

LE ORGINI DELLA VITA
NELL'UNIVERSO

Nicolas Cretton
Liceo Lugano 2, 2009-2010

Corso integrato del terzo anno di
biologia, chimica e fisica

Parte di fisica

Figura di copertina: l'ammasso globulare di Ercole è un gruppo sferico di centinaia di migliaia di stelle. Nel 1974 fu lanciato un messaggio radio verso questo ammasso in rappresentanza dell'umanità dall'Osservatorio Arecibo, nella speranza che un ammasso così denso di stelle avesse possibilità maggiori di ospitare la vita in uno dei suoi pianeti.

Credito: Robert Gendler

Indice

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Introduzione | 1 |
| 1.1 | Astrobiologia | 1 |
| 1.2 | I setti scopi scientifici dell'astrobiologia | 1 |
| 1.3 | Piano del corso di fisica | 4 |
| 1.4 | Il metodo scientifico | 4 |
| 1.4.1 | Come applicare il metodo scientifico all'osservazione dei fenomeni naturali | 5 |
| 1.4.2 | Astronomia ed evolucionismo | 6 |
| 1.5 | Esercizi | 7 |
| 2 | Vita e morte delle stelle e formazione dei pianeti | 9 |
| 2.1 | Introduzione | 9 |
| 2.2 | Evoluzione stellare | 9 |
| 2.2.1 | Dipendenza dalla massa | 9 |
| 2.2.2 | Lo schema di base | 12 |
| 2.2.3 | Fase 1: Nube Molecolare Gigante | 12 |
| 2.2.4 | Fase 2: Proto-stelle | 15 |
| 2.2.5 | Fase 3: T-Tauri | 18 |
| 2.2.6 | Fase 4: Sequenza principale | 19 |
| 2.2.7 | Fase 4-b: Dischi proto-planetari | 23 |
| 2.2.8 | Fase 4-c: La formazione dei pianeti e del nostro sistema solare | 24 |
| 2.2.9 | Fase 5: Subgiganti, giganti rosse, supergiganti. | 29 |
| 2.2.10 | Fase 6: Nebulose planetarie o supernova | 39 |
| 2.2.11 | Fase 7: Residui centrali | 44 |
| 2.3 | Riassunto e implicazione per la vita nell'universo. | 46 |
| 2.4 | Esercizi | 47 |
| 3 | Le condizioni fisiche che permettono la vita | 49 |
| 3.1 | I prerequisiti per la vita | 49 |
| 3.1.1 | Perché l'acqua liquida è così importante ? | 49 |
| 3.1.2 | La presenza di alcuni elementi importanti per la vita | 50 |
| 3.1.3 | Il silicio contro il carbonio | 50 |
| 3.1.4 | Le sorgenti di energia | 51 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.1.5 | La stabilità climatica | 51 |
| 3.2 | Java quiz: Costruire un pianeta | 52 |
| 3.3 | Il tipo stellare e l'orbita del pianeta | 52 |
| 3.4 | La massa del pianeta | 53 |
| 3.5 | I vulcani | 53 |
| 3.6 | Il movimento delle placche tettoniche | 54 |
| 3.6.1 | La tettonica delle placche | 54 |
| 3.6.2 | La pioggia | 54 |
| 3.6.3 | Senza il movimento delle placche | 55 |
| 3.6.4 | Con il movimento delle placche | 55 |
| 3.7 | L'acqua liquida | 55 |
| 3.7.1 | La pioggia | 55 |
| 3.8 | I produttori | 55 |
| 3.8.1 | L'ossigeno / l'ozono | 55 |
| 3.8.2 | Il cibo | 55 |
| 3.8.3 | Le condizioni per l'esistenza dei produttori | 55 |
| 3.8.4 | La terra e gli oceani | 56 |
| 3.9 | La stabilità dell'asse di rotazione della Terra | 56 |
| 3.10 | La stabilità dell'orbita della Terra | 57 |
| 3.11 | Esercizi | 57 |
| 4 | La ricerca della vita nel Sistema Solare | 59 |
| 4.1 | Marte | 59 |
| 4.1.1 | Il clima su Marte oggi | 59 |
| 4.1.2 | L'acqua su Marte oggi | 60 |
| 4.1.3 | L'acqua liquida su Marte oggi | 61 |
| 4.1.4 | Il clima su Marte in un passato recente | 61 |
| 4.1.5 | Il clima su Marte in un passato remoto: 3 miliardi di anni fa | 63 |
| 4.1.6 | L'enigma del clima antico di Marte | 63 |
| 4.1.7 | Il confronto con strutture geologiche terrestri | 65 |
| 4.1.8 | Conclusione | 65 |
| 4.2 | Esercizi | 67 |
| 5 | Oltre il sistema solare | 71 |
| 5.1 | Come scoprire un pianeta extra-solare? | 71 |
| 5.1.1 | La spettroscopia Doppler | 71 |
| 5.1.2 | La diminuzione della luminosità | 73 |
| 5.1.3 | Il fenomeno di lente gravitazionale e la scoperta di pianeti | 73 |
| 5.1.4 | Vedere il pianeta direttamente | 74 |
| 5.2 | I pianeti come la Terra | 74 |
| 5.2.1 | Quanto è probabile trovare una vita "avanzata" su un pianeta extra-solare? | 76 |
| 5.3 | Il futuro | 76 |
| 5.4 | Esercizi | 78 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 6 | L'emergere dell'intelligenza | 79 |
| 6.1 | La selezione naturale Darwiniana | 79 |
| 6.1.1 | Una nuova fase nell'evoluzione umana | 80 |
| 6.1.2 | Introduzione ai algoritmi genetici | 82 |
| 6.2 | L'intelligenza | 82 |
| 6.2.1 | Toumai | 83 |
| 6.2.2 | Lucy | 85 |
| 6.2.3 | Selam | 86 |
| 6.2.4 | Gli ultimi sviluppi su Lucy | 87 |
| 6.2.5 | Altre spiegazioni per l'origine del bipedismo: la scimmia acquatica | 87 |
| 6.3 | La galleria dei nostri antenati | 88 |
| 6.3.1 | Australopithecus anamensis | 88 |
| 6.3.2 | Australopithecus Afarensis | 88 |
| 6.3.3 | Australopithecus Africanus | 89 |
| 6.3.4 | Paranthropus Boisei | 89 |
| 6.3.5 | Homo Rudolfensis | 90 |
| 6.3.6 | Homo habilis | 90 |
| 6.3.7 | Homo erectus | 91 |
| 6.3.8 | Homo Neanderthalensis | 91 |
| 6.3.9 | La foto di famiglia | 92 |
| 6.4 | Migrazioni umane: come gli uomini popolarono il mondo | 92 |
| 6.4.1 | Una teoria alternativa: il modello "multi-regionale" | 93 |
| 6.5 | Da Toumai e Lucy all'Homo sapiens | 94 |
| 6.6 | Versatilità, lungimiranza e intelligenza | 95 |
| 6.7 | Far fronte ai cambiamenti climatici | 97 |
| 6.8 | L'invenzione del linguaggio | 100 |
| 6.9 | La pianificazione | 101 |
| 6.9.1 | Il caso Neandertal | 101 |
| 6.10 | Non solo il linguaggio, ma anche l'utilizzo di attrezzi | 102 |
| 7 | Gli ultimi 40'000 anni in Svizzera | 105 |
| 7.1 | Riassunto. La preistoria: una lunga storia | 105 |
| 7.2 | Evoluzione del paesaggio e della vegetazione | 109 |
| 7.3 | I cacciatori-raccoglitori dal Paleolitico al Mesolitico | 111 |
| 7.3.1 | Il Paleolitico | 112 |
| 7.3.2 | L'Epipaleolitico e il Mesolitico | 113 |
| 7.3.3 | Risorse alimentari: caccia e raccolta | 115 |
| 7.3.4 | Caccia e raccolta durante il <i>Magdalénien</i> | 116 |
| 7.3.5 | Caccia e raccolta durante l'Epipaleolitico e il Mesolitico | 116 |
| 7.4 | I primi contadini del Neolitico | 120 |
| 7.4.1 | Scene di vita del Neolitico | 121 |
| 7.5 | L'età del Bronzo | 128 |
| 7.5.1 | Scene di vita dell'età del Bronzo | 130 |
| 7.6 | I celtici dell'età del Ferro | 135 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 7.6.1 | Scene di vita dell'età del Ferro | 136 |
| 8 | Approfondimenti | 141 |
| 8.1 | La storia climatica della Terra | 141 |
| 8.2 | MRO Science Goals | 148 |
| 8.2.1 | Goal 1: Determine whether life ever arose on Mars | 148 |
| 8.2.2 | Goal 2: Characterize the climate of Mars | 149 |
| 8.2.3 | Goal 3: Characterize the geology of Mars | 149 |
| 8.2.4 | Goal 4: Prepare for human exploration | 150 |
| 8.3 | Discoveries made by MGS | 150 |
| 8.4 | Phoenix Mars Mission: Why is liquid water important for life? | 152 |
| 8.5 | La scoperta di Lucy | 154 |
| 8.6 | Humans, apes and monkeys | 155 |
| 8.7 | Una nuova teoria dell'origine umana, la scimmia acquatica | 156 |
| 8.7.1 | Problemi con la "teoria della savana" e l'origine del bipedismo | 156 |
| 8.7.2 | Senza peli | 157 |
| 8.7.3 | Il grasso | 159 |
| 8.7.4 | Cibo e cervello | 159 |
| 8.7.5 | Il sudore | 159 |
| 8.7.6 | Nuotare & Tuffarsi | 160 |
| 8.7.7 | Il pene | 160 |
| 8.7.8 | Conclusione | 161 |
| 8.8 | La ricostruzione del cranio di Toumai | 162 |
| 8.9 | La ricostruzione del vero volto del Neanderthal | 163 |
| 8.10 | Datazione di Toumai | 164 |
| 8.11 | Selam, Toumai e l'ultimo antenato comune | 166 |
| 8.12 | Evoluzione schematica del paesaggio in Vallese | 172 |
| 9 | Glossario e risorse internet | 173 |
| 9.1 | Glossario di termini astronomici | 173 |
| 9.2 | Astrobiologia | 173 |
| 9.3 | Corso di astronomia in italiano (Università di Padova) | 174 |
| 9.4 | Doppler Shift, redshift: | 174 |
| 9.5 | Pianeti extra-solari | 174 |
| 9.6 | Simulazioni N-body | 175 |
| 9.7 | Mappe di galassie particolari | 175 |
| 9.8 | Potenze da dieci | 175 |
| 9.9 | Immagini di galassie (spirali, ellittiche, ecc) | 175 |
| 9.10 | FAQ (Frequently Asked Questions) sull'universo, il Big Bang,... | 176 |
| 9.11 | The Sloan Digital Sky Survey | 176 |
| 9.12 | Pianeti del nostro sistema solare | 176 |
| 9.13 | Recenti missioni su MARTE | 177 |
| 9.14 | La missione Cassini-Huygens verso Saturno e Titano | 177 |
| 9.15 | L'effetto fionda | 178 |

| | |
|---|------------|
| <i>INDICE</i> | 1 |
| 9.16 Il telescopio spaziale Hubble, <i>The Hubble Space Telescope (HST)</i> | 178 |
| 9.17 ESO, Paranal e il VLT | 178 |
| 9.18 Buchi neri | 179 |
| 10 Referenze | 181 |

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Astrobiologia

Il tema principale di questo corso è una nuova disciplina chiamata **astrobiologia**. L'astrobiologia è lo studio delle origini, dell'evoluzione, della distribuzione e del futuro della vita nell'universo. La comprensione dei concetti fondamentali di vita e di ambiente abitabile sono prerequisiti per poter riconoscere biosfere potenzialmente molto diverse dalla nostra.

L'astrobiologia si pone tre domande fondamentali, che l'uomo si è chiesto da molto tempo in varie forme:

- Come la vita inizia e si evolve ?
- La vita esiste altrove nell'universo ?
- Qual è il futuro della vita sulla Terra e altrove ?

"Vedo l'astrobiologia come una scienza più ampia della semplice ricerca della vita" spiega Bruce Jakosky, direttore del centro di astrobiologia dell'Università del Colorado. Questa disciplina cerca anche di capire quale varietà di vita possa o non possa esistere, quali sono le condizioni perché si realizzi, e come sia nata la vita sulla Terra, quattro miliardi di anni fa. La ricerca, dunque, non è solo per trovare compagnia su altri mondi, ma soprattutto per scoprire le nostre origini.

1.2 I setti scopi scientifici dell'astrobiologia

Alla fine del 2003 la NASA identificava sette vasti scopi scientifici nell'ambito dell'astrobiologia (nelle didascalie delle figure seguenti vengono indicati gli obiettivi concreti da raggiungere). Per più dettagli vedere il sito internet:

<http://astrobiology.arc.nasa.gov/roadmap/index.html>

Scopo 1:

Capire la natura e la distribuzione degli ambienti abitabili nell'universo. Determinare quali siano potenzialmente i pianeti abitabili oltre il sistema solare e descrivere le caratteristiche di quelli che sono osservabili.



FIGURA 1.1— Modelli di formazione e di evoluzione di pianeti abitabili. Indirette e dirette osservazioni astronomiche di pianeti extrasolari abitabili.

Scopo 2:

Ricerca e studiare gli ambienti abitabili del presente o del passato, la chimica prebiotica e i segni di vita altrove nel nostro sistema solare. Determinare qualsiasi precursore chimico della vita e qualsiasi antico clima abitabile del sistema solare. Caratterizzare qualsiasi tipo di vita estinta o ancora esistente e i potenziali luoghi abitabili nel sistema solare (Marte in particolare).



FIGURA 1.2— Esplorazione di Marte. Esplorazione delle parti esterne del sistema solare.

Scopo 3:

Capire come la vita emerge da precursori cosmici e planetari. Condurre una serie di esperimenti, osservazioni e riflessioni teoriche per capire i principi generali fisici e chimici che sono alla base dell'origine della vita.



FIGURA 1.3— Sorgente di materiale prebiotico e catalizzatori. Origini ed evoluzione di biomolecole funzionali. Origini della trasduzione (trasferimento e riuso) dell'energia. Origini delle cellule e dei sistemi proto-biologici.

Scopo 4:

Capire come la vita terrestre nel passato ha interagito con il suo ambiente in mutazione, sia a livello planetario che del sistema solare. Investigare le relazioni storiche tra la vita e il suo ambiente richiede l'uso di varie scienze: geofisica, geochimica, astrofisica, biologia molecolare, ecc...

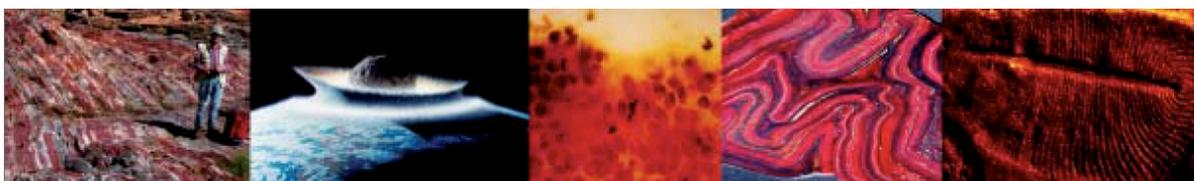


FIGURA 1.4— La biosfera primitiva terrestre. I fondamenti della vita complessa. Gli effetti di eventi extraterrestri sulla biosfera.

Scopo 5:

Capire i meccanismi evolutivi e i limiti ambientali della vita. Determinare i meccanismi molecolari, genetici e biochimici che controllano e limitano l'evoluzione, la diversità metabolica e l'acclimatazione della vita.



FIGURA 1.5— Evoluzione molecolare dei micro-organismi, anche in funzione dell'ambiente. Co-evoluzione di comunità di microbi. Adeguamento biochimico a degli ambienti estremi.

Scopo 6:

Capire i principi sottostanti che modelleranno il futuro della vita, sia sulla Terra che altrove. Chiarire gli elementi motori e gli effetti di un cambiamento d'ecosistema, in modo da poter predire futuri cambiamenti su scale di tempo da decine a milioni di anni. Esplorare il potenziale della vita microbica di evolvere in ambienti fuori dal suo pianeta di origine.

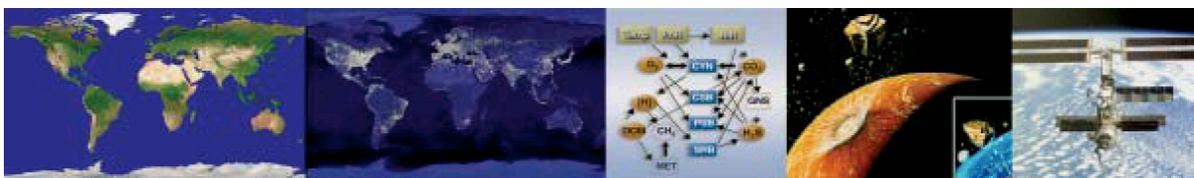


FIGURA 1.6— Cambiamenti ambientali e il ciclo degli elementi degli ecosistemi. Adattamento della vita oltre la Terra.

Scopo 7:

Determinare come riconoscere firme della vita su altri mondi e sulla Terra primordiale. Identificare biofirme che possano rivelare e caratterizzare la vita (passata o presente) in campioni terrestri ed extraterrestri (in situ o riportati sulla Terra) e in atmosfere di pianeti distanti.



FIGURA 1.7— Ricercare le biofirme nel materiale del nostro sistema solare. Ricercare le biofirme nei sistemi planetari vicini.

1.3 Piano del corso di fisica

In questo corso, proveremo a dare qualche risposta ad alcuni dei temi sopraelencati. Come introduzione mi sembra opportuno cominciare dando un **senso in scala** all'universo e ai suoi diversi oggetti: pianeti e stelle del sistema solare (poster nel corridorio e anche sito web) e alcune distanze importanti.

Cominceremo dalla formazione e l'evoluzione delle stelle e dei pianeti, per poi approfondire le condizioni fisiche che permettano la vita. Nei capitoli successivi ci interesseremo alla ricerca della vita nel nostro sistema solare (per limiti di tempo, guarderemo solo il caso di Marte) e in altri sistemi planetari. In fine, proveremo di capire perché e come la vita sulla Terra ha portato a una forma di vita "intelligente" con la nostra specie.

1.4 Il metodo scientifico

Da Wikipedia, l'enciclopedia libera: http://it.wikipedia.org/wiki/Metodo_scientifico

Il **metodo scientifico** è lo studio sistematico, controllato, empirico e critico di ipotesi formulate sulle relazioni supposte tra vari fenomeni (Frédéric Kerlinger). È usato in particolare dalla scienza (nelle sue varie discipline) della cui moderna definizione esso è alla base.

Il metodo scientifico si sviluppa storicamente ed il suo nocciolo risiede nel processo sistematico usato dalla scienza nella sua continua ricerca della verità sui fenomeni percepiti e nella sua formalizzazione in forma di conoscenza. La storia della scienza comprende vari capitoli affascinanti, dagli Egizi, ai Greci, agli Arabi, fino a Leonardo da Vinci e Galileo.

Galileo fu il primo a introdurre formalmente il metodo scientifico. Secondo lo scienziato pisano il libro della natura è scritto secondo leggi matematiche e per poterle capire è necessario eseguire esperimenti con gli oggetti che essa ci mette a disposizione. Come già Galileo, anche la scienza moderna fa la distinzione tra l'aspetto sperimentale e teorico: né l'uno né l'altro sono preponderanti, poiché fa parte del metodo scientifico l'idea che un modello teorico spieghi un'osservazione sperimentale ed anticipi future osservazioni. Uno dei punti basilari è la riproducibilità degli esperimenti, ovvero la possibilità che un dato fenomeno possa essere riproposto e studiato in tutti i laboratori del mondo.

Non è sempre possibile riprodurre sperimentalmente delle osservazioni naturali, ad esempio, in alcune scienze come l'**astronomia** o la meteorologia, non è possibile ri-

produrre molti dei fenomeni osservati e allora si ricorre ad osservazioni e simulazioni digitali. Un altro esempio è l'**evoluzionismo di Charles Darwin**, che per essere verificato direttamente richiederebbe tempi d'osservazione talmente lunghi, milioni d'anni, da non essere riproducibili in laboratorio; in questi casi le verifiche sperimentali si basano sull'analisi genetica e dei fossili. Nel 1866, con la pubblicazione dell'*Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*, Claude Bernard tenta di adottare questo metodo, detto sperimentale, nel settore della medicina. L'emergere delle scienze umane e sociali a partire dalla fine del 1800 fino al 1900 ha rimesso in discussione questo modello unico del metodo scientifico. Nel tentativo di definire un metodo scientifico valido anche nel campo delle scienze umane, i filosofi hanno cercato nuovi ragionamenti ed un importante contributo è venuto da Karl Popper e dalla sua pubblicazione *Logica della scoperta scientifica*.

1.4.1 Come applicare il metodo scientifico all'osservazione dei fenomeni naturali

La preoccupazione metodologica scientifica è quella di rispettare una serie di regole imposte dal pensiero logico al fine di salvaguardare la realtà e l'obiettività dei fenomeni studiati. Le scienze naturali dette anche scienze empiriche per il loro carattere sperimentale, sono una forma di conoscenza basata su due elementi fondamentali, l'oggetto dello studio ed il metodo impiegato. Questa conoscenza è un sapere empirico, cioè fondato sull'esperienza, descrittivo ed esplicativo, di osservazioni singole e limitate che possono essere sia ripetute che generalizzate. L'oggetto di studio della scienza è la realtà sensibile, vale a dire il mondo che ci circonda nei suoi diversi aspetti e ciò che rende ammissibile l'introduzione di un ente nel discorso scientifico, è la sua osservabilità di principio, cioè di registrare mediante strumenti di varia natura l'esistenza di un dato oggetto o di un fenomeno e di descriverli.

Il metodo sperimentale, detto anche galileano o ipotetico-deduttivo, originatosi dall'empirismo, è una procedura conoscitiva articolata in diverse proposizioni, chiamate ragionamento sperimentale. Per eseguire osservazioni scientifiche che abbiano caratteri di verità, è necessario applicare le seguenti regole (figura 1.8):

1. Osservare e descrivere un dato fenomeno.
2. Formulare un'ipotesi che lo possa spiegare.
3. Prevedere una o più conseguenze dipendenti da quest'ipotesi.
4. Verificare in modo sperimentale le conseguenze.
5. Concludere (valutare): confermare o confutare l'ipotesi iniziale.

Quando le conseguenze confermano le ipotesi, si parla di oggettività delle osservazioni e si costruisce una legge; da un insieme di leggi, si costruisce una teoria. Dunque le basi della scienza sono quelle osservazioni di fenomeni naturali che chiunque può ripetere, da qui la preoccupazione di una descrizione dei fenomeni e delle conclusioni in termini selezionati, rigorosi e univoci, in modo che ognuno possa esattamente comunicare ciò che pensa.

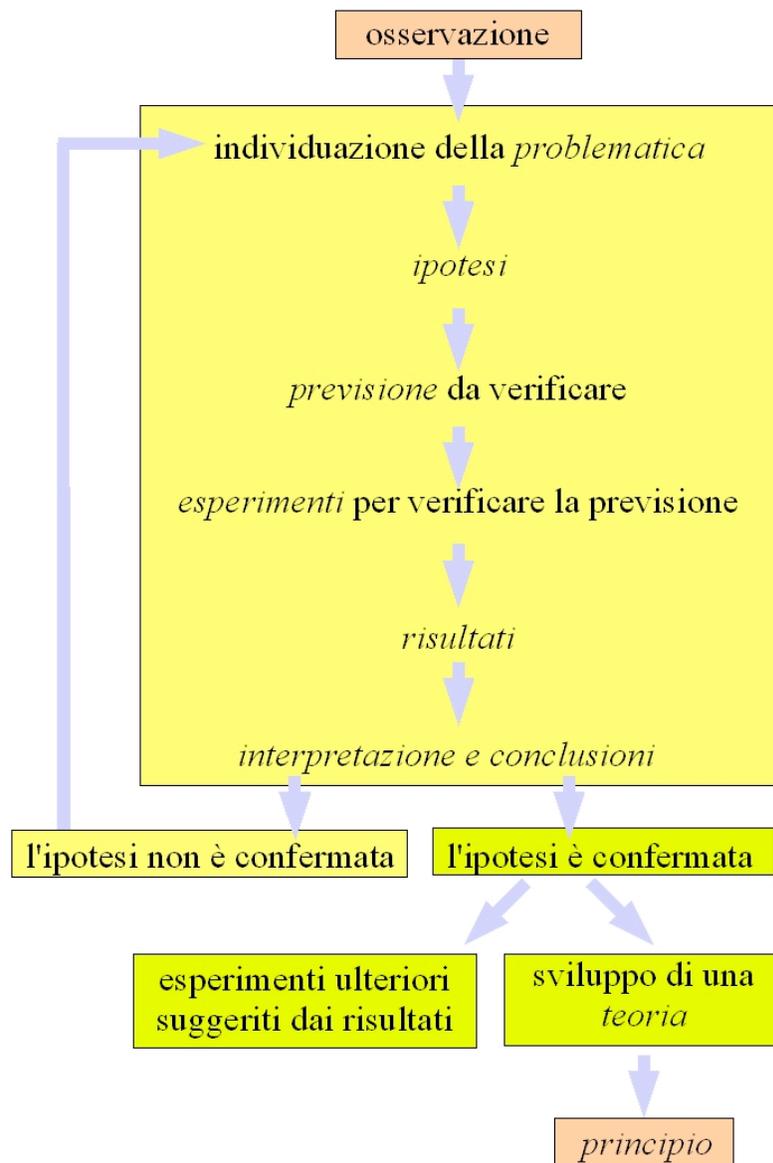


FIGURA 1.8— Descrizione schematica dell'applicazione del metodo scientifico, disegnata da Corneliae il 26.04.2007 (sorgente: http://it.wikipedia.org/wiki/Immagine:Metodo_scientifico.jpg)

1.4.2 Astronomia ed evolucionismo

Si è già parlato della natura un po' particolare dell'astronomia e dell'evoluzionismo di Darwin, nel senso che in queste discipline, solo poche "esperienze" possono essere verificate in laboratorio. In astronomia, si applicano le conoscenze scientifiche delle "altre" scienze, nel campo specifico degli astri e dell'universo, come la fisica nucleare (nella fusione al centro delle stelle), la legge della gravitazione universale (nei movimenti delle stelle nelle galassie, nel moto dei pianeti), la relatività generale (in cosmologia), la fisica quantistica, ecc. Queste leggi hanno dei "fondamenti di laboratorio". Come nelle altre scienze, in astronomia si cerca di capire l'origine e lo sviluppo degli

oggetti studiati, in questo caso delle stelle, dei pianeti, delle galassie, dei buchi neri, ... dell'universo. L'astronomia si basa su principi fisici fondamentali. Una ipotesi può essere verificata grazie ad apposite future osservazioni e deve essere coerente con il resto delle conoscenze attuali. Le simulazioni numeriche al computer tentano di sostituire le esperienze di laboratorio. La nucleosintesi stellare all'inizio del corso è un ramo dell'astronomia molto ben conosciuto perché possiamo confrontare queste teorie con osservazioni molto precise della nostra stella vicina, il Sole. Per di più le reazioni di fusione termonucleare su cui sono basate sono molto ben comprese.

L'evoluzionismo, proposto da Charles Darwin (1859) non gode di questa precisione e di questa sicurezza. La storia dell'uomo per esempio è molto incompleta, dovuta principalmente alla scarsità e alla qualità dei fossili. Le ipotesi in questo campo a volte sono difficili da verificare.

Ho deciso di presentare nonostante tutto questa teoria¹, perché essa raccoglie consenso tra gli scienziati oggi. Questa teoria ha conosciuto (e conosce ancora oggi) vari sviluppi, e non costituisce sicuramente l'ultima parola sulla storia affascinante della vita. Tuttavia essa rimane, secondo me, il quadro migliore di spiegazione scientifica per l'origine della vita e della nostra specie.

Ad un certo punto nello studio di una scienza, le conoscenze diventano meno sicure, più speculative, a volte in contraddizione con altre teorie, insomma, è arrivato il punto dove abbiamo raggiunto i nostri limiti. La scienza prova a fare crescere e a portare avanti le nostre conoscenze, ma ci sarà sempre un limite. In questi casi uno studente deve decidere allora da solo, perché il docente non riesce più a dare una risposta completamente soddisfacente. Il ruolo del docente in questi casi è quello di presentare alcune teorie (se esistono) con i loro pregi e difetti e di dare gli elementi agli studenti per permettere di valutare e di farsi un'idea personale.

1.5 Esercizi

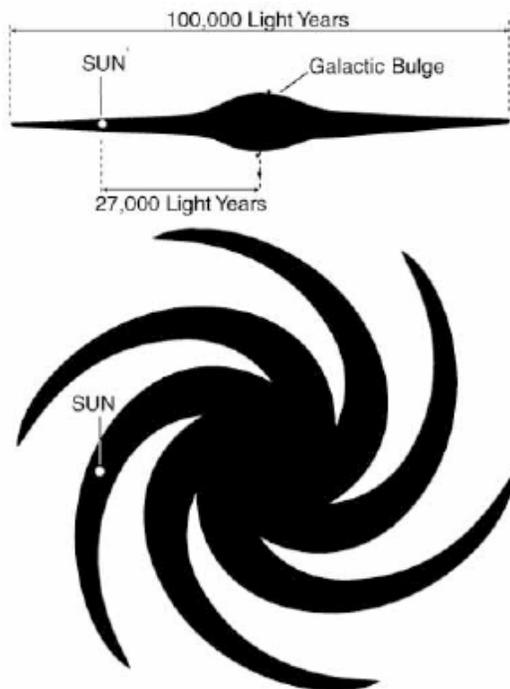
1. Dare due esempi di metodologia scientifica ispirati a casi famosi della fisica, della chimica o della biologia; spiega per favore come il metodo scientifico si applicava nel caso preciso.
2. Ricercare (sulle pagine di astronomia della settimana d'approfondimento o su Internet) che cosa è un parsec, l'unità di distanza usata in astronomia. Perché essa è stata scelta in questo modo?
3. Quali sono gli scopi principali dell'astrobiologia? Perché la gente si interessa tanto a questi temi? Secondo te, questa scienza ha delle applicazioni concrete nella vita umana?
4. Proxima Centauri, una nana rossa nella costellazione del Centauro, è la stella più vicina al Sole. Calcolare quante volte la distanza tra questa stella e il Sole è maggiore della dimensione del sistema Solare (distanza Sole-Plutone)? La sonda spaziale Cassini-Huygens² ha impiegato quasi 7 anni per mettersi in orbita attorno

¹insieme ad una teoria concorrente

²www.lilu2.ch/lilu2dir/materie/scienze_sperimentali/Settimana_approfondimento_astronomia/

a Saturno. Con questa velocità, quanto tempo impiegherebbe per raggiungere Proxima Centauri ?

5. Quali sono le differenze tra l'astronomia e l'astrologia? Perché l'astrologia non è una scienza? Il sito <http://www.astrosociety.org/education/astro/act3/astrology.html> aiuta a capire meglio la differenza tra scienza e pseudo-scienza.
6. Quando due galassie entrano in collisione³, si toccano fisicamente anche le stelle?



Paragonate il diametro "medio" di una stella con la distanza media delle stelle in una galassia, per stimare se due stelle possano toccarsi mentre due galassie si "attraversano" durante una collisione. Prendete come esempio, due galassie come la nostra, ognuna con un totale di 10^{11} stelle e un diametro di 100'000 anni-luce. Per semplificare, presupponete una densità di stelle costante in una sfera di 50'000 anni-luce di raggio. In realtà le stelle sono molto più concentrate nella parte centrale della galassia (chiamata *Galactic Bulge*). Per una simulazione di quello che accade durante una collisione di galassie, vedete il capitolo a questo proposito nel corso di astronomia della settimana di approfondimento.

FIGURA 1.9— Disegno della nostra galassia la Via Lattea. Credito: Illustrazione da Tim Jones.

Cassini-Huygens/Cassini.html

³Settimana_approfondimento_astronomia/Galaxies/Galaxy_mergers/Mergers.html

Capitolo 2

Vita e morte delle stelle e formazione dei pianeti

2.1 Introduzione

Le stelle¹ vivono per un sacco di tempo rispetto alle vite umane. I vostri bis-bis nonni vedevano le stesse stelle che voi vedrete stanotte (se il cielo sarà chiaro). La nostra vita è misurata in anni, la vita delle stelle è misurata in milioni di anni. Malgrado il fatto che i tempi stellari siano giganteschi, è possibile sapere come le stelle nascono, vivono e muoiono. Questo capitolo copre le varie fasi della vita delle stelle e la formazione dei pianeti. La parte finale del capitolo si occuperà di quello che rimane delle stelle: nane bianche, stelle a neutroni e buchi neri.

2.2 Evoluzione stellare

Le stelle possono avere masse molto diverse alla nascita. La massa di una stella è una quantità fondamentale per caratterizzarla; infatti, tutte le altre caratteristiche della stella, come la sua luminosità, la temperatura, la dimensione, la densità ecc., possono essere spiegate usando la proprietà fondamentale della stella: la sua massa. Esiste anche una piccola dipendenza della luminosità, della temperatura e della dimensione dalla composizione chimica della stella, ma dato che le stelle sono fatte in maggior parte di idrogeno ed elio, la massa della stella è la quantità più importante.

2.2.1 Dipendenza dalla massa

Le varie tappe della vita di una stella e quanto tempo durerà ogni tappa dipendono dalla massa (e in misura molto minore dalla composizione chimica). Le stelle massicce evolvono più in fretta delle stelle leggere. La relazione tra luminosità e massa può essere spiegata usando i principi elementari sul comportamento di un gas compresso (vedi prossimo paragrafo). Piccoli incrementi di massa producono grandi incrementi di luminosità.

Le stelle brillano a causa delle reazioni nucleari nel loro centro. Più una stella è luminosa, più numerose sono le reazioni nucleari nel suo centro. Le stelle massicce hanno

¹A parte qualche eccezione, questo capitolo è stato copiato e tradotto dai appunti di Nick Strobel. Per favore, visitare www.astronomynotes.com per una versione aggiornata e corretta.

vite più brevi delle comunissime stelle piccole perché anche se hanno un serbatoio di idrogeno da bruciare più grande, il loro tasso di consumo è molto più grande.

Con un calcolo semplice si trova quanto tempo una "cosa" può continuare a consumare del carburante: tempo totale di consumo = quantità di carburante / tasso di consumo. Quante ore può viaggiare una macchina che consuma 7 lt/100 km con un serbatoio di 50 litri (ad una velocità media di 100 km/h)?

Per le stelle è la stessa cosa. La quantità di carburante per le reazioni nucleari è proporzionale alla massa totale della stella quando essa comincia a produrre energia con le reazioni di fusione per la prima volta (quantità di carburante = $k \cdot$ massa iniziale, con k una costante di proporzionalità). Il tasso di consumo è semplicemente la **luminosità** della stella, quindi la stella vivrà sulla sequenza principale (la maggiore parte della sua vita) per un tempo = $k \cdot$ massa iniziale / luminosità. Se le masse e le luminosità stellari sono in unità relativamente al Sole, allora il tempo di vita di una stella = massa / luminosità $\cdot 10^{10}$ anni. Ricordatevi che il Sole vive sulla sequenza principale per circa 10 miliardi ($10 \cdot 10^9 = 10^{10}$) anni, prima di esaurire l'idrogeno nel suo cuore.

Equilibrio idrostatico e la relazione massa–luminosità

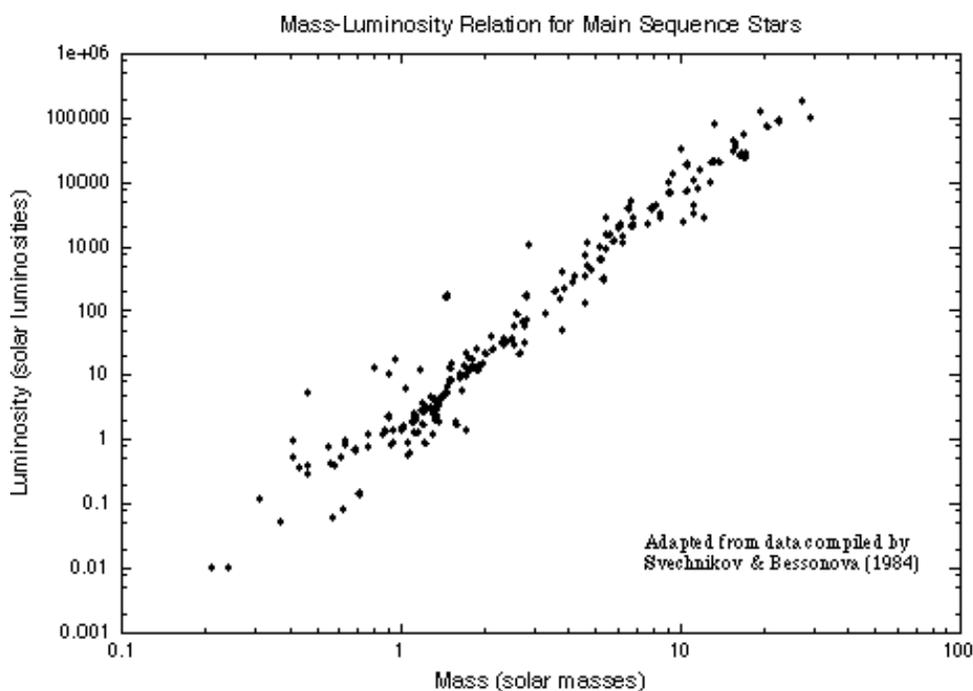


FIGURA 2.1— La relazione massa–luminosità per 192 stelle binarie, di cui si può conoscere la massa. Da notare la scala non–lineare (logaritmica) su entrambi gli assi.

L'osservazione di migliaia di stelle della sequenza principale (SP) mostra che esiste una definita relazione tra la massa e la luminosità (vedi figura 2.1). Le stelle più massicce della SP sono più calde e più luminose che le stelle leggere della SP. Inoltre la luminosità dipende dalla massa elevata alla potenza 3–4 (Luminosità \propto Massa ^{p} con p tra 3 e 4). Questo significa che anche una piccola differenza di massa tra stelle risulta

in una grande differenza tra le loro luminosità. Per esempio, una stella di tipo O può essere solo 20 volte più massiccia del Sole ma è 10'000 volte più luminosa. Mettendo insieme il principio di equilibrio idrostatico e la sensibilità del tasso delle reazioni nucleari alla temperatura, questo fatto può essere facilmente spiegato:

Nel cuore le stelle massicce hanno una compressione gravitazionale più forte dovuta al peso maggiore degli strati sovrastanti. Quindi hanno bisogno di una pressione (termica e radiativa) maggiore che preme verso l'esterno per contro-bilanciare la più grande compressione gravitazionale. Questa pressione termica maggiore è fornita dalla più elevata temperatura che c'è nel cuore delle stelle massicce. In altre parole, le stelle più massicce hanno bisogno di avere interni più caldi per essere stabili.

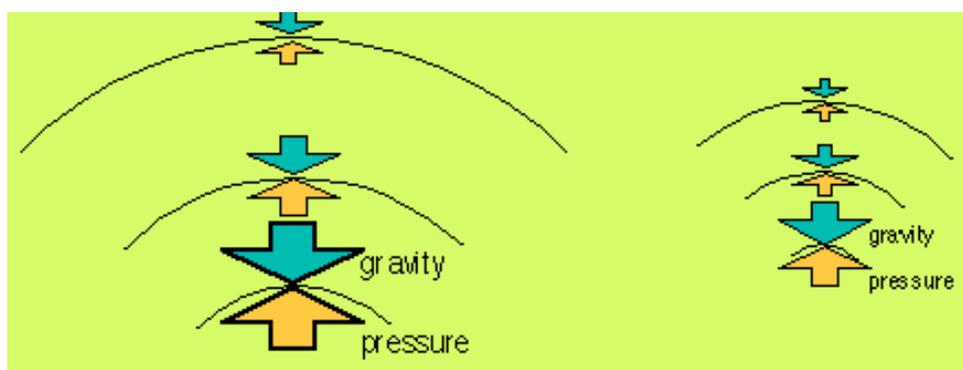


FIGURA 2.2— Le stelle più massicce hanno maggiore compressione gravitazionale. Hanno bisogno di temperature centrali più elevate per essere stabili. Un piccolo cambiamento in massa genera un grande cambiamento di luminosità.

Il tasso di reazione nucleare è molto sensibile alla temperatura, pertanto anche un piccolo aumento della temperatura provoca un incremento notevole (*molto* più grande) delle reazioni nucleari. Ciò significa anche che una stella di massa leggermente superiore ha una luminosità *nettamente* maggiore.

Esercizi

1. Per rimanere stabile attraverso un equilibrio idrostatico, la luminosità L di una stella aumenta con la sua massa M_* come $L \propto M_*^p$, con valori dell'esponente p che variano tra 3 e 4. Per le rare stelle massicce ($M_* > 30 M_\odot$)² $p = 3$ e per le più comuni stelle leggere ($M_* < 10 M_\odot$), $p = 4$. Usate questa relazione tra la massa e la luminosità per trovare il tempo di vita di stelle che hanno 0.1, 1.5, 3, 10 e 60 volte la massa del Sole. Quali commenti puoi fare confrontando questi numeri, sapendo che l'universo ha un'età di circa 14 miliardi di anni?
2. Che succederebbe alla dimensione di una stella se il suo nucleo producesse *più* energia di quanto faceva precedentemente (come per esempio quando la stella diventa una gigante rossa)?

² M_\odot è la massa del Sole

3. Che succederebbe alla dimensione di una stella se il suo nucleo producesse *meno* energia di quanto faceva precedentemente (come per esempio quando la stella smette di avere reazioni nucleari nel suo centro) ?
4. Con quello che sai sui pianeti, prova ad elencare alcune differenze fondamentali tra stelle e pianeti.

