pan, tutto, e talassa, mare). Per una curiosa coincidenza, l'attuale teoria della deriva dei continenti prevede che le Americhe da una parte, e l'Australia e l'Antartide da quell'altra, o meglio le relative placche continentali, saranno "rimbalzate" in modo tale da riformare un unico continente, denominato Pangea Ultima, tra circa 250 milioni di anni. Più in dettaglio,

⁶Allo stesso modo, i fenomeni vulcanici su Io sono provocati dall'interazione mareale dovuta a Giove, di intensità maggiore essendo Io il più interno tra i satelliti medicei, e i getti di gas che fuoriescono dalla superficie in corrispondenza al polo sud di Encelado, sono provocati dall'interazione mareale dovuta a Saturno.

⁷Infatti la particella α può considerarsi alla stregua di un proiettile sparato da un cannone, che prima dello sparo rappresenta l'atomo di uranio, e dopo lo sparo l'atomo di torio. Il calore si genera in seguito al trasferimento dell'energia cinetica, acquisita dalla particella α e dal torio ad opera del decadimento dell'uranio, alle particelle circostanti.

l'oceano Atlantico e l'oceano Indiano si rimpiccioliranno progressivamente fino a scomparire definitivamente o a ridursi ad un minuscolo mare interno della Pangea, mentre l'oceano Pacifico si estenderà progressivamente fino a rimanere l'unico oceano, denominato Pantalassa Ultima. Successivamente, si avrebbe un'ulteriore frammentazione con la creazione di nuove placche continentali e di nuovi oceani.

In particolare, l'Africa si unirà all'Europa tra circa 50 milioni di anni, e le Americhe si uniranno all'Eurafrica tra circa 200 milioni di anni. Nel frattempo, come descritto in precedenza, la luminosità e il raggio del Sole saranno interessati da un progressivo aumento, tale da provocare l'estinzione del 95% dei vegetali tra circa 500 milioni di anni, e l'estinzione totale tra circa 900 milioni di anni. L'ebollizione degli oceani inizierà tra circa un miliardo e duecento milioni di anni.

In seguito alla progressiva riduzione degli oceani, e quindi della massa d'acqua interessata dall'effetto mareale, l'allontanamento della Luna dalla Terra avverrà ad un ritmo sempre minore, fino a cessare del tutto in seguito alla totale evaporazione degli oceani. Se la Luna riuscirà a distanziarsi sufficientemente dalla Terra, non sarà più in grado di stabilizzare l'asse terrestre, la cui direzione sarà interessata da oscillazioni di natura caotica. Al riguardo, non si è ancora in grado di fornire previsioni sicure: sembra tuttavia che una situazione di questo tipo, qualora si verifici, abbia luogo non prima di un miliardo e mezzo o due miliardi di anni.

La formazione di oceani di magma inizierà tra circa tre miliardi e mezzo di anni, e si completerà tra circa sei miliardi di anni. In tali condizioni, potranno ancora aversi effetti mareali da parte della Luna, con una ripresa dell'allontanamento della Luna dalla Terra e dell'aumento della durata del giorno. Tra circa sette miliardi di anni il Sole avrà raggiunto la configurazione di gigante rossa, e tra circa sette miliardi e mezzo di anni gli oceani di magma inizieranno a bollire. L'interazione mareale da parte del Sole, ora molto più esteso, potrebbe aumentare ulteriormente la durata del giorno fino a renderla infinita con il raggiungimento della rotazione sincrona, dove la Terra mostra sempre la stessa faccia al Sole⁸.

Il futuro dell'acqua degli oceani sarà determinato dall'effetto serra, che

⁸Va notato tuttavia che una cosa del genere non si verifica attualmente per i pianeti più interni, Mercurio e Venere, dove il rapporto tra periodo di rotazione e periodo di rivoluzione è pari a $2/3$ e $1,0815$, rispettivamente.

può essere di tre tipi: serra umida controllata, serra umida incontrollata, e serra arida. In generale, l'effetto serra è provocato dalla presenza di certi gas (ad esempio, anidride carbonica e vapore acqueo) nell'atmosfera, con la proprietà di trattenere il calore provocato dall'insolazione a terra, impedendone in tal modo la dispersione nello spazio interplanetario. Ne discende una temperatura superficiale maggiore, rispetto al caso in cui i gas in questione siano assenti⁹.

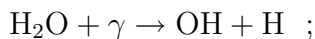
Un esempio di effetto serra umida controllata è quello attualmente dovuto all'anidride carbonica. Se la concentrazione di anidride carbonica presente nell'atmosfera aumenta, si ha un innalzamento della temperatura ad opera del maggiore effetto serra, il quale a sua volta comporta un aumento delle reazioni chimiche che assorbono anidride carbonica nella litosfera, fino a ripristinare il valore iniziale della concentrazione. Viceversa, se la concentrazione di anidride carbonica presente nell'atmosfera diminuisce, si ha un abbassamento della temperatura ad opera del minore effetto serra, il quale a sua volta comporta una diminuzione delle reazioni chimiche che assorbono anidride carbonica nella litosfera, fino a ripristinare il valore iniziale della concentrazione. Se però in luogo di fluttuazioni della temperatura si ha una crescita sistematica, la concentrazione di anidride carbonica presente nell'atmosfera si riduce progressivamente ad opera delle reazioni chimiche con la litosfera, fino ad esaurirsi del tutto. La scomparsa dell'anidride carbonica dall'atmosfera segnerà l'inizio dell'effetto serra umida incontrollata.

Un esempio di effetto serra umida incontrollata è quello dovuto in futuro al vapore acqueo, quando gli oceani inizieranno a bollire. In tali condizioni, in seguito all'aumento di concentrazione del vapore acqueo nell'atmosfera, dovuto all'evaporazione degli oceani, si ha un innalzamento della temperatura ad opera del maggiore effetto serra, il quale a sua volta comporta un ulteriore aumento di concentrazione del vapore acqueo nell'atmosfera, dovuto all'accresciuta evaporazione degli oceani, e quindi un ulteriore innalzamento della temperatura ad opera dell'accresciuto effetto serra, e così via, fino alla completa evaporazione degli oceani. La scomparsa dell'acqua sulla superficie terrestre segnerà l'inizio della transizione verso l'effetto serra arida.

Un esempio di effetto serra arida è quello dovuto in futuro alla scomparsa

⁹Ad esempio, l'elevata temperatura superficiale su Venere (circa 500 °C) è dovuta alla presenza di anidride carbonica in grande quantità nella sua atmosfera. Per quanto riguarda la Terra, in assenza dell'effetto serra, la temperatura media in superficie sarebbe di circa -18 °C.

del vapore acqueo, dopo la completa evaporazione degli oceani. Le molecole di vapore acqueo che si porteranno al di sopra dell'ozonofera, saranno facilmente dissociate ad opera dei raggi ultravioletti provenienti dal Sole, attraverso la reazione di fotolisi:



dove l'idrogeno così prodotto, prima o dopo, si disperderà nello spazio interplanetario, a motivo del basso peso atomico di questo elemento, e della conseguente facilità di acquisire una velocità superiore alla velocità di fuga dal campo gravitazionale terrestre. In un arco di tempo sufficientemente lungo, l'atmosfera della Terra verrebbe privata di tutto il vapore acqueo, similmente a quanto si riscontra su Venere e su Marte. La scomparsa del vapore acqueo dall'atmosfera segnerà l'inizio dell'effetto serra arida.

Il futuro lontano della Terra è ancora più ipotetico, pur potendosi stabilire con certezza la formazione di oceani di magma in epoca anteriore al raggiungimento della prima configurazione di gigante rossa da parte del Sole, fra circa sette miliardi di anni, come pure la loro evaporazione al raggiungimento della seconda configurazione di gigante rossa, fra circa sette miliardi e mezzo di anni. Nell'ipotesi in cui la Terra mostrerà rotazione sincrona mentre il Sole si troverà nella prima configurazione di gigante rossa, la presenza o meno di un'atmosfera sarà determinante. Una Terra in rotazione sincrona intorno a un Sole in configurazione di gigante rossa, sarebbe perennemente illuminata o in penombra, all'infuori di una regione ristretta con estensione paragonabile a quella del Nord America (situata agli antipodi rispetto alla zona maggiormente illuminata), dove invece regnerebbe l'oscurità.