2.2.2 **Lo schema di base**

Tutte le stelle seguono la stessa serie di tappe durante la loro vita: Nube interstellare di gas \rightarrow Sequenza Principale (con possibile formazione di pianeti) \rightarrow Gigante rossa \rightarrow Nebulose planetarie o Supernovae \rightarrow Residuo stellare. Quanto tempo una stella passerà in ogni fase, se si formerà una nebulosa planetaria o un'esplosione di supernova e quale tipo di residuo si formerà dipende dalla massa iniziale della stella. L'evoluzione delle stelle durante la loro vita dipende dalla loro massa iniziale (prima di iniziare le reazioni nucleari) con una leggera dipendenza dalla composizione chimica. Il resto del capitolo è una descrizione di ognuna di queste fasi.

2.2.3 **Fase 1: Nube Molecolare Gigante**

Una **Nube Molecolare Gigante (NMG)** è una grande nube densa di gas (con polveri), fredda abbastanza per permettere la formazione di molecole. Migliaia di NMG esistono nel disco della nostra galassia. Una NMG può avere una massa da 100'000 a qualche milione di volte della massa solare.

Un esempio vicino di NMG è la costellazione di Orione, di cui la famosa nebulosa di Orione (M42) fa parte (figura 2.3). La nebulosa di Orione si trova a circa 1500 anni-luce dalla Terra, ha qualche centinaia di anni-luce di larghezza, e ha abbastanza materiale per formare varie decine di migliaia di Soli. Le NMG hanno della polvere all'interno che protegge le parti più dense dalle intense radiazioni delle stelle giovani e permette la formazione di molecole. Perciò sono molto scure e molto fredde (con temperature di solo $10^\circ K$). Oltre alla molecola più comune, l'idrogeno molecolare H_2 , più di 80 molecole diverse sono state trovate, dalle semplici molecole come il monossido di carbonio CO , alle molecole complesse come il metanolo (CH_3OH) e l'acetone ($CH_3-CO-CH_3$). Si osservano meglio queste nubi molto scure con i radio-telescopi perché le onde radio non sono assorbite dalla nuvola, al contrario della luce visibile. Una nube è più densa rispetto al resto del gas interstellare ma è ancora molto più rarefatta dell'atmosfera di un pianeta. Densità tipiche di nubi sono 100 a 1000 molecole per cm^3 , quando ogni cm^3 di aria che respiriamo nell'atmosfera terrestre contiene circa $2.5 \cdot 10^9$ molecole: una nube molecolare è da decine a centinaia di volte più vuota che i migliori vuoti che possiamo ottenere in laboratorio sulla Terra!

Nelle parte della nube molecolare dove le stelle molto calde (di tipo O e B) si sono formate, il gas idrogeno circondante emette della luce visibile e forma quello che viene chiamato una "regione HII", come per esempio la nebula di Orione (figura 2.3 e figura 2.4).

La nebulosa è illuminata dalla fluorescenza del gas idrogeno attorno una stella di tipo O nell'ammasso del Trapezio che contiene 4 stelle brillanti al centro della nebulosa

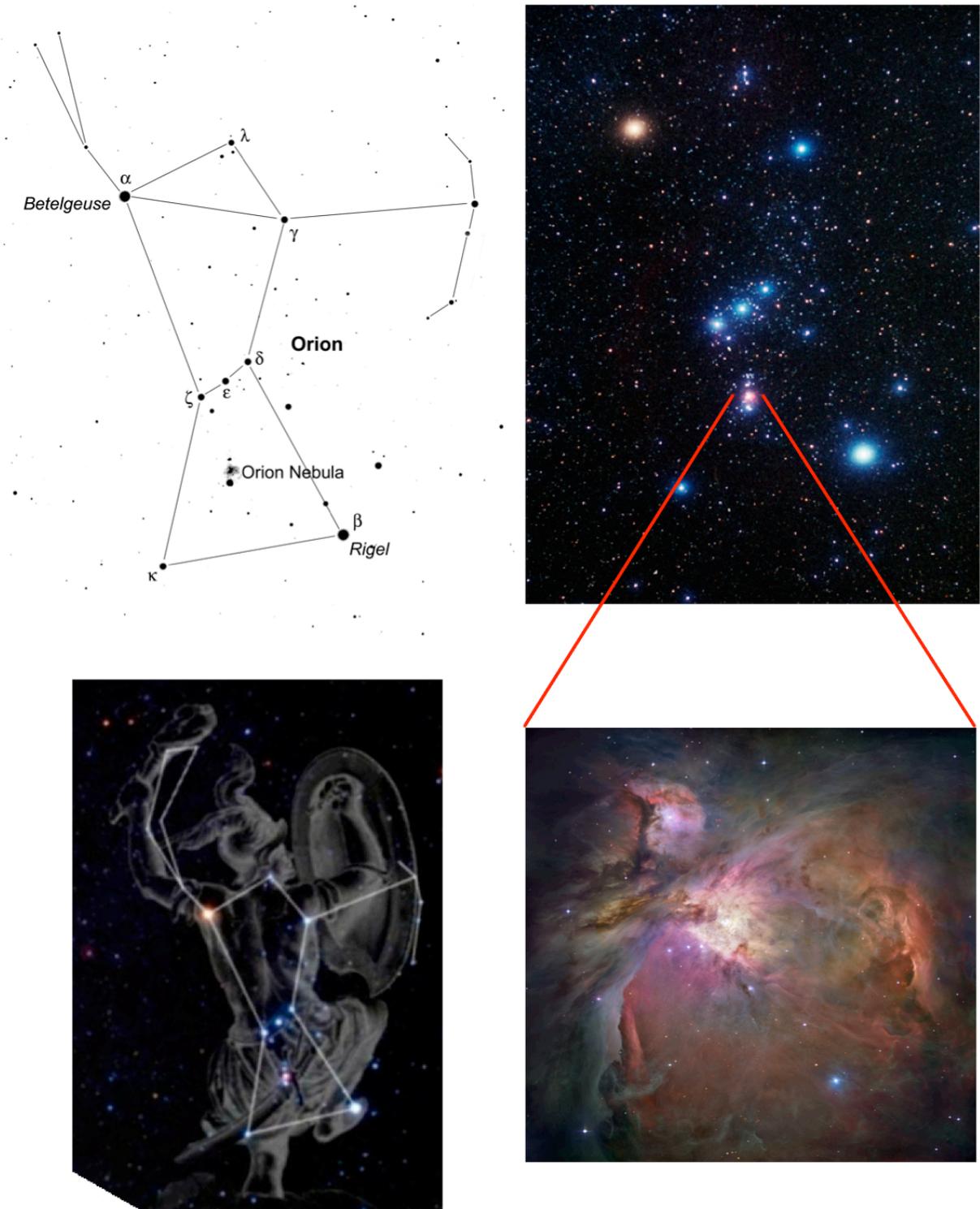


FIGURA 2.3— Le stelle della costellazione di Orione con la nebulosa di Orione (M42) in basso a destra. Nella mitologia Orione rappresenta un cacciatore.

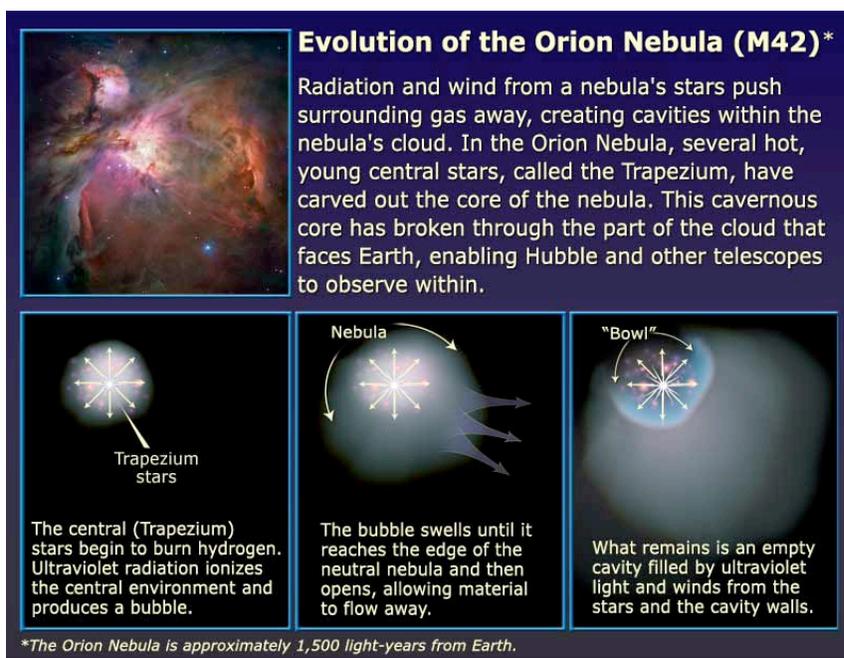


FIGURA 2.4— Evoluzione della nebulosa di Orione. Credito: Hubble Space Telescope, STScI, NASA.

(vedi la figura 2.5). La stella di tipo O è così calda che produce un sacco di luce ultravioletta che ionizza il gas idrogeno circostante. Quando gli elettroni tornano a legarsi con un protone (il nucleo del atomo d'idrogeno) emettono luce nel visibile. Altre stelle nel processo di formazione sono visibili vicino all'ammasso del Trapezio. Esse appaiono come dei corpi di forma oblunghe, con il loro asse principale nella direzione delle stelle calde del Trapezio (figura 2.5).

Le regioni HII indicano i siti di formazione stellare perché sono composti di stelle calde e giovani. Ricordatevi che le stelle di tipo O vivono "solo" alcuni milioni di anni, un tempo molto breve per una stella! La maggiore parte delle stelle (come il nostro Sole) vivono miliardi di anni (mille volte di più). Le stelle di tipo O non vivono abbastanza per allontanarsi molto dal posto dove sono nate. Durante la sua vita, il nostro Sole invece ha già compiuto circa 25 volte il giro attorno al centro della Via Lattea (Periodo di rotazione = 200 milioni di anni, età del Sole = 5 miliardi di anni, età della nostra galassia = circa 10 miliardi di anni).

Dietro la parte visibile della nebulosa di Orione si trova una regione molto più densa di gas e di polvere che ha una temperatura abbastanza bassa per permettere la formazione di molecole complesse. Centinaia di stelle si formano adesso all'interno della Nebulosa di Orione.

Frammenti di NMG con massa compresa tra decine e centinaia di masse solari di materiale inizieranno a crollare e a comprimersi. Possibili meccanismi innescanti possono essere l'onda d'urto proveniente dall'esplosione di una stella massiccia vicina o anche il passaggio della NMG in una regione di attrazione gravitazionale più intensa, come per esempio nelle braccia spirali delle galassie come la nostra. Queste onde di urto comprimono le nubi di gas abbastanza per farle crollare "gravitazionalmente".

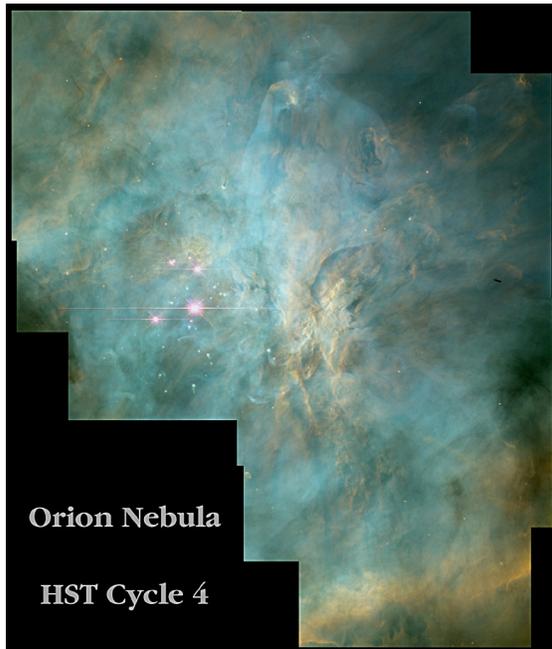


FIGURA 2.5— Il cuore del Trapezio mostra le 4 stelle massicce e brillanti e una pletora di stelle come il Sole con estese emissioni di luce circondante. Il Trapezio si trova nel centro della Nebulosa di Orione, vista qui come un sottofondo blu. Notate come il materiale attorno alle piccole stelle di tipo solare produce una struttura simile ad una cometa, con una testa brillante e una coda nella direzione opposta alle stelle energetiche e massicce del centro. Questa immagine in falso colore è stata prodotta combinando varie immagine del telescopio spaziale Hubble. Credito: John Bally, Dave Devine, and Ralph Sutherland, NASA, STScI.

Se la NMG è abbastanza fredda e massiccia, può anche crollare spontaneamente senza nessuna forza esterna. Qualunque sia il motivo, il risultato è lo stesso: ammassi di gas si comprimono e diventano proto-stelle.

2.2.4 Fase 2: Proto-stelle

Quando una nube di gas si comprime si riscalda perché le particelle di gas entrano più spesso in collisione l'una con l'altra. L'energia potenziale gravitazionale si converte in energia termica. L'ammasso di gas diventa abbastanza caldo per emettere una grande quantità di luce infrarossa e micro-onde. A questo punto, l'ammasso caldo di gas viene chiamato "proto-stella".

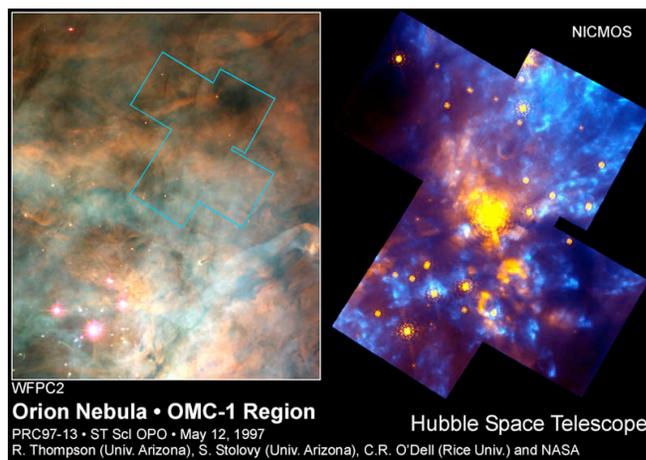


FIGURA 2.6— Immagine della nebulosa di Orione nella luce visibile con WFPC2 (a sinistra) e nell'infrarosso con NICMOS (a destra). Le proto-stelle si possono solo vedere nell'infrarosso. Credito: Hubble Space Telescope, STScI, NASA.

Comprimendosi, la nube di gas forma un disco con la proto-stella al centro. Il materiale nel disco può anche crollare per formare altre stelle o pianeti. Una proto-stella raggiunge una temperatura di 2000 a 3000 gradi K , emettendo la maggiore parte della sua luce nell'infrarosso. L'involucro di gas e polvere circondante blocca la luce visibile. La polvere circondante si riscalda abbastanza per produrre copiose quantità di luce infrarossa. I telescopi infrarossi sono capaci di osservare le proto-stelle direttamente, come si può vedere su questa foto ottenuta con la macchina fotografica infrarossa NICMOS di HST (figura 2.6). La parte della nebulosa sopra e a destra delle stelle del Trapezio sta formando molte stelle al momento. Si possono solo vedere nell'infrarosso, sulla destra della figura 2.6.

Le proto-stelle di piccola massa (fino a $5 M_{\odot}$) sono inizialmente molto più luminose che le stelle della SP che diventeranno a seguito della loro grande superficie. Quando queste leggere proto-stelle crollano, diminuiscono di luminosità mentre la loro temperatura superficiale rimane quasi costante. Una stella rimane nella fase di proto-stella solo poco tempo, è quindi difficile osservarle in questo periodo della loro vita. Proto-stelle più massicce crollano più rapidamente. La fusione inizia nel cuore della stella e produce una pressione verso l'esterno che permette di controbilanciare il crollo verso l'interno e di fermarlo in una posizione d'equilibrio. Il materiale circondante la nube continua a cadere sulla proto-stella. La maggiore parte dell'energia prodotta dalla proto-stella proviene dal crollo gravitazionale del materiale della nube.

Giovani stelle sono socievoli: la frammentazione della NMG produce proto-stelle di masse diverse, ma che si formano tutte più o meno allo stesso tempo. Si osserva che le stelle nascono in gruppi, non esistono giovani stelle isolate.



FIGURA 2.7— Una immagine di un sistema stella-disco a forma di lacrima, chiamato HST10, e i suoi vicini: un disco visto in silhouette (il disco scuro all'estrema destra) e un secondo sistema stella-disco a sinistra di lacrima. Al centro di HST10 si trova un disco scuro visto quasi di profilo, con un diametro simile all'orbita di Plutone. Gas caldo e diffuso circonda il sistema, probabilmente evaporato dalla superficie del disco. Stiamo assistendo alla distruzione di un disco circumstellare, che se lasciato da solo, sarebbe stato un probabile candidato per la formazione di pianeti. Credito: Hubble Space Telescope, STScI, NASA.

Il telescopio spaziale Hubble ha osservato proto-stelle nella nebulosa di Orione (figura 2.7). Queste proto-stelle sono state prematuramente esposte all'intensa radiazione di stelle calde vicine di tipo O e B. Quest'intensa radiazione ha evaporato la polvere e il gas attorno alla stella in formazione. In più di un caso in Orione, tutto il gas è stato soffiato via e ha lasciato solo un disco scuro di polvere con la proto-stella al centro. Un

esempio di disco di polvere totalmente esposto e visto quasi di faccia è mostrato nella figura 2.7: è la macchia nera a destra dell'immagine con la proto-stella al centro.

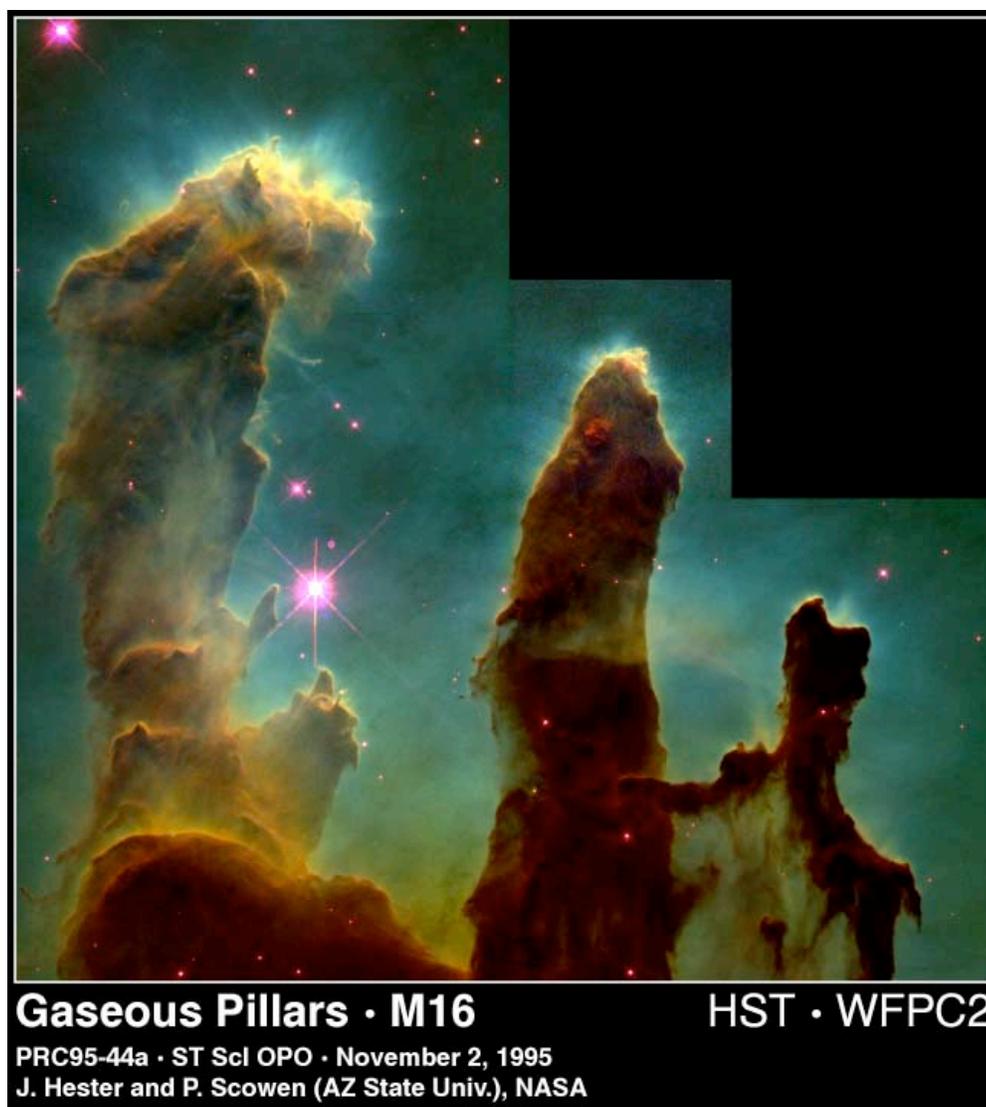


FIGURA 2.8— I pilastri della creazione. Credito: NASA, ESA, STScI, J. Hester and P. Scowen (Arizona State University).

L'evaporazione di questi dense e scure dita di polvere e gas nella nebulosa dell'Aquila è stata osservata da Hubble. È una delle immagini più famose di HST e viene chiamata "I pilastri della creazione (Pillars of creation)" (figura 2.8, vedere i posters di astronomia nel corridoio per una spiegazione sulla formazione dei "pilastri della creazione"). Nota che la più piccola protuberanza che sporge ai lati dei pilastri è più grande del nostro sistema solare!

Come illustrato nelle figure 2.9 e 2.10, le proto-stelle continuano a crollare su se stesse, liberando energia gravitazionale durante la compressione. In un diagramma che mostra la luminosità della stella in funzione della sua temperatura (diagramma

“Hertzsprung–Russell”), la stella segue un cammino complicato chiamato “the Hyashi track” mentre si avvicina lentamente al punto dove la fusione nucleare può cominciare³. La massa iniziale della proto-stella determina quali saranno la luminosità finale della stella e la sua temperatura.

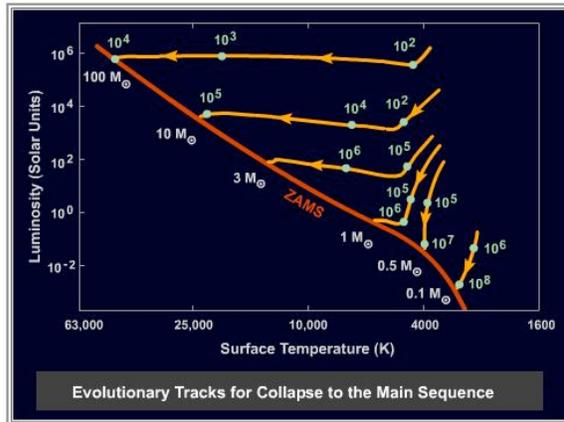


FIGURA 2.9— Cammini evolutivi verso la sequenza di età zero (Zero Age Main Sequence, ZAMS).

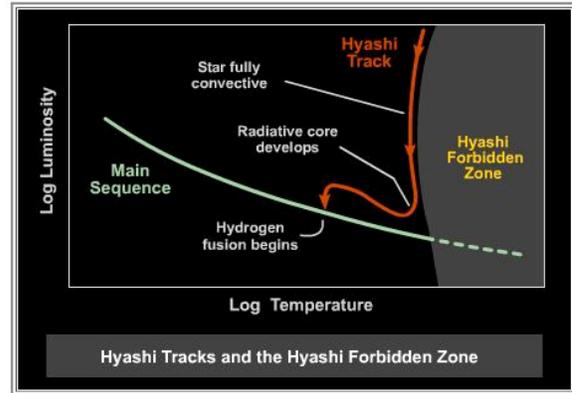


FIGURA 2.10— Hyashi track.

2.2.5 Fase 3: T-Tauri

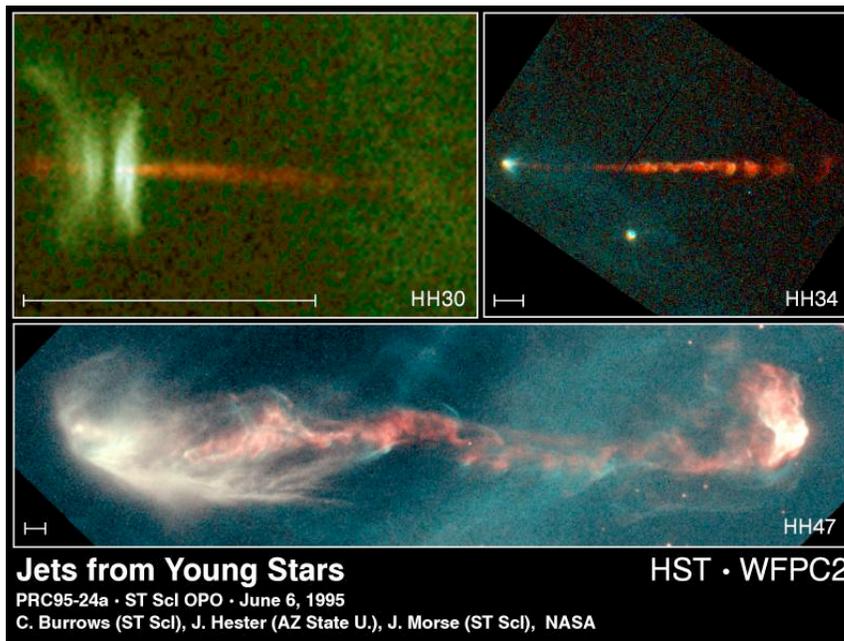


FIGURA 2.11— Getto di 3 giovane stelle nella fase T-Tauri. La scala nell’angolo in basso a sinistra di ogni figura rappresenta 150 miliardi di km, o 1000 volte la distanza tra la Terra e il Sole (più di 12 volte l’orbita di Plutone). Credito: NASA, STScI, AZ State Univ.

La giovane stella produce forti venti in una fase chiamata “T-Tauri”, in onore del prototipo di questo genere di stelle nella costellazione del Toro. Questi venti forti causano l’e-

³Credito <http://www.cfa.harvard.edu/COMPLETE/learn/protostars/protostar.html>

spulsione della maggior parte dell'involucro circostante di gas e di polvere. I venti sono costretti a seguire l'asse di rotazione del disco di polvere e di gas. Quando l'involucro circostante è completamente evaporato, si comincia a vedere la stella in formazione per la prima volta. Le immagini HST (figura 2.11) mostrano i getti che scaturiscono da tre giovani stelle. Il disco attorno a una stella è visibile nell'immagine in alto a sinistra.

2.2.6 Fase 4: Sequenza principale

Alla fine, la stella diventa stabile perché l'equilibrio idrostatico è stato raggiunto. La stella passerà il 90% della sua vita sulla Sequenza Principale (SP). Tramite le reazioni di fusione nucleare, la stella fonde idrogeno per formare dell'elio nel suo centro. Stelle di $1 M_{\odot}$ vivono stabilmente sulla SP circa 10 miliardi di anni. Questo lungo tempo ha importanti conseguenze per lo sviluppo della vita sui pianeti attorno a tali stelle.



FIGURA 2.12— Le Pleiadi sono un ammasso aperto piuttosto vicino (380 anni-luce) anche conosciuto come Le sette sorelle, anche se dagli ambienti cittadini solo cinque o sei delle stelle più brillanti sono visibili, mentre da un luogo più scuro se ne possono contare fino a dieci. Le stelle sono circondate da leggere nebulose a riflessione, osservabili solo in fotografie a lunga esposizione prese con telescopi di dimensione ragguardevole. I membri visibili delle Pleiadi sono stelle blu o bianche, molto luminose. L'ammasso conta centinaia di altre stelle troppo deboli per essere visibili ad occhio nudo. Credito per il testo: Wikipedia; credito per l'immagine: NASA/ESA/AURA/JPL-Caltech.

Le stelle cominciano la loro vita vicino ad altre stelle in un ammasso. Dopo qualche orbita attorno al centro galattico, le forze gravitazionali esercitate da tutte le altre stelle della galassia possono distruggere l'ammasso se non è abbastanza concentrato nel suo centro. Alcune stelle vivranno da sole, mentre altre avranno uno o due compagni (circa la metà delle stelle nella nostra galassia sono binarie). Le Pleiadi sono un giovane ammasso di stelle facilmente visibili nella costellazione del Toro (Taurus). L'età di queste stelle è circa 80 milioni di anni (al confronto, il nostro Sole ha 4'600 milioni di anni = 4.6 miliardi di anni!). Le Pleiadi hanno una durata di vita prevista di soli altri 250 milioni

di anni, a causa della bassa densità dell'ammasso. La prominenza delle Pleiadi nel cielo notturno le ha rese importanti in molte culture. Il gas e la polvere attorno alle stelle può essere un residuo della formazione o semplicemente una nube interstellare attraverso la quale sta passando l'ammasso.

Una stella rimane dello stesso tipo spettrale durante tutta la sua vita sulla SP—la SP non è una sequenza *evolutiva*. Solo nel caso in cui la stella possedesse una compagna molto vicina, del gas potrebbe passare da una stella all'altra in un tale sistema doppio. Una stella isolata sulla SP aumenta lentamente di luminosità con un lieve cambiamento della sua temperatura superficiale quando l'elio si accumula nel suo nucleo. La luminosità del nostro Sole é adesso 30 % di più del suo valore iniziale 4.6 miliardi di anni fa.

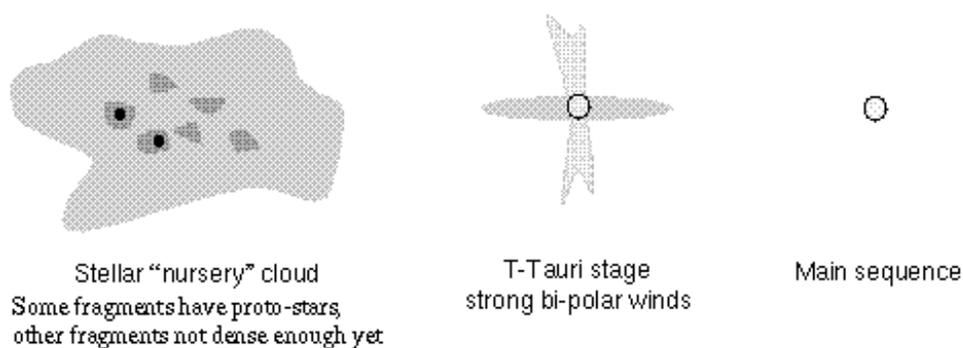


FIGURA 2.13— Tre fasi della formazione di una stella.

Il diagramma Hertzsprung–Russell

Il diagramma Hertzsprung–Russell (dal nome dei due astronomi, Ejnar Hertzsprung e Henry Norris Russell, che verso il 1910 lo idearono indipendentemente; in genere abbreviato in diagramma HR) è un potente "strumento" teorico che mette in relazione la temperatura effettiva (riportata in ascissa) e la luminosità (riportata in ordinata) delle stelle (figura 2.14). La temperatura effettiva e la luminosità sono quantità fisiche che dipendono strettamente dalle caratteristiche intrinseche della stella (massa, età e composizione chimica), non sono misurabili direttamente dall'osservatore ma possono essere derivate attraverso modelli fisici.

Diagramma Colore-Magnitudine

Esistono legami tra la temperatura effettiva di una stella ed il suo colore (o in termini più tecnici, "indice di colore"), e tra la luminosità della stessa e la sua magnitudine apparente (o assoluta), che permettono di ottenere una "versione osservativa" del diagramma HR (detta diagramma Colore-Magnitudine) che mette in relazione due quantità misurabili direttamente dall'osservatore: il colore della stella e la sua magnitudine (figura 2.14). L'esatta trasformazione da diagramma HR a diagramma Colore-Magnitudine non è banale, e dipende da fattori osservativi e teorici: distanza, arrossa-

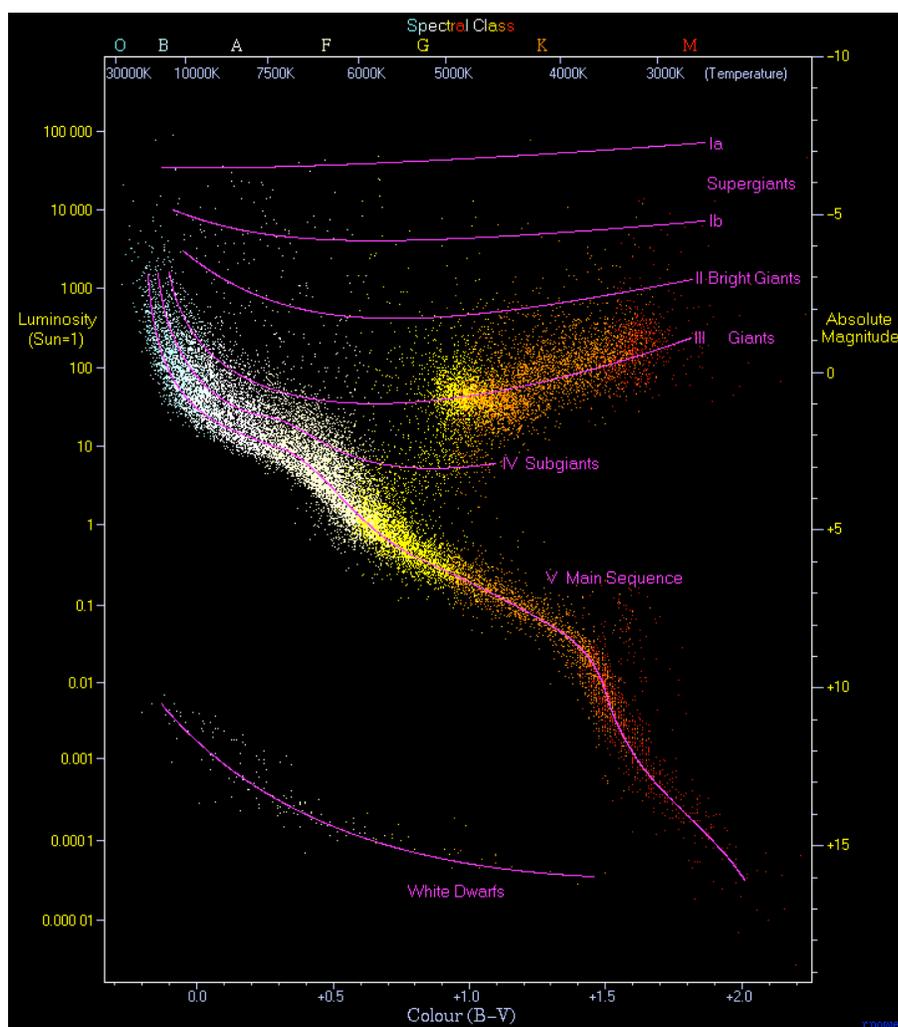


FIGURA 2.14— Diagramma HR con 22000 stelle del catalogo Hipparcos e 1000 stelle del catalogo di Gliese di stelle vicine sono rappresentate su questo diagramma. La caratteristica più evidente è la concentrazione di stelle su una linea diagonale, dall'angolo in alto a sinistra (stelle calde e brillanti) fino all'angolo in basso a destra (stelle più fredde e meno luminose), chiamata Sequenza Principale. In basso a sinistra si vedono le nane bianche e sopra la SP si trovano le subgiganti, le giganti rosse e le supergiganti. Il nostro Sole si trova sulla SP con una luminosità di 1.0 (magnitudine assoluta 4.8) e una temperatura superficiale di 5780 K (tipo spettrale G2, colore giallo). Credito: Richard Powell (<http://www.atlasoftheuniverse.com/hr.html>).

mento, età, composizione chimica e gravità della stella, modelli di interni e di atmosfere stellari.

A cosa serve

Il diagramma HR ed il diagramma Colore-Magnitudine vengono utilizzati per comprendere l'evoluzione e le caratteristiche fisiche delle singole stelle e degli agglomerati stellari: ammassi aperti, ammassi globulari e galassie. Grazie al diagramma HR è possibile: confrontare le predizioni teoriche dei modelli di evoluzione stellare (vedi figu-

ra 2.15) con le osservazioni per verificare l'accuratezza delle prime; determinare l'età, la composizione chimica e la distanza di una popolazione stellare; derivare la storia della formazione stellare di un agglomerato di stelle, ecc...

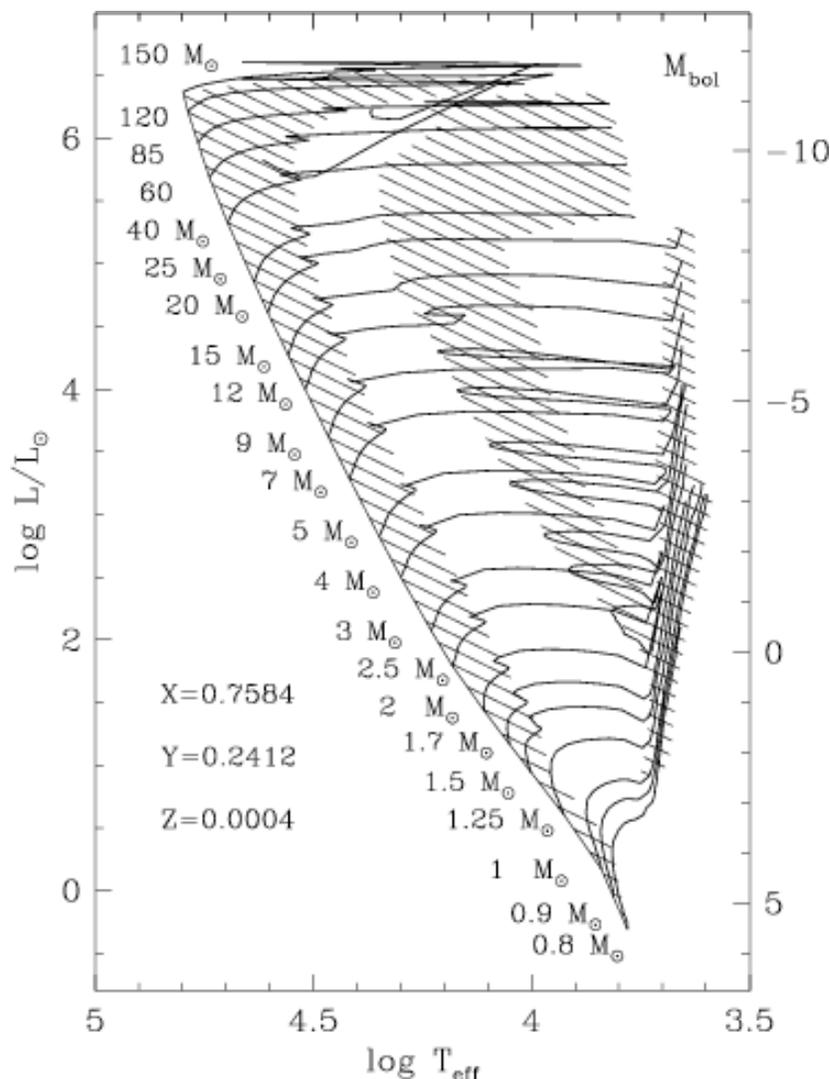


FIGURA 2.15— Diagramma HR teorico basato sul calcolo dell'evoluzione di stelle di varie masse iniziali, per una certa composizione chimica iniziale unica. Verso la fine della loro vita, le stelle lasciano la SP e si spostano verso destra. Le stelle di massa piccola seguono un percorso finale molto più verticale. Credito: Lejeune e Schaerer (2001).

Come funziona

Da un primo esame del diagramma HR si osserva immediatamente come le stelle tendano a posizionarsi in regioni ben distinte: la struttura evolutiva predominante è la diagonale che parte dall'angolo in alto a sinistra (dove si trovano le stelle più massicce, calde e luminose) verso l'angolo in basso a destra (dove si posizionano le stelle meno massicce, più fredde e meno luminose), chiamata la sequenza principale. In basso a

sinistra si trova la sequenza delle nane bianche, mentre sopra la sequenza principale, verso destra, si dispongono le giganti rosse e le supergiganti. I tipi stellari sono chiamati con le lettere O, B, A, F, G, K, M – in ordine decrescente di temperatura (con la frase mnemonica "Oh, Be A Fine Girl/Guy, Kiss Me").

2.2.7 Fase 4-b: Dischi proto-planetari

La pressione⁴ al centro della stella aumenta gradualmente fino al momento in cui controbilancia esattamente le forze gravitazionale che facevano crollare la nube di gas sulla stella (figura 2.16).

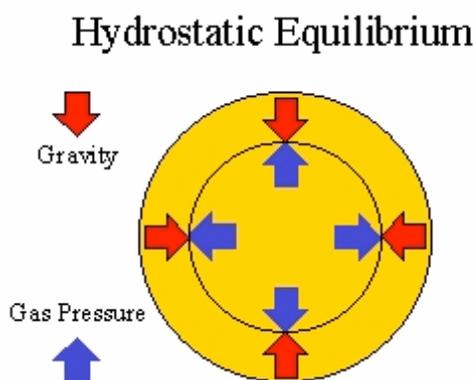


FIGURA 2.16— Equilibrio idrostatico. In ogni punto di una stella, c'è un equilibrio tra la pressione termale (verso l'esterno) e il peso del materiale sopra che spinge verso il basso (verso l'interno). Quest'equilibrio è chiamato *equilibrio idrostatico*.

Quando il processo di aggregazione del materiale sulla stella si ferma, il resto della polvere rimane attorno alla stella nella forma di un disco in lenta rotazione.