La presenza di un'atmosfera sufficientemente densa, comporterebbe un trasferimento di calore dalla zona illuminata alla zona oscura, che minimizzerebbe la differenza di temperatura fra i due emisferi. Viceversa nel caso di un'atmosfera sufficientemente rarefatta, la temperatura nella regione oscura potrebbe scendere fino a un valore di circa -240°C ¹⁰. In tali condizioni, sull'emisfero illuminato, i metalloidi e i metalli come il silicio, il magnesio, il ferro, unitamente ai rispettivi ossidi, sarebbero in grado di evaporare dall'oceano di magma, per poi precipitare sotto forma di pioggia o neve nelle

¹⁰Una situazione di questo genere si verifica attualmente su Mercurio, dotato di un'atmosfera estremamente rarefatta, dove la temperatura passa da un valore di circa 350°C sull'emisfero illuminato, a un valore di circa -170°C sull'emisfero oscuro.

zone più vicine all'emisfero oscuro, dove la temperatura è più bassa a motivo della minore insolazione. Procedendo ulteriormente verso la regione immersa nell'oscurità, si riscontrerebbero neviccate di sodio e potassio, e procedendo ancora si potrebbe trovare un oceano di acqua, che evaporerebbe in superficie e quindi precipiterebbe sotto forma di pioggia o neve. Infine la regione oscura sarebbe caratterizzata dalla presenza di una calotta glaciale costituita da ghiaccio ordinario, anidride carbonica, biossido di zolfo, azoto, e argo.

Il quadro prospettato è altamente ipotetico: la presenza di precipitazioni sotto forma di pioggia o neve potrebbe comportare la presenza di un'atmosfera sufficientemente densa, da minimizzare la differenza di temperatura fra i due emisferi. Inoltre l'acqua attualmente presente sulla superficie terrestre sarebbe stata dispersa nello spazio interplanetario con l'avvento dell'effetto serra arida, molto prima che il Sole avesse raggiunto la configurazione di gigante rossa. Pertanto la presenza di un oceano sull'emisfero notturno, nelle condizioni considerate, potrebbe aver tratto origine da acque talmente profonde, da non essere state mai interessate dall'effetto serra. In ogni caso, ci si deve accertare se il destino della Terra sarà simile a quello dei pianeti più interni, di essere inglobati nell'atmosfera solare e quindi vaporizzati, o a quello dei pianeti più esterni, di sopravvivere seppure al prezzo di radicali cambiamenti.

4.2 Il destino dei pianeti interni

Una volta uscito dalla sequenza principale, il Sole inizia a perdere massa, destinata a disperdersi nello spazio interstellare, fino a rimanere con poco più della metà del valore attuale quando, alla fine dell'evoluzione, viene raggiunta la configurazione finale di nana bianca. In tali condizioni, la quantità di massa solare contenuta in una sfera che ha per equatore l'orbita di un pianeta (supposta in prima approssimazione circolare), diminuisce progressivamente nel tempo, come pure la forza gravitazionale solare agente sullo stesso pianeta¹¹.

¹¹Questo effetto si spiega utilizzando un teorema dovuto a Newton, in base al quale un corpo posto all'interno di una distribuzione di massa a simmetria sferica, risente soltanto della forza gravitazionale dovuta alla massa contenuta nella sfera che reca il corpo stesso in superficie. Ad esempio, supponendo in prima approssimazione che la distribuzione di massa della Terra sia a simmetria sferica, se si scavasse un pozzo dall'uno all'altro polo, il peso riscontrato su una bilancia a molla diminuirebbe progressivamente nel corso della

A parità di massa del corpo centrale, la stabilità dell'orbita è garantita dall'equilibrio tra la forza gravitazionale, inversamente proporzionale al quadrato della distanza, e la forza centrifuga, inversamente proporzionale al cubo della distanza. Nel caso in cui il raggio dell'orbita diminuisce, la forza centrifuga aumenta in misura maggiore rispetto alla forza gravitazionale. Nel caso in cui il raggio dell'orbita aumenta, la forza centrifuga diminuisce in misura maggiore rispetto alla forza gravitazionale. Ne discende che, in entrambe le alternative, il raggio dell'orbita torna al suo valore iniziale.