In questa impressionante immagine di HST (figura 2.17), la stella è in maggior parte nascosta all'interno del disco, perché esso è visto di profilo. Questo disco è verosimilmente un sistema protoplanetario embrionale. È probabile che il nostro sistema solare sia stato formato da un simile disco 4.5 miliardi di anni fa. Con un diametro 17 volte superiore a quello del sistema solare, questo disco è il più grande di alcuni recentemente scoperti nella nebulosa di Orione con HST. Chiaramente visibile anche la luce sopra e sotto il piano del disco: essa tradisce la presenza di una stella nascosta, che non è direttamente visibile a causa della polvere nel disco.

La figura 2.18 mostra 4 dischi protoplanetari recentemente scoperti attorno a giovani stelle nella nebulosa di Orione. Dischi di gas e di polvere sono sospettati di essere uno stadio primitivo della formazione di pianeti. Essi possono essere osservati direttamente nella luce visibile con HST. Tali dischi circondanti giovani stelle sono composti da 99% di gas e 1% di polvere. Anche questa piccola quantità di polvere basta per rendere il disco opaco e scuro in lunghezze d'onda visibile. La luce rossa al centro di ogni disco è una giovane stella "appena" formata, con un'età di circa 1 milione di anni (4500 volte meno del Sole).

⁴http://cfa-www.harvard.edu/COMPLETE/learn/protoplanetary_disk/protoplanetary_disk.html

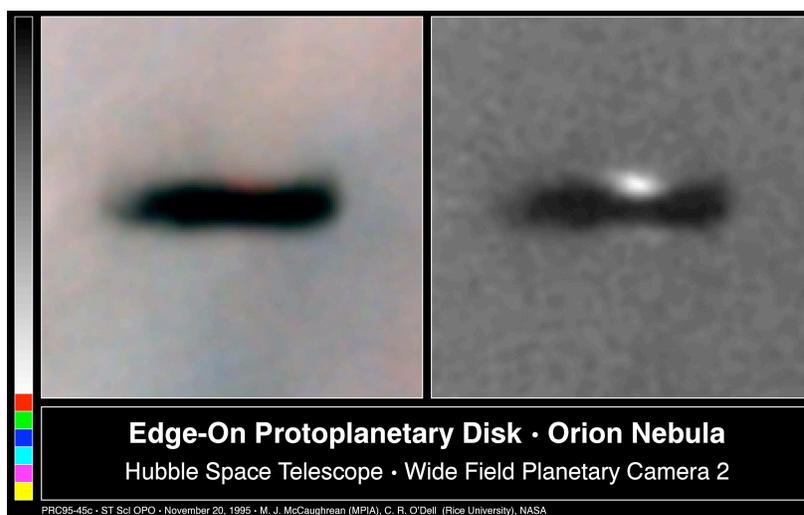


FIGURA 2.17— Disco protoplanetario visto di profilo nella nebulosa di Orione. Questo “frisbee” interstellare è un disco di polvere visto di profilo attorno ad una stella appena nata nella nebulosa di Orione. L’immagine a sinistra è composta di 3 colori: blu, verde e rosso che registrano l’emissione luminosa del gas nella nebulosa. L’immagine a destra è stata presa attraverso un filtro diverso, che blocca tutta la luce proveniente dalle righe di emissione spettrale della nebulosa, e quindi il disco è meno visibile in confronto al sottofondo e la stella centrale appare più distintamente. Credito: Mark McCaughrean (Max-Planck-Institute for Astronomy), C. Robert O’Dell (Rice University), NASA.

Mark McCaughrean del Max-Planck-Institute for Astronomy, (Heidelberg, Germania), e il suo collaboratore C. Robert O’Dell della Rice University, (Houston, Texas), hanno individuato questi nuovi dischi in un sondaggio a larga scala (“large-scale survey”) della nebulosa di Orione tra Gennaio 1994 e Marzo 1995 con HST. Ogni immagine è larga 257 miliardi di km (30 volte il diametro del nostro sistema solare). I dischi variano in dimensione da 2 a 8 volte il diametro del nostro sistema solare. Le diverse forme (circolare o ellittiche) dipendono dall’inclinazione del disco rispetto alla nostra linea di vista: ogni disco è inclinato rispetto alla Terra con un angolo diverso.

Nel sottofondo, il gas caldo della nebulosa emette intensa luce dal suo contenuto in ossigeno ionizzato (blu sull’immagine), idrogeno (verde) e azoto (rosso). Questo gas luminoso permette di vedere in “silhouette” i dischi protoplanetari scuri. In ogni caso, si vede anche chiaramente la stella centrale.

2.2.8 Fase 4-c: La formazione dei pianeti e del nostro sistema solare

Questa parte del corso è tratta da:

- http://en.wikipedia.org/wiki/Planet_formation
- http://stardate.org/resources/ssguide/planet_form.html
- <http://cfa-www.harvard.edu/COMPLETE/learn/planets/planets.html>

Pianetasimali

Alla fine (o quasi alla fine) del processo di formazione stellare, i pianeti possono formarsi a partire dal materiale che rimane nel disco circumstellare.

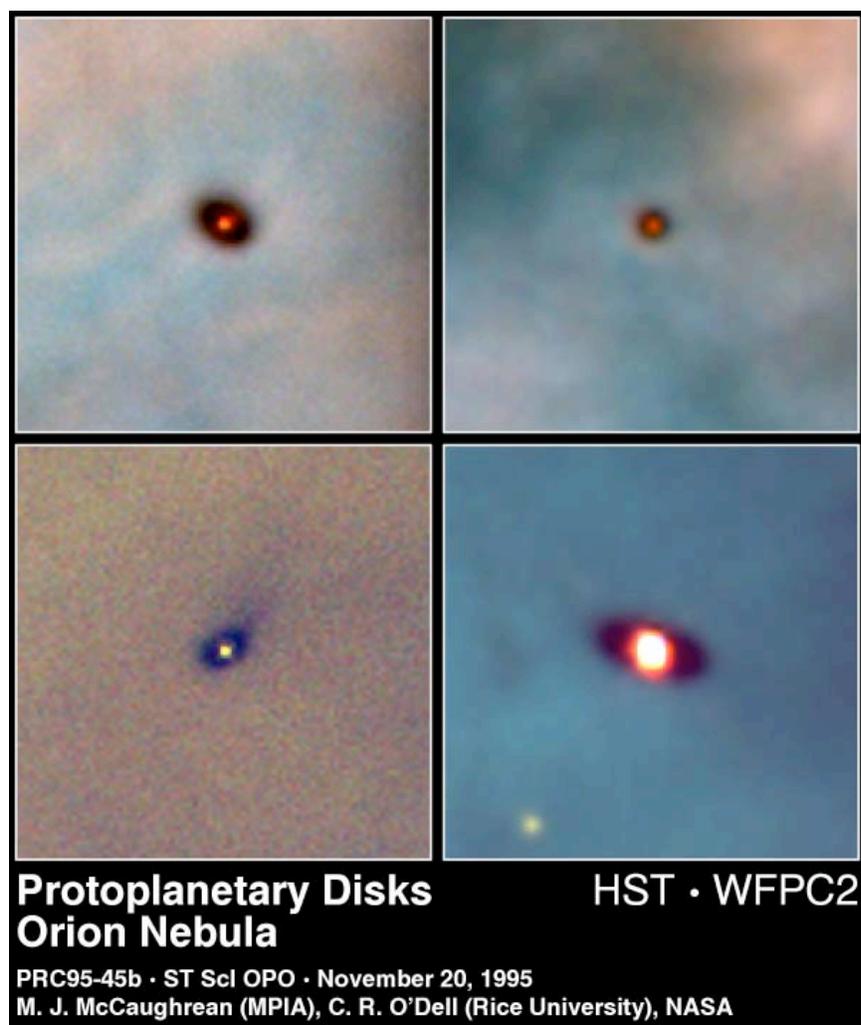


FIGURA 2.18— Sistemi planetarie in formazione.

La componente solida del disco è inizialmente formata di **microscopici chicchi** che si trovavano nella nube primordiale: tale chicchi nel mezzo interstellare misurano tipicamente meno di un micron di diametro, ma grazie alle multiple collisioni nel disco protoplanetario, si attaccano a vicenda e crescono di dimensione per diventare "planetesimali"⁵. Una volta che i planetesimali sono diventati sufficientemente massicci, la loro gravità aiuta ad attirare ancora più chicchi. Si pensa che per formare una gigante gassosa, sia necessario formare planetesimali di circa 1 km entro 10'000 anni. Poiché i planetesimali sono così numerosi e diffusi nel disco protoplanetario, molti di loro sopravvivono alla formazione di un sistema planetario.

Gli astronomi pensano che gli **asteroidi** sono dei planetesimali "avanzati" (left-over planetesimals), che vanno gradualmente polverizzandosi a vicenda in pezzi sempre più piccoli (un po' come la sabbia sulla spiaggia), mentre le **comete** sono planetesimali delle parti più esterne del sistema planetario. **Meteoriti** sono dei campioni di planetesimali

⁵letteralmente, significa pianeta infinitamente piccola.



Flared Proto-Planetary Disc
(Artist's Impression)

ESO Press Photo 36/06 (28 September 2006)



FIGURA 2.19— Disegno di un disco protoplanetario svasato, simile a quello ch'è stato dedotto dalle osservazione infrarosse compiute con lo strumento VISIR sul VLT di ESO attorno alla stella HD 97048. Essa ha solo $\sim 2 \cdot 10^6$ di anni e si trova nella nube scura Camaleonte I, un asilo nido di stelle a 600 anni-luce dalla Terra. Questa stella è 40 volte più luminosa del nostro Sole e 2.5 volte più massiccia. Astronomi hanno scoperto un disco molto grande, al meno 12 volte più esteso dell'orbita del pianeta più distante del sistema solare, Nettuno. Le osservazione suggeriscono che il disco sia svasato e contenga una grande quantità di gas, almeno 10 volte la massa di Giove e più di 50 volte la massa della Terra in polvere. Credito: Pierre-Olivier Lagage e ESO.

che raggiungono una superficie planetaria, e forniscono un sacco d'informazione sulla formazione del nostro sistema solare. Solo i più grossi pianetasimali sopravvivono e continuano a crescere.

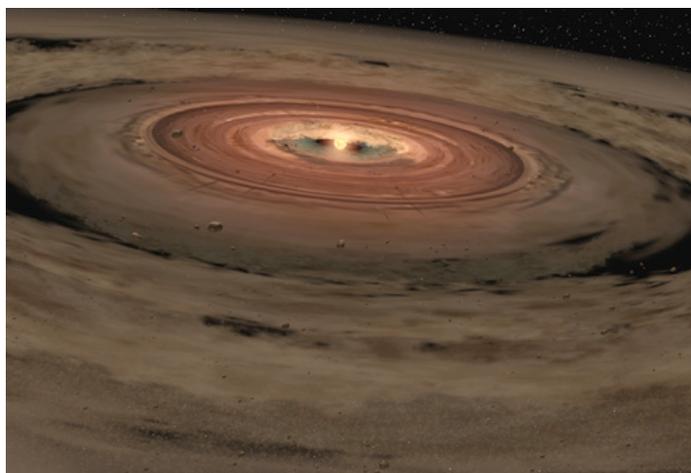


FIGURA 2.20— Un disco di polvere, che diventerà un giorno un sistema planetario, circonda la nana marrone OTS44 in questo disegno. Gli astronomi osservano che questo è il primo disco di questo tipo attorno ad una stelle di piccola massa. Essa è una nana marrone chiamata OTS44 con una massa di circa 15 volte Giove; è distante 500 anni-luce nella costellazione australe del Camaleonte. Astronomi speculano che il disco di questa stella possiede abbastanza materiale per formare un pianeta gigante e gassoso e un paio di pianeti di dimensione simile a quelle terrestri. Credito: NASA/JPL-Caltech

Crescita oligarca

Mentre i pianetasimali crescono, il loro numero diminuisce e le collisioni sono meno frequenti. A causa della natura casuale della crescita, non tutti pianetasimali crescono alla stessa velocità e alcuni diventano più massicci di altri.

Quando i pianetasimali orbitano attorno alla nuova stella, interazioni mutuali mantengono la quantità di moto (massa \times velocità) uniformemente distribuita: i corpi di grande massa hanno piccole velocità, orbitando in moto quasi-circolare, mentre i pianetasimali più piccoli si muovono molto più rapidamente, su orbite più eccentriche. I

corpi lenti hanno una probabilità maggiore di colpire e catturare un altro corpo, mentre corpi piccoli e veloci crescono appena. Ciò porta ad un processo che sfugge ad ogni controllo in cui i corpi più grossi cominciano a dominare significativamente, crescendo molto più in fretta degli altri. Questi corpi massicci dominano completamente la componente solida del disco e vengono chiamati "oligarchi", cioè i pochi che governano. La dimensione di questi pochi pianetasimali varia da decine di km, fino a varie centinaia e alla fine migliaia di km in diametro.

Il nostro sistema solare

Questo paragrafo è tratto da: http://stardate.org/resources/ssguide/planet_form.html.

Appena la concentrazione centrale di gas idrogeno è diventata densa e calda abbastanza, sono iniziate le reazioni di fusione nucleare e una nuova stella, il Sole, è nata. All'inizio è ancora circondata dalla sua nebulosa, che prende la forma di un disco in lenta rotazione. Atomi e molecole nella nebulosa si aggregano per formare particelle più grosse, come spiegato nei paragrafi precedenti. Le caratteristiche fisiche del Sole (massa, luminosità, gravità) determinano quale tipo di particelle possono esistere. Vicino al Sole, il calore solare vaporizza il ghiaccio e impedisce agli elementi leggeri, come l'idrogeno e l'elio, di condensarsi.

Pianeti interni

Questa zona è dominata da roccia e metalli, che si ammassano uno con l'altro per formare corpi più grandi, i "pianetasimali" visti precedentemente. Essi alla fine porteranno alla formazione dei pianeti rocciosi interni: Mercurio, Venere, La Terra, Marte.

Pianeti esterni

Nelle parte esterne del sistema solare, era freddo abbastanza per mantenere l'integrità del ghiaccio. Anche qui si sono ammassati in pianetasimali, che diventeranno il cuore dei pianeti giganti: Giove, Saturno, Uranio, Nettuno⁶. Una grande quantità di idrogeno e di elio rimarrà in queste regioni lontane dal Sole. Durante la crescita dei pianeti giganti, le loro forze gravitazionali hanno spazzato la maggior parte dei resti, e quindi hanno aggiunto alla crescita. Giove e Saturno contengono la più grande percentuale d'idrogeno ed'elio, mentre Uranio e Nettuno contengono maggior frazioni di acqua, ammoniaca, metano, e monossido di carbonio.

I satelliti (come la Luna) si sono probabilmente formati anche loro allo stesso tempo dei pianeti. Una ipotesi per la formazione della Luna prevede che un corpo massiccio come diverse volte la massa di Marte sia entrato in collisione con la Terra e le abbia strappato un pezzo di roccia, mandandolo in orbita attorno alla Terra. Questo materiale si sarebbe raffreddato e amalgamato per formare la Luna.

MA...

Questi modelli di formazione planetari, che riproducono con successo il nostro sistema solare, si sono trovati in grossi difficoltà con la scoperta dei pianeti extra-solari, cioè attorno ad un'altra stella che il Sole. In particolare, il primo pianeta trovato ha una

⁶Plutone non è più considerato come un "pianeta" secondo la nuova definizione dell'unione astronomica internazionale (IAU), vedi <http://www.iau.org/iau0603.414.0.html>.

massa circa la metà della massa di Giove, ma si trova, rispetto al nostro sistema solare, all'interno dell'orbita di Mercurio! (vedi figura 2.21 per le caratteristiche di questo pianeta). Ironicamente, il primo caso confermato di pianeta attorno ad una stella simile al Sole, non era spiegabile con i nostri modelli di formazione planetari.

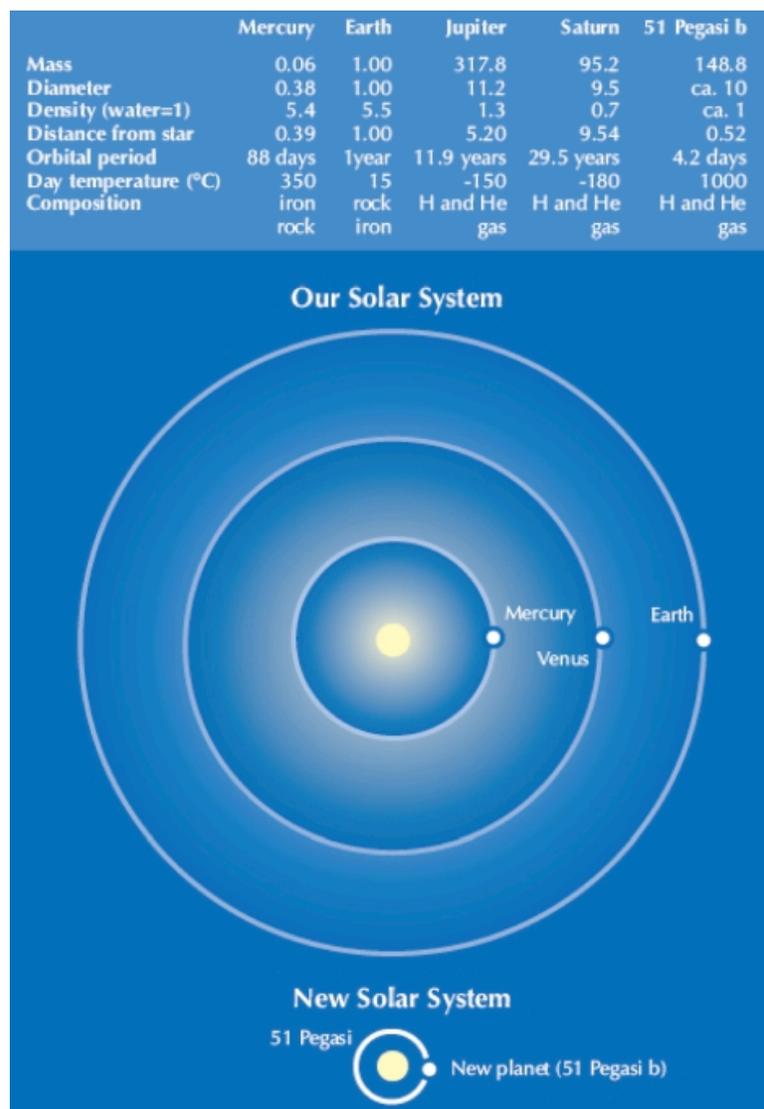


FIGURA 2.21— Caratteristiche di 51 Pegasi b, il primo pianeta extra-solare, al confronto con Mercurio, la Terra, Giove e Saturno. Credito: Uffe Grae Jorgensen, Science in School, Issue 2 (Summer 2006).

“51 Pegasi b” è il nome del primo pianeta extra-solare. Due astronomi svizzeri, M. Mayor & D. Queloz dell’osservatorio di Ginevra, sono all’origine della scoperta. Per spiegare, come un pianeta gigante può trovarsi così vicino alla sua stella, si pensa ad una formazione nelle parti esterne, seguita da una **migrazione** verso le parte interne.

A conclusione di questa parte dedicata alla formazione dei pianeti, la figura 2.22 presenta i due scenari più probabili per la formazione di pianeti: collasso o aggregazione. Ripareremo di dischi protoplanetari nel capitolo 5.

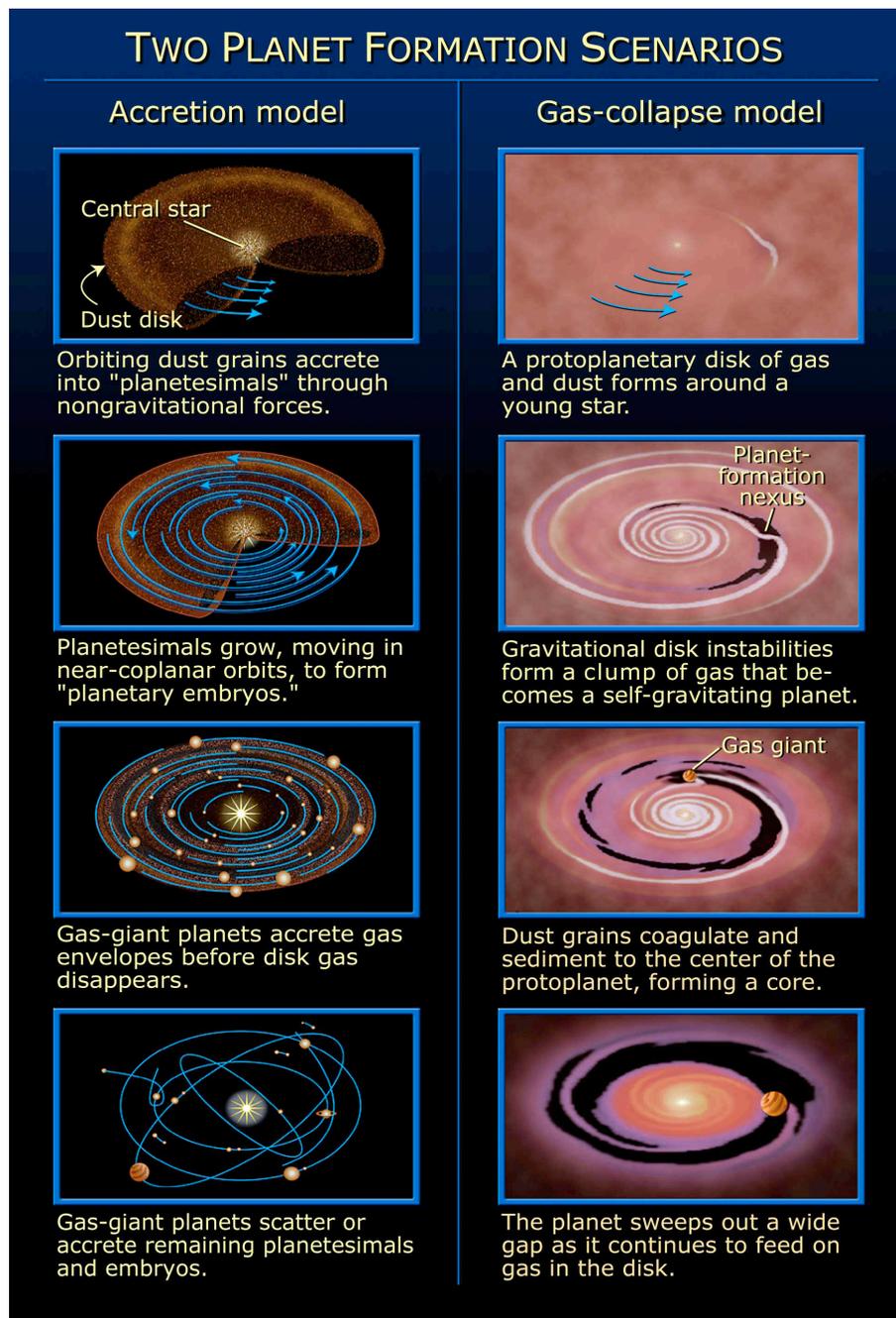


FIGURA 2.22— Due scenari più probabili per la formazione di pianeti: aggregazione o collasso. Credito: NASA/ESA e A. Feild (STScI), immagine: www.spacetelescope.org/images/html/opo0319f.html. Per più informazione, vedi: <http://www.fas.org/irp/imint/docs/rst/Sect20/A11.html>.

2.2.9 Fase 5: Subgiganti, giganti rosse, supergiganti.

Durante tutta la lunga fase della SP, la compressione inflessibile della gravità è equilibrata dalla pressione verso l'esterno dalle reazioni nucleari nel cuore. Quando tutto l'idrogeno nel cuore viene convertito in elio, le reazioni nucleari hanno "esaurito il carburante" e si fermano. Quello che succederà poi all'interno della stella, come per la

maggior parte della fase dell'evoluzione stellare, dipende dalla sua massa. Cominciamo ad esaminare ciò che accade nell'interno di una stella come il Sole, quando lascia la SP e diventa una gigante rossa. In seguito studieremo l'evoluzione delle stelle più massicce⁷.

Evoluzione di una stella di $1 M_{\odot}$ via dalla SP

Lasciare la SP – il ramo delle giganti rosse (RGB)

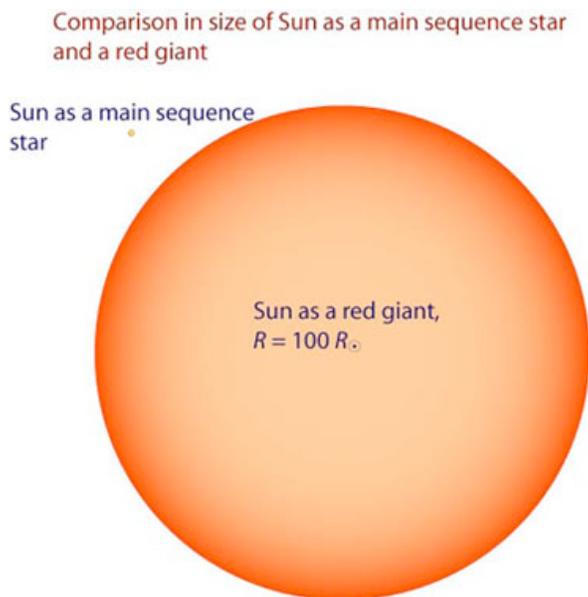


FIGURA 2.23— Quando il Sole diventerà una gigante rossa, il suo raggio sarà circa 0.5 unità astronomiche, cioè 100 volte il valore attuale. A questo punto, Mercurio e Venere saranno ingoiate dal Sole (e forse anche la Terra). Anche nel caso contrario, le condizioni sulla Terra diventerebbero impossibili per l'esistenza della vita: Gli oceani e l'atmosfera evaporerebbero. Questa scadenza è certamente un limite insuperabile per la vita, ma succederà solo in 5–6 miliardi di anni. Credito: <http://outreach.atnf.csiro.au/education/>

Stelle come il nostro Sole lasciano la SP e si muovono verso l'alto, in una parte del diagramma HR chiamata "ramo delle giganti rosse" (o **RGB** acronimo inglese di *Red Giant Branch*) dove queste stelle di piccola massa (sotto 2.5 masse solari) bruciano l'idrogeno nell'involucro esterno al nucleo centrale (*shell burning*). Le stelle che si trovano in questa regione sono dette **giganti rosse**. Un breve flash (*helium flash*) vede l'inizio della fusione dell'elio nel cuore e la stella si sposta verso il "ramo orizzontale" (*Horizontal Branch*, **HB**). Una volta che la temperatura dell'involucro del nucleo raggiunge sufficiente temperatura, l'elio comincia a bruciare (*helium shell burning*) e la stella si sposta verso il "ramo asintotico delle giganti" (*Asymptotic Giant Branch*, **AGB**).

Una stella rimane sulla SP finché c'è idrogeno nel cuore che può fondersi in elio. Abbiamo presupposto finora che una stella sulla SP manteneva una produzione d'energia costante. Infatti, quando una stella della SP invecchia la sua luminosità aumenta leggermente, e le parti esterne si espandono e si raffreddano. Questo spiega perché la SP è una banda larga piuttosto che una linea sottile – le stelle si muovono verso l'alto e verso destra quando invecchiano.

Alla fine, il carburante idrogeno si esaurisce e la fusione nucleare si ferma, spegnendo la pressione di radiazione verso l'esterno. Le forze gravitazionali verso l'interno pro-

⁷Il testo di questa fase 5 è tratto da: http://outreach.atnf.csiro.au/education/senior/astrophysics/stellarevolution_postmain.html#postmainevotrack

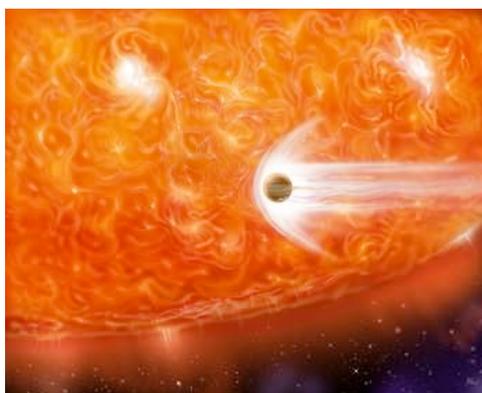


FIGURA 2.24— Un disegno di una supergigante rossa che ingoia un pianeta della dimensione di Giove quando si espande. Credito: NASA.

vocano la contrazione del cuore di elio, convertendo l'energia potenziale gravitazionale in energia termica.

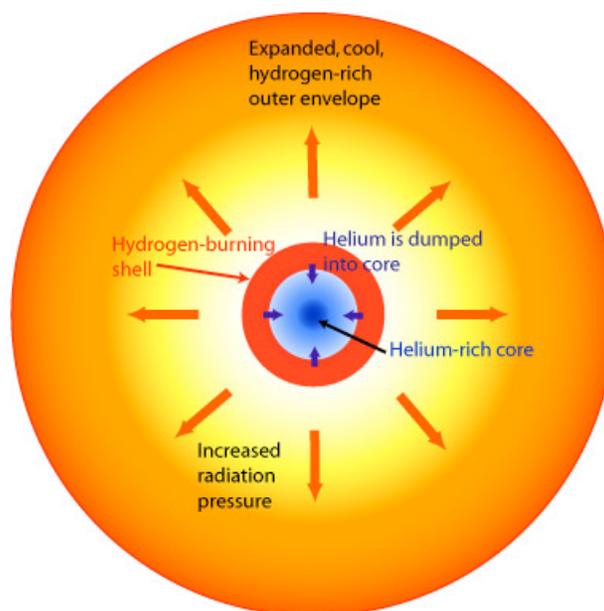


FIGURA 2.25— Combustione dell'idrogeno nell'involucro esterno al nucleo centrale (*Hydrogen shell burning*) nella fase RGB. Credito: <http://outreach.atnf.csiro.au/education/senior/astrophysics/>

Malgrado la fusione non accade più nel cuore, l'aumento di temperatura riscalda l'involucro d'idrogeno che circonda il nucleo centrale fino al punto di fusione (figura 2.25). Così facendo, la stella produce più energia che quando era sulla SP.

Questa combustione dell'involucro (*shell burning*) ha effetti interessanti: La nuova pressione di radiazione, maggiore che nella fase precedente, causa l'espansione degli strati esterni. Durante questa espansione, la stella si raffredda e si muove in alto a destra nel diagramma HR, lungo il ramo RGB. La luminosità della stella aumenta circa di un fattore 1000. La parte esterna dell'involucro stellare è molto diffusa e ha una densità

più bassa di un eccellente vuoto di laboratorio sulla Terra. È solo debolmente legata gravitazionalmente al resto della stella ed è facilmente espulsa. La perdita di massa delle giganti è tipicamente $10^{-7} M_{\odot}$ all'anno (quando invece è di $10^{-17} M_{\odot}$ all'anno per il Sole adesso).

Mentre il resto della gigante è poco denso e freddo, il cuore compresso di elio è incredibilmente denso. Gli elettroni nel cuore formano un gas "degenerare": essi sono compressi strettamente l'uno all'altro. In questa fase non si comportano più come un gas normale.

Fusione di elio e Flash di elio

La fusione dell'idrogeno nell'involucro produce elio che viene depositato sul cuore, aggiungendo massa e provocando un ulteriore aumento di temperatura. Quando essa raggiunge $100 \cdot 10^6$ K, i nuclei d'elio hanno abbastanza energia cinetica per superare la forte repulsione elettrostatica (a livelli bassi di temperatura e di densità, 2 nuclei di elio si respingono, perché hanno entrambi cariche positive) e creano atomi di ^{12}C . Dato che 3 nuclei di elio (particelle α) sono stati utilizzati, questo processo viene chiamato "triple alpha process" (figura 2.26). Un'ulteriore fusione con un altro nucleo di elio produce un nucleo di ^{16}O . Questo processo è la sorgente principale di carbonio e di ossigeno dell'universo.

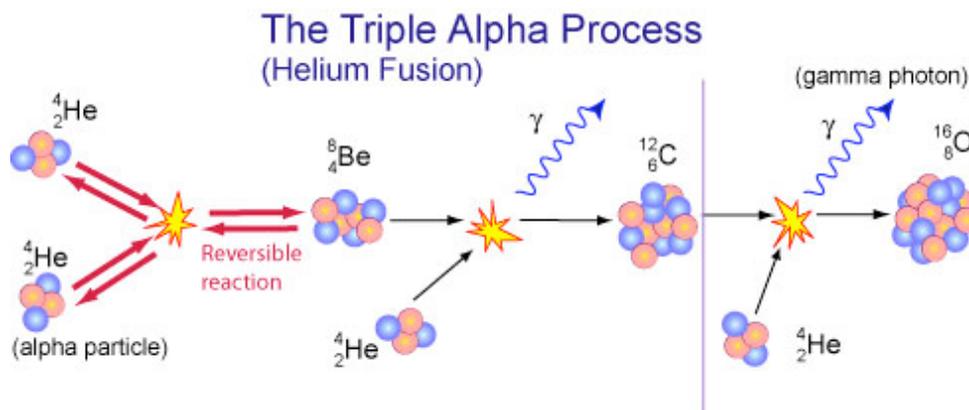


FIGURA 2.26— Il triplo processo α per la stelle post-SP. Due nuclei di elio (particelle α) si fondono per formare un nucleo di Berilio-8. Questa reazione è instabile e decade normalmente in due nuclei d'elio in una frazione di secondo, ma dato il numero elevato di nuclei d'elio nel cuore, a volte un nucleo di ^8Be entra in collisione con uno di esso prima del decadimento. Questo produce un nucleo di ^{12}C e un fotone. Il nucleo di ^{12}C può anche al fondersi con un altro ^4He per formare un nucleo di ^{16}O . ^{20}Ne può anche essere creato dalla fusione di un nucleo d'ossigeno con l'elio, ma solo in quantità trascurabili.

Nelle stelle di meno di $2-3 M_{\odot}$, una volta che la temperatura è diventata abbastanza calda per la fusione dell'elio in una parte del nucleo, la reazione si diffonde velocemente, nel giro di minuti o di ore. Questo brusco inizio della fusione dell'elio viene chiamato "helium flash".

Il ramo orizzontale (HB)

L'energia rilasciata dall' "helium flash" aumenta la temperatura del nucleo fino al punto in cui non è più degenere. Da questo punto esso comincia di nuovo a comportarsi come un gas normale: si espande e si raffredda. Un trasferimento d'energia ha come risultato strati esterni più caldi ma una dimensione globale più piccola. L'aumento di temperatura effettiva (figura 2.27) e la diminuzione della dimensione sono tali da lasciare la luminosità approssimativamente invariata. Sul diagramma HR, una tale stella si sposta orizzontalmente sulla sinistra lungo il *ramo orizzontale*. Tali stelle possiedono un nucleo d'elio in fusione (*helium core-burning*) e un involucro d'idrogeno in fusione (*hydrogen shell-burning*). Una stella di $1 M_{\odot}$ ha sufficiente elio da bruciare nel cuore per circa 100 milioni di anni.

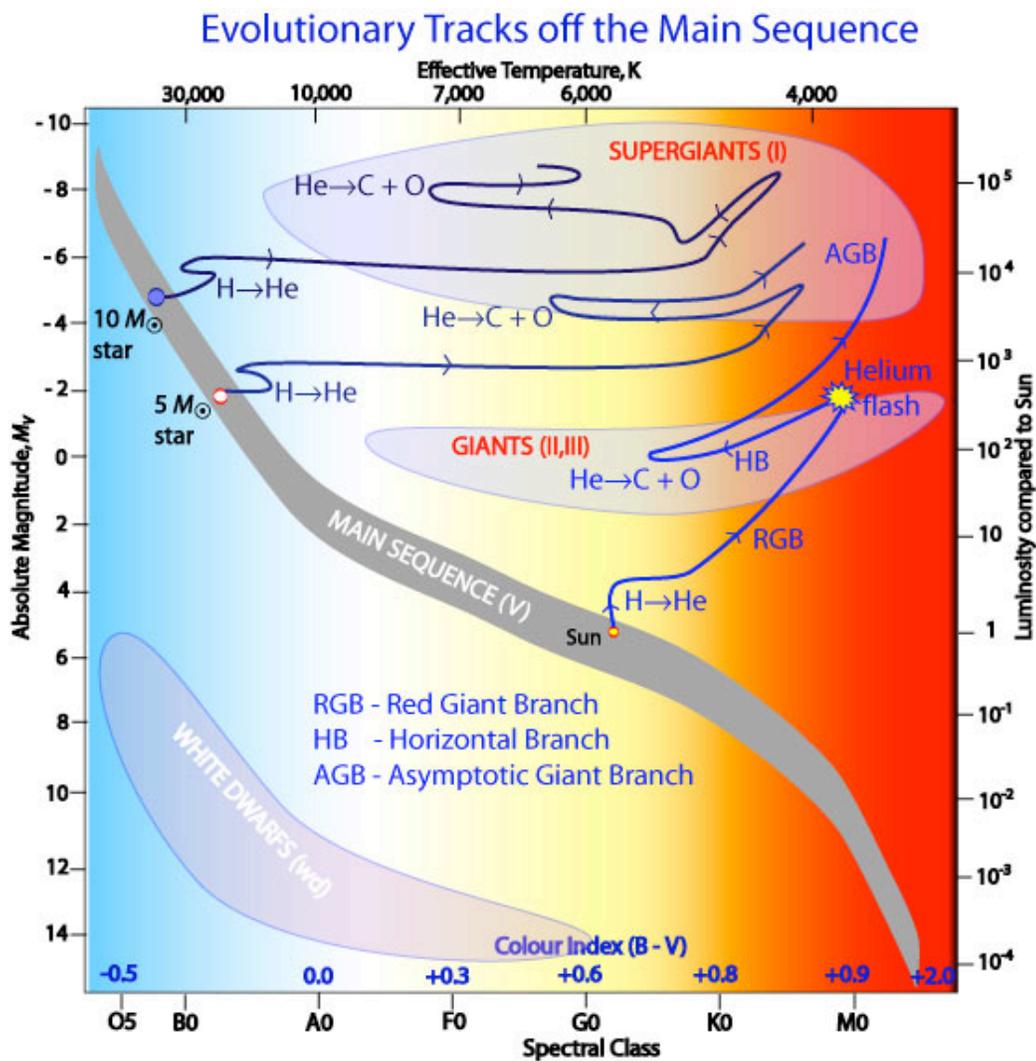


FIGURA 2.27— Percorsi evolutivi per stelle di massa 1, 5 e $10 M_{\odot}$ dopo la SP.

Il ramo asintotico delle giganti (AGB)

Alla fine quando tutto l'elio nel cuore si è fuso in carbonio e ossigeno il cuore si comprime di nuovo. I nuclei di carbonio e di ossigeno hanno più protoni dell'elio, quindi la loro repulsione elettrica è maggiore. La temperatura necessaria per fonderli deve essere maggiore dei $100 \cdot 10^6$ K della fusione d'elio. In stelle di $8 M_{\odot}$ o meno, non c'è abbastanza energia gravitazionale per raggiungere queste temperature. La fusione nel cuore non può più accadere. La contrazione del cuore genera tuttavia abbastanza calore per iniziare la fusione dell'elio nell'involucro (*helium shell burning*). L'energia dalla fusione dell'elio a sua volta riscalda l'idrogeno non utilizzato che comincia anche una fusione nell'involucro.

La stella gigante si espande, possibilmente fino a 1.5 AU, l'equivalente dell'orbita di Marte. Si trova adesso sul ramo AGB del diagramma HR. Una stella di $1 M_{\odot}$ nella fase AGB può avere una luminosità 10'000 volte maggiore del Sole. "Mira" è un esempio di stella AGB.

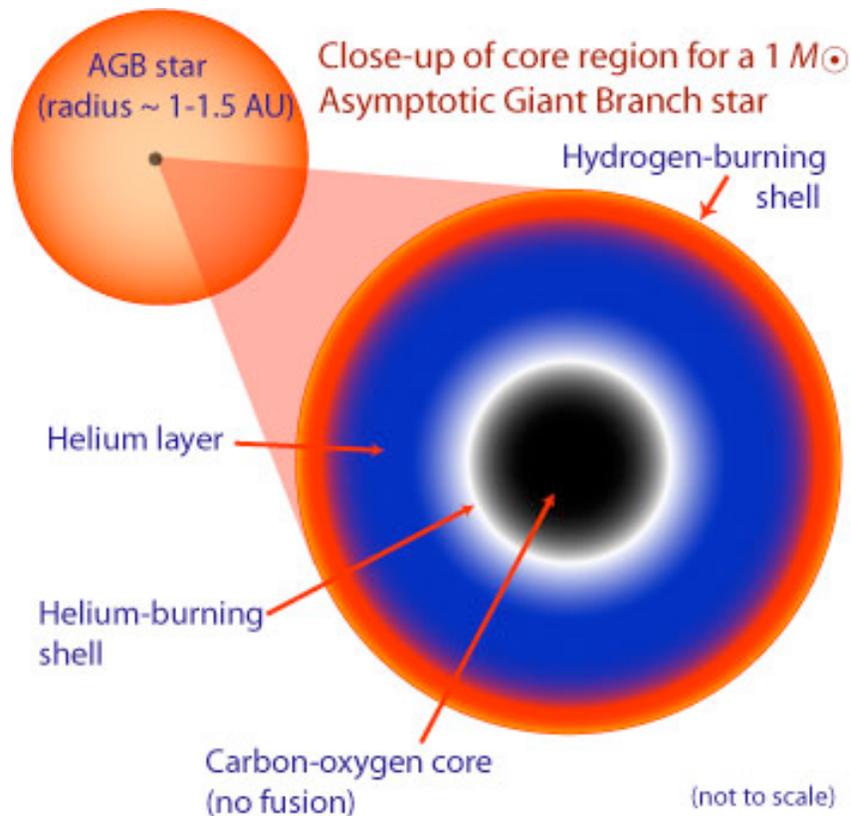


FIGURA 2.28— Ingrandimento della regione centrale di una stella di $1 M_{\odot}$ nella fase AGB.