Nel caso in esame, la massa del corpo centrale diminuisce progressivamente, comportando la prevalenza della forza centrifuga sulla forza di gravità, e il conseguente aumento del raggio dell'orbita. La sopravvivenza (del tutto o in parte) di un pianeta interno dipende da due fattori: la quantità di massa solare che ha oltrepassato l'orbita di quel pianeta fino al raggiungimento della prima configurazione di gigante rossa, e il raggio del Sole al raggiungimento della prima configurazione di gigante rossa. La sopravvivenza del pianeta è garantita da un raggio dell'orbita maggiore del raggio del Sole nelle condizioni considerate mentre, in caso contrario, il pianeta è destinato ad essere inglobato nell'atmosfera solare e quindi vaporizzato.

Senza ombra di dubbio, Mercurio e Venere rientrano nella seconda alternativa mentre, per quanto riguarda la Terra, i pareri non sono concordi. Tuttavia i calcoli più recenti sembrano indicare che anche la Terra non è in grado di sottrarsi al destino dei pianeti più interni: infatti si è trovato che soltanto un ipotetico pianeta, attualmente distante dal Sole non meno di 1,15 unità astronomiche, sarebbe in grado di salvarsi dalla vaporizzazione, condividendo così la stessa sorte di Marte e dei pianeti esterni.

La ragione di questo fatto va ricercata nell'interazione mareale tra la Terra e il Sole durante il raggiungimento della prima configurazione di gigante rossa, la quale (contrariamente a quanto avviene nel sistema Terra-Luna) comporta una progressiva riduzione del raggio dell'orbita terrestre. Un'ulteriore riduzione, seppure di minore entità, è dovuta all'attrito conseguente all'interazione tra la Terra e il vento solare. Ne discende un'orbita a spirale anziché circolare, con la Terra destinata inesorabilmente ad addentrarsi sempre più profondamente nel Sole, fino alla completa vaporizzazione.

discesa all'interno di una cabina (da arrestare ad ogni misurazione), fino ad annullarsi al centro della Terra, per poi tornare ad aumentare (avendo scambiato il soffitto con il pavimento all'interno della cabina) e quindi riassumere il valore di partenza al raggiungimento dell'estremità opposta del pozzo.

Un tale destino sarà stato già sperimentato da Mercurio e da Venere, circa 3,8 e 1,0 milioni di anni prima della Terra, rispettivamente. Al momento della completa vaporizzazione della Terra, il Sole dovrà aumentare il proprio raggio ancora di circa un quarto di unità astronomica, nell'arco del successivo mezzo milione di anni, fino al raggiungimento della prima configurazione di gigante rossa, tra circa 7,59 miliardi di anni a partire da oggi, con un'incertezza di 50 milioni di anni.

4.3 Il destino di Marte e dei pianeti esterni

Il destino di Marte e dei pianeti esterni appare ancora più ipotetico di quello degli altri pianeti interni, a prescindere dalla certezza della loro sopravvivenza nel corso dell'intera evoluzione del Sole, fino alla configurazione terminale di nana bianca. Sicuramente Marte sarà interessato da un effetto serra umida e quindi da un effetto serra arida, comportanti la scomparsa delle calotte glaciali¹². Poco dopo l'uscita del Sole dalla sequenza principale, fra 5,42 miliardi di anni, la luminosità sarà aumentata di un fattore 2,2 rispetto ad oggi, e l'insolazione su Marte sarà pari a quella attualmente sulla Terra, ma il vapore acqueo e l'anidride carbonica prodotti in seguito all'evaporazione delle calotte glaciali si disperderanno ben presto nello spazio interplanetario, a causa della bassa gravità del pianeta, destinato in tal modo a preservarsi inospitale per qualsiasi forma di vita organizzata.

I pianeti esterni probabilmente perderanno la quasi totalità del loro idrogeno, attualmente allo stato liquido o gassoso, destinato a disperdersi nello spazio interplanetario. L'orbita dei satelliti si allargherà in misura proporzionale alla perdita di massa dei rispettivi pianeti, e in quei satelliti dove è stato riscontrato ghiaccio in superficie e/o è stato ipotizzato un oceano al di sotto della superficie, potrebbero instaurarsi le condizioni adatte alla vita, seppure nel breve arco di qualche centinaio di milioni di anni. La situazione sarebbe diversa, ad esempio, su Europa, su Titano, su Titania, e su Tritone, a motivo della differente distanza dal Sole dei rispettivi pianeti: Giove, Saturno, Urano, e Nettuno, rispettivamente. Più in dettaglio, si ritiene che su Europa, Ganimede, e Callisto, possa svilupparsi una densa atmosfera di vapore acqueo, con un successivo effetto serra umida, durante il raggiungimento della prima configurazione di gigante rossa. In seguito ai processi

¹²Cosa che attualmente avviene sulla Terra.

fotolitici, l'idrogeno successivamente si disperderebbe nello spazio interplanetario, fintantoché dall'effetto serra umida non si passerebbe all'effetto serra arida. Inoltre si prevede che su Titano, per qualche centinaio di milioni di anni, si originino e persistano oceani di ammoniaca, dove nuove forme di vita potrebbero svilupparsi ad opera delle numerose molecole organiche presenti sul satellite.

È anche stato ipotizzato che, in seguito alla perdita di massa sperimentata dal Sole e dai pianeti esterni, le orbite di questi ultimi potrebbero perturbarsi passando da circolari a fortemente ellittiche o iperboliche, fino a cadere nel Sole oppure ad essere espulsi da (quello che resta del) sistema solare. Eventuali pianeti superstiti orbiterebbero stabilmente intorno al Sole, che avrebbe raggiunto la configurazione terminale di nana bianca.

4.4 Una possibilità per la Terra

Le considerazioni precedentemente svolte mostrano come l'unico modo di salvare la Terra, o per lo meno di rimandare l'inevitabile, sia quello di trovare un meccanismo in grado di far aumentare progressivamente il raggio dell'orbita terrestre, in modo tale da portare il nostro pianeta ad una distanza di sicurezza, quando il Sole uscirà dalla sequenza principale, o addirittura raggiungerà la configurazione di gigante rossa.

Un meccanismo plausibile consiste nel trasferimento di energia cinetica orbitale da un pianeta a un altro, per il tramite di un grosso asteroide con l'orbita sufficientemente allungata da intersecare le orbite dei due pianeti. Nel caso in esame, il perielio e l'afelio dovrebbero essere situati all'interno dell'orbita terrestre e all'esterno dell'orbita di Saturno, rispettivamente.

Disponendo della tecnologia necessaria per effettuare piccole correzioni all'orbita dell'asteroide, si potrebbe farlo transitare sufficientemente vicino a Giove e Saturno, da acquisire una piccola quantità di energia cinetica orbitale a spese di questi pianeti. Una successiva modifica dell'orbita porterebbe l'asteroide sufficientemente vicino alla Terra, da fornirle l'energia cinetica orbitale in eccesso, ed eventualmente a Venere, per acquisire ulteriore energia cinetica orbitale. In tal modo, il raggio dell'orbita terrestre si allargherebbe progressivamente, il raggio delle orbite di Giove e Saturno si ridurrebbe impercettibilmente, ed eventualmente il raggio dell'orbita di Venere si ridurrebbe progressivamente. Si è calcolato che un incontro ravvicinato con la Terra ogni seimila anni basterebbe per allargare l'orbita terrestre nella misura

| | |
|---|--|
| Principio Creatore del Sole | Principio Distruttore del Sole |
| Prevalenza dell'Ordine sul Caos Luce e Calore Salvezza Ascesa al Cielo Paradiso | Prevalenza del Caos sull'Ordine Fuoco e Fornace Dannazione Sprofondamento in Terra Inferno |

Table 3: Il Sole nella tradizione indo-europea, quale accentratore tanto di un Principio Creatore quanto di un Principio Distruttore.

necessaria a compensare il graduale aumento di luminosità del Sole, nel corso della sua evoluzione sulla sequenza principale.