Durante la fase AGB, nuclei più pesanti possono essere creati attraverso la cattura di neutroni e il decadimento beta. Questo processo (chiamata "*s-process*", *slow process*, rispetto a processi rapidi in stelle più massicce, "*r-process*") crea degli elementi fino al bismuto con 83 protoni.

Grandi correnti di convezione in stelle AGB portano il materiale prodotto nel sottile involucro in cui brucia l'elio verso la superficie. Questi elementi pesanti, una volta in superficie, possono essere osservati negli spettri stellari. Come per le stelle RGB, la pressione di radiazione tende a soffiare via una buona parte dei strati esterni. Il tasso di perdita di massa può raggiungere $10^{-4} M_{\odot}$ all'anno.

Tuttavia, la maggior parte della massa dispersa verrà persa nelle fasi finali (nebulosa planetaria o supernova) descritti nei paragrafi successivi. Durante la sua vita, la stella perde continuamente massa: sia trasformata in energia, sia attraverso il vento stellare. Questo significa che anche se una gigante rossa è grande di diametro, è meno pesante della stella della SP da cui proviene.

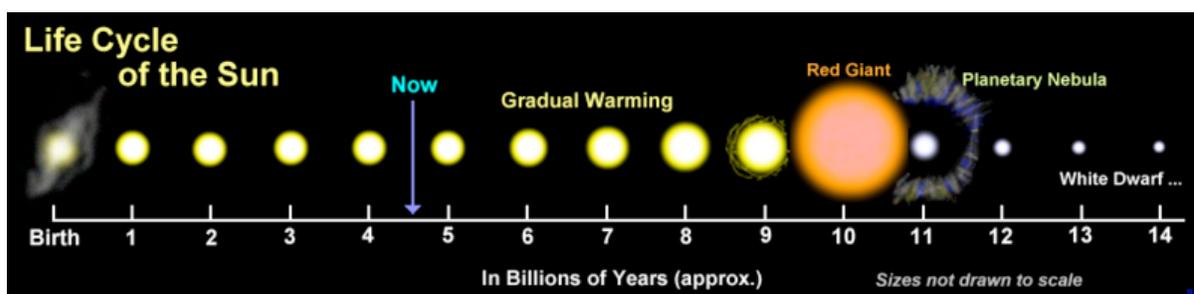


FIGURA 2.29— Ciclo di vita del Sole. Credito: wikipedia.

La morte della Terra e del Sole

Che cosa accadrà alla Terra con l'evoluzione della nostra stella, il Sole? In qualche miliardo di anni, la Terra conoscerà la sua ultima giornata "perfetta" (figura 2.30). Poi, dopo qualche milione di anni, il Sole crescerà, la Terra si riscalderà, numerose specie viventi spariranno e il livello del mare si abbasserà (figura 2.31).



FIGURA 2.30— Ultima giornata perfetta della Terra.



FIGURA 2.31— Abbassamento del livello del mare e riscaldamento del pianeta.

Gli oceani evaporeranno rapidamente e l'atmosfera scomparirà nello spazio (figura 2.32). Mentre il Sole si trasformerà in una gigante rossa, la Terra, senza aria, si dis-

secherà e si denuderà (figura 2.33). Il Sole riempirà la quasi totalità del cielo e, magari, ingoierà la Terra. (Credito per i dipinti: A. Schaller, tratto dal libro "Cosmos" di Carl Sagan).



FIGURA 2.32— Evaporazione degli oceani e scomparsa dell'atmosfera nello spazio.



FIGURA 2.33— Quando il Sole diventerà una gigante rossa, riempirà quasi tutto il cielo.

Evoluzione post-SP di stelle massicce

Le stelle massicce sono rare e hanno una vita molto corta rispetto a stelle di piccola massa. La dimensione delle supergiganti è enorme. Betelgeuse, tra 13 e $17 M_{\odot}$ di massa, è così grande che si estenderebbe oltre l'orbita di Giove se fosse al posto del Sole. La sua dimensione angolare è così imponente che può essere osservata direttamente con HST (figura 2.34).

Le stelle massicce consumano il loro cuore d'idrogeno ad una velocità prodigiosa, quindi possono sopravvivere solo milioni di anni (invece di miliardi). Una volta usato questo carburante, il loro cuore si comprime e si riscalda. Inizia la combustione dell'elio nel cuore. Al contrario delle stelle leggere, la fusione dell'elio (triple alpha process) comincia gradualmente, piuttosto che come un flash. Lasciando la SP, la temperatura superficiale diminuisce quando la stella si espande. La diminuzione in temperatura è compensata dall'aumento in raggio, così la luminosità globale rimane essenzialmente costante (vedere la figura 2.27 per i percorsi evolutivi nel diagramma HR). L'energia liberata dalla fusione dell'elio nel cuore aumenta la temperatura dell'involucro circostante di idrogeno, e così esso comincia anche un processo di fusione.

Nelle stelle di $5 M_{\odot}$ (o di più), la massa è sufficiente per produrre temperature di $3 \cdot 10^8$ K, dove la fusione del carbonio con l'elio (per formare dell'ossigeno) domina. Una stella di $8 M_{\odot}$ può continuare a produrre elementi anche più pesanti nel cuore. Una volta che tutto l'elio è esaurito, una contrazione gravitazionale genera una temperatura di $5 \cdot 10^8$ K, dove i nuclei di carbonio si fondono per formare sodio, neon e magnesio. Una volta che tutto il carbonio è esaurito, un ulteriore collasso spinge la temperatura fino a 10^9 K. A questa temperatura, le reazioni che producono fotoni energetici (raggi γ), come $^{16}\text{O} + ^4\text{He} \rightarrow ^{20}\text{Ne} + \gamma$, sono rovesciate da un processo chiamato

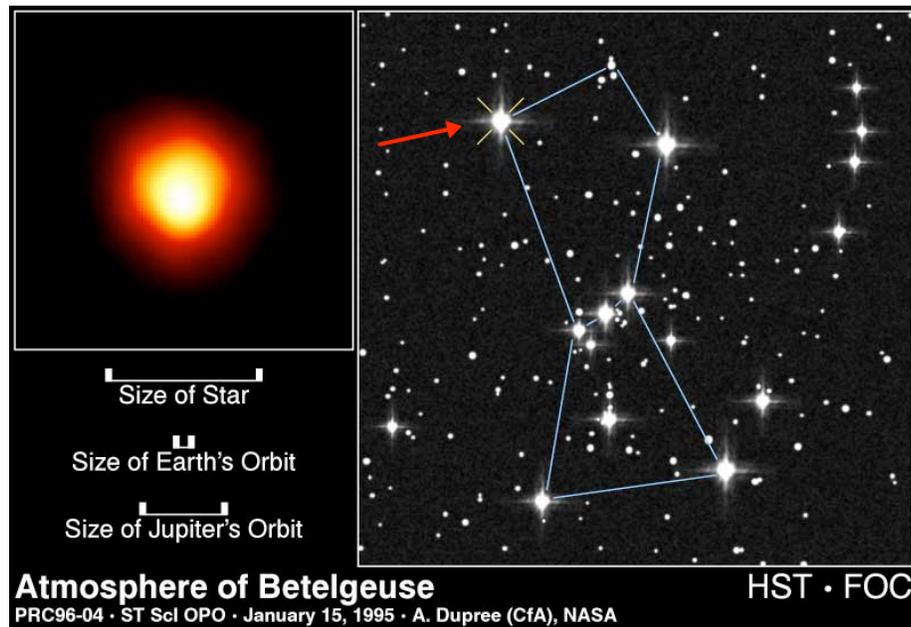


FIGURA 2.34— Questa è una immagine diretta di Alpha Orionis, o Betelgeuse, un supergigante rossa alla fine della sua vita nella costellazione di Orione presa con il telescopio spaziale Hubble. Se fosse al posto del nostro Sole, tutti pianeti fino a Giove sarebbero nel suo interno. Credito: Andrea Dupree (Harvard-Smithsonian CfA), Ronald Gilliland (STScI), NASA e ESA.

foto-disintegrazione. Nuclei di elio prodotti da questo processo possono fondersi con dei nuclei di neon per produrre magnesio.

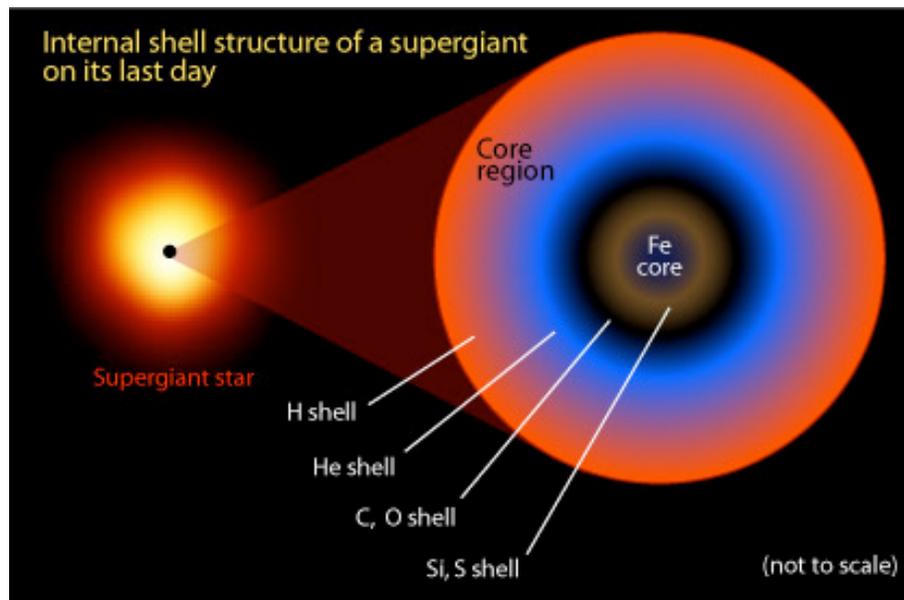


FIGURA 2.35— La struttura "a cipolla" dell'interno di una supergigante nelle fasi finali della sua vita. Al centro si trova un denso cuore di ferro.

Quando il neon è finito, la contrazione del cuore aumenta la temperatura fino a

$2 \cdot 10^9$ K, in cui due nuclei di ossigeno fusionano per formare un nucleo di Silicio. La foto-disintegrazione forma magnesio ed elio che si fondono insieme ad altri nucleo di Silicio per produrre Zolfo. Simili fasi di reazioni vedono zolfo produrre argon, ed argon sintetizzare Calcio. Alla fine elementi come cromo, manganese, ferro, cobalto e nickel possono essere prodotti. Nell'ultima fase, il silicio viene convertito in Ferro ad una temperatura di $7 \cdot 10^9$ K. La regione del cuore di una supergigante assomiglia ad una cipolla, con al centro un denso cuore di ferro, circondato da strati di silicio, zolfo, ossigeno, carbonio, elio ed idrogeno (figura 2.35)

La nucleosintesi degli elementi sopra l'elio è meno efficiente, quindi ogni reazione successiva produce meno energia per unità di massa di carburante. Ciò significa anche che le reazioni accadono a un ritmo più elevato, per controbilanciare la gravità. Se una stella massiccia spende alcuni milioni di anni sulla SP, la sua fase di combustione dell'elio nel cuore durerà solo un paio di centinaia di migliaia di anni. La fase di combustione del carbonio dura solo alcune centinaia di anni, del neon un anno, dell'ossigeno 6 mesi e del silicio solo un giorno. Le stelle massicce evolvono estremamente rapidamente una volta che hanno lasciato la SP.

L'evoluzione stellare e il diagramma HR

Quest'applet permette di seguire l'evoluzione delle stelle di diverse masse nel diagramma HR in modo interattivo.

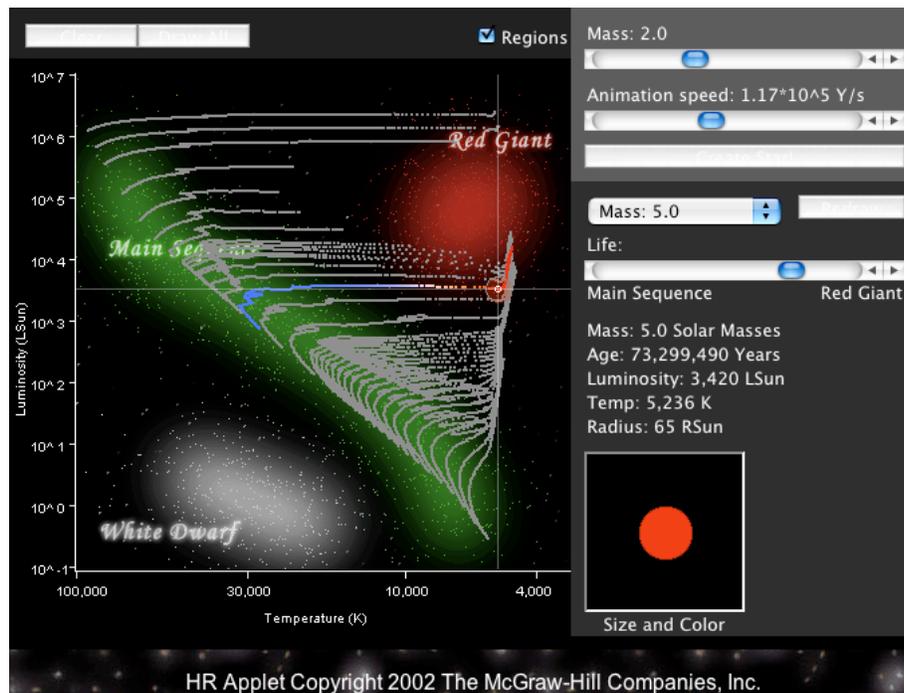


FIGURA 2.36— <http://www.mhhe.com/physsci/astronomy/applets/Hr/frame.html>.

2.2.10 Fase 6: Nebulose planetarie o supernova

In questa penultima fase della vita stellare, gli strati esterni sono espulsi quando il cuore si comprime fino alla sua massima concentrazione. Una grande quantità di massa viene persa in questa fase quando gli strati esterni sono "restituiti" al mezzo interstellare. Per le stelle comuni di piccola massa (0.08 fino a 6 o 7 M_{\odot} durante la loro fase SP), I fotoni che fluiscono fuori dal cuore compresso e caldo spingono i semi di carbonio e silicio ed espellono gli strati esterni della stella: si forma una "nebulosa planetaria". I raggi ultravioletti del cuore esposto (chiamato nana bianca) provoca la fluorescenza del gas. Le emissioni più notevoli sono la rossa dell'idrogeno e dell'azoto ionizzato, la verde dell'ossigeno doppio-ionizzato, e la blu dell'elio ionizzato (figure 2.37 e 2.38).

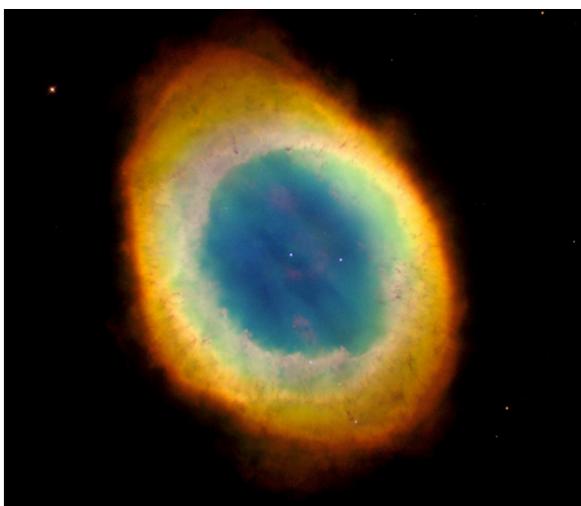


FIGURA 2.37— La più famosa delle nebulose planetarie: La nebulosa dell'anello "Ring Nebula". Essa misura circa un anno-luce in diametro e si trova a 2000 anni-luce della Terra nella costellazione della Lira. Credito: NASA e The Hubble Heritage Team (STScI/AURA).



FIGURA 2.38— Nebulosa planetaria dell'elica "Helix Nebula" (NGC 6720). Credito: NASA, NOAO, ESA, the Hubble Helix Nebula Team, M. Meixner (STScI), and T.A. Rector (NRAO).

Le nebulose planetarie devono il loro nome al fatto che le prime osservazioni (molto imprecise) di questi oggetti le facevano apparire pianeti tondi e verdi. Oggi si sa che non hanno niente a vedere con i pianeti. La loro dimensione è un anno-luce (o di più), molto di più del sistema solare. All'inizio si pensava che le nebulose planetarie fossero semplicemente sfere in espansione che appaiono come anelli: se uno osserva il bordo di conchiglia in espansione, la linea di vista passa attraverso più materiale che se uno osserva il centro della conchiglia. Le bolle di sapone circolare che fanno i bambini appaiono come anelli per lo stesso motivo. Infatti molte nebulose planetarie appaiono come anelli nel cielo (vedi per esempio le figure 2.37 e 2.38 e i poster nel corridoio).

Indagini più approfondite sulle nebulose planetarie (come le immagine ad alta risoluzione del telescopio spaziale) hanno rivelato che le nebulose planetarie possiedono strutture molto più complesse. Tante hanno delle fuoriuscite bipolari di gas (figure 2.40,

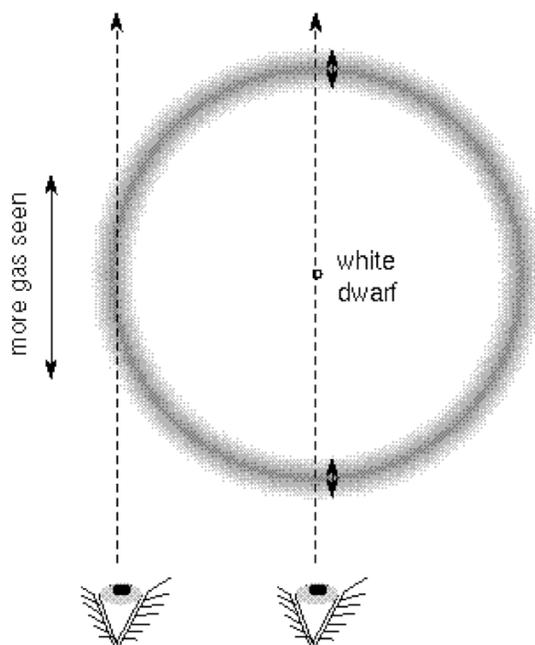


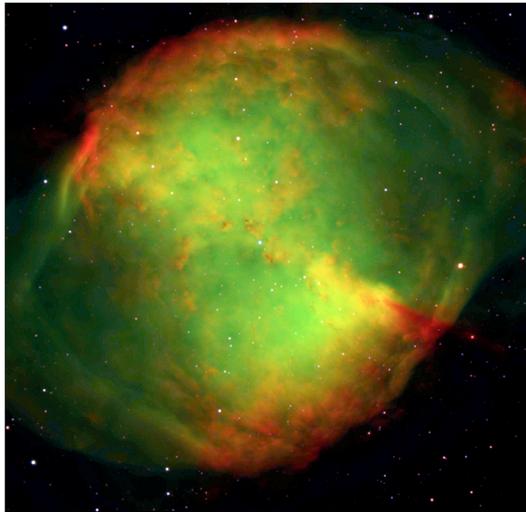
FIGURA 2.39— L'effetto "bolle di sapone" delle conchiglie sferiche di gas. Una quantità maggiore di gas si vede lungo la linea di vista ai bordi della conchiglia, quindi essa appare più trasparente quando uno guarda attraverso il centro.

2.42, 2.43)⁸. L'aspetto diverso di queste nebulose è dovuto all'angolo di inclinazione diverso che hanno rispetto alla Terra.

Immagini dettagliate del telescopio spaziale mostrano strutture complesse nelle nebulose in espansione (figure 2.44 e 2.45). Il gas in espansione della nebulosa planetaria entra in collisione con gas e polvere del vento stellare della gigante rossa. Quando il gas in espansione della nebulosa planetaria passa attraverso il materiale del vento (che si muove più lentamente) il gas trasforma le dense concentrazioni di massa in struttura a forma di cometa. Tuttavia esse non devono essere confuse con le comete: ogni concentrazione di massa è circa 2 volte più grande del nostro sistema solare! (vedi anche i poster nel corridoio).

Le rare stelle molto massicce (tra 8 e 50 volte la massa del Sole durante la loro SP) non vivono gli eventi sopraelencati di nebulose planetarie, ma seguono la strada delle esplosione di supernova. Quando il cuore di ferro di una stella massiccia crolla su se stesso, i protoni e gli elettroni si fondono insieme per formare neutroni e neutrini. All'inizio, il cuore di ferro è grande come la Terra e alla fine della contrazione, la "stella a neutroni" ha le dimensioni di una piccola città. La densità è così alta (centinaia di milioni di tonnellate per ogni centimetro cubo) che la stella di neutroni può essere considerata un nucleo atomico gigante. Gli strati superiori cadono sul cuore e si riscaldano fino a miliardi di gradi. Essi rimbalzano sul cuore super-denso della stella a neutroni, espellendo ad altissima velocità il materiale della stella nello spazio interstellare. Durante il

⁸per vedere molte foto di nebulose planetarie, consultare http://www.lilu2.ch/lilu2dir/materie/scienze_sperimentali/Settimana_approfondimento_astronomia/Black_Holes/BH.html



Planetary Nebula NGC 6853 (M 27) - VLT UT1+FOR51

ESO PR Photo 38a/98 (7 October 1998)

© ESO European Southern Observatory



FIGURA 2.40— La nebulosa Manubrio (anche nota come Nebulosa Campana Muta), "the Dumbbell Nebula". Credito: European Southern Observatory (ESO)

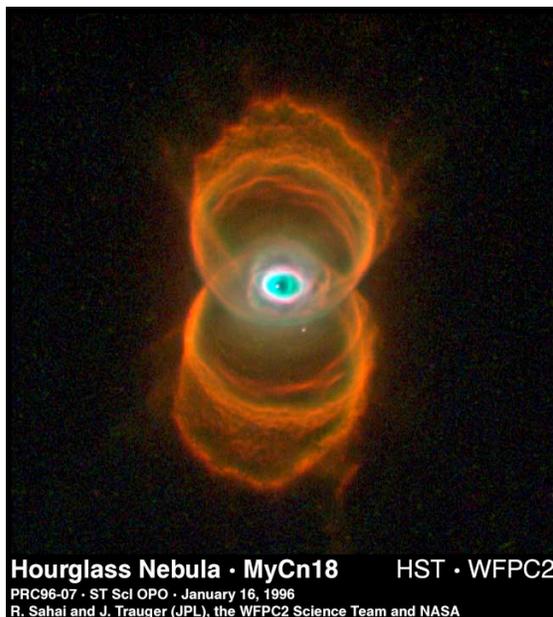


Cat's Eye Nebula • NGC 6543

Hubble Heritage

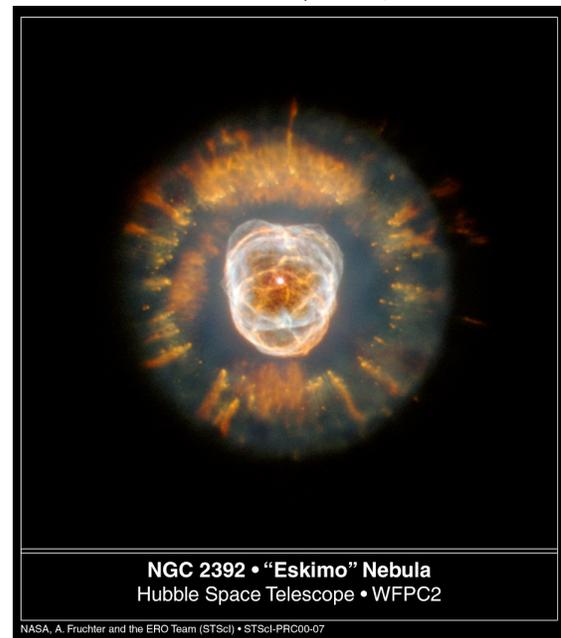
NASA, ESA, HEIC and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)
Hubble Space Telescope ACS • STScI-PRC04-27

FIGURA 2.41— Questa complessa nebulosa è stata formata quando la stella ha espulso i suoi strati in una serie di pulsioni sferiche separati di circa 1500 anni. Credito: NASA, STScI/AURA.



Hourglass Nebula • MyCn18 HST • WFPC2
PRC96-07 • ST ScI OPO • January 16, 1996
R. Sahai and J. Trauger (JPL), the WFPC2 Science Team and NASA

FIGURA 2.42— La nebulosa planetaria "the hourglass nebula", cioè in forma di clessidra, osservata da Hubble. Credito: R. Sahai e J. Trauger (JPL), the WFPC2 science team e NASA.



NGC 2392 • "Eskimo" Nebula
Hubble Space Telescope • WFPC2

NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI) • STScI-PRC00-07

FIGURA 2.43— La nebulosa dell'eskimo (NGC 2392). Credito: NASA, A. Fruchter, S. Baggett (STScI), R. Hook (ST-ECF), Z. Levay (STScI).

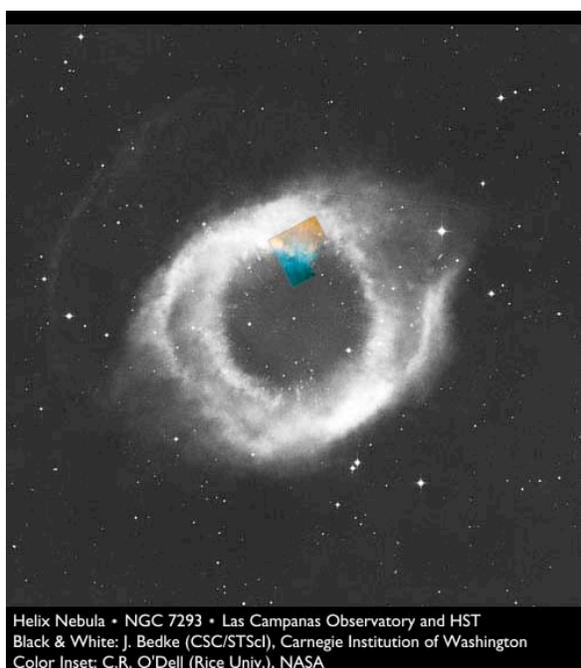


FIGURA 2.44— Nebulosa dell'elica vista dal suolo (Las Campanas Observatory). A colore la zona osservata con il telescopio spaziale HST. Credito: J. Bedke (CSC/STScI), Carnegie Institution.

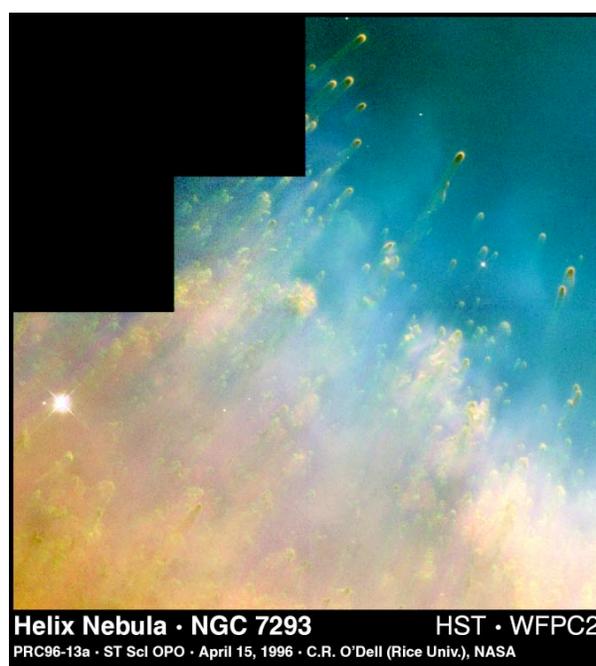


FIGURA 2.45— Immagini HST rivelano strutture complesse quando il gas dell'espulsione finale recupera il materiale emesso da espulsioni e venti precedenti. Credito: C.R. O'Dell (Rice Univ.), NASA.

collasso, nuclei più pesanti del ferro sono prodotti, quando i neutroni liberi si combinano rapidamente con i nuclei massicci: elementi rari come l'oro, il platino e l'uranio sono creati durante i primi 15 minuti dell'esplosione. Il gas surriscaldato è proiettato nello spazio, spargendo tutti gli elementi pesanti prodotti nello spazio: quest'evento si chiama **supernova**.

Quando il gas in espansione urta il gas interstellare circostante ad una velocità di

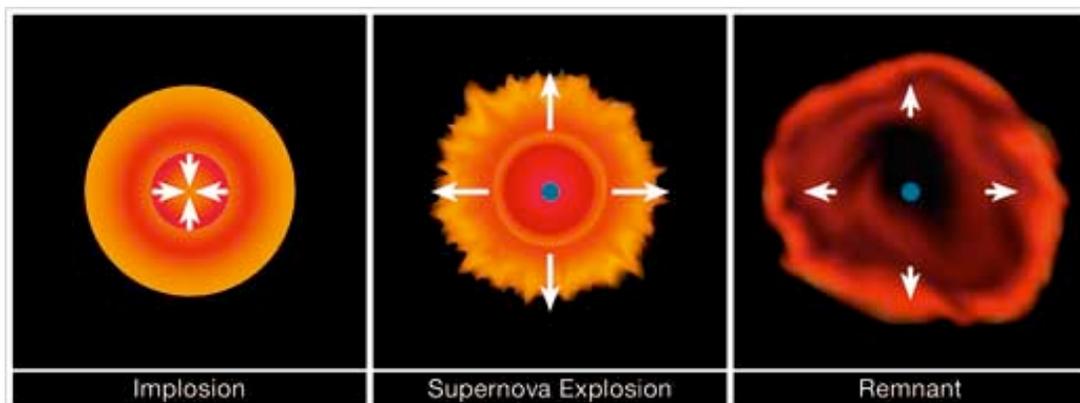


FIGURA 2.46— Le diverse fasi della supernova di tipo II: contrazione del cuore, esplosione, residuo della supernova. Credito: Mafalda Martins, ESO.

migliaia di km/sec, l'onda d'urto riscalda il gas interstellare ad altissime temperature ed emette luce. Recenti esplosioni di supernove (non più vecchie di alcune migliaia di anni) sono anche visibili ai raggi X.

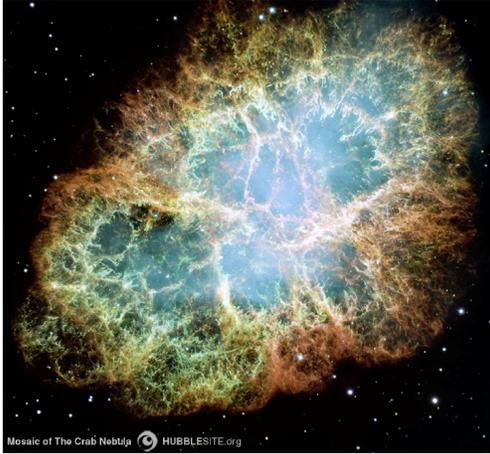


FIGURA 2.47— Un famoso resto di supernova è la nebulosa del Granchio. Astronomi cinesi hanno registrato l'esplosione il 4 luglio 1054 di questa supernova così brillante che per alcune settimane, si vedeva anche di giorno! Credito: NASA, ESA, STScI/AURA.



FIGURA 2.48— I resti di una supernova conosciuta come Cassiopeia A. Essa è relativamente giovane con un'età di solo 340 anni. Credito: NASA, ESA, STScI/AURA.

I neutrini formati durante l'esplosione portano via la maggior parte (più del 99%) dell'energia del collasso del cuore. Una parte dell'energia (meno del 1%) serve ad espellere l'involucro di gas verso l'esterno. Il resto dell'energia (meno di 0.01%) rende la supernova molto brillante come 10^{11} stelle: brillante come una galassia intera!

Quando una supernova esplose nel 1987 (chiamata SN 1987A) in una galassia satellite della nostra Via Lattea, il detector Kamiokande di neutrini ha rivelato un'eruzione gigantesca di neutrini nella direzione di questa galassia, confermando i modelli



FIGURA 2.49— Il 23 Febbraio 1987 una supernova esplose nella grande nube di Magellano, una galassia vicina alla nostra. Tuttavia, essa si trova a circa 170'000 anni-luce, quindi l'evento è avvenuto 170'000 anni fa. Questa foto mostra il campo attorno alla supernova, prima (a destra) e 10 giorni dopo (a sinistra) l'esplosione. Credito: David Malin, Anglo-Australian Observatory.

di supernova (figura 2.49). Osservazioni recenti di Hubble mostrano che il materiale dall'esplosione di SN 1987A si espande ad una velocità di 9.5 milioni di km/h.

Le supernove sono eventi molto rari – circa uno per secolo in una data galassia – perché le stelle progenitrici sono molto rare. Tuttavia ci sono miliardi di galassie nell'universo, quindi statisticamente, in un anno ci sono alcune supernove da qualche parte nell'universo. Esse sono facilmente riconoscibili perché la loro energia è concentrata in una piccola regione e si possono vedere da milioni di anni-luce talmente sono luminose. Il gas della nebulosa (nebulosa planetaria o supernova) non rimane brillante per molto tempo (alcune decine di migliaia di anni). Quando la nebulosa si espande, si raffredda e diventa meno luminosa. Il materiale espulso diventa parte del mezzo interstellare della galassia.



FIGURA 2.50— La supernova 1994D nella galassia NGC 4526 è il punto brillante a sinistra in basso. Credito: NASA, ESA, The Hubble Key Project Team, e The High-Z Supernova Search Team.

2.2.11 Fase 7: Residui centrali

Cosa rimane dopo che gli strati esterni sono stati espulsi dipende (di nuovo!) dalla massa del cuore. Se il cuore ha una massa inferiore di $1.4 M_{\odot}$, si comprimerà in una nana bianca della dimensione della Terra. Gli elettroni entrano in collisione l'uno con l'altro e formano un gas strano (chiamato "degenerare") che impedisce un crollo ulteriore.

- Se il cuore ha una massa compresa tra 1.4 e $3 M_{\odot}$, i neutroni si urtano a vicenda e formano un gas degenere in una stella a neutroni della dimensione di qualche decina di km. I neutroni impediscono un crollo ulteriore.
- Se la massa del cuore supera $3 M_{\odot}$, niente è in grado di impedire il crollo del cuore su se stesso in un punto matematico. La gravità vince e diventa così alta che la legge di Newton non descrive più adeguatamente la forza di gravità. Essa deve essere sostituita dalla teoria della relatività generale di Einstein.

Questo punto super-compatto si chiama **buco nero**, perché niente può scappare ad esso, neanche la luce: Se sulla Terra si lancia una palla verso l'alto, essa ritorna sulla superficie. Più forte viene lanciata la palla, maggiore sarà la velocità iniziale e maggiore sarà l'altezza raggiunta prima di tornare. Se la palla è lanciata sufficientemente velocemente, la forza di gravità terrestre non basta più per farla cadere sulla Terra e la palla non torna mai più. Questa velocità viene chiamata "velocità di fuga". La velocità di fuga dell'attrazione gravitazionale terrestre è 11 km/s ($39'600 \text{ km/h}$).

Se la velocità di fuga supera la velocità della luce (la massima velocità assoluta), l'oggetto che genera queste forze gravitazionali è un buco nero.

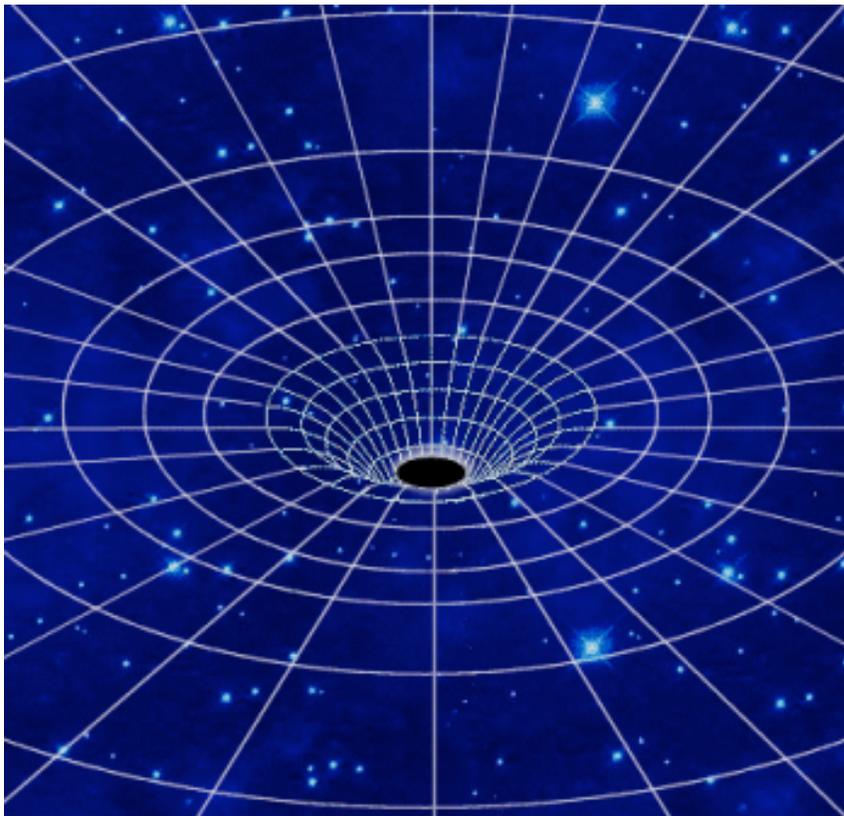
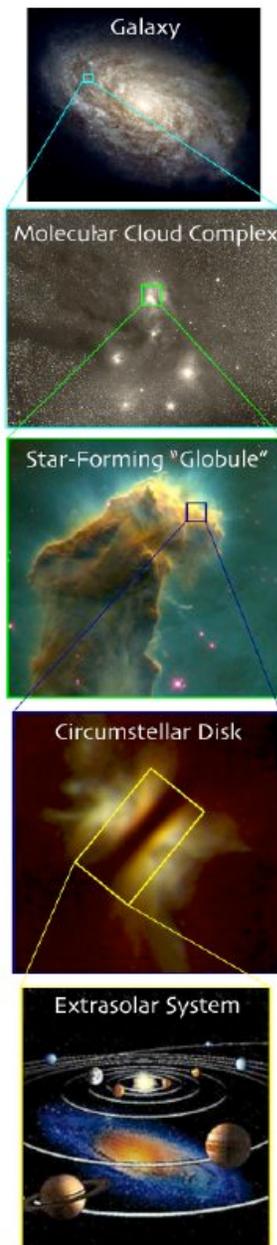


FIGURA 2.51— Un buco nero è una regione dello spazio in cui la forza di gravità è così intensa che niente può fuggire, neanche la luce. Credito: http://www.wvu.edu/depts/skywise/a101_blackholes.html

2.3 Riassunto e implicazione per la vita nell'universo.



H e He (e qualche traccia di Li, B, Be) sono stati creati con il Big Bang, all'inizio dell'universo. Tutto il resto degli elementi chimici dell'universo sono stati prodotti dalle stelle con le reazioni di fusione nucleare. Queste reazioni hanno creato elementi più pesanti fondendo insieme elementi più leggeri nelle regioni centrali delle stelle. Quando le parti esterne delle stelle sono state espulse nello spazio, il materiale processato può essere incorporato in nubi di gas a partire dal quale si formeranno altre stelle e pianeti. Il materiale del nostro sistema solare include degli atomi creati durante le precedenti generazioni di stelle. **Tutti gli atomi della Terra (incluso quelli del vostro corpo) a parte l'idrogeno e la maggior parte dell'elio sono materiali riciclati: non sono stati creati sulla Terra, ma nelle stelle.**

Atomi più pesanti dell'He e fino al Fe e al Ni sono stati creati nel centro delle stelle (il processo che ha creato il Fe ha anche creato una piccola quantità di Ni). Stelle di piccola massa possono solo sintetizzare He, C e O. Stelle massicce ($M > 8 M_{\odot}$) possono sintetizzare He, C, O, Ne, Mg, Si, S, Ar, Ca, Ti, Cr, Fe (e Ni). Elementi più pesanti del Fe sono creati in esplosione di supernova dalla rapida combinazione dei neutroni con i nuclei pesanti. Massicce giganti rosse sono anche capaci di fare una piccola quantità di elementi sopra il Fe (fino a Hg e Pb), ma la maggior parte di questi sono creati in supernova (è sicuramente il caso per gli elementi sopra Pb fino all' U). Non esistono nell'universo elementi più pesanti dell'uranio (a parte nelle nostre centrali nucleari, o quelle di una civiltà extraterrestre). Questi elementi sono ulteriormente dispersi nell'ambiente durante le fase di nebulosa planetaria e supernova. In seguito, essi sono incorporati in nubi molecolari giganti e alla fine diventano parte di future stelle, pianeti (e forme di vita?).

A questo punto, sembra importante notare che:

1. La teoria della nucleosintesi stellare predice correttamente le abbondanze relative osservate di tutti gli elementi pesanti sulla Terra, sulle meteoriti, sul Sole, sulle altre stelle, sulle nubi interstellari... ovunque nell'universo.
2. Per creare un pianeta come la Terra (e dopo la vita sul pianeta), abbastanza elementi pesanti devono essere creati in generazioni stellari precedenti e poi concentrati in nubi interstellari che si aggregano attorno alle stelle in formazione. C'è un ritardo necessario tra l'inizio dell'universo e l'inizio della vita.

3. Gli elementi indispensabili per la vita (C, O, K, ecc) sono creati in stelle massicce, ma solo le stelle leggere (come il Sole) hanno un tempo di vita abbastanza lungo per permettere alla vita di svilupparsi ed evolvere. Per lo più, l'intensa luce UV delle stelle massicce renderebbe l'apparizione e lo sviluppo della vita molto difficile su un pianeta attorno ad una tale stella.