I limiti maggiori di questo progetto sono insiti non tanto nella mancanza della tecnologia necessaria, che si ritiene disponibile in un futuro prossimo, quanto nel rischio consistente di una collisione fra l'asteroide e la Terra, ad opera di un evento accidentale o di un errore umano, con conseguenze devastanti sulla litosfera. Ma l'ostacolo di gran lunga più grande sembra essere costituito dall'innata incapacità del genere umano di cooperare a fin di bene, nella fattispecie per la salvezza dell'intero pianeta.

5 Il Sole tra mito e realtà

Nella parte iniziale della trattazione è stato messo in rilievo come il Sole, almeno nella tradizione indo-europea, accentrasse in sé tanto un Principio Creatore quanto un Principio Distruttore, come schematizzato in Tab. 3. Nella prima alternativa, il Sole si manifesta come Luce e Calore, attraverso i quali si assiste alla prevalenza dell'Ordine sul Caos, nella vita terrena, e al conseguimento della Salvezza e quindi del Paradiso, nella vita ultraterrena. Nella seconda alternativa, il Sole si manifesta come Fuoco e Fornace, attraverso i quali si assiste alla prevalenza del Caos sull'Ordine, nella vita terrena, e al conseguimento della Dannazione e quindi dell'Inferno, nella vita

ultraterrena.

Nella parte successiva della trattazione, l'analisi dell'evoluzione del Sole ha mostrato come la sua luminosità e il suo raggio siano caratterizzati da un progressivo aumento nel corso del tempo, comportando una transizione graduale dalla manifestazione del Principio Creatore alla manifestazione del Principio Distruttore, dalla prevalenza dell'Ordine sul Caos alla prevalenza del Caos sull'Ordine, dalla Luce al Fuoco, dal Calore alla Fornace. In tali condizioni, ci si chiede come si collochino la Salvezza e la Dannazione, l'ascesa al Cielo e lo sprofondamento in Terra, l'Inferno e il Paradiso. Ogni tentativo di fornire una risposta a questo riguardo, deve necessariamente esulare dall'ambito scientifico. Per tale motivo, ci limiteremo a rispondere a tali domande con la formulazione di altre domande, soltanto in apparenza blasfeme.

Ammettendo l'esistenza di una scienza antediluviana, il cui ricordo si sarebbe perduto nelle leggende e nei miti, le numerose analogie riscontrabili nei Testi Sacri delle principali religioni, non troverebbero forse una naturale spiegazione? Se i portatori di una tale scienza fossero venuti dalle stelle, non potrebbero la Salvezza e la Dannazione concretizzarsi nell'accoglienza in un'arca celeste destinata ad attraversare lo spazio interstellare fino a raggiungere pianeti più ospitali, e nell'esclusione da quella stessa arca con la forzata permanenza sulla Terra condannata all'estinzione di ogni forma di vita? Non potrebbe la resurrezione dei corpi avvenire per mezzo di un'ingegneria genetica avanzata, in grado di ottenere un intero organismo mediante clonazione, dove inserire successivamente personalità e ricordi, allo stesso modo in cui si trasferiscono programmi e memoria da un calcolatore a un altro?