2.4 Esercizi

1. Che cosa sono: un pianeta, una stella, una costellazione, una galassia ?
2. Spiegare la creazione dei pilastri della figura 2.8. Conosci un fenomeno "analogo" sulla Terra ?
3. Spiegare come un diagramma HR di un ammasso di stelle può essere usato per stimare l'**età dell'ammasso**, cioè l'età della maggiore parte delle sue stelle ?
4. Le figure 2.15 e 2.14 sono entrambe diagrammi Hertzsprung–Russell, però non sono la stessa figura. Quale relazione esiste tra le due figure, cioè come i calcoli di percorsi evolutivi della figura 2.15 possono spiegare le osservazioni della figura 2.14 (con le 23'000 stelle più vicine al Sole)?
5. Se osservate una stella estremamente brillante (temperatura di superficie uguale a 100'000 K), quale colore avrebbe questa stella? A. rosso, B. blu, C. viola, D. bianco, E. nero (la stella emette la sua luce in ultravioletto e raggi X, non nel visibile).
6. Annie Jump Cannon stabilì la classificazione spettrale e organizzò i tipi spettrali nella sequenza OBAFGKM. Fu dimostrato dopo che questa sequenza era correlata a: A. la massa, B. il raggio, C. la temperatura di superficie, D. l'età, E. la composizione chimica delle stelle?
7. Quali sono le due proprietà osservabili delle stelle che gli astronomi usano oggi per classificarle? A. la distanza e la posizione sul cielo, B. la massa e il raggio, C. la temperatura centrale e la pressione, D. la temperatura superficiale e la luminosità, E. l'età e la composizione chimica?
8. Nel cuore del Sole accadono reazioni di fusione nucleare, un processo che ha bisogno di circa $10^7 K$ per esistere. La sorgente di energia che ha permesso al Sole di riscaldarsi abbastanza per iniziare le reazioni di fusione era: A. il Big Bang, B. Correnti elettriche generate dal campo magnetico, C. energia chimica, D. fissione nucleare, E. contrazione gravitazionale?
9. Nel cuore del Sole succede lo stesso processo di fusione nucleare che nell'esplosione delle bombe a idrogeno. Perché il Sole non esplose? A. perché è un plasma ionizzato di elettroni e nuclei, B. se la sua temperatura aumenta, il cuore si espande, causando una diminuzione di temperatura, C. i neutrini portano via l'energia, raffreddandolo, D. sta esplodendo ma la gravità "contiene" l'esplosione?

10. La sorgente principale di energia del Sole oggi è: A. chimica, B. fissione nucleare, C. fusione nucleare, D. contrazione gravitazionale, E. un buco nero nel suo centro.
11. Quale affermazione qui di seguito è falsa? Le stelle in un ammasso hanno tutte circa la stessa: A. posizione sul cielo, B. distanza, C. età, D. composizione chimica iniziale, E. massa?
12. Sappiamo che la nebulosa di Orione è una regione di formazione stellare, cioè una regione che contiene stelle che sono molto più giovani di 14 miliardi di anni, l'età dell'universo, perché: A. contiene stelle calde e luminose sulla SP, B. contiene gas idrogeno ionizzato che emette luce, C. si trova in un braccio spirale, D. contiene un sacco di stelle vicine l'una con l'altra.
13. Il Sole finirà la sua vita come: A. una gigante rossa, B. una supergigante, C. una nana bianca, D. una stella a neutroni, E. un buco nero?
14. La prova migliore che in genere il centro di una galassia contiene un buco nero è: A. immagini ad alta risoluzione usando il telescopio spaziale rivelano forte effetti di lente gravitazionale, B. un grande redshift, C. un spettro variabile che non assomiglia ad un spettro stellare e che si estende dal radio fino ai raggi gamma, D. la presenza di getti relativistici, E. molta massa (dedotta dal moto orbitale del gas o delle stelle) in uno spazio piccolo (dedotto dalle immagini ad alta risoluzione).
15. Questa foto (figura sotto) è un'immagine dal telescopio spaziale Hubble della nostra galassia: A. corretto, B. falso, C. possibile.



16. Descrivere con un massimo di 5 righe il cammino di un atomo di C che oggi appartiene alla vostra pelle: Dall'inizio della sua creazione, fino ad arrivare sulla vostra pelle.

Capitolo 3

Le condizioni fisiche che permettono la vita

3.1 I prerequisiti per la vita

Questo paragrafo è tratto da: <http://gould.as.arizona.edu/~mmeyer/ast202/lect10.html>
(Credito: M. Meyer, University of Arizona).

3.1.1 Perché l'acqua liquida è così importante ?

1. La molecola d'acqua si trova sotto forma liquida entro un ampio intervallo di temperature: da 0 a 100°C. In più l'acqua possiede delle proprietà interessanti: Prima di tutto, la temperatura massima (ebollizione) è vicina alla temperatura massima alla quale molecole organiche complesse possono sopravvivere. In secondo luogo, l'acqua può essere liquida sotto 0°C, per es. quando mescolata con il sale. Infine, l'acqua può essere liquida sopra 100°C, per es. quando è sotto alta pressione. Altri liquidi possibili (come l'ammoniaca, il metano e l'etano) sono tutti liquidi a temperature molto più basse. Questo fatto rallenta le reazioni chimiche, cioè esse sono circa 64 volte più lente. In un tale ambiente, ci sarebbe stato il tempo di sviluppare la vita? Si pensa che la vita sulla Terra ha messo 500 milioni di anni per apparire: $500 \cdot 10^6 \times 64 = 32$ miliardi di anni! Ricordatevi che l'universo ha "solo" 14 miliardi di anni.
2. L'acqua in forma solida (ghiaccio) galleggia piuttosto che affondare.



FIGURA 3.1— Iceberg

A causa dell'organizzazione molecolare, il ghiaccio è meno denso dell'acqua liquida e quindi, grazie alla spinta di Archimede, galleggia sull'acqua liquida. Se il ghiaccio affondasse, la superficie più fredda farebbe sempre più ghiacciata e condurrebbe ad un effetto "palla di neve" (*runaway effect*). Il ghiaccio agisce come una coperta termica per impedire agli oceani interi di solidificarsi. L'ammoniaca solida, il metano solido e l'etano solido affondano.

3. L'acqua è una molecola polare.

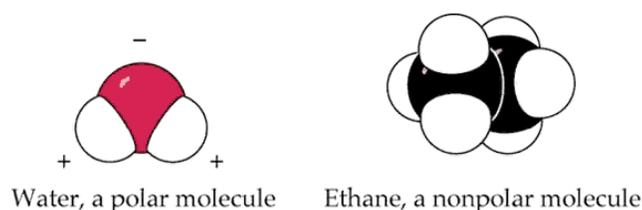


FIGURA 3.2— L'acqua è una molecola polare, mentre l'etano no.

Le molecole polari si dissolvono in acqua. Questo fa dell'acqua un eccellente solvente per molte reazioni chimiche. Ma lunghi idrocarburi come l'olio e le membrane delle cellule (che sono non-polari) non si dissolvono nell'acqua.

Sull'importanza dell'acqua per la vita, vedere anche l'approfondimento 8.4 (disponibile a http://phoenix.lpl.arizona.edu/pdf/water_and_life.pdf).

3.1.2 La presenza di alcuni elementi importanti per la vita

Il carbonio (C), l'azoto (N), lo zolfo (S), l'idrogeno (H), l'ossigeno (O) e il fosforo (P) sono molto importanti per la vita. Paragonate questa lista con gli elementi più abbondanti nell'universo: H, He, O, C, N, Ne. Gli elementi più abbondanti sulla Terra sono: O, Si, Al, Fe, Ca e Na.

H, O, N e C reagiscono mettendo in comune 1, 2, 3 o 4 elettroni rispettivamente e sono gli elementi più leggeri capaci di fare questo. Più un atomo è grosso, più i suoi legami sono instabili. Perlopiù C, O e N possono formare legami elettronici doppi. Il carbonio può da solo fare più legami che tutti gli altri elementi messi insieme.

La vita non usa gli elementi più abbondanti, ma quelli con le proprietà chimiche essenziali.

3.1.3 Il silicio contro il carbonio

Il silicio (Si) è una base alternativa al carbonio per la vita? È capace di formare lunghe catene come il carbonio (ma meno stabili) ed è molto abbondante nella crosta terrestre. Non può formare però legame doppi come il C. Come risultato, C può combinarsi con 2 atomi di O per formare il CO₂. Questo è importante perché così il C può esistere sotto forma gassosa e anche dissolversi in acqua. Questa capacità di muoversi attraverso l'atmosfera e gli oceani significa che il C è disponibile direttamente agli organismi.

Al contrario, Si non può esistere sotto forma gassosa sulla Terra, neanche dissolversi in acqua in quantità sufficiente. Infine, i legami del Si sono più deboli che i legami del C, rendendolo meno stabile.

3.1.4 Le sorgenti di energia

1. La fotosintesi stellare: per ospitare la vita, il pianeta dovrebbe essere non troppo lontano da una stella.
2. I lampi e le scariche elettriche (molecole organiche create dai lampi): per ospitare la vita, il pianeta dovrebbe avere un'atmosfera.
3. Il calore proveniente da *hydrothermal vents* permette la creazione di molecole organiche.
4. L'energia chimica: per ospitare la vita, il pianeta dovrebbe essere chimicamente attivo, cioè avere molecole organiche, attività geo-termale e un'atmosfera.

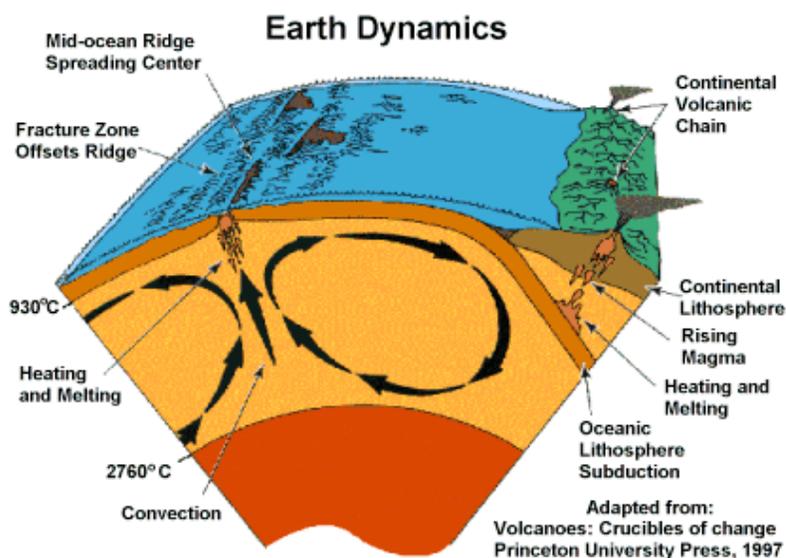


FIGURA 3.3— Dinamica della Terra



FIGURA 3.4— Geiser

3.1.5 La stabilità climatica

La vita richiede un ambiente stabile per svilupparsi ed evolvere. In primo luogo, il tasso di impatti di meteoriti deve diminuire significativamente. Nel nostro sistema solare, le forze gravitazionali di Giove e Saturno hanno agito come "pulitori" di comete e meteoriti (vedi per esempio la collisione di Shoemaker-Levy 9 con Giove nel 1994). Pertanto la presenza di pianeti massicci a $\sim 5 \text{ AU}^1$ è stato molto importante (essenziale?) per lo

¹1 Astronomical Unit = distanza Terra-Sole = $150 \cdot 10^6$ km.

sviluppo della vita sulla Terra, perché tende a diminuire il numero di collisioni drammatiche di comete con la Terra. La seconda condizione è che il pianeta non sia esposto troppo alla luce UV (le lunghezze d'onda sotto $3 \mu\text{m}$ distruggono tutte le molecole organiche). Lo strato di ozono (O_3) protegge la Terra. Si pensa che all'inizio, lo strato di O_3 era più spesso.

Per questi motivi, una stella sulla SP, senza grande variabilità con un flusso non troppo forte in UV è ottima (come il Sole...)

3.2 Java quiz: Costruire un pianeta

Questo paragrafo è la traduzione italiana di <http://astroventure.arc.nasa.gov/DAP/index.html>. Provate il quiz sul vostro computer a casa o in sala d'informatica. Per allenarsi prima di rispondere al quiz, potete fare il training "Astroventure" (<http://astroventure.arc.nasa.gov/>).



FIGURA 3.5— Animazione "Design a planet". Credito: NASA.

3.3 Il tipo stellare e l'orbita del pianeta

La distanza tra un pianeta e la sua stella aiuta a determinare la temperatura della superficie del pianeta. È importante per la presenza di acqua liquida: L'intervallo di distanze

tra la stella e il pianeta dove l'acqua liquida può esistere si chiama "la zona abitabile". Si pensa che l'acqua liquida sia uno degli ingredienti essenziali per la vita, perché la maggior parte delle molecole organiche sono idrosolubili. La zona abitabile (ZA) è diversa per ogni stella. La ZA di una stella calda è più distante di quella di una stella fredda.

Animazione Flash sulle ZA disponibili all'indirizzo:

<http://library.thinkquest.org/C003763/index.php?page=planet07>

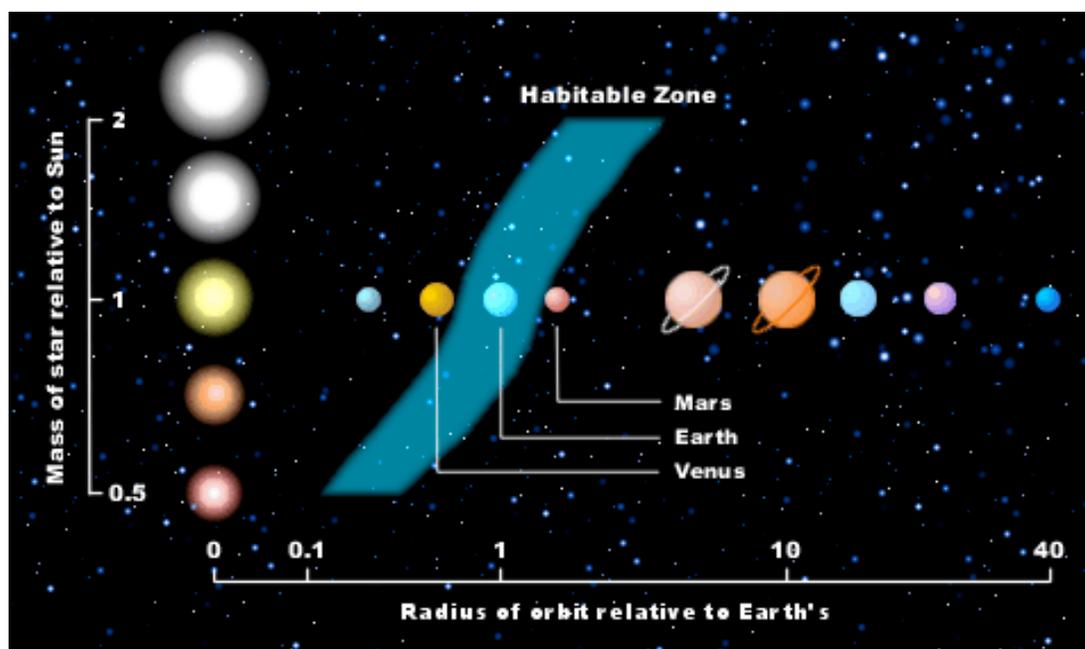


FIGURA 3.6— Quando la massa (e la temperatura) della stella aumentano (in ordinata) la ZA si sposta verso l'esterno. In ascissa è indicata la distanza dalla stella in unità di distanza Terra-Sole. Con il nostro Sole, la ZA include la Terra e raggiunge quasi Marte e Venere. Se il Sole fosse più piccolo, Venere sarebbe abitabile. Se il Sole fosse più grande, allora Marte sarebbe abitabile. La ZA del Sole va da 0.85–0.95 fino a 1.4–1.7 volte la distanza Terra-Sole.

3.4 La massa del pianeta

La massa del pianeta permette di determinare quanta atmosfera avrà il pianeta. La massa di Mercurio è circa un centesimo della massa della Terra. Mercurio non ha abbastanza gravità per trattenere un'atmosfera.

3.5 I vulcani

I vulcani sono importanti perché aiutano a rilasciare la CO_2 nell'atmosfera. Insieme ai movimenti delle placche tettoniche, i vulcani sono tramite i maggiori giocatori nel ciclo del carbonio sulla Terra: i vulcani prendono il carbonio dall'interno della Terra e lo rilasciano nell'atmosfera sotto forma di CO_2 .

Gas ad effetto serra (come la CO_2) possono aumentare la temperatura della superficie di un pianeta. Se non ci sono abbastanza gas ad effetto serra nell'atmosfera, un pianeta può essere troppo freddo. Se ci sono tanti gas ad effetto serra nell'atmosfera, un pianeta può diventare molto caldo.

Data la sua distanza dal Sole e data la quantità di luce riflessa verso lo spazio (chiamato albedo), Venere dovrebbe avere una temperatura media di -23°C , ma per colpa di un effetto serra intenso dovuto ad una densa atmosfera (più di 96% di CO_2 , 100 volte la pressione terrestre), la temperatura media della superficie è di 460°C .

3.6 Il movimento delle placche tettoniche

Il movimento della crosta terrestre e del mantello influenza quanta CO_2 si trova nell'atmosfera.

3.6.1 La tettonica delle placche

L'effetto di placche in movimento sulla superficie del pianeta può essere molto complicato. Da un lato, questo movimento può riciclare il carbonio portandolo sotto la superficie dove può essere rilasciato grazie ad un vulcano. Tuttavia esso può anche imprigionarlo sottoterra per milioni di anni.

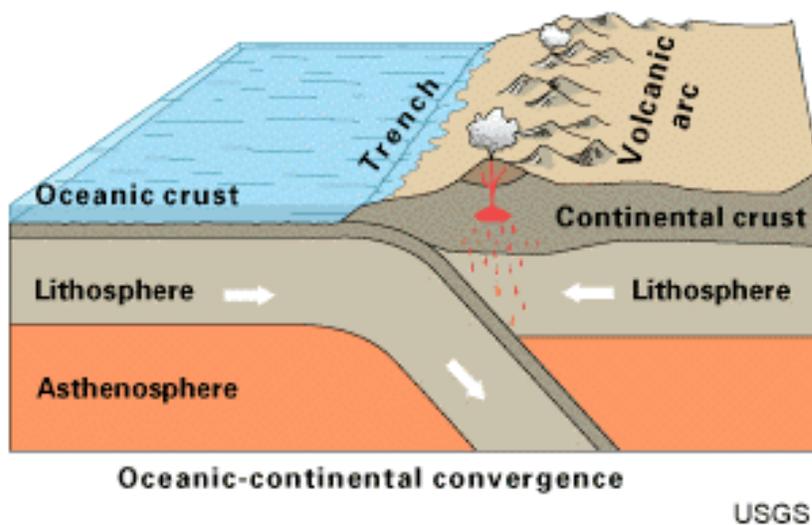


FIGURA 3.7— Subduzione

3.6.2 La pioggia

La pioggia rimuove la CO_2 dell'atmosfera ($\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$, piogge acide). Alla fine, il carbonio si deposita sulla Terra o sui fondi degli oceani dove crea nuove rocce calcaree ("limestone") combinandosi con elementi chimici provenienti da altre rocce terrestri che sono state erose e trasportate negli oceani.

3.6.3 Senza il movimento delle placche

In assenza di movimento delle placche (e sotto le condizioni giuste) le rocce calcaree (contenenti carbonio) al fondo degli oceani possono più facilmente e più rapidamente trasferire il carbonio nell'atmosfera, tramite lo scioglimento del carbonio nell'acqua.

3.6.4 Con il movimento delle placche

Con un movimento delle placche le rocce contenenti carbonio possono essere trascinate sotto la crosta terrestre e rimanere lì per un lungo tempo (milioni di anni). Alla fine un vulcano potrebbe rilasciare carbonio nell'atmosfera sotto forma di CO₂.

3.7 *L'acqua liquida*

Sulla Terra, dove troviamo l'acqua, troviamo la vita! Le condizioni devono essere giuste per permettere l'esistenza dell'acqua liquida. Se scegliete di avere acqua liquida sul vostro pianeta e le condizioni non sono corrette, l'acqua evaporerà, si congelerà o scapperà nello spazio. Su un pianeta freddo, qualche volta l'acqua può rimanere liquida sottoterra.

3.7.1 La pioggia

L'acqua liquida, sotto forma di pioggia, è una parte importante del ciclo del carbonio. La pioggia rimuove la CO₂ dall'atmosfera.

3.8 I produttori

Produttori come alghe e piante trasformano l'energia solare, l'acqua e la CO₂ in zucchero e O₂.

3.8.1 L'ossigeno / l'ozono

Durante la fotosintesi, i produttori rilasciano ossigeno nell'aria. Essi hanno creato abbastanza ossigeno per formare uno strato di ozono che ci protegge dalle nocive radiazioni ultraviolette che provengono dal Sole.

3.8.2 Il cibo

Produttori ci forniscono di cibo per sopravvivere e crescere.

3.8.3 Le condizioni per l'esistenza dei produttori

I produttori (come tutte le altre forme di vita) hanno bisogno di alcune cose per sopravvivere. Se scegliete di avere dei produttori sul vostro pianeta, ma le condizioni non sono giuste per loro, essi moriranno immediatamente.

3.8.4 La terra e gli oceani

Le piante sulla Terra producono ossigeno più velocemente che la vita negli oceani. La maggior parte di questo O_2 viene consumato quando le piante muoiono e si decompongono. Negli oceani, alcuni organismi morti vengono seppelliti e sono così protetti dalla decomposizione. Quindi l'ossigeno prodotto dalla vita può muoversi dall'oceano verso l'atmosfera. **Di conseguenza è la vita negli oceani, non nelle foreste, che è responsabile della grande quantità di ossigeno nell'atmosfera terrestre.**

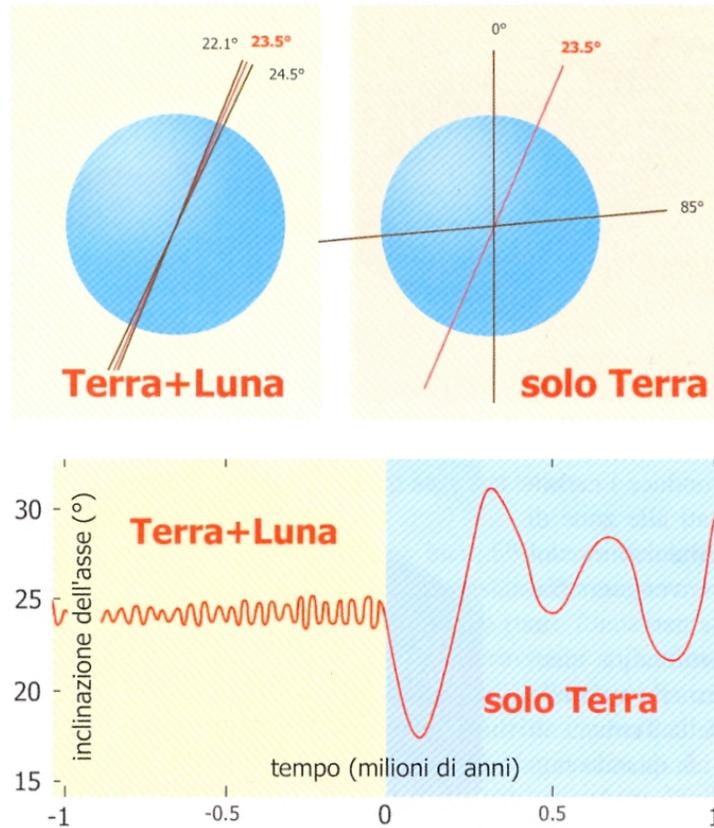


FIGURA 3.8— In alto: Attuale range di variabilità dell'inclinazione dell'asse terrestre (compreso tra 22.1° e 24.5°) e a destra la grande variazione (da 0° a 85°) che si invece verificherebbe senza l'effetto gravitazionale indotto dalla Luna. Nel grafico in basso, a sinistra sono descritte le reali e quasi impercettibili variazioni di obliquità dell'asse in un periodo che va dal presente a 1 milione di anni nel passato; sulla destra come cambierebbe l'andamento se improvvisamente cessasse l'effetto gravitazionale della Luna: da qui a 1 milione di anni nel futuro si avrebbero inclinazioni superiori ai 30° , e in un periodo di decine di milioni di anni tale variazione raggiungerebbe gli 85° !

3.9 La stabilità dell'asse di rotazione della Terra

La Terra possiede un grosso satellite (la Luna) e la sua presenza è molto importante per garantire la stabilità dell'inclinazione dell'asse di rotazione della Terra (figura 3.8). In effetti, senza la Luna, la Terra avrebbe avuto molte più probabilità nella sua storia di cambiare drasticamente il suo asse di rotazione, con delle conseguenze enormi per

la vita. Immaginate se cambiasse di 90° : Il polo nord si ritroverebbe all'equatore e viceversa... Calcoli numerici hanno mostrato che grazie alla presenza della Luna, la Terra è molto più stabile (Laskar, Joutel, Robutel, 1993).



3.10 La stabilità dell'orbita della Terra

Se Giove non fosse su un'orbita (quasi) circolare, ma fortemente ellittica, potrebbe disturbare la Terra e mandarla fuori dalla sua orbita attuale. Uscendo della ZA, le conseguenze per lo sviluppo della vita sarebbero ovviamente drammatiche. Pertanto la presenza di un pianeta massiccio (come Giove) a una distanza maggiore di ~ 3 AU è un "beneficio" per lo sviluppo della vita su pianeti interni (come la Terra), ma solo se il pianeta massiccio si trova su un'orbita circolare, cioè che non viene a disturbare altri pianeti.

3.11 Esercizi

1. Le distanze (minime e massime) della ZA sono proporzionali alla radice quadrata della luminosità della stella ($d \propto L_{stella}^{1/2}$). Calcolare la ZA di una stella massiccia di tipo A0 ($63 L_\odot$) e di una stella nana di tipo M8 ($0.008 L_\odot$). Per quale stella è maggiore la larghezza della ZA ?
2. La massa di un pianeta permette di determinare quanta atmosfera avrà il pianeta. Con l'animazione Java "Costruire un pianeta", trovare l'intervallo di massa di un

pianeta che permette di avere la vita. Spiegare per quale motivi c'è una massa inferiore e una massa superiore.

3. La ZA dei microbi sarà più vicina o più lontana dalla stella che la ZA degli uomini? Motivate la vostra risposta.
4. Da che cosa dipende la temperatura di un pianeta ?
5. Quali sono le cose essenziali alla vita umana?
6. Perché il vapore acqueo è così importante per noi?
7. Che cosa ci insegna la presenza di vapore acqueo nell'atmosfera di un pianeta extra-solare (cioè, fuori del nostro sistema solare) ?
8. Che cosa è "l'effetto serra" ?
9. La quantità di CO₂ nell'atmosfera terrestre è rimasta la stessa ? Se no, quali sono state le conseguenze ?
10. Perché lo strato di ozono è molto utile per la vita sulla Terra ?
11. Perché gli scienziati sono interessati a trovare O₂ su un altro pianeta ?
12. Le piante e gli animali sono danneggiati da troppa luce ultravioletta. Quale gas è necessario nell'atmosfera per proteggerli ? A. ossigeno, B. anidride carbonica, C. vapore acqueo, D. azoto, E. ozono
13. Senza quale gas, il nostro pianeta sarebbe molto secco e freddo? A. ossigeno, B. anidride carbonica, C. vapore acqueo, D. azoto, E. ozono
14. Scegliere quale delle seguenti possibilità **non** è una funzione della nostra atmosfera: A. Proteggere da un certo tipo di radiazione solare. B. Mantenere il caldo sulla Terra un po' come una coperta. C. Fermare la maggior parte della luce visibile. D. Fornire gas per le piante e gli animali.
15. Le piante e gli animali sono danneggiati dalle particelle del vento solare. Quali condizioni geologiche genererebbero un campo magnetico che potrebbe proteggerli ?

Capitolo 4

La ricerca della vita nel Sistema Solare

Marte, Europa (un satellite di Giove) e possibilmente qualche nuovo pianeta fuori del nostro sistema solare potrebbero avere le condizioni giuste per ospitare la vita. Mentre gli scienziati hanno una buona idea di un ambiente abitabile, essi stanno ancora cercando di scoprire quanti pianeti o altri corpi celesti abbiano tali condizioni. Per limiti di tempo, in questo corso esamineremo solo il caso di Marte.

4.1 Marte

Per i dettagli sulle recenti missioni su Marte (Mars Reconnaissance Orbiter (MRO), Mars Rovers, Mars Global Surveyor (MGS) e 2001 Mars Odyssey), vedere il capitolo su questo pianeta nel corso di astronomia della Settimana d'approfondimento¹, vedere anche gli approfondimenti 8.2 e 8.3. La linea conduttrice di queste missioni su Marte è la **ricerca dell'acqua** (passata o presente), data la sua importanza per la vita.

L'importanza particolare che occupa Marte scaturisce principalmente dal fatto che possiede un'atmosfera e che le condizioni climatiche erano, ad un certo punto della sua storia, compatibili alla presenza di acqua liquida sulla superficie, e di conseguenza alla vita. I paragrafi successivi sono tratti da François Forget (2007).

4.1.1 Il clima su Marte oggi

Marte è un pianeta con approssimativamente la metà del diametro della Terra e 1.5 volte più lontano dal Sole. La pressione atmosferica superficiale va da 1 mbar fino a 14 mbar a seconda della posizione sul pianeta e della stagione (sulla Terra la pressione media a livello del mare vale 1013 mbar, circa 100–1000 volte di più.) Il gas dominante nell'atmosfera marziana è l'anidride carbonica CO_2 (99%). Malgrado queste differenze, il clima di Marte è simile a quello della Terra per molti aspetti: I due pianeti ruotano con quasi lo stesso periodo e la stessa obliquità (angolo d'inclinazione rispetto al piano di rotazione attorno al Sole). La lunghezza della giornata è quindi quasi la stessa (24 ore e 40 minuti su Marte) e il ciclo delle stagioni è paragonabile.

In una prima approssimazione, il clima di Marte può essere paragonato con un clima freddo e secco (desertico) sulla Terra: Durante un pomeriggio d'estate ai tropici, le

¹http://www.lilu2.ch/lilu2dir/materie/scienze_sperimentali/Settimana_approfondimento_astronomia/Mars/Mars_4missions.html

temperature possono a volte raggiungere i 20°C , ma la notte successiva, possono abbassarsi fino a -100°C . Il terreno marziano è composto di fine e secca polvere di sabbia che non ha un'alta capacità termica e quindi non può immagazzinare molto calore, come la sabbia dei deserti sulla Terra. Dato che neanche la fine atmosfera marziana può immagazzinare tanto calore, il clima di Marte è caratterizzato da grandi variazioni giornaliere. Sulla Terra il clima non è solo controllato da variazioni di temperatura e circolazione atmosferica: oceani e nuvole di vapore acqueo hanno anche la loro importanza. Anche su Marte vari fenomeni rendono il clima molto più complesso:

1. Quasi il 30% dell' CO_2 atmosferica condensa ogni inverno ad alta latitudine per formare una calotta polare di ghiaccio. Al polo nord, la copertura di CO_2 sparisce completamente all'inizio dell'estate, lasciando esposto una calotta sottostante di ghiaccio d'acqua. Al polo sud, un piccolo residuo fatto di ghiaccio CO_2 perenne sopravvive ogni anno, perché l'albedo medio del polo sud è più elevato del suo corrispondente al nord: il polo sud riflette una frazione maggiore delle radiazioni solari e pertanto assorbe meno energia e sublima significativamente meno.
2. Una quantità altamente variabile di polvere in aria modifica le proprietà radiative dell'atmosfera, a volte con delle tempeste globali di polvere che colpiscono il pianeta intero.

4.1.2 L'acqua su Marte oggi

C'è acqua su Marte quasi dappertutto in forma **solida** o **gassosa** (vedi figura 4.1):

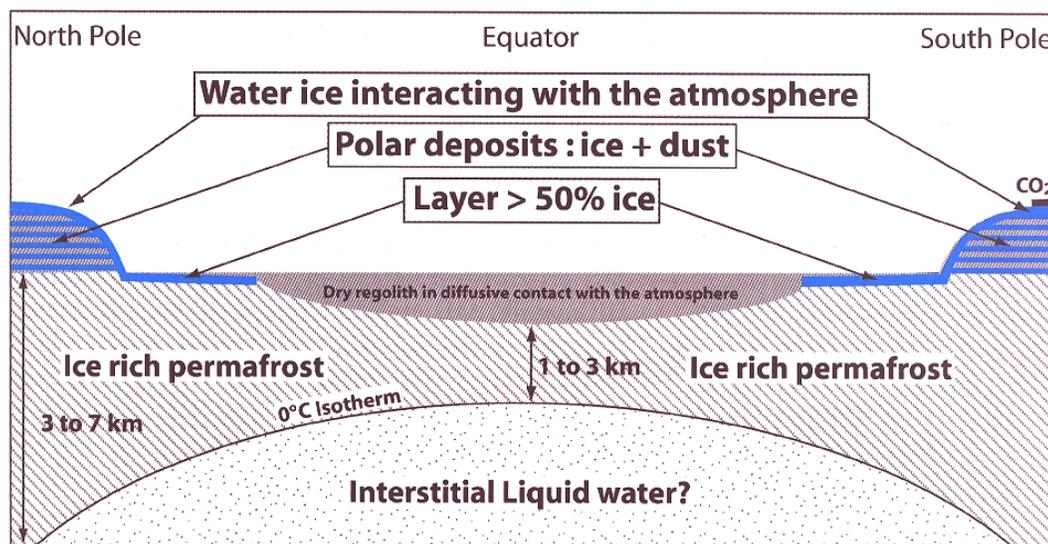


FIGURA 4.1— Sezione schematica della superficie e della crosta Marziana.

1. Ghiaccio d'acqua, bianco e relativamente puro si trova in una zona di circa 1000 km di diametro attorno al polo nord. Lo spessore di questo strato può variare da qualche millimetro al bordo fino a qualche decina di metri nella zona centrale.

2. Quest'ultimo strato copre una struttura molto più grande composta da migliaia di strati di ghiaccio e polvere che si sono accumulati durante l'ultimo milione di anni con un spessore di più di 3000 metri.
3. Vicino al polo sud la piccola (300 km) calotta bianca è composta principalmente da ghiaccio da anidride carbonica. La missione Mars Express ha rivelato per la prima volta la presenza perenne di ghiaccio d'acqua al bordo di questa calotta di CO_2 . Molto probabilmente la calotta perenne di CO_2 riposa su uno strato esteso di ghiaccio d'acqua.
4. In entrambi gli emisferi e fino ad una latitudine di circa 55 gradi, la sonda Mars Odyssey ha mostrato che quando il ghiaccio non è presente in superficie, è comunque presente appena sotto la superficie (pochi centimetri), nella forma di uno strato di ghiaccio sporco spesso circa un metro con non meno di 50% di ghiaccio. Quello che è stato misurato è in realtà solo una grossa quantità d'idrogeno, però nessun'altra sostanza che non sia il ghiaccio d'acqua sembra in grado di spiegare una tale quantità (figura 4.8).
5. Sotto questo strato di ghiaccio sporco e anche a latitudini più basse, sembra probabile che la maggior parte del sottosuolo sia pieno di ghiaccio: Esso potrebbe trovarsi molto vicino alla superficie ad alte latitudini ma esso potrebbe esistere solo a profondità significative (centinaia di metri) vicino all'equatore. Questa conclusione è stata raggiunta dalla forma dei crateri d'impatto diversi da quelli della Luna, i quali devono la loro morfologia allo scioglimento e alla vaporizzazione del ghiaccio del sottosuolo durante l'impatto.

4.1.3 L'acqua liquida su Marte oggi

Per formare dell'acqua liquida (e possibilmente un ambiente favorevole alla vita come la conosciamo), non c'è solo bisogno dell'acqua ma anche di temperature sopra lo $0^\circ C$ e pressione sopra 6.1 mbar (vedi figura 4.2). Tale condizioni non sono inusuali per Marte, per esempio nelle pianure basse in estate all'inizio del pomeriggio. Durano solo poche ore e solo pochi millimetri sotto la superficie possono riscaldarsi sopra lo $0^\circ C$. A causa della pressione bassissima, qualsiasi ghiaccio che si trovi in superficie (la mattina per esempio) sublima nell'atmosfera ben prima di sciogliersi.

In tali condizioni dove si trova l'acqua liquida? Probabilmente a qualche migliaia di metri sotto la superficie, dove l'acqua presente nei pori del sottosuolo può essere riscaldata dai flussi geotermici.

4.1.4 Il clima su Marte in un passato recente

Il clima che osserviamo oggi su Marte è probabilmente diverso dal clima che il pianeta aveva solo qualche migliaia di anni fa. Ci sono segnali chiari che il pianeta è in costante evoluzione su tali scale di tempo. Come sulla Terra, il clima globale di Marte dipende dai parametri orbitali, in particolare dall'inclinazione dell'asse di rotazione rispetto al piano orbitale (obliquità). Nel caso della Terra, le oscillazioni dell'obliquità sono piccole ($\pm 1.3^\circ$), ma hanno giocato un ruolo chiave nei cicli glaciali e inter-glaciali. Nel caso di

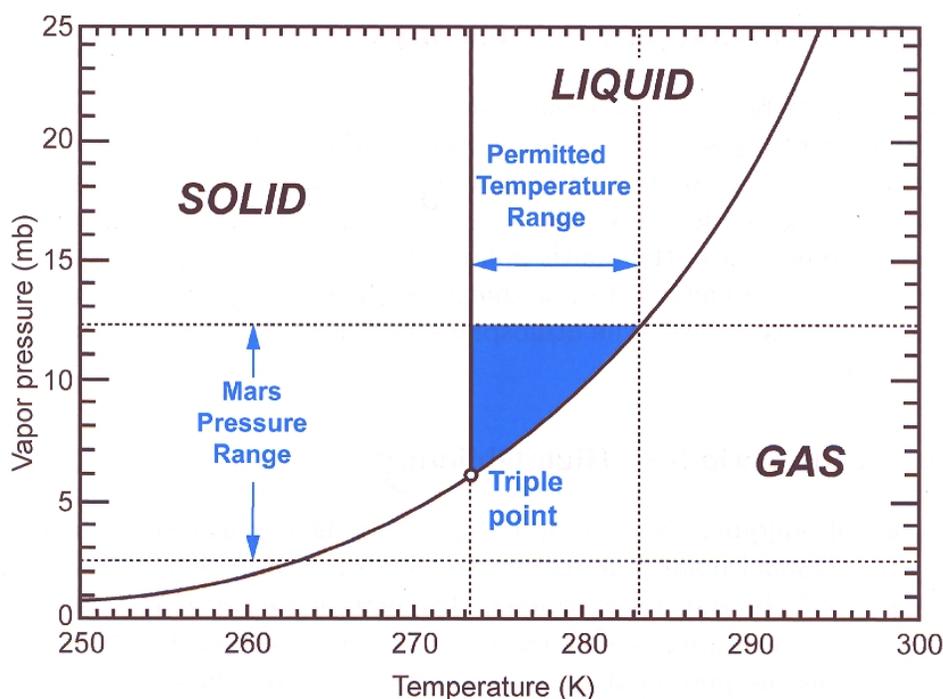


FIGURA 4.2— Diagramma delle fasi dell'acqua in funzione della temperatura e della pressione.

Marte, calcoli hanno mostrato che la sua obliquità cambiò drammaticamente e in modo casuale nel passato, tra 0° e più di 60° (il valore attuale è 25,2°). Chiaramente queste variazioni hanno avuto un impatto notevole sul clima di Marte. Questi cambiamenti non sembrano abbastanza per permettere la formazione di fiumi e laghi in un passato recente.

Però due tipi di morfologie hanno probabilmente avuto bisogno dell'acqua liquida per formarsi in un passato recente: gole ed eruzioni catastrofiche. Le gole sono formate da flussi di materiale che include una quantità significativa di acqua liquida. Sono state osservate sui muri di crateri d'impatto, di canyon, di dune e di canali (figura 4.6). Sono larghe 10–30 metri e raggiungono centinaia di metri di lunghezza. La loro affilatura e il fatto che esse coprono altre strutture geologiche giovani suggerisce che queste gole siano molto giovani, formate probabilmente nell'ultimo milione d'anni. La missione Mars Global Surveyor ha osservato alcune zone con 5 anni d'intervallo e ha rivelato la presenza di gole assente 5 anni fa! (vedi figura 4.7). Uno scenario possibile per la loro origine potrebbe essere una fuga di acque del sottosuolo, per es. da un serbatoio di acqua liquida localizzato ad un centinaio di metri di profondità. Un'altra possibile origine potremmo cercarla nei cambiamenti climatici del passato: per esempio, si pensa che il ghiaccio si accumuli su pendii di latitudine media durante l'autunno, l'inverno e la primavera, ma che questi pendii siano fortemente riscaldati (sopra il punto di fusione dell'acqua) per vari giorni durante l'estate.

Varie regioni di Marte esibiscono grandi canali (fino a 150 km di larghezza, migliaia di chilometri di lungo). Questi sembrano essere stati formati da eruzioni catastrofiche

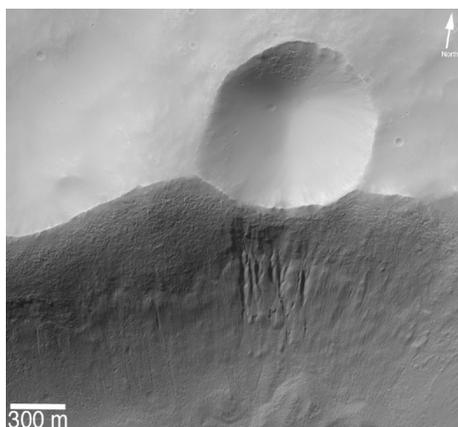


FIGURA 4.3— Un impatto di meteorite sul bordo di un cratere preesistente ha frantumato il sottosuolo, creando delle faglie per facilitare la fuoriuscita dell'acqua sottoterra.

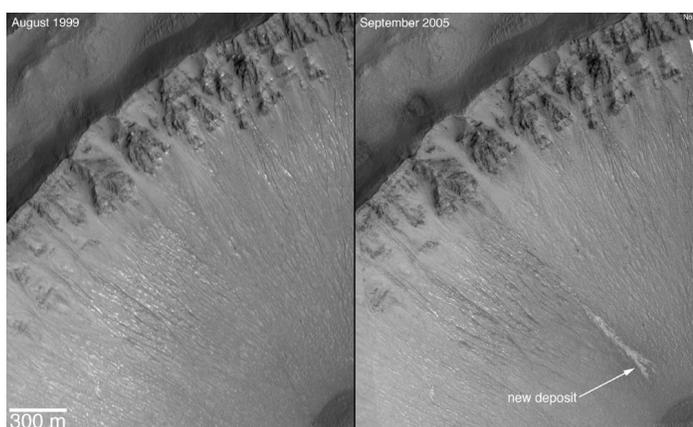


FIGURA 4.4— Nuove gole che si sono formate negli ultimi 5 anni. Osservazioni dalla sonda MGS.

di grandi quantità di acqua proveniente da sotto la superficie. Anche se la maggior parte di questi canali si sono formati miliardi di anni fa, si pensa che alcuni di loro siano molto più recenti (meno di 10 milioni di anni fa), per es. Athabasca Vallis. Per questo non c'è bisogno di un clima diverso da quello attuale, perché si pensa che l'acqua rilasciata in tale quantità possa scorrere per una distanza significativa prima di gelare. La presenza di acqua liquida sulla superficie è stata quindi probabilmente di corta durata.

4.1.5 Il clima su Marte in un passato remoto: 3 miliardi di anni fa

Circa la metà della superficie di Marte è estremamente antica (ha più di 3.8 miliardi di anni), quando la frequenza di meteoriti che colpivano il pianeta era molto più alta di oggi. Si può stimare la sua età, perché è densamente craterizzato da questo periodo di bombardamenti pesanti. Questa porzione della superficie marziana, per la maggior parte negli altipiani australi, ha anche mantenuto la memoria del tempo in cui l'ambiente era molto diverso da quello che diventerà dopo. Ci sono prove che a questa epoca, acqua liquida era presente sulla superficie di Marte e poteva formare dei fiumi, dei laghi e magari anche un oceano. Un lungo tempo è richiesto per formare tali strutture, quindi si pensa che il clima sia stato compatibile con l'acqua liquida per un lungo periodo.

4.1.6 L'enigma del clima antico di Marte

Avere delle condizioni climatiche relativamente calde da permettere l'esistenza dell'acqua liquida in superficie su Marte 3.8 miliardi di anni fa è un'ipotesi improbabile. La maggior parte degli esperti pensa che all'epoca la luminosità del giovane Sole era minore del 25% del valore attuale. Dato che Marte è 1.5 volte più distante del Sole rispetto alla Terra, l'energia solare disponibile a quest'epoca su Marte era solo un terzo di quella che abbiamo oggi sulla Terra. In queste condizioni la temperatura d'equilibrio del

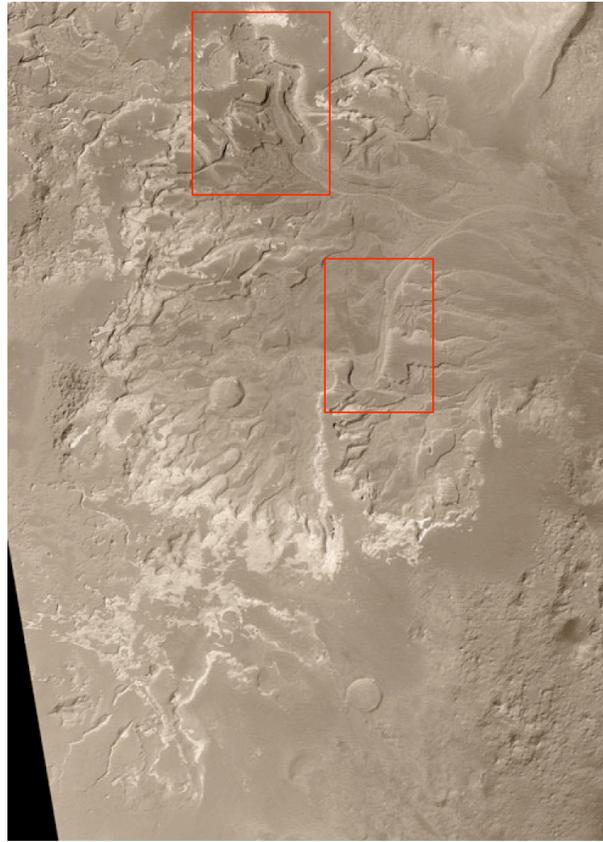


FIGURA 4.5— Eberswalde delta: resti di alluvioni sedimentari analoghe al delta di un fiume (MGS). L'osservazione di queste strutture caratteristiche fornisce la prova chiara e univoca che alcune valli di Marte hanno conosciuto lo stesso tipo di flusso su lunghi periodi di tempo come i fiumi sulla Terra.

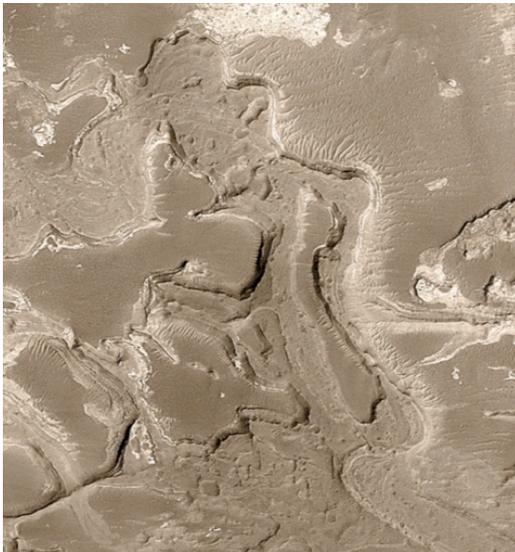


FIGURA 4.6— Ingrandimento di un canale nel delta Eberswalde.



FIGURA 4.7— Ingrandimento di un meandro nel delta Eberswalde.

pianeta dovrebbe essere stata -75°C , senza tener conto dell'atmosfera. La domanda è quindi: che cosa avrebbe potuto generare un clima così caldo e umido? Il modo più facile per riscaldare il giovane Marte è attraverso un effetto serra della sua atmosfera, ma è difficile conoscere la composizione chimica esatta dell'atmosfera di Marte in un passato remoto.

4.1.7 Il confronto con strutture geologiche terrestri

Malgrado che l'acqua liquida oggi non esista sulla superficie di Marte, osservazioni del Mars Global Surveyor, dal Mars Odyssey, e degli Exploration Rovers mostrano chiari segni di delta, di depositi di sale e di gole: tutti questi segni indicano che l'acqua liquida esisteva ad un certo punto nella storia di Marte.²

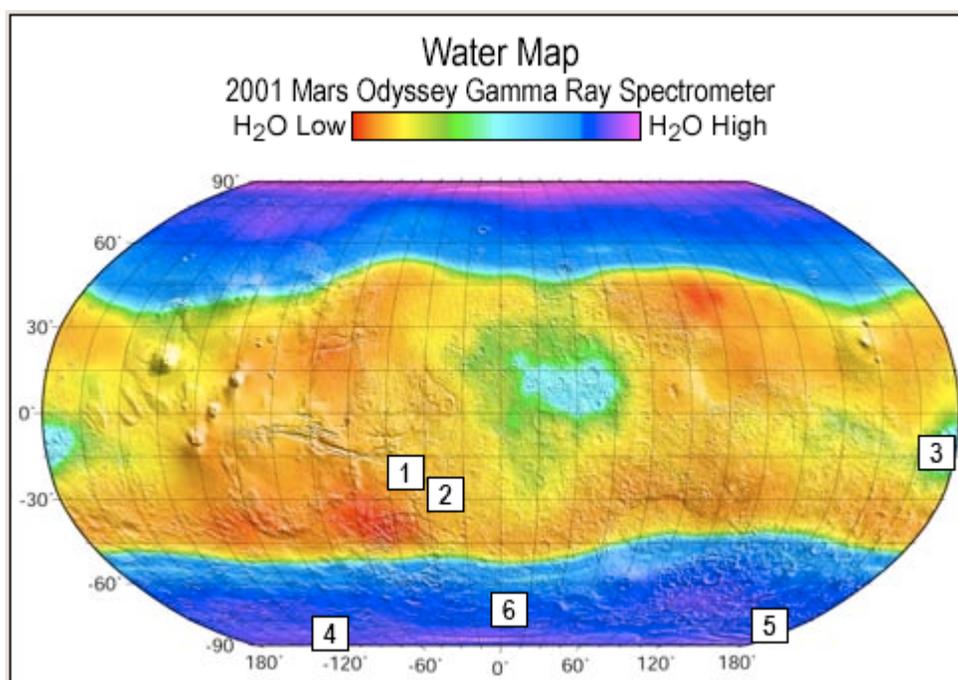


FIGURA 4.8— Questa carta di Marte mostra i posti dove sono stati osservati i segni lasciati dalla probabile presenza dell'acqua. I numeri 1-6 corrispondono alle figure 4.9 a 4.14. Credito: Mars Odyssey, NASA/JPL/UA.

4.1.8 Conclusione

La nuova era di esplorazione iniziata dalla NASA in 1997 e seguita dall'ESA nel 2003 sta rivoluzionando la nostra conoscenza del presente e del passato di Marte. Sempre più dati sono disponibili, ma alcuni di queste osservazioni sembrano contraddittorie. Pertanto non c'è ancora un consenso su che cosa sia realmente successo su Marte, la sua evoluzione climatica, la presenza di acqua liquida e della vita.

Sappiamo che ci sono stati vari clima su Marte, perché l'ambiente del pianeta ha cambiato fortemente con le oscillazioni dei parametri orbitali e con l'evoluzione del

²<http://phoenix.lpl.arizona.edu/mars161.php#map>

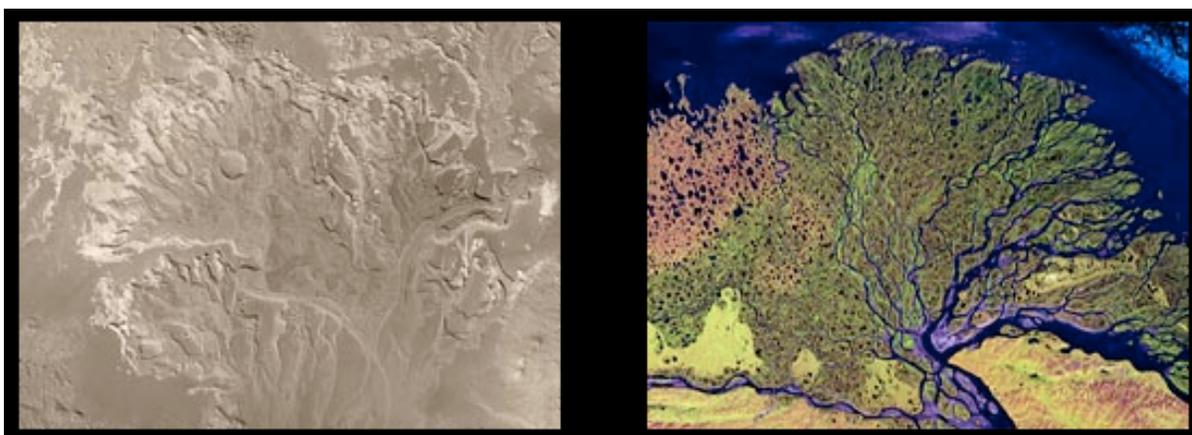


FIGURA 4.9— **Su Marte (sinistra)**: La presenza di meandri e di canali nel Delta Eberswalde hanno fornito le prime indicazioni che alcune valli di Marte hanno conosciuto lunghi periodi con acqua liquida (credito: MGS, NASA/JPL/Malin Space Science Systems). **Sulla Terra (destra)**: Appena prima di sfociare nel mare Laptev nel nord della Siberia, il fiume Lena si divide in molti piccoli fiumi che scorrono sulla pianura per formare il delta del fiume Lena. Con una lunghezza di 4'400 km, questo fiume è uno dei più lunghi al mondo (credito: Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus image, U.S. Geological).

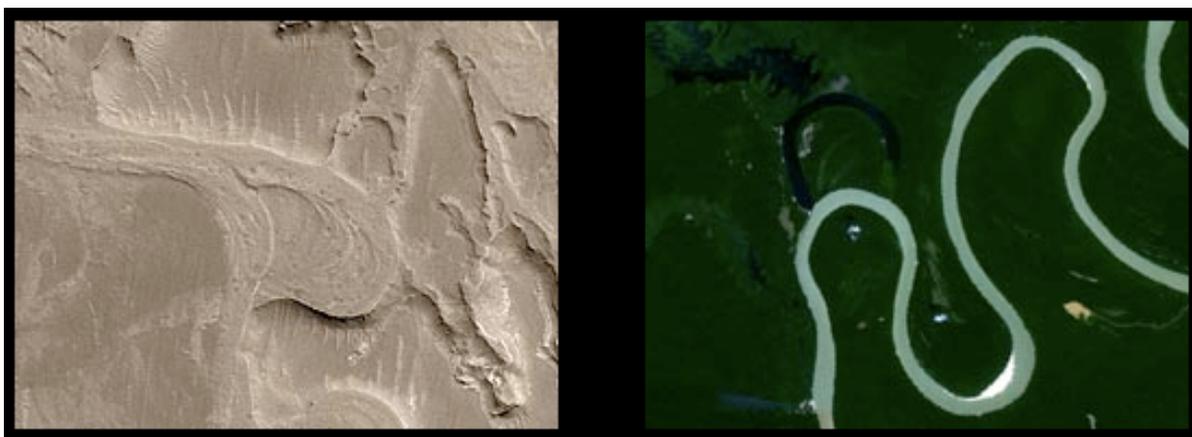


FIGURA 4.10— **Su Marte (sinistra)**: Questa immagine mostra un meandro nel delta Eberswalde ch'è stato tagliato quando il canale ha aggiustato il suo corso. Questo genere di strutture sono delle prove forti dell'esistenza continuata dell'acqua liquida nella storia di Marte (credito: MGS, NASA/JPL/Malin Space Science Systems). **Sulla Terra (destra)**: Questo meandro intagliato nel fiume Amazon è analogo ai meandri di Marte nel delta Eberswalde (credito: NASA, World Wind).

contenuto della sua atmosfera. Potremo concludere dicendo che Marte sembra aver conosciuto un clima compatibile con la presenza per lunghi periodi di acqua liquida sulla sua superficie 3.7–4.2 miliardi di anni fa. Dopo quest'epoca il clima non permise più l'acqua liquida, a parte brevi episodi. Per vari miliardi di anni, Marte probabilmente non fu compatibile con la vita, a parte forse nel profondo sottosuolo. Nuove missioni, come "Phoenix"³, lanciata in Agosto 2007 dovrebbe dare ulteriore risposte a queste domande.

³<http://phoenix.lpl.arizona.edu/>



FIGURA 4.11— **Su Marte (sinistra)**: Questa immagine in falso colore è presa dalla macchina fotografica panoramica del Rover Spirit. Essa mostra depositi di sale sul fondo del cratere Gusev su Marte. Questi sali forse ricordano la presenza passata dell'acqua su Marte, dato che essi sono facilmente concentrati in una soluzione liquida (credito: NASA/JPL/Cornell). **Sulla Terra (destra)**: Questa immagine mostra depositi di evaporazione vicino alle sorgenti, nella regione di Cuatrociénegas, Mexico. Essi costituiscono sedimenti che si formano dall'evaporazione dell'acqua salata (credito: John W. Holt, Institute for Geophysics, University of Texas).

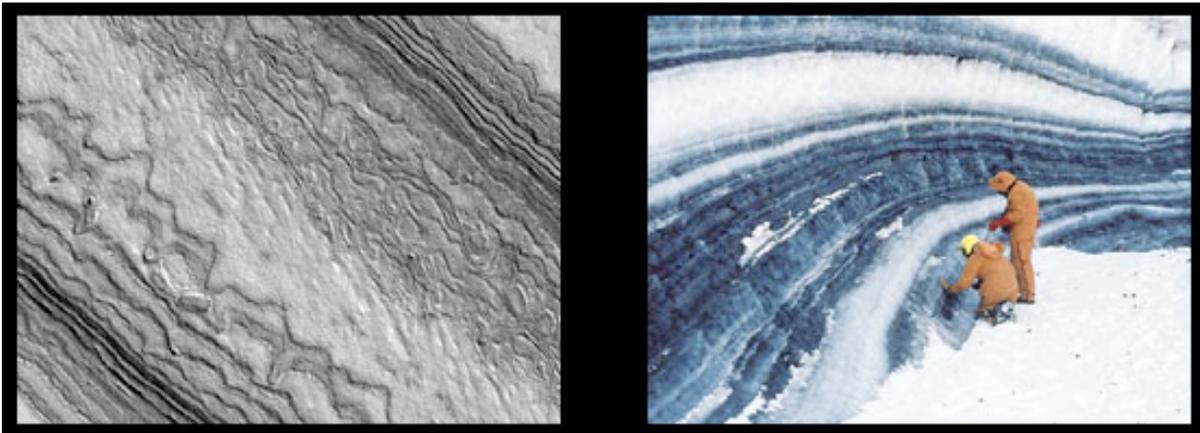


FIGURA 4.12— **Su Marte (sinistra)**: Questa immagine mostra strati coperti di brina nei poli di Marte. Si pensa che essa consista di polvere, ghiaccio e possibilmente sabbia. Malgrado la formazione di questi strati sia sconosciuta, essi potrebbero essere legati a cicli climatici su Marte, simili ai cicli glaciali sulla Terra (credito: MGS, NASA/JPL/Malin Space Science Systems). **Sulla Terra (destra)**: Questi strati di sedimenti e di ghiaccio si trovano nelle montagne David, vicino a Mawson Station in Antartide. Hanno impieghiato centinaia d'anni per formarsi (credito: Peter Harris, Geoscience Australia)

4.2 Esercizi

1. Ricercare nelle immagini di HiRISE (della missione MRO) strutture geologiche su Marte che vi ricordano simile strutture che esistono sulla Terra (come nelle figura 4.9 a 4.14). A cosa sono dovuti i segni di erosione presenti su Marte? Usate lo "HiRISE Online Image Viewer" disponibile a:

http://marsoweb.nas.nasa.gov/HiRISE/hirise_images/.

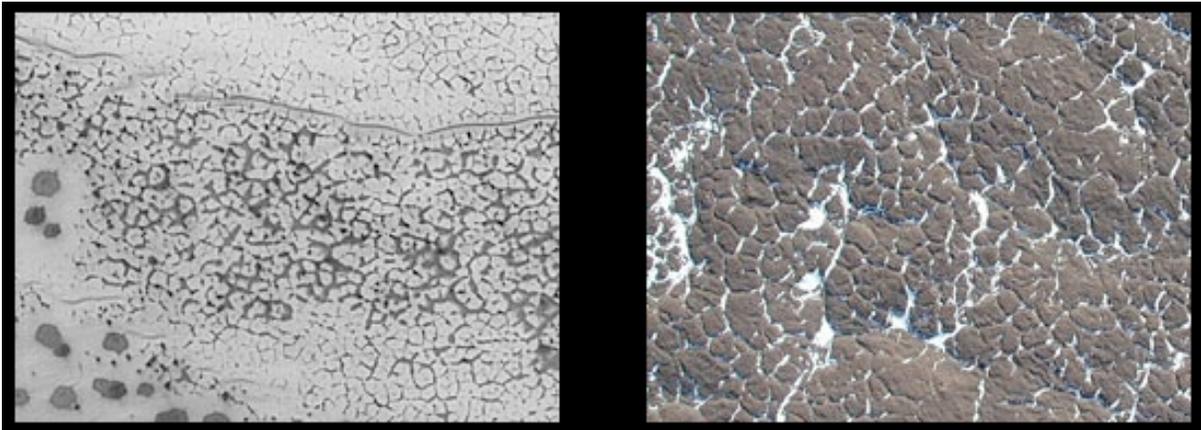


FIGURA 4.13— **Su Marte (sinistra)**: Questa immagine mostra un suolo con struttura poligonale nell'emisfero sud. L'esistenza di poligoni su Marte potrebbe indicare regioni dove il ghiaccio d'acqua si trova a pochi metri dalla superficie (credito: MGS, NASA/JPL/Malin Space Science Systems). **Sulla Terra (destra)**: Suoli poligonali sono comuni nella valle Beacon in Antartide e indicano la presenza di acqua liquida nello strato attivo del permafrost (credito: John W. Holt, Institute for Geophysics, University of Texas).

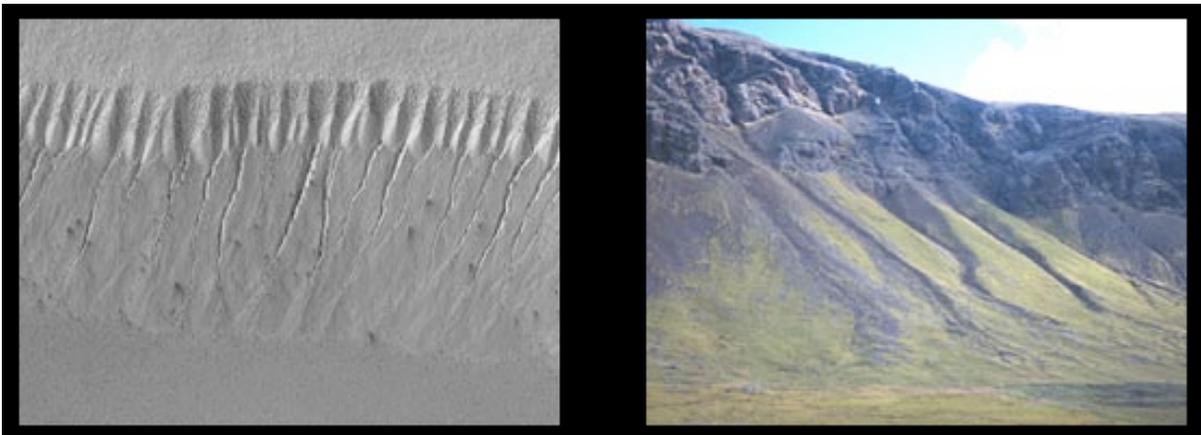


FIGURA 4.14— **Su Marte (sinistra)**: Gole su Marte. Gli scienziati dibattono ancora oggi sulla formazione di questi burroni, che di solito si formano con la presenza d'acqua liquida sulla Terra. Nelle condizioni atmosferiche attuali di Marte è però difficile avere l'acqua liquida (credito: Mars Global Surveyor, Mars Orbiter Camera image; NASA/JPL/Malin Space Science Systems) **Sulla Terra (destra)**: Questa foto mostra delle gole erose in Islanda molto simili a quelle trovate sulla superficie di Marte (credito: William K. Hartmann, Planetary Science Institute).

2. Ricercare su Internet perché si pensa che Europa, un satellite gelato di Giove, può ospitare la vita? La recente missione Galileo della NASA può essere un buon punto di partenza.



FIGURA 4.15— Tracce di erosione dall'acqua vicino alla rifugio Rambert, Vallese.

3.



Nel 1976, la missione Viking ha osservato su Marte una "strana" collina che assomigliava ad una faccia. Ricerare questa faccia sulle nuove immagini della missione Mars Odyssey (<http://themis.asu.edu/features/cydonia>), e valutare se si tratta veramente di un segno di vita intelligente.

Capitolo 5

Oltre il sistema solare

A differenza di una stella, un pianeta non emette luce: vediamo i pianeti del nostro sistema solare solo perché riflettono la luce del Sole. È quindi difficile vedere pianeti attorno ad altre stelle (a parte il Sole), perché la loro luce (riflessa) è molto più debole della luce della stella (vedere nonostante il paragrafo 5.1.4). Di conseguenza per scoprire un pianeta attorno ad una stella esterna, è più efficace misurare "l'effetto" che questo pianeta esercita sulla stella. Questo effetto può essere di tre tipi: il primo è un effetto indotto dalla forza gravitazionale tra il pianeta e la stella. Il secondo è un effetto di oscuramento della luce stellare quando il pianeta passa direttamente davanti la stella. Il terzo è un effetto di lente gravitazionale.

5.1 Come scoprire un pianeta extra-solare?

5.1.1 La spettroscopia Doppler

Quando un pianeta orbita attorno alla sua stella, le forze gravitazionali dovute al pianeta agiscono sulla stella e creano una leggera oscillazione di essa attorno al centro di gravità del sistema stella-pianeta. È una situazione analoga al lanciatore di olimpico di martello, quando gira su se stesso all'inizio del suo lancio: La palla compie un grande giro mentre l'uomo, più massiccio, compie un piccolo giro. La palla è mantenuta sulla sua traiettoria circolare dalla forza di tensione nel filo. Il pianeta è mantenuto in orbita dalla forza di attrazione gravitazionale che la stella esercita su di esso; non c'è un filo tra il pianeta e la stella, ma la situazione delle forze è analoga.

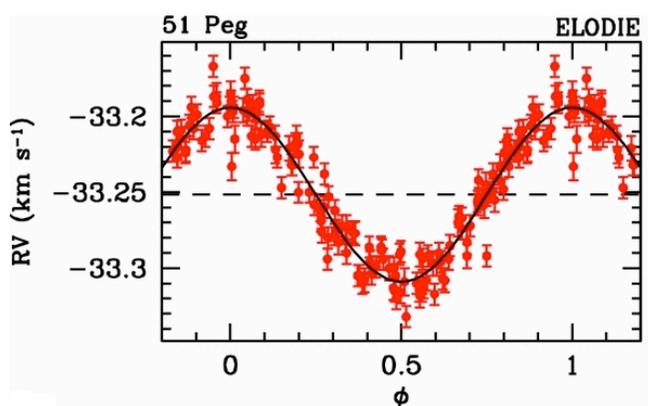


FIGURA 5.1— Velocità radiale della prima stella di tipo solare (51 Pegasi) attorno alla quale la presenza di un pianeta (chiamato 51 Pegasi b) è stata osservata da Mayor & Queloz (Osservatorio di Ginevra). L'ampiezza massima dell'oscillazione della stella è di ~ 0.05 km/s.

Per capire meglio questo concetto, vedere l'animazione Flash "How Radial Velocity works" disponibile a <http://library.thinkquest.org/C003763/flash/extrasolar1.htm>; vedere anche <http://astronautica.com/detect.htm>.

La velocità di questo moto stellare indotto dalla presenza di un pianeta è molto piccola rispetto alla velocità di rotazione delle stelle attorno al centro galattico. Per esempio il Sole gira ad una velocità di circa 200 km/s, mentre le velocità indotte dalla presenza di pianeti sono di solito del ordine di 0.05 km/s (o meno)!

Le velocità stellari si misurano grazie all'**effetto Doppler** che modifica la frequenza delle righe d'assorbimento nello spettro della luce stellare. Se la sorgente dell'onda si sposta rispetto a un osservatore, la lunghezza d'onda (e la frequenza) si modificano. L'esempio più conosciuto di quest'effetto è il cambiamento di frequenza dell'onda sonora di una sirena di una macchina della polizia quando passa davanti a noi.

Nel suo moto di oscillazione, quando la stella si avvicina alla Terra, le onde luminose si comprimono e si spostano verso lunghezze d'onde più corte (verso il blu). Invece quando la stella si allontana da noi, le onde luminose "si allungano" verso lunghezze d'onde più lunghe (verso il rosso). Possiamo scoprire questi spostamenti paragonando spettri stellari con spettri ottenuti in laboratorio, e calcolare così la velocità radiale della stella. Osservando ripetutamente la stella, misuriamo la variazione completa della velocità nel tempo (figura 5.1).

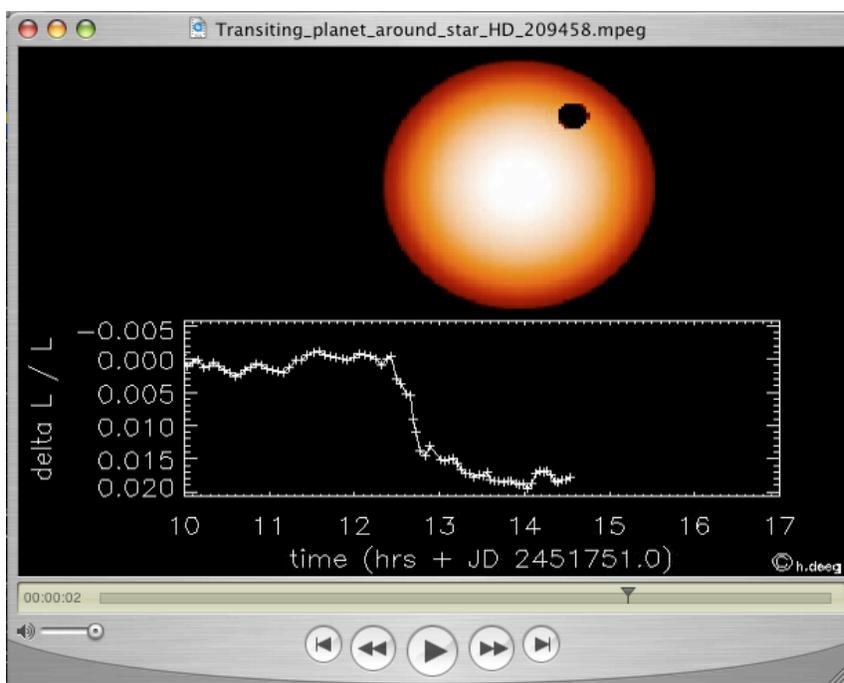


FIGURA 5.2— Animazione del transito di un pianeta davanti alla stella HD 209458. In ordinata trovate la variazione di luminosità ($\Delta L/L$) e in ascissa il tempo (in ore). Credito: Hans-Joerg Deeg & Garrido, Instituto de Astrofísica de Canarias.

Grazie a queste osservazioni di velocità, possiamo dedurre la massa del pianeta: un pianeta massiccio avrà un effetto maggiore sulla stella che un pianeta leggero, causando

una maggiore variazione di velocità. Il periodo di rivoluzione (il tempo che mette un pianeta per girare attorno alla sua stella) si legge direttamente sul grafico della velocità: è il tempo che separa due picchi. Con il periodo del pianeta e la massa della stella, si può calcolare la distanza che separa la stella dal pianeta e sapere per esempio se il pianeta si trova nella zona abitabile.

5.1.2 La diminuzione della luminosità

Quando un pianeta extra-solare transita davanti alla sua stella, la oscura un po' e quindi noi possiamo osservare una leggera diminuzione della sua luminosità, dell'ordine di 2-3 percento (figura 5.2). Osservazioni molto precise sono necessarie per "vedere" un pianeta, ma addirittura alcuni telescopi amatoriali equipaggiati di CCD (insieme ad un accurato trattamento delle immagini) sono oggi in grado di raggiungere questo livello di precisione. Per scoprire nuovi pianeti con questa tecnica, si devono però osservare molte stelle durante lunghi periodi di tempo.

5.1.3 Il fenomeno di lente gravitazionale e la scoperta di pianeti

Nella teoria della relatività generale di Einstein, la presenza di massa curva lo spazio-tempo. Il risultato è che il cammino dei raggi di luce non è più una linea dritta, ma una linea deviata dalla massa (figura 5.3). Questo fenomeno si chiama "lente gravitazionale" in analogia con la deviazione della luce in una lente.

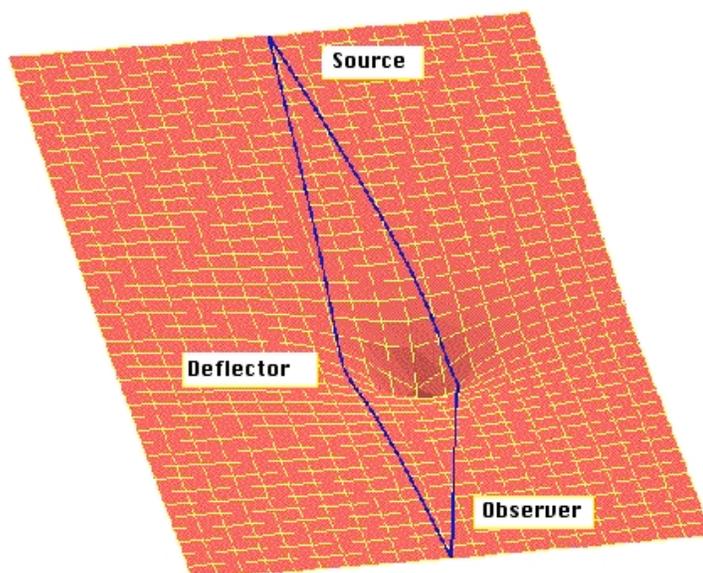


FIGURA 5.3— Due raggi di luce (blu) emessi da una sorgente (Source) sono deviati dalla presenza di un corpo massiccio (Deflector) al centro della figura perché lo spazio-tempo è curvato. Credito: <http://astro.berkeley.edu/~jcohn/lens.html>

Insieme al fenomeno di deviazione occorre un **aumento della luminosità apparente** della sorgente perché i raggi di luce siano "piegati" verso l'osservatore invece di continuare il loro cammino che avrebbe evitato l'osservatore in assenza di massa diflettore.

In caso di allineamento perfetto tra la sorgente, la massa diflettore e l'osservatore, si osserva un anello completo chiamato "Einstein ring" (figura 5.4). Nel caso in cui l'allineamento non è perfetto, osserviamo solo pezzi di arco come nel caso di Abell 1689 (vedere il poster nel corridoio).

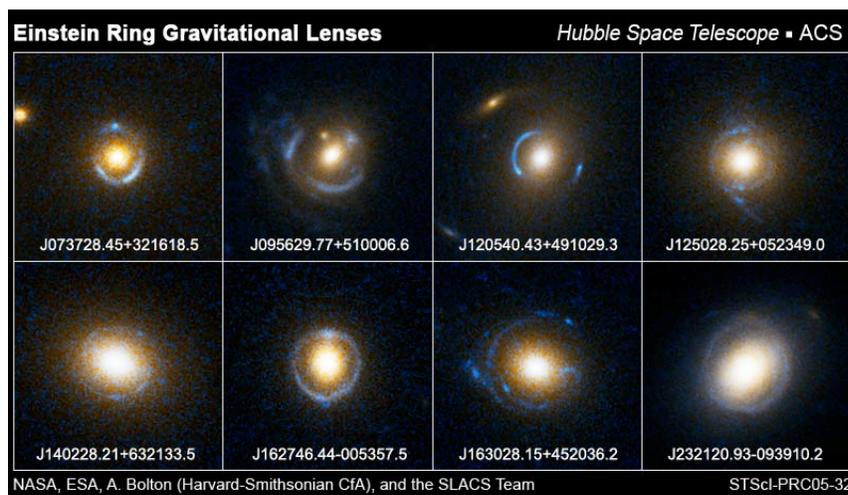


FIGURA 5.4— I deboli anelli blu in queste immagini del telescopio spaziale Hubble sono dei esempi di "Einstein rings". In questo caso, non è una stella a creare la deviazione della luce, ma sono galassie ellittiche gigante che si trovano a 2–4 miliardi di anni-luce dalla Terra. Le sorgente sono galassie lontanissime che si trovano a circa due volte la distanza delle galassie ellittiche. Credito: NASA, ESA, e il SLACS Survey team.

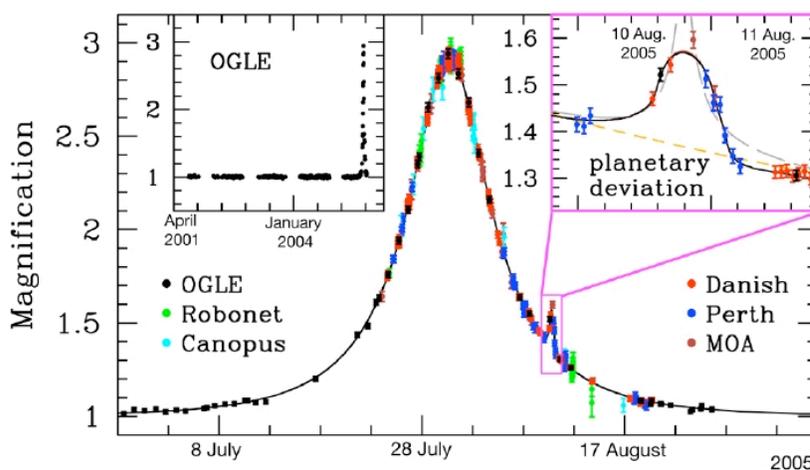
Nel caso in cui un stella (nel foreground) passi davanti ad'un'altra stella (nel background), osserviamo un apparente aumento della luminosità della stella nel sottofondo. Se la stella nel foreground è accompagnata da un pianeta, accade un secondo aumento di luminosità (più modesto) che si sovrappone al primo, come nella figura 5.5.

5.1.4 Vedere il pianeta direttamente

In casi eccezionali si può direttamente vedere il pianeta se esso si trova abbastanza lontano dalla sua stella. Attorno alla nana bruna 2M1207, astronomi di ESO hanno osservato un pianeta usando un sistema di ottica adattativa (che migliora la risoluzione ottica delle immagini, vedi figura 5.6). Questo compagno planetario è due volte più lontano dalla sua stella rispetto alla distanza di Nettuno dal Sole (circa 55 AU). Poter osservare un pianeta direttamente è molto importante perché permette di studiare in dettaglio le caratteristiche fisiche del pianeta, in particolare la sua atmosfera (per scoprire i segni della vita).

5.2 I pianeti come la Terra

L'analisi spettrale di **dischi proto-planetari** attorno a giovani stelle mostra che nel loro interno esistono elementi (silicati cristallini, trovati per esempio nella sabbia) che costituiscono gli ingredienti fondamentali per la formazione di pianeti rocciosi come la



Light Curve of OGLE-2005-BLG-390

ESO PR Photo 03b/06 (January 25, 2006)



FIGURA 5.5— Dall'Aprile 2001 fino al Gennaio 2004, la stella OGLE-2005-BLG-390 non ha mostrato nessun cambiamento di luminosità (vedi l'inserto in alto a sinistra). Improvvisamente, dall' 8 Luglio 2005 la sua luminosità comincia ad aumentare per raggiungere una luminosità 3 volte maggiore. Tra il 10 e l'11 agosto 2005, un secondo picco nella curva della luminosità è stato osservato grazie ad una retta di telescopi (vedi l'inserto in alto a destra). Credito: OGLE, PLANET/RoboNet Collaboration, ESO.

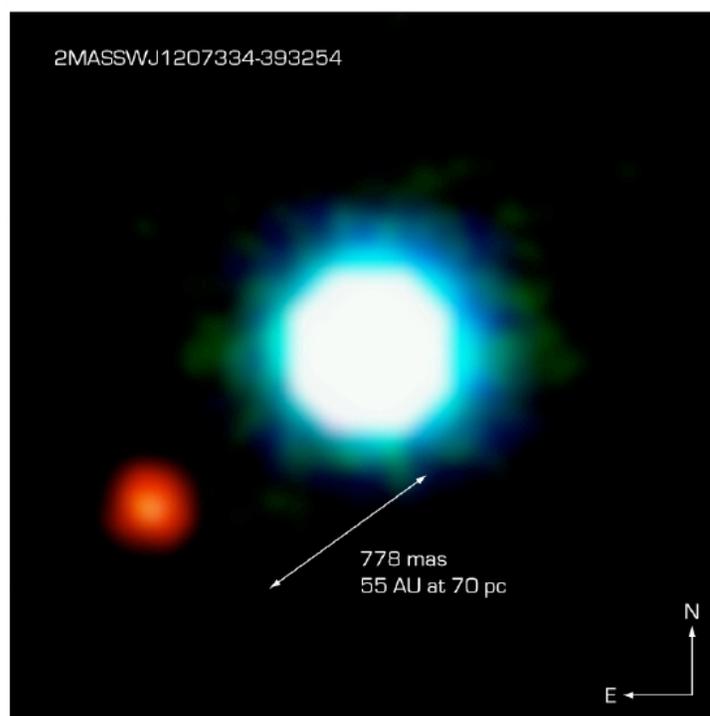
Terra. Questo risultato suggerisce che la formazione di pianeti come la Terra non sia così rara.¹

Il pianeta scoperto usando la tecnica della lente gravitazionale attorno alla stella OGLE-2005-BLG-390 (figura 5.5) è un **pianeta simile alla Terra**: è solo 5 volte più massiccio (quando il primo pianeta 51 Pegasi b era 150 volte la massa della Terra, circa la metà della massa di Giove) ed orbita ad una distanza di 2.6 AU. Tuttavia, poiché la sua stella ha solo il 20% della luminosità del Sole, la temperatura sulla sua superficie è di -220°C .

Un altro **pianeta simile alla Terra**², il più piccolo dei pianeti extra-solari, ha un raggio solo del 50% maggiore di quello terrestre e può avere l'acqua liquida in superficie. Con 5 volte la massa della Terra, questo pianeta orbita attorno ad una nana rossa in 13 giorni. Questa nana rossa si trova solo ad una distanza di 20.5 anni-luce ed era già conosciuta per avere un altro pianeta (della massa di Nettuno). Il nuovo pianeta extra-solare è quindi molto vicino alla sua stella (14 volte più vicino che la Terra). Dato che la sua stella, Gliese 581, è più piccola del Sole e quindi poco luminosa, il pianeta (chiamato Gliese 581c) si trova nonostante nella zona abitabile. La temperatura è stimata tra 0 e 40°C , permettendo la presenza di acqua liquida su Gliese 581c.

¹<http://www.eso.org/outreach/press-rel/pr-2004/pr-27-04.html>

²<http://www.eso.org/public/outreach/press-rel/pr-2007/pr-22-07.html>



NACO Image of the Brown Dwarf Object 2M1207 and GPCC

ESO PR Photo 26a/04 (10 September 2004)

© European Southern Observatory



FIGURA 5.6— Il primo pianeta extra-solare osservato direttamente. Esso orbita attorno alla nana bruna 2M1207 (al centro dell'immagine) e si trova molto lontano dalla stella (55 volte la distanza tra la Terra e il Sole). È circa 100 volte più debole della nana bruna. Credito: ESO/UCLA/CNRS.

5.2.1 Quanto è probabile trovare una vita "avanzata" su un pianeta extra-solare?

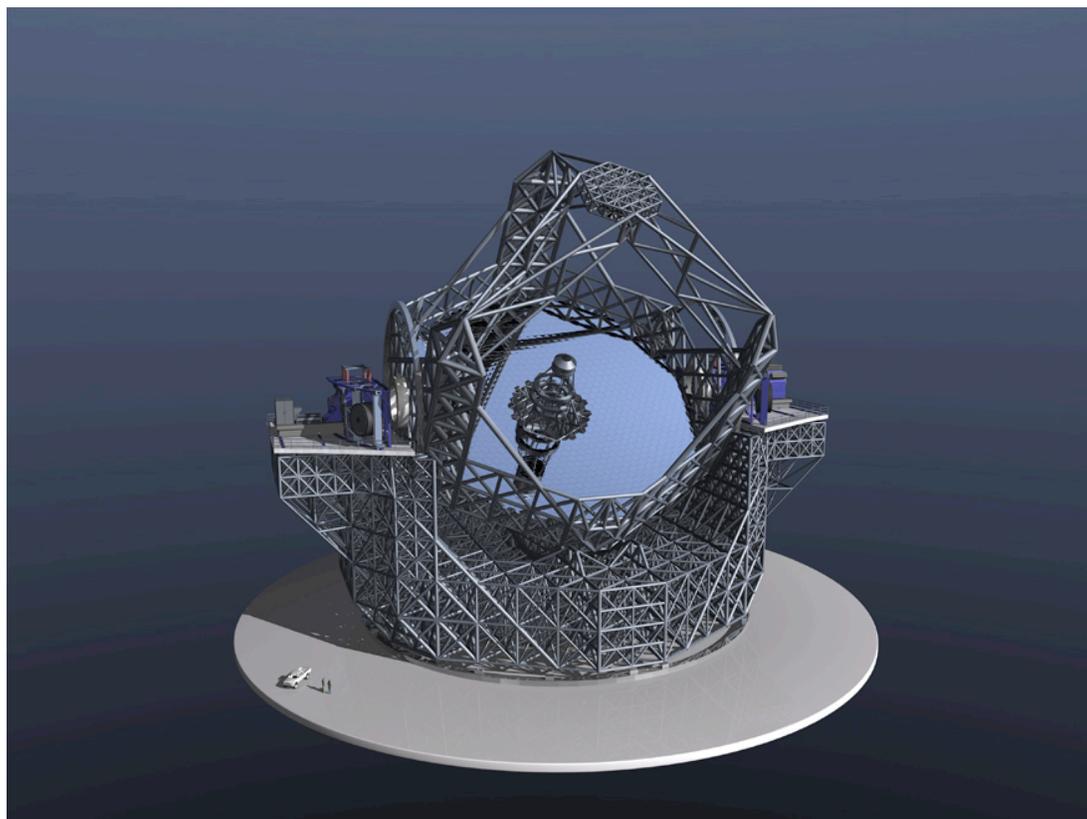
La ricerca di pianeti come Giove in sistemi planetari esterni può dare un elemento di risposta, nel senso che i pianeti massicci come Giove "ripuliscono" un sistema planetario, attraendo asteroidi e comete. Quest'azione diminuisce pertanto la probabilità di collisione mortale con pianeti più piccoli che si trovano in questi sistemi e aumenta la probabilità di sviluppare la vita su questi piccoli pianeti.

Il programma di osservazione a larga scala OGLE ha osservato più di 100 milioni di stelle, tra questi 200 casi di lente gravitazionale sono stati trovati (stella con stella). L'assenza di picchi secondari (dovuti a compagni planetari) in questi casi permette di dire, statisticamente, che meno del 30% di stelle di tipo M hanno compagni della massa di Giove a una distanza tra 1.5 e 4 AU. Questo risultato suggerisce che la presenza di vita sviluppata su altri pianeti non è così comune.

5.3 Il futuro

Alla fine di Luglio 2007 la lista dei pianeti confermati (usando le tecniche sopra elencate) contiene 182 pianeti (<http://exoplanets.org/planets.shtml>). Questa lista sta cre-

scendo rapidamente dato che molti gruppi di astronomi si stanno attivando per scoprirne altre. In più nuovi telescopi sempre più potenti sono in fase di costruzione: per esempio, il nuovo telescopio spaziale (James Webb Telescope³) di 6.5 m di diametro e il telescopio gigante di ESO (Extremely Large Telescope⁴) con 40 m di diametro.



The European Extremely Large Telescope
(Artist's Impression)

ESO PR Photo 46/06 (11 December 2006)



FIGURA 5.7— Il "European Extremely Large Telescope": modello 3D del futuro telescopio gigante europeo. Con 42 metri di diametro, lo specchio principale è composto da 906 segmenti, ogni uno largo di 1.45 m. La massa totale che si sposta durante la notte è di 5500 tonnellate. Lo specchio secondario ha un diametro di 6 m. Un terzo specchio (4.2m) trasmette la luce al sistema di ottica adattativa composto di 2 specchi: uno di 2.5 m di diametro con 5000 pistoni che possono correggere la qualità dell'immagine migliaia di volte al secondo e uno di 2.7 m per le correzioni finali. Un tale sistema a 5 specchi risulta in un'eccezionale qualità d'immagine. Notate la macchina e le due persone in fondo a sinistra per dare un'idea della scala. Credito: ESO.

³<http://www.stsci.edu/jwst/>

⁴<http://www.eso.org/public/astronomy/projects/e-elt.html>

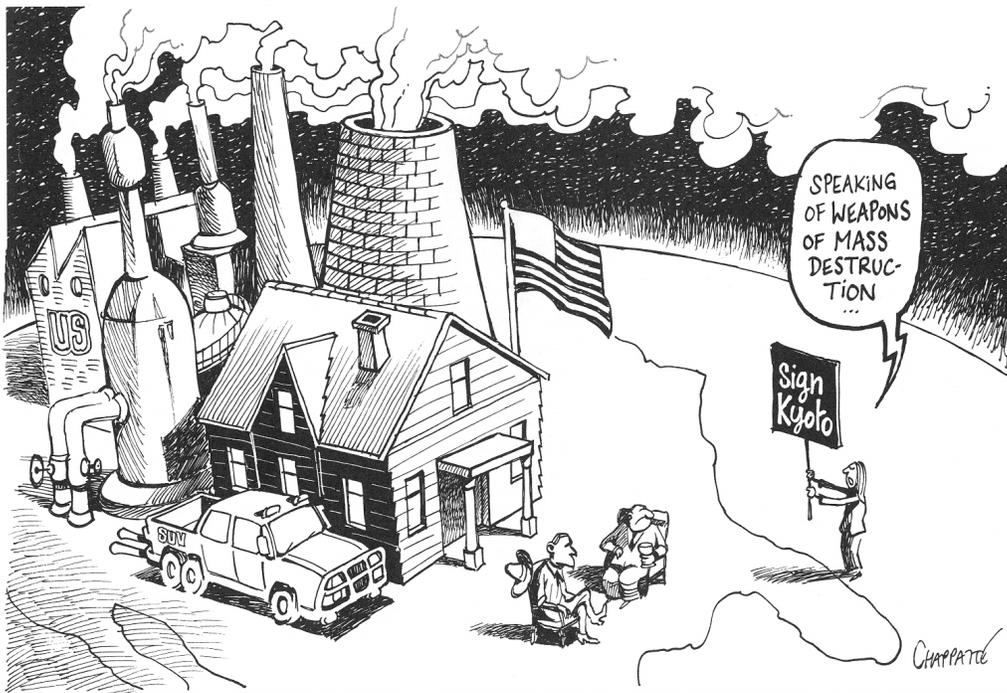
5.4 Esercizi

1. Come fanno gli astronomi per sapere che la galassia di Andromeda (M31) si sta avvicinando alla nostra galassia (la Via Lattea) ad una velocità di 300 km/s? Dato che Andromeda è distante di $2.55 \cdot 10^6$ anni-luce, in quanto tempo entrerà in collisione con noi?
2. Supponete un sistema planetario simile al nostro sistema Sole-Terra (dimensione della stella, distanza stella-pianeta) distante 20 anni-luce dalla Terra. Se questo pianeta, simile alla Terra, passasse davanti alla sua stella, quale sarebbe la diminuzione (in percentuale) della luminosità apparente della stella, visti da un distanza di 20 anni-luce? Supponete per semplicità che la luminosità della stella sia uniforme sulla sua superficie e proporzionale alla sua superficie non-oscurata apparente. Calcolare l'angolo sostenuto sul cielo dall'immagine della stella e dal pianeta.

Capitolo 6

L'emergere dell'intelligenza

In questo capitolo ci concentreremo non solo sull'emergere della vita nell'universo, ma sull'emergere della vita **intelligente**. L'unica forma di vita intelligente che conosciamo nell'universo è quella della razza umana, anche se, come lo dice Stephen Hawkins, "much of the human behaviour throughout history has been pretty stupid, and not calculated to aid the survival of the species".



La domanda fondamentale è quindi: perché ci siamo evoluti verso quello che siamo oggi: una nuova specie di scimmie, intelligenti, sprovvisti di peli e che cammina in una posizione eretta.

6.1 La selezione naturale Darwiniana

Gli individui appartenenti ad una stessa specie sono simili ma non uguali, si differenziano l'uno dall'altro per le caratteristiche morfologiche, fisiologiche e comportamenta-

li. In funzione dell'ambiente in cui una specie vive, alcune caratteristiche avvantaggeranno l'organismo che le porta, altre saranno indifferenti e altre ancora ostacoleranno l'attività vitale del portatore di tali caratteristiche.

La teoria della **selezione naturale** proposta da Charles Darwin (1859) prevede che sia l'ambiente a selezionare le specie, infatti è l'ambiente a scegliere tra le diverse specie, quella che presenta le caratteristiche che meglio la adattano all'ambiente in cui vive:

Gli individui **meglio attrezzati** in un certo ambiente avranno vita più facile, si procureranno più facilmente il cibo e si accoppieranno più rapidamente degli altri individui della stessa specie che non presentano tali caratteristiche. Gli individui con le caratteristiche **meno adatte** alla situazione ambientale avranno difficoltà a svolgere le fondamentali funzioni vitali e molti di essi non riusciranno ad arrivare all'accoppiamento di conseguenza non trasmetteranno i propri geni alle generazioni successive. Con il passare delle generazioni si avrà una progressiva selezione dei geni buoni e la scomparsa dei geni inutili o dannosi. La specie evolverà progressivamente conservando le caratteristiche che la rendono meglio adattata all'ambiente e eliminando tutte quelle caratteristiche che sono di ostacolo alla vita della specie. Si arriverà così ad una situazione di equilibrio tra ambiente e popolazione che persisterà finché un cambiamento ambientale (p. es. climatico) non innescherà un nuovo fenomeno evolutivo nella specie. Se questo cambiamento è drastico (come quello di 70 milioni di anni fa che ha provocato la fine dei dinosauri), parecchie specie possono sparire.

In sintesi un processo Darwiniano segue 6 tappe (o regole) fondamentali:

1. Deve operare su un "modello" di qualche tipo: in genetica si tratta delle catene di DNA.
2. Sono fatte copie di questi modelli: generazione dopo generazione, nuovi modelli (o individui) sono creati mescolando l'informazione (DNA) di due genitori.
3. I modelli devono variare occasionalmente (mutazioni, errore di copia, ecc).
4. Deve esistere una certa competizione per le risorse dell'ambiente.
5. Il successo riproduttivo delle variazioni è influenzato dall'ambiente (selezione naturale).
6. La composizione della generazione successiva di modelli dipende da quali variazioni sono sopravvissute. La generazione successiva sarà una variazione attorno ai modelli di successo della generazione presente.

6.1.1 Una nuova fase nell'evoluzione umana

Questa sezione è tratta da una conferenza pubblica del famoso fisico e cosmologo inglese Stephen Hawking (<http://www.hawking.org.uk/text/public/life.html>).

Secondo S. Hawkins, con l'umano l'evoluzione ha raggiunto un punto critico, paragonabile per importanza all'invenzione del DNA: lo sviluppo del linguaggio, in particolare il linguaggio scritto. Ciò significa che l'informazione può passare di generazione

in generazione non solo sotto forma genetica (cioè nel DNA). Negli ultimi 10'000 anni non c'è stato un cambiamento notevole nel DNA umano, ma la quantità di conoscenza passata da generazione a generazione è cresciuta enormemente.

Il DNA umano contiene circa 3 miliardi di acidi nucleici, ma la maggior parte dell'informazione è ridondante o non attiva. La quantità di informazione utile nei nostri geni è probabilmente 100 milioni di bits¹. Un romanzo contiene circa 2 milioni di bits di informazione. Una biblioteca nazionale può contenere 5 milioni di volumi, quindi 10¹³ bits, 100'000 volte più bits che nel DNA.

Ancora più importante è il fatto che l'informazione sui libri può essere cambiata e aggiornata rapidamente. Abbiamo avuto bisogno di 5–6 milioni di anni per evolvere dall'antenato comune che abbiamo con lo scimpanzé. Durante questo tempo l'informazione utile del nostro DNA è probabilmente cambiata di alcuni milioni di bits (oggi abbiamo ancora più del 98% di DNA comune con gli scimpanzé). Quindi il tasso di evoluzione biologica è di circa 1 bit all'anno, mentre ci sono 50'000 libri pubblicati ogni anno (solo in inglese). Certo che la maggior parte di questi non sono utili alla vita, ma anche così, il tasso di crescita dell'informazione è milioni (se non miliardi) di volte superiore a quello del DNA.

Questo significa che l'umano è entrato in una **nuova fase della sua evoluzione**. All'inizio l'evoluzione procedeva con la selezione naturale a partire da mutazioni casuali. Questa fase "Darwiniana" è durata 3.5 miliardi di anni e ha prodotto la nostra specie, che ha sviluppato un linguaggio per scambiarsi l'informazione. Negli ultimi 10'000 anni siamo in una fase di trasmissione "esterna" dell'informazione: l'informazione interna, trasmessa alle prossime generazioni nel nostro DNA, non è (quasi) cambiata; invece l'informazione esterna, in libri o altre forme di immagazzinamento durevoli, è cresciuta enormemente. Siamo più che i nostri geni! Non siamo più intelligenti dei nostri antenati delle caverne, ma ciò che ci distingue sono le conoscenze che abbiamo accumulato nei ultimi 10'000 anni (soprattutto negli ultimi 300). Sembra quindi legittimo accettare una visione più ampia ed includere l'informazione trasmessa esternamente, insieme al DNA, nell'evoluzione della razza umana.

Inoltre, saremo presto in grado di cambiare (e migliorare) il nostro DNA. Nel 2003, il "Human Genome Project (HGP)"² è stato finito. Esso ha identificato tutti i circa 25'000 geni nel DNA umano e ha determinato le sequenze dei 3 miliardi di acidi nucleici che formano il DNA. Naturalmente c'è ancora tanto lavoro per capire il **significato** di tutti questi geni, ma si può immaginare che tra poco saremo in grado di migliorare il nostro DNA. All'inizio per cambiare difetti genetici semplici, come quelli controllati da un gene unico, ma anche per migliorare altre caratteristiche umane, come la memoria, l'intelligenza, la resistenza alle malattie, la durata della vita, ecc.

Infine, siamo (o saremo presto) anche la prima specie in grado di impedire una collisione devastante con una meteorite (figura 6.2). Questi eventi catastrofici hanno cambiato radicalmente il corso della storia della vita sul nostro pianeta. Come vedremo, cinque volte negli ultimi 500 milioni di anni, la maggior parte delle forme di vita hanno semplicemente cessato di esistere. Si pensa che alcuni di questi eventi fossero

¹Un bit di informazione è la risposta sì/no a una domanda, i famosi 1/0 binari. 1 Byte = 8 bits.

²http://www.ornl.gov/sci/techresources/Human_Genome/home.shtml

dovuti a collisioni con meteoriti di grande dimensione. Prevenire queste collisioni ha chiaramente un'influenza drastica sull'evoluzione della vita terrestre.

6.1.2 Introduzione ai algoritmi genetici

Per capire meglio come la selezione naturale funziona, possiamo fare degli esperimenti con un modello semplice dell'evoluzione Darwiniana, i algoritmi genetici. Per un introduzione sull'uso dei algoritmi genetici, vedere questi due eccellenti articoli di P. Charbonneau:

<http://adsabs.harvard.edu/abs/1995ApJS..101..309C>

http://www.cs.uga.edu/~potter/CompIntell/no_tutorial.pdf

Attività in classe: dimostrare le varie applicazioni java del seguente sito web

<http://cs.felk.cvut.cz/~xobitko/ga/>

in particolare, guardare:

[GA Example \(1D func.\)](#)

[GA Example \(2D func.\)](#)

[GA Example \(TSP\)](#)

6.2 L'intelligenza

Questa sezione è tratta da: Scientific american (2006), special edition, "Becoming Human, Evolution and the Rise of Intelligence", Volume 16, Number 2.

Chiaramente in ogni specie **l'intelligenza** è una caratteristica "vincente" che è stata favorita dalla selezione naturale. Grazie a complessi ragionamenti logici, le probabilità di sopravvivenza aumentano notevolmente. In questo capitolo, proveremo a capire meglio perché l'intelligenza è "apparsa", o meglio, perché si è sviluppata fino ad un grado molto elevato, mai raggiunto da nessuna specie prima, ma che si verifica alla fine in una specie di scimmia sulla cui sopravvivenza, quasi nessuno avrebbe scommesso. Quasi senza peli, deboli (niente unghie affilate o denti taglienti), lenti con un andatura bipede accidentata, i primi umani potevano apparire a prima vista come uno dei più improbabili sopravvissuti sulla faccia della Terra. A parte che per il loro cervello...

Vedremo il ruolo fondamentale che il **clima** ha giocato nella storia dell'evoluzione umana. È da notare che, dato il carattere casuale del clima, la vita poteva prendere una tutt'altra via. Basta pensare a come sarebbe la faccia della Terra se 70 milioni di anni fa, la cometa che è stata (probabilmente) responsabile di un drammatico cambiamento climatico globale provocando la scomparsa dei dinosauri, non avesse colpito la Terra. La storia della vita sulla Terra comprende numerose catastrofi climatiche associate ad estinzioni di massa, dove a volte più del 90% delle specie sono scomparse

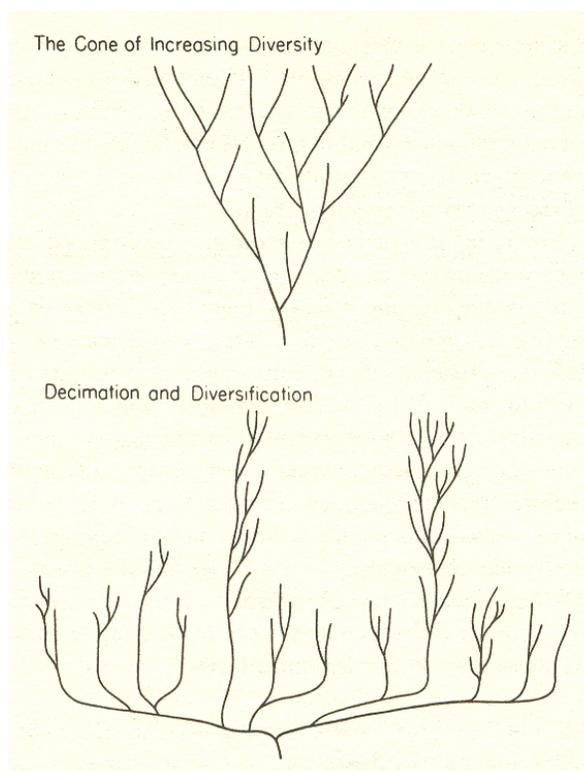


FIGURA 6.1 — Sopra: l'iconografia convenzionale, ma sbagliata, del cono di diversità crescente. Sotto: il modello rivisitato della diversificazione e decimazione, suggerito da S. J. Gould (1989)

(vedi Gould (1989) per una nuova visione dell'evoluzione delle specie attraverso fasi di diversificazione e di decimazione come sulla figura 6.1).

Cinque volte negli ultimi 500 milioni di anni, la maggior parte delle forme di vita della Terra hanno cessato di esistere. Il primo di questi eventi accadde alla fine del Ordovician, 443 milioni di anni fa. Il secondo, 374 milioni di anni fa, quasi alla fine del Devonian. Il più grande di tutti, alla fine del Permian 251 milioni di anni fa, ha cancellato 90% della vita negli oceani e il 70% delle piante e degli animali, anche gli insetti terrestri (vedere "The Mother of Mass Extinctions", Douglas H. Erwin, Scientific American, July 1996). La morte a livello mondiale accadde di nuovo 201 milioni di anni fa, alla fine del Triassic e l'ultima estinzione globale (65 milioni di anni fa) ha concluso il Cretaceous con la fine dei dinosauri.

6.2.1 Toumai

Cominciamo la storia umana con un vecchio antenato dell'uomo moderno che viveva 7 milioni di anni fa in Africa, soprannominato "Toumai".

Lo Sahelanthropus tchadensis è un fossile di primate originalmente classificato come il più vecchio membro del ramo umano sull'albero evolutivo. Recentemente però la sua posizione nella storia evolutiva umana (vedi figura 8.4) è stata rivalutata: sembra che questo fossile visse circa 7 milioni di anni fa e che esso sia quindi 1–2 milioni di anni anteriore alla separazione tra umani e scimpanzé avvenuta 5 milioni di anni fa.



FIGURA 6.2— Un grande meteorite ha colpito la Terra 380 milioni di anni fa in quello che oggi è il deserto marocchino. Fino a questa scoperta, si pensava che solo il cratere di Chixculub nel golfo di Messico, dove un meteorite è caduto 65 milioni di anni fa, fosse l'unico impatto sicuramente collegato ad un'estinzione di massa. <http://www.abc.net.au/science/news/stories/2003/880949.htm>

Il fossile ritrovato in Chad nel marzo 2002 è composto da un piccolo cranio quasi completo, 5 pezzi di mandibola, e qualche dente, che formano una testa che contiene un misto di caratteristiche scimmiesche e umane. Con un volume di solo 340–360 cm³, il cranio suggerisce l'intelligenza di uno scimpanzé, ma i denti sono più simili a quelli umani e la faccia include una cresta della fronte, una caratteristica umana che non esiste in nessun tipo di scimmia oggi (vedi rinforzamento 8.8). Il fossile è stato soprannominato "Toumai", che significa "Speranza di vita" nel linguaggio Goran nel Chad.

Il cranio fossile di Toumai ha subito delle deformazioni importanti (figura 6.3) dovute ai movimenti delle rocce in cui si trovava. Dopo una ricostruzione 3D al computer (vedi rinforzamento 8.8), si può notare che il punto dietro al cranio dove i muscoli della nuca si attaccano indica che questa specie **non** camminasse dritta.

Ci sono ancora delle controversie su questo fossile, come per esempio quella del professore di antropologia James Ahern dell'università del Wyoming che dubita dell'appartenenza di Toumai agli ominidi e sulle conclusioni riguardanti il suo bipedismo: "One of the biggest issues that we raise is that based on the skull alone, it can never be certain whether or not an ape walked on two legs. To tell for sure, you really need legs, a pelvis or a spinal column. Most Miocene apes that we know of are 10 million years old or older, so instead of being the earliest hominid, the Toumai Skull becomes an example of the latest Miocene apes".

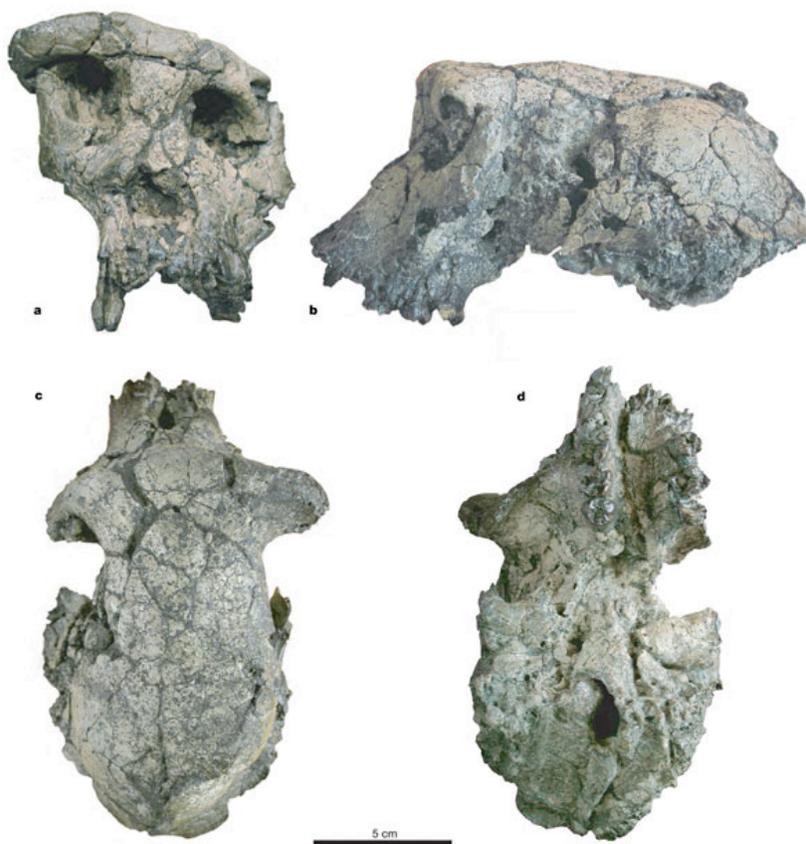


FIGURA 6.3— Il cranio fossilizzato di Toumai (*Sahelanthropus tchadensis*). a: Vista di faccia. b: Vista laterale. c: Vista da sopra. d: Vista da sotto.

6.2.2 Lucy

Lucy è il soprannome dato al primo antico scheletro quasi completo di primate ritrovato in Afar, Etiopia. Questo ominide (nome scientifico *Australopithecus afarensis*) si nutriva di frutta, noci e semi 3.2 milioni di anni fa. Poteva anche ottenere delle proteine animali delle termiti o dalle uova di uccello.

Come uno scimpanzé Lucy aveva un piccolo cervello, lunghe braccia cadenti, gambe corte e un torace di forma conica con una grande pancia. Ma la struttura del ginocchio e delle pelvi mostrano che camminava regolarmente su due gambe come noi. Questa forma di locomozione, chiamata bipedismo è la differenza più importante tra umani e scimmie.

Ci sono varie teorie su come l'*Australopithecus* ha cominciato a camminare eretto. La cosiddetta "teoria della savana" è basata sul fatto che intorno a 6 – 8 milioni di anni fa, ci fu un' estinzione quasi totale delle creature che vivevano nella foresta incluso i più vecchi ominidi riconoscibili, *Sahelanthropus tchadensis* e *Orrorin tugenensis* (vedi tabella nella sezione 6.7). Si pensa che ci fu un notevole **cambiamento climatico** che avrebbe ridotto la foresta in questa parte dell'Africa ad un punto tale, da non poter offrire più abbastanza cibo e protezione alle scimmie che ci vivevano.

Gli antenati genetici di Lucy erano scimmie che vivevano sugli alberi, ma nel mondo



FIGURA 6.4— Scheletro di Lucy, Australopithecus afarensis



FIGURA 6.5— Lucy (a destra) e il suo compagno

di Lucy gli alberi sarebbero stati molto meno e Lucy sarebbe stata costretta a trovare una vita sulla savana piatta e povera di alberi. Camminare su due gambe presenta alcuni vantaggi evolutivi. Per esempio con gli occhi più in alto, si può vedere più lontano dei quadrupedi. Il bipedismo aiuta a risparmiare energia, ma i suoi svantaggi erano anche importanti: Lucy era il primate più lento del suo tempo. Sicuramente i vantaggi hanno pesato di più.

Un cambiamento climatico sembra aver giocato quindi un ruolo fondamentale nella storia dell'evoluzione umana. Come vedremo più tardi un altro cambiamento climatico (l'era glaciale) ha influenzato anche in modo decisivo la strada verso l'intelligenza. Un storia simile è accaduta quando i dinosauri si sono estinti (probabilmente anche loro a causa di un brusco cambiamento climatico) permettendo ai mammiferi (e ultimamente all'uomo) di prendere così il sopravvento.

6.2.3 Selam

Nell'estate 2006 vengono pubblicati i risultati di una scoperta fatta in Etiopia nel 2000: Lo scheletro più completo mai ritrovato di una bambina di tre anni appartenente alla specie Australopithecus Afarensis, la stessa specie di Lucy, che viveva 3.3 milioni di anni fa, cioè circa 100'000 anni prima di Lucy. Il fossile è stato soprannominato "Selam", che significa pace nella lingua ufficiale dell'Etiopia. Esso include il cranio completo, la mandibola inferiore, tutte le vertebre (dalla nuca fino al torso), tutte le costole, entrambe le scapole, entrambe le clavicole, il gomito sinistro e parte di una mano, entrambi i ginocchi, stinco and femore. Un piede quasi completo permette per la prima volta lo studio del piede di questo primate con le ossa ancora posizionate come erano in vita.

Come Lucy, Selam aveva lunghe braccia che finivano appena sopra i ginocchi. La parte inferiore del corpo assomiglia molto all'umano e porta alla conclusione che Selam potesse camminare dritta. La parte superiore però è più simile alle scimmie: le scapole, la nuca, la colonna e le dita sono più scimmiesche e portano a pensare che Selam fosse anche capace di arrampicarsi sugli alberi e di muoversi all'interno della foresta con agilità.

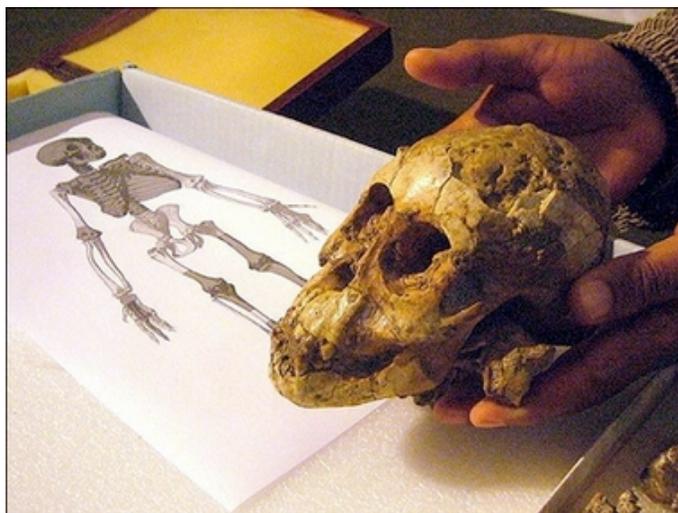


FIGURA 6.6— Il cranio fossilizzato di Selam, una bambina di *Australopithecus afarensis*, che visse 3.3 milioni di anni fa, mostra sia le caratteristiche di scimmia che quelle umane. È stato ritrovato nel 2000 in Etiopia a 400 km a nord-est di Addis Abeba.

Il dottore Jonathan Wynn dell'università di South Florida commentava:

"We can see from the sediment that the region was very much characterized by a mosaic of environment that ranged from forests and woodlands near the rivers, to seasonally flooded grasslands to a flood plain that would have supported more open vegetation", un ambiente compatibile con la teoria sviluppata nella sezione 8.7.

6.2.4 **Gli ultimi sviluppi su Lucy**

Pensato un tempo come il nostro antenato, c'è adesso un largo consenso nel considerare l'*Australopithecus Afarensis* come un ramo fallito dell'albero umano. Molti esperti sospettano che questo ominide fosse molto più vicino anatomicamente alla scimmia che all'uomo. Malgrado che non avesse più i lunghi canini che distinguono le scimmie dagli uomini, aveva dei grossi molare, ch'erano piuttosto primitivi.

6.2.5 **Altre spiegazioni per l'origine del bipedismo: la scimmia acquatica**

vedi Approfondimento (sezione 8.7) per una teoria diverza dalla teoria della savana per spiegare l'origine del bipedismo.

6.3 La galleria dei nostri antenati

Che faccia avevano i nostri antenati? Come avvenne la conquista del Pianeta? Dalle oscure origini in una valle etiopica fino all'uscita dall'Africa e all'arrivo negli altri continenti. Una sola specie è riuscita a invadere tutta la Terra e a superare migliaia di chilometri, ostacoli e nemici, cambiando radicalmente la natura.³

6.3.1 *Australopithecus anamensis*

Da 4.1 a 3.9 milioni di anni fa

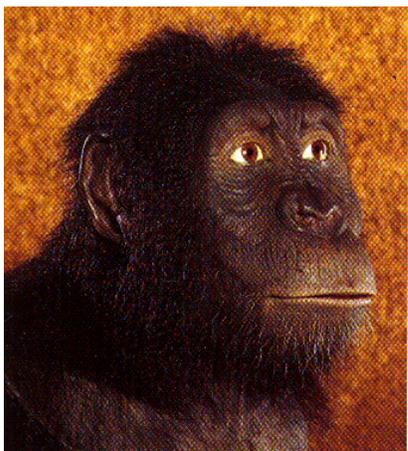


FIGURA 6.7— *Australopithecus anamensis*

I pochi resti trovati assomigliano almeno in parte a uno scimpanzé, anche se i denti sono molto più simili a quelli di ominidi successivi.

6.3.2 *Australopithecus Afarensis*

Da 3.9 a 2.9 milioni di anni fa

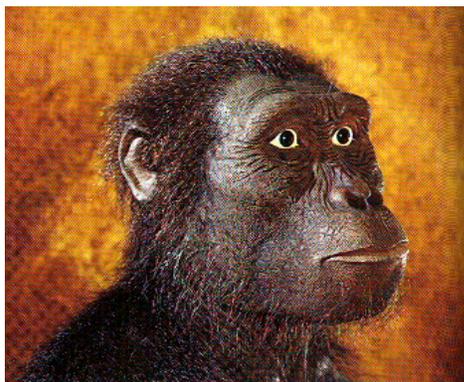


FIGURA 6.8— *Australopithecus Afarensis*

Era alto da 1 metro a 1 metro e mezzo. Il volume del suo cervello era di 300–550 cm³, quanto uno scimpanzé; anche il viso con fronte bassa, sopracciglia robuste, naso piatto e mento sfuggente è più simile a quello di una scimmia antropomorfa che a quello di un uomo. Il celebre fossile "Lucy" scoperto nel 1974 dall'antropologo D. Johanson e il suo studente T. Gray fa parte di questa famiglia.

³Questo capitolo è tratto da un articolo di M. Ferrari (testo) e T. Ernsting (foto), pubblicato in Geo, numero 25, Gennaio 2008.

6.3.3 Australopithecus Africanus

Da 3 a 2 milioni di anni fa



FIGURA 6.9— Australopithecus Africanus

La "scimmia meridionale africana" viveva nella savana alberata del Sudafrica. Non era in grado di camminare velocemente e, per sfuggire ai predatori, preferiva rifugiarsi sugli alberi. Il primo cranio ritrovato apparteneva a un cucciolo, che è stato chiamato "bambino di Taung".

6.3.4 Paranthropus Boisei

Da 2.6 a 1.2 milioni di anni fa

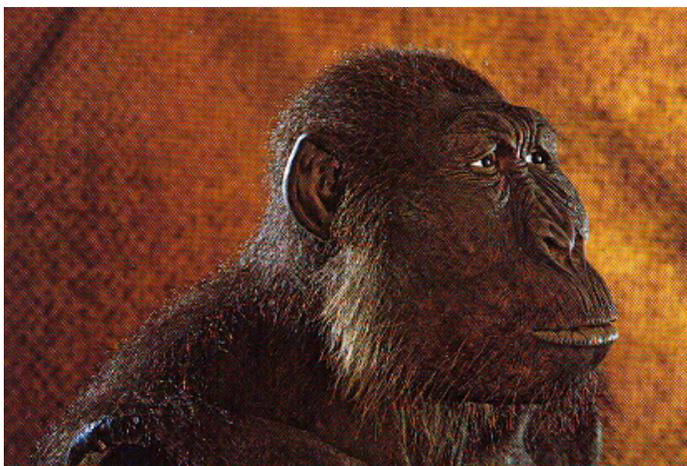


FIGURA 6.10— Paranthropus Boisei

I resti di questo "australopiteco robusto" furono scoperti nel 1959 da Louis e Mary Leakey. È una delle specie più grandi nella famiglia dell'uomo, anche se non ha connessioni dirette con la nostra specie. Sopra il cranio aveva una "cresta" ossea a cui erano attaccati forti muscoli.

6.3.5 Homo Rudolfensis

Da 2.4 a 1.9 milioni di anni fa

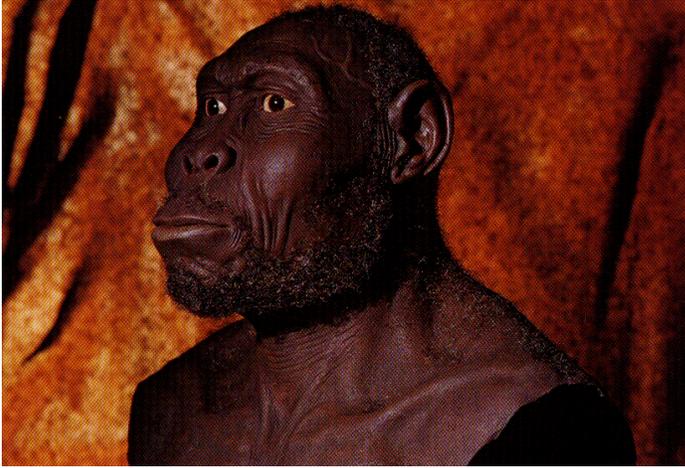


FIGURA 6.11— Homo Rudolfensis

Cranio grande e viso piatto e ampio sono i tratti più rilevanti "dell'uomo del lago Rodolfo", forse il primo rappresentante del genere *Homo*. Tra i primi a creare strumenti, era in grado di utilizzare pietre affilate per tagliare la carne di animali morti ed estrarre il midollo dalle ossa.

6.3.6 Homo habilis

Da 2.33 a 1.4 milioni di anni fa

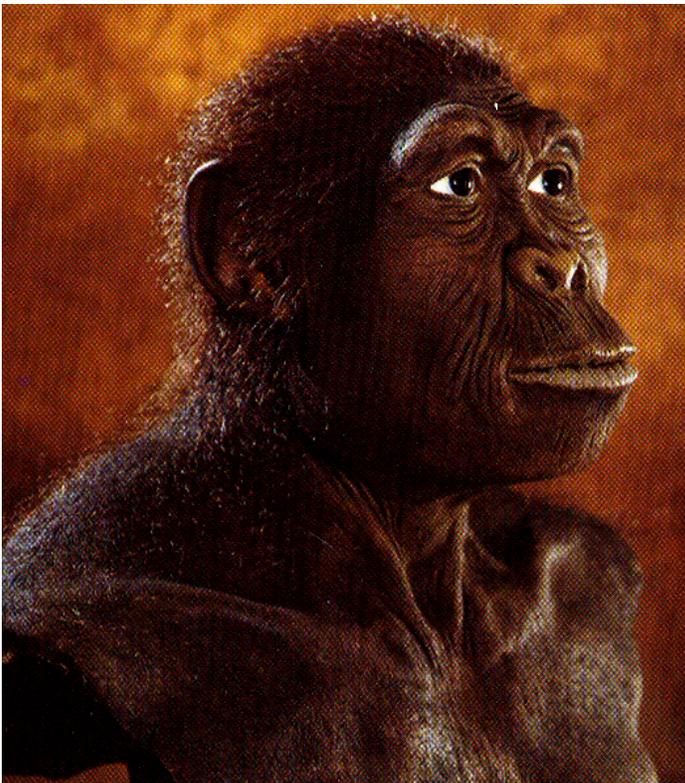


FIGURA 6.12— Homo habilis

Non aveva un aspetto molto umano. Dietro la fronte sfuggente con forti arcate sopraccigliari c'era un cervello di soli 650 cm^3 . Alto 1.40 m, proveniva dall'Africa orientale e abitò nel Sud dell'Africa.

6.3.7 Homo erectus

Da 1.8 milioni a 100'000 anni fa

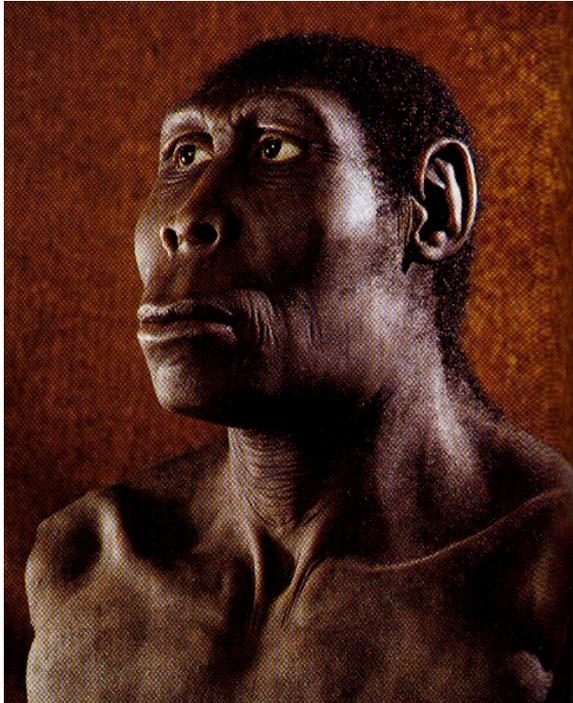


FIGURA 6.13— Homo erectus

Il primo ominide che lasciò l’Africa, circa un milione di anni fa, raggiungendo l’Asia orientale e forse la Siberia meridionale. Aveva un cervello di 750–900 cm³.

6.3.8 Homo Neanderthalensis

Da 350'000 a 28'000 anni fa

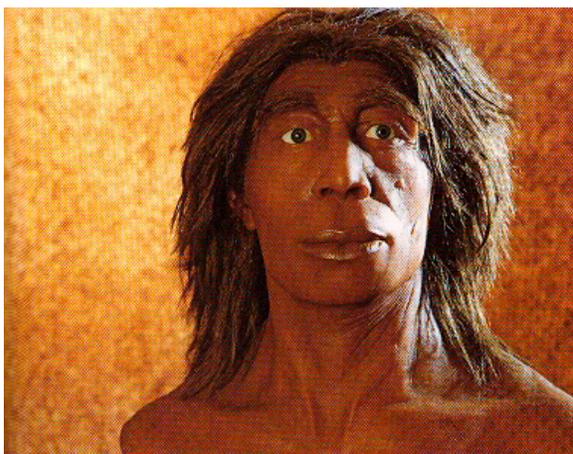


FIGURA 6.14— Homo Neanderthalensis

Con la sua calotta cranica piatta e allungata, le arcate sopraccigliari marcate, il mento sfuggente e le ossa forti, l’uomo di Neanderthal è stato a lungo considerato primitivo, nonostante il volume del suo cervello, con i suoi 1200–1450 cm³, fosse addirittura più grande di quello dell’uomo odierno. Fabbricava vari strumenti in pietra e in legno, portava abiti di pelle, costruiva capanne, padroneggiava il fuoco e seppelliva almeno in maniera occasionale i propri morti in tombe.

6.3.9 La foto di famiglia



FIGURA 6.15— Foto di famiglia: Il vostro docente di astrobiologia circondato dalle ricostruzioni di alcuni tra i parenti e gli antenati dell'uomo moderno. Dall'alto a sinistra, in senso orario: *Australopithecus afarensis* (Lucy), *Paranthropus boisei*, *Homo sapiens* (è il vostro docente), *Homo neanderthalensis*, *Homo rudolfensis*, *Australopithecus anamensis*, *Homo habilis*, *Homo erectus*, *Australopithecus africanus*. L'aspetto in vita dei nostri parenti scomparsi è stato ricostruito, usando tecniche della polizia scientifica da W. Schnaubelt e N. Kieser dell'atelier *Wildlife Art*, nell'ambito di un progetto sostenuto da Geo e dal Museo Regionale dell'Assia di Darmstadt, in Germania. (copyright, Geo, articolo di M. Ferrari (testo) e T. Ernsting (foto), Gennaio 2008, numero 25).

6.4 Migrazioni umane: come gli uomini popolarono il mondo

Questo capitolo è tratto dall'articolo: "The application of molecular genetic approaches to the study of human evolution", di L. Luca Cavalli-Sforza & M. W. Feldman (2003), ed è disponibile all'indirizzo: <http://www.nature.com/ng/journal/v33/n3s/full/ng1113.html>.

Come seguire le migrazioni umane? Attraverso le mutazioni del nostro DNA. Un recente studio del cromosoma Y e delle prove paleoantropologiche e paleoclimatiche suggerisce un possibile scenario per l'evoluzione della diversità umana. Circa 100'000 anni fa un piccolo gruppo di individui, probabilmente dall'est africano, si è diffuso in tutta l'Africa. Dopo, tra circa 60 e 40'000 anni fa, ci fu una seconda espansione, molto probabilmente da una discendenza, in Asia e da lì in tutti gli altri continenti (vedi figura 6.16). Questo modello è conosciuto come "il modello standard dell'evoluzione umana moderna". Viene anche chiamato "Out of Africa 2", rispetto ad una migrazione precedente dell'*Homo Erectus* dall'Africa verso l'Eurasia circa 1.7 milioni

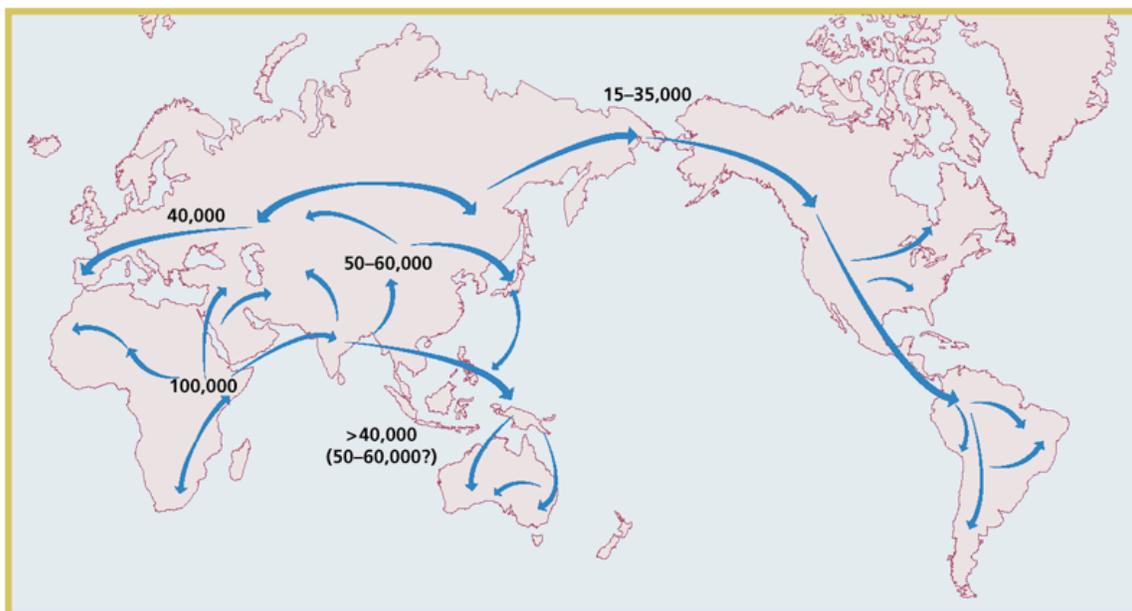


FIGURA 6.16— La migrazione del moderno Homo Sapiens: Il modello presentato qui comincia con una diffusione dall’Africa dell’est verso il resto dell’Africa circa 100’000 anni fa ed è seguita da un’espansione dalla stessa area verso l’Asia, probabilmente attraverso due strade, sud e nord tra 60 e 40’000 anni fa. L’Oceania, l’Europa e l’America sono state colonizzate a partire dall’Asia in questo ordine.

di anni fa. Questo modello suppone anche che gli uomini (anatomicamente) moderni, anche chiamati Homo Sapiens Sapiens, hanno sostituito precedente specie di Homo che discendevano dai primi emigrati dell’Homo Erectus.

I dati genetici forniscono qualche indicazione che l’espansione umana in Asia sia successa attraverso due strade. La prima era una strada del sud, lungo la costa verso il sud-est asiatico, e da lì ha biforcato verso nord e verso sud. Nel sud questi umani moderni hanno raggiunto l’Oceania tra 60 e 40’0000 anni fa, mentre l’espansione verso nord ha raggiunto solo dopo la Cina, il Giappone e alla fine l’America.⁴ La seconda strada era una strada centrale attraverso il Medio-Oriente, l’Arabia o la Persia verso l’Asia centrale, da dove la migrazione è successa in tutte le direzioni raggiungendo l’Europa, l’Asia dell’est e del nord-est circa 40’000 anni fa.

6.4.1 Una teoria alternativa: il modello “multi-regionale”

Un’alternativa all’ipotesi “Out of Africa 2” è stata prima descritta da Weidenreich (1946) e ulteriormente estesa e chiamata “multi-regionale” da Wolpoff (1989). Quest’ipotesi ritiene che tutte le popolazioni umane viventi oggi trovino la loro origine nei vari continenti e si siano evolute in parallelo negli umani moderni. La base principale di questa ipotesi risiede nel fatto che la maggior parte dei fossili umani (essenzialmente quelli europei e asiatici, ma non oceanici e americani, dove i fossili umani trovati sono tutti

⁴Durante le glaciazioni, il livello del mare era molto più basso (100–150 metri di meno) perché una grande quantità d’acqua era imprigionata nel ghiaccio dei poli, quindi era molto più facile passare da un continente all’altro. Per andare in America, attraverso lo stretto di Bering, il ghiaccio aiutava.

molto recenti e di tipo moderno) mostrano una transizione morfologica continua verso gli umani moderni.

Tuttavia ricerche antropologiche quantitative recenti sul cranio umano hanno mostrato che non c'è una continuità morfologica nei vari continenti (Salem et al. 1996). In più nella sola parte del mondo dove c'è stato un tipo umano con delle similarità chiare con l'umano moderno – cioè i Neandertal in Europa e Asia – questo "antenato" dell'Europeo moderno è sparito rapidamente dopo l'apparizione dell'uomo moderno (40–30'000 anni fa). L'analisi del DNA mitocondriale del Neandertal non ha mostrato nessuna similarità con l'uomo moderno, cioè il Neandertal non era un nostro antenato, ma piuttosto un "cugino". Queste ricerche hanno anche indicato che la separazione tra il Neandertal e l'Homo sapiens è avvenuta un lungo tempo fa, almeno 500'000 anni fa.

6.5 Da Toumai e Lucy all'Homo sapiens

Perché i primati (magari come Toumai o Lucy) si sono evoluti in un nuovo tipo di scimmia nuda e molto più intelligente? Dobbiamo tenere presente che la teoria della savana (se vera) ci porta ad un primate simile a Lucy, che comincia a camminare dritto e che è equipaggiato di un cervello simile a quello di uno scimpanzé moderno: Lucy era quindi probabilmente poco più intelligente di uno scimpanzé. Il cammino verso l'uomo moderno è ancora lungo.



FIGURA 6.17— Gli scimpanzé hanno notevole predisposizione per il linguaggio semplice e l'uso di attrezzi, come per esempio infilare un bastoncino in un tumulo di termiti. Però paragonate a quelle umane, le capacità di questo animale sono piuttosto rudimentali.

Si stima che da circa 5–6 a 2.5 milioni di anni fa, il cervello quasi non aumenta di volume. Invece nel periodo (2.5 milioni di anni – 250'000 anni), il volume totale del cervello cresce in maniera molto rapida: esso si è espanso di un cucchiaino da cucina ogni 100'000 anni, e come risultato oggi esso è quasi **triplicato** rispetto al suo volume "iniziale" di 2.5 milioni di anni fa⁵. Per quale motivo questo radicale cambiamento è av-

⁵Sostanzialmente, l'uomo di oggi ha lo stesso cervello dei primi Homo Sapiens 250'000 anni fa.

venuto? In somma, perché siamo quello che siamo oggi, degli uomini? Non dobbiamo dimenticare che così tanto dell'ascesa dei nostri antenati dagli umili inizi a una umanità che domina il pianeta è dovuto a questa crescita incredibile della nostra corteccia.

Ma come vedremo nella sezione 6.7 la dimensione del cervello da solo non spiega le nostre fantastiche capacità di ragionamento. Per esempio, uno dei misteri dell'evoluzione umana è che altre specie con un grande cervello (come i Neanderthals) apparentemente non hanno raggiunto livelli di cognizione paragonabili ai nostri. Nel resto di questo capitolo, presentiamo le tesi di I. Tattersall e W. H. Calvin (2006) che propongono un nuovo scenario per spiegare l'emergenza dell'intelligenza.

6.6 **Versatilità, lungimiranza e intelligenza**

Per molti, l'essenza dell'intelligenza è l'**ingegnosità**, cioè una **versatilità** a risolvere nuovi problemi. La **lungimiranza** è anche un aspetto essenziale dell'intelligenza. Lo psicologo Jean Piaget sosteneva che l'intelligenza era un bricolaggio sofisticato che usiamo quando non sappiamo cosa fare. Il neurobiologo Horace Barlow dice che l'intelligenza sta tutta nella capacità di fare una supposizione che porta a scoprire una nuova struttura sottostante. Quest'ultima definizione copre una varietà di situazioni: trovare la soluzione ad un problema o la logica di un argomento, cercare l'analogia appropriata, creare un'armonia gradevole o una risposta arguta, o predire quello che succederà dopo. Infatti prediamo in continuazione quello che succederà, anche quando ascoltiamo passivamente un discorso o una melodia. Questo spiega perché la battuta finale di uno scherzo o una parodia musicale ci colga di sorpresa: inconsciamente, aspettavamo qualche cosa di diverso e siamo sorpresi dalla differenza.

L'intelligenza e la coscienza sono frequentemente confuse con qualche processo mentale elementare, come quelli che usiamo per riconoscere un amico. Naturalmente, semplici meccanismi neuronali come questi sono probabilmente la base su cui le nostre abilità per trattare con la logica e le metafore si sono evolute. Ma come è accaduto? La nostra intelligenza è apparsa perché avevamo a disposizione più degli altri animali? La corteccia spessa 2 millimetri è la parte del cervello più coinvolta nel fare delle nuove associazioni. La nostra è molto corrugata, ma se fosse appiattita, coprirebbe 4 pagine A4, invece la corteccia di uno scimpanzé coprirebbe solo una pagina.

Una spiegazione puramente quantitativa sembra però incompleta. I. Tattersall e W. H. Calvin (2006) sostengono che l'intelligenza deriva primariamente dai raffinamenti, cioè da qualche specializzazione del cervello, come per esempio il linguaggio. Questa specializzazione avrebbe permesso un salto notevole in ingegnosità e lungimiranza durante l'evoluzione da primati a uomini – forse l'esplosione creativa di 50'000 anni fa (vedi figura 6.18 e 6.19) quando la gente che assomigliava a noi da 200'000 anni ha cominciato a comportarsi come noi.

Esaminiamo ora più in dettaglio le cause dell'emergere dell'intelligenza. Un persona particolarmente intelligente spesso sembra essere "veloce" e capace di manipolare mentalmente tante idee nello stesso tempo. La **versatilità** è quindi un'altra caratteristica dell'intelligenza. La maggior parte dei animali sono specialisti stretti, particolarmente per quello che riguarda la loro dieta: Il gorilla di montagna consuma 25 chili di foglie



FIGURA 6.18— Immagini di animali dell'era glaciale sono spesso accompagnate da simboli astratti, come quelli dipinti nella grotta di Lascaux 17'000 anni fa.

verdi tutti giorni. Invece uno scimpanzé cambia in continuazione: mangia frutti, termiti, foglie e addirittura un porcellino se è fortunato abbastanza per trovarne uno. Il comportamento degli onnivori è più variato perché devono passare da un tipo di cibo all'altro. Essi hanno anche bisogno di un più grande numero di immagini mentali del cibo e dei predatori, perciò essi stanno in continuazione in guardia.

Una **vita sociale** dà la possibilità agli individui di replicare le scoperte utili fatte dagli altri. Per esempio dei ricercatori hanno osservato che in Giappone, un gruppo di scimmie si sono ispirate da una femmina più inventiva degli altri e hanno copiato la sua tecnica per lavare la sabbia dal cibo. In più una vita sociale è piena di problemi interpersonali da risolvere che vanno molto oltre le sfide abituali della sopravvivenza e della riproduzione (basta pensare ai problemi tra i uomini e le donne...). In un contesto sociale, magari per gioco, dei bambini hanno inventato dei suoni, delle parole e l'hanno trasmesse agli adulti, come sostiene Ian Tattersall (2006).

Però la versatilità non è sempre un vantaggio: essere "universale" significa anche competere contro degli specialisti. Per esempio quando gli scimpanzé in Uganda arrivano su alberi da frutta, scoprono spesso che delle scimmie locali efficienti stanno già strappando dall'albero tutti i frutti mangiabili. Il vantaggio della versatilità dipende dalla scala di tempo. I paleoclimatologi hanno scoperto che in molte parti del pianeta accadono cambiamenti climatici brutali (vedi Figura 6.22). Tali cambiamenti in grado di eliminare tutti gli alberi da frutta sarebbero disastrosi per tante specie di scimmie. Ciò sarebbe anche dannoso per gli animali onnivori, ma essi possono sopravvivere con altri cibi e alla fine, avrebbero un'esplosione demografica quando le restrizioni di cibo fossero finite e pochi competitori fossero rimasti in vita.⁶

⁶Nel campo dell'economia, questa pratica si chiama "dumping": abbassare i prezzi sotto la soglia di rentabilità per eliminare i concorrenti più fragili.



FIGURA 6.19— Scolpito nell'avorio di mammut più di 32'000 anni fa, questa piccola (5cm) scultura è forse la più antica opera d'arte conosciuta. Le sue linee eleganti esprimono l'essenza del cavallo piuttosto che rendere le proporzioni esatte dei cavalli tarchiati dell'epoca.

6.7 Far fronte ai cambiamenti climatici

In Africa la postura eretta è apparsa circa 5 milioni di anni fa, ma le dimensioni del cervello non sono cambiate notevolmente fino all'era glaciale che iniziò 2.5 milioni di anni fa⁷, come si può vedere sulla tavola che segue. Le figure 6.20 e 6.21 presentano lo stesso tipo di informazione sotto forma grafica (e con meno specie indicate).

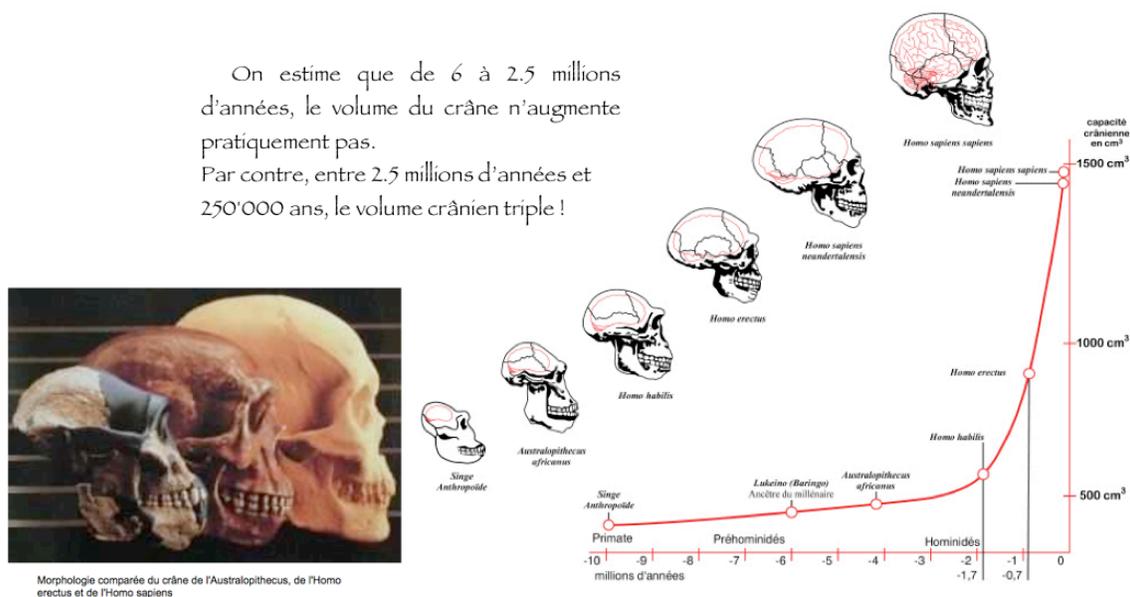


FIGURA 6.20— Evoluzione del volume del cranio sugli ultimi 10 milioni di anni.

⁷Per una visione del clima molto più estesa, cioè su gli ultimi 100 milioni di anni, vedi figura 8.1

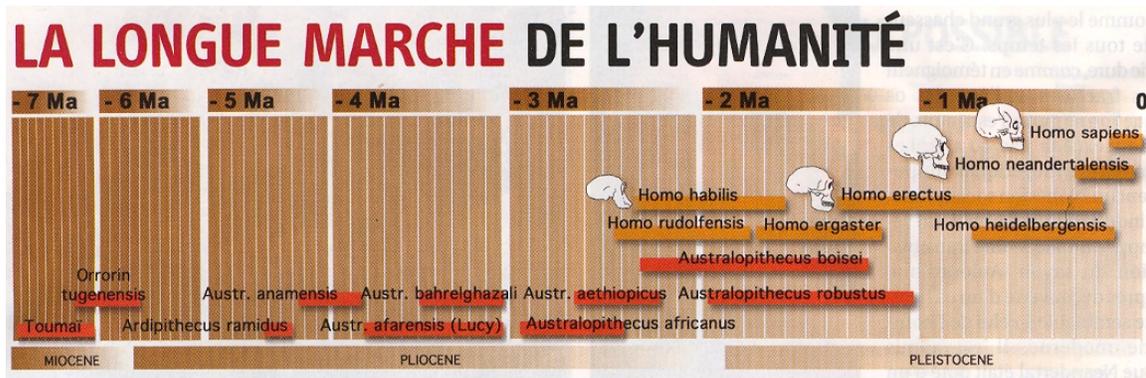


FIGURA 6.21— I primi ominidi nascono in Africa meno di 8 milioni di anni fa. Apparsa 4 milioni di anni fa, la linea degli australopitechi si spegne 3 milioni di anni dopo. Il genere "Homo" apparve 2.5 milioni di anni fa. Apparso circa 200'000 anni fa, l'homo sapiens è un contemporaneo del Neandertal, scomparso 30'000 anni fa.

| Nome della specie | Quando viva | Volume del cervello |
|---|-----------------|---------------------|
| Sahelanthropus tchadensis (Toumai) | 7 | 340 – 360 |
| Orrorin tugenensis | 5.8 – 6.1 | |
| Ardipithecus ramidus | 4.4 | |
| Australopithecus anamensis | 4.1 – 3.9 | |
| Australopithecus afarensis (Lucy, Selam) | 3.0 – 3.9 | 438 |
| Australopithecus bahrelghazali | 3.0 – 3.5 | |
| Australopithecus aethiopicus | 2.5 – 2.7 | 410 |
| Australopithecus africanus | 2.4 – 3.3 | 400 – 500 |
| Australopithecus robustus | 2.7 | 530 |
| Australopithecus boisei | 1.8 | 521 |
| Homo habilis | 2.5 – 1.5 | 600 |
| Homo rudolfensis | 1.9 | |
| Homo georgicus | 1.8 – 1.6 | 600 |
| Homo ergaster | 1.9 – 1.25 | 700 – 850 |
| Homo erectus | 2(1.25) – 0.3 | 900 – 1100 |
| Homo cepranensis | 0.8? | |
| Homo antecessor | 0.8 – 0.35 | 1000 |
| Homo heidelbergensis | 0.6 – 0.25 | 1100 – 1400 |
| Homo neanderthalensis | 0.23 – 0.03 | 1200 – 1700 |
| Homo rhodesiensis | 0.3 – 0.12 | 1300 |
| Homo sapiens | 0.25 – presente | 1000 – 1850 |
| Homo sapiens idaltu | 0.16 | 1450 |
| Homo floresiensis | 0.10 – 0.012 | 400 |
| Orangutan | presente | 275 – 500 |
| Gorilla | presente | 340 – 752 |
| Scimpanzé | presente | 275 – 500 |

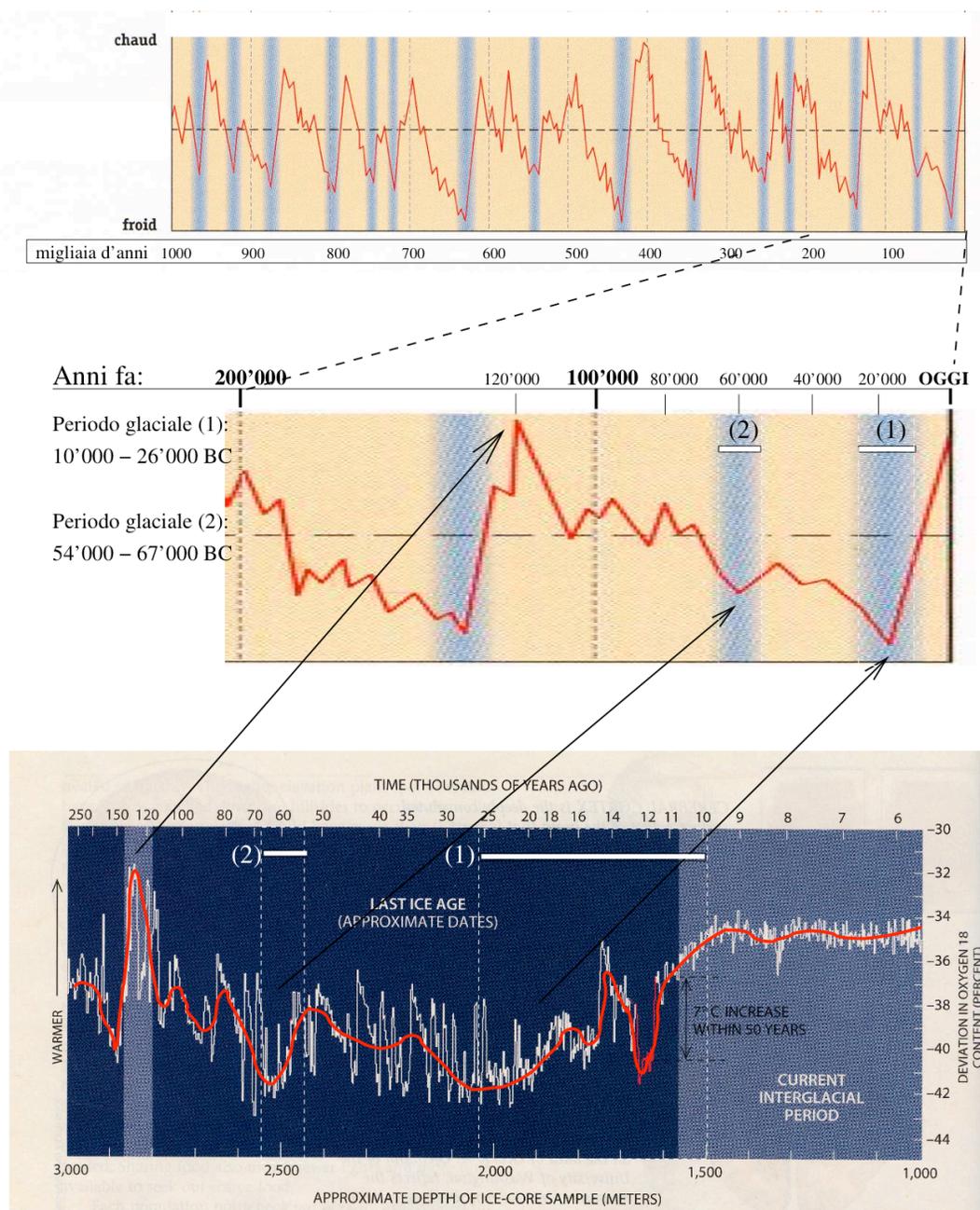


FIGURA 6.22— La temperatura media in funzione del tempo con un paragone più dettagliato tra i due grafici sugli ultimi 200'000 anni. Due periodi particolarmente freddi (1) e (2) sono rappresentati da barre bianche rettangolari che indicano rispettivamente gli stessi intervalli di tempo sui due grafici. Cambiamenti rapidi del clima potrebbero aver promosso flessibilità comportamentali negli antenati dell'uomo moderno. Durante il periodo da 10'000 a 100'000 anni fa, la temperatura media era molto più bassa di quello che è oggi, ma era anche soggetta a grandi ed improvvisi fluttuazioni che duravano a volte secoli. Durante un'oscillazione climatica 12'000 anni fa, la temperatura media si alzò di circa 7°C (vedi figura in basso) e le piogge aumentarono del 50% nel giro di poche decina d'anni. Periodi freddi cominciarono nello stesso modo brusco. **I primi umani avrebbero avuto bisogno di considerevoli risorse intellettuali per sopravvivere a questi cambiamenti.**

Le carote di ghiaccio della Groenlandia rivelano **bruschi cambiamenti di clima** durante il periodo glaciale (vedi figura 6.22). Foreste intere sparirono in decenni a causa di drastiche cadute di temperatura e precipitazioni. Le piogge calde tornarono in un modo anche più abrupto qualche secolo dopo.

L'evoluzione degli adattamenti anatomici degli ominidi (attraverso la selezione naturale Darwiniana) non poteva tenere il passo con questi rapidi cambiamenti che potevano accadere anche durante la vita di un singolo individuo, un tempo troppo breve per l'evoluzione. Queste fluttuazioni ambientali però potrebbero aver promosso l'accumulazione progressiva di capacità mentali che conferiva un maggiore flessibilità comportamentale.

Di conseguenza la pressione esercitata dall'ambiente (in questo caso, i rapidi sbalzi climatici) sull'evoluzione dei primati ha condotto a selezionare gli individui più versatili, più cooperativi, più capaci di ragionamenti astratti, e che sviluppano un linguaggio articolato, in somma i più intelligenti. Una delle addizione di maggior importanza durante l'era glaciale fu il **linguaggio** umano.

6.8 L'invenzione del linguaggio

Il linguaggio è la caratteristica che definisce meglio l'intelligenza umana: senza la sintassi – l'organizzazione delle idee verbali – saremo solo poco più intelligenti degli scimpanzé. Per avere un'idea di cosa potrebbe essere la **vita senza sintassi**, possiamo guardare il caso di Joseph, un bambino sordo di 11 anni. Poiché egli non poteva sentire il linguaggio parlato e per il fatto di non essere mai stato messo in contatto con un linguaggio dei segni, non ha avuto la possibilità di imparare la sintassi durante gli anni critici della prima infanzia. Il neurologo Oliver Sacks l'ha descritto così: "Joseph può vedere, distinguere, categorizzare; non ha nessun problema con la categorizzazione o la generalizzazione *percettiva*, ma sembra che non possa andare molto oltre questo, cioè avere delle idee astratte in mente, riflettere, giocare, pianificare. Sembra completamente letterale – incapace di manipolare immagine mentali o ipotesi e di entrare in un mondo immaginario o figurativo. Sembra come un individuo inchiodato nel presente, confinato a una percezione letterale e immediata".

Per pienamente capire perché gli umani sono così intelligenti, dobbiamo capire come i nostri antenati hanno rimodellato il repertorio simbolico delle scimmie e l'hanno aumentato inventando la sintassi. Gli scimpanzé usano circa tre dozzine di vocalizzazioni per esprimere circa tre dozzine di significati. Anche se possono ripetere un suono per intensificare il suo significato, non incatenano tre suoni per aggiungere una nuova parola nel loro vocabolario. In inglese si usano circa tre dozzine vocalizzazioni, chiamati fonemi. Però, solo la loro combinazione ha un vero contenuto: incateniamo dei suoni senza significato per creare delle parole con un significato. Non sappiamo ancora come i nostri antenati hanno superato l'ostacolo di sostituire "una parola = un significato" con un sistema sequenziale e combinatorio di fonemi senza significato. Il linguaggio umano possiede una complessità in più nel senso che usa delle catene di catene (le parole di questa frase per esempio). La sintassi possiede delle regole di riferimento in

forma di albero che ci permette di comunicare velocemente – a volte con meno di 100 suoni incollati insieme – chi ha fatto cosa a chi, quando, dove, perché e come.

Chiaramente l'invenzione (anche) di un proto-linguaggio costituisce un vantaggio enorme permettendo delle cooperazione più complesse e perciò delle maggiori chance di sopravvivenza (per trovare cibo, per curare, collaborare per la caccia, ecc): il linguaggio fu dunque probabilmente **uno dei progressi più importanti nell'evoluzione da primati a umani**.

Un linguaggio complesso che richieda una sintassi usa la stessa rete neuronale da cui dipende il pensiero logico-formale. Sviluppare il linguaggio aiuta l'intelligenza. Un altro aspetto vicino alla sintassi verbale sembra anche contribuire ad un'altra caratteristica straordinaria dell'intelligenza umana: la capacità di pianificare.

6.9 La pianificazione

A parte le preparazioni per il cambiamento inverno/estate scatenate dagli ormoni, gli animali mostrano ben poca pianificazione che richieda più di qualche minuto di anticipo.

Le capacità umane alla pianificazione magari derivano dal nostro talento per costruire strutture concettuali basate su catene più lunghe di una frase. Esse si sviluppano gradualmente dall'infanzia. Sono un fondamento essenziale per le nostre scelte etiche: immaginiamo un'azione nel tempo, la sua conseguenza sugli altri e decidiamo di farlo o no. In questo modo, la sintassi alza l'intelligenza verso un nuovo livello: grazie alle strutture della sintassi, possiamo giudicare nuove combinazione di azioni e le loro conseguenze. Un po' come se parlando in silenzio a noi stessi, giudicassimo un dato scenario pericoloso, insensato, possibile, probabile o logico.

Tuttavia, il nostro pensiero non è limitato a costruzioni di tipo "linguistico". Per esempio, a volte abbiamo l'impressione di aver capito qualcosa o che le cose si mettano al loro posto, ma senza essere capace di esprimere questi concetti verbalmente. La musica è anche in questo rispetto qualche cosa che ci tocca nel più profondo, ma senza che possiamo dire perché o come.

Il linguaggio e l'intelligenza sono così potente, che uno potrebbe pensare che l'evoluzione favorirebbe il loro sviluppo. Tuttavia l'evoluzione spesso segue **strade indirette** invece di procedere per adattamenti. Ambienti che danno un chiaro vantaggio per chi ha un talento per la musica sembrano difficili da immaginare, ma ci sono dei meccanismi multi-funzionali del cervello che sono stati migliorati per una funzione critica e che, incidentalmente, aiutano altre funzioni. Charles Darwin chiamava questo "functional change in anatomic continuity", distinguendolo dall'adattamento graduale. La musica e la danza sono quasi sicuramente degli usi secondari di una macchina neuronale formata da comportamenti più esposti alla selezione naturale, come il linguaggio.

6.9.1 Il caso Neandertal

Perché l'uomo di Neandertal è scomparso circa 30'000 anni fa, dato che egli aveva un cervello voluminoso come il nostro? Si pensa oggi che egli fosse esperto nel fabbrica-

re utensili, usasse pelli di animali per tenersi caldo e si prendesse cura dei suoi simili. Recenti scavi a Gibilterra mostrano anche una dieta variata, composta da mammiferi, uccelli e crostacei. Queste ultime ricerche suggeriscono anche che il Neandertal e l'*homo sapiens* hanno avuto una convivenza di almeno 4000 anni. Un paragone tra il DNA mitocondriale del Neandertal e il nostro permette di concludere che il Neandertal **non** sia il nostro antenato, ma piuttosto un cugino di cui ci siamo separati 315'000 anni fa.

La scomparsa del Neandertal è stata il primo di una lunga serie di genocidi compiuti dall'*Homo Sapiens*? o il Neandertal è semplicemente scomparso perché non ha retto alla competizione con la nostra specie?

Una possibilità è che, malgrado il suo grosso cervello, il Neandertal non abbia mai sviluppato un linguaggio articolato complesso come il nostro, un progresso che ha dato invece un vantaggio decisivo alla nostra specie. La forma della faringe del Neandertal, più corta che nell'uomo moderno, non avrebbe permesso tutta la varietà di suoni che sono necessari in un linguaggio articolato (vedi figura 6.23).

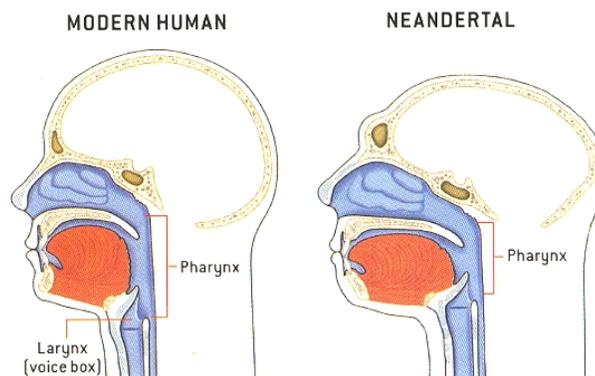


FIGURA 6.23— Un paragone tra la testa e la nuca di un uomo moderno e quelle di uno Neandertal (ricostruzione). Il faringe molto più lungo nell'uomo moderno è ciò che rende possibile tutta la varietà di suoni richiesti da un linguaggio articolato complesso.

6.10 Non solo il linguaggio, ma anche l'utilizzo di attrezzi

Utilizzare attrezzi non è solo un segno di intelligenza, forse si è trattato anche di uno stimolo per l'evoluzione umana. Il cervello richiede molta energia: il cervello dell'uomo moderno usa 20 Watt (circa 400 calorie) al giorno, un quinto del consumo energetico totale. Gli ominidi primordiali, come le scimmie, erano essenzialmente erbivori (frutti, foglie, radice), solo eccezionalmente completato da addizioni di carne (proveniente da carcasse di animali morti). Tuttavia le piante danno molto meno energia e nutrimento che la carne. Pertanto il fatto di essere capace di cacciare grandi animali, reso possibile solo dall'uso di attrezzi come la lancia, ha dato la possibilità agli umani di sostenere cervelli più grossi e più complessi, che a loro volta hanno dato la possibilità di sviluppare attrezzi più intelligenti e più efficienti.

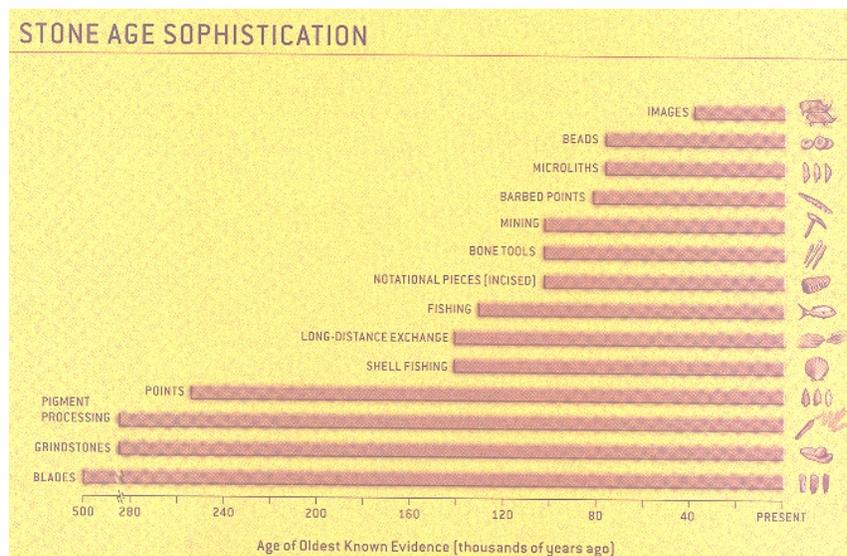


FIGURA 6.24— Scoperte archeologiche in Africa hanno rivelato che gli elementi del comportamento umano moderno trovano la loro origine molto prima di 40'000 anni fa, come si pensava in base a ricerche europee.

Capitolo 7

Gli ultimi 40'000 anni in Svizzera

Concludiamo questo corso con la fase "finale" delle nostre origini, cioè come era la vita dei nostri antenati (svizzeri) negli ultimi 40'000 anni. Questo capitolo prende ispirazione dal libro "Des Alpes au Léman, images de la préhistoire", A. Gallay (dir.) con illustrazioni di A. Houot e J. Charrance¹.

7.1 Riassunto. La preistoria: una lunga storia

In Europa e in Svizzera, 40'000 anni fa l'uomo moderno (*Homo Sapiens*) sostituisce progressivamente l'uomo di Neandertal del **Paleolitico medio**, vissuto tra il 100'000 e il 40'000 a.C. I popoli nomadi del **Paleolitico superiore** (40'000 – 12'500 a.C.) si sono stabiliti in tutta Europa, vivendo di caccia, di pesca e di raccolta (figura 7.2).

Durante questo periodo, varie culture si succedono (figura 7.1). Verso il 12'500 a. C., in seguito ad un riscaldamento climatico importante, appaiono le prime foreste e gli uomini dell'Epipaleolitico adottano l'arco e le frecce per la caccia. Tra il 10'000 e il 5'500 a.C., cioè durante il **Mesolitico** (figura 7.3), i sistemi di vita dell'uomo si diversificano su tutto il territorio europeo. Con l'arrivo di nuove tradizioni originarie del Medio-Oriente, i cacciatori-raccoglitori di tutta Europa spariscono gradualmente ed adottano un metodo di vita sedentario basato sull'agricoltura e l'allevamento. Questo periodo, chiamato **Neolitico** (5'500–2'200 a.C.) vede apparire la ceramica e gli attrezzi in pietra levigata. Le case si organizzano in villaggi (figura 7.4). L'apparizione della metallurgia del bronzo, lega di rame e stagno (figura 7.5) che caratterizza l'**età del Bronzo** (2'200–800 a.C.), rimpiazzerà gli attrezzi in selce o in pietra levigata. Il modo di vita è poco diverso da quello del Neolitico, si tratta sempre di villaggi di agricoltori. Durante l'**età del Ferro** (800–0 a.C.) appaiono le prime città (figura 7.6). Il commercio e l'uso della moneta si diffondono attraverso l'Europa e il sud mediterraneo. Diversi popoli celtici (*Ubères, Sédunes, Vérages, Nantuates, Helvètes, Allobroges*, figura 7.37) si dividono