6 Conclusione

La domanda più urgente, e tuttavia più importante, è come comportarsi di fronte alla coscienza dell'Apocalisse sulla Terra e sul sistema solare. Le stelle sono come gli uomini: "Nascendo morimur"¹³. Non esiste una risposta

¹³La frase, attribuita a Seneca, si trova sul trattato di Astronomia scritto da Marco Manilio nel primo secolo dopo Cristo, e nel periodo rinascimentale ha ispirato gli autori di vari quadri e rappresentazioni aventi per soggetto un bimbo reclinato su teschio, come un dipinto attribuito a Cornelis van der Goude, datato intorno al 1540, dove il fanciullo impersona San Giovanni Battista. Una traduzione non letterale ma efficace potrebbe essere: "*Si inizia a morire dal momento stesso in cui si inizia a vivere*".

generale: ognuno deve ricercare la propria risposta dentro di sé, tanto più facilmente quanto più alla ricerca della sua vera Natura e in armonia col Mondo che lo circonda. Per quanto personalmente ci riguarda, lasciamo la parola al Poeta¹⁴:

1 Tu ne quaesieris, scire nefas, quem mihi, quem tibi
2 finem di dederint, Leuconoe, nec Babylonios
3 temptaris numeros. Ut melius, quidquid erit, pati,
4 seu plures hiemes, seu tribuit Iuppiter ultimam,
5 quae nunc oppositis debilitat pumicibus mare
6 Tyrrhenum: sapias, vina liques, et spatio brevi
7 spem longam reseces. Dum loquimur, fugerit invida
8 aetas: carpe diem, quam minimum credula postero.

1 Non domandarti, o Leuconoe, non è dato sapere,
2 quale sorte a me, quale a te, gli dèi abbiano riservato,
3 e non tentare i giri delle stelle. Meglio non sottrarsi agli avvenimenti,
4 anche se molti inverni Giove ancora conceda, o ultimo questo,
5 che adesso sulle opposte rocce fiacca il mare
6 Tirreno: assaggia, mesci il vino, e per la breve stagione
7 rinuncia al desiderio lontano. Mentre parliamo, fugge la vita
8 distogliendo lo sguardo: cogli il giorno, fiduciosa quanto basta nel domani.

(Orazio, *Carpe Diem*)

Note

1. ...
2. ...
3. Si è tradotto “quidquid erit” nel senso di “avvenimenti”, che a nostro avviso rende meglio il manifestarsi di eventi indipendenti dalla volontà di chi li subisce. Si è tradotto “pati” nel senso di “non sottrarsi” e

¹⁴La traduzione riportata è la sintesi di due differenti traduzioni, con l’aggiunta di un contributo personale, motivato nelle relative note.

quindi “sopportare”, che a nostro avviso rende meglio l’idea della libera accettazione in luogo di una supina sopportazione.

4. ...
5. Rocce opposte alle onde del mare che ivi si infrangono, e quindi al vento che le sospinge.
6. Si è tradotto “spatio” nel senso temporale di “stagione”, che a nostro avviso rispecchia gli angusti limiti di tempo concessi dalla Natura, nella stessa accezione di “aetas”, riportata più avanti.
7. Si è tradotto “invida” nel senso di “che distoglie lo sguardo a motivo dell’invidia”, come dicesi di persone che “non si possono vedere”. Similmente, la paura del domani distoglie lo sguardo da quanto di bello e di vero è al mondo.
8. Si è tradotto “aetas” nel senso di “età della vita” e in senso lato “vita”, ossia il tempo concessoci dalla Natura. Si è tradotto “credula” con “fiduciosa”, che a nostro avviso rende meglio l’idea di contare solamente sulle proprie forze, senza lasciarsi sopraffare da inutili condizionamenti. Si è tradotto “quam minimum” con “quanto basta” in luogo di “appena”, che a nostro avviso sarebbe stato riduttivo.

7 Bibliografia

Garlick, M.A., *The future of the Earth*, Sky & Telescope, 10/2002, p. 31.

Hell on Earth, New Scientist, 6/12/2003, p. 36.

Laughlin, G.P., *From here to eternity*, Sky & Telescope, 6/2007, p. 32.

(trad. it. *Da qui all’eternità*, Le Stelle, 11/2007, p. 32.)

Schröder, K.P., Smith, R.C., *Distant future of the Sun and Earth revisited*, Monthly Notices Royal Astronomical Society, 2008, vol. 386, p. 155.

Su questa bibliografia si basa l'articolo: molti dettagli sono stati curati utilizzando il motore di ricerca "Google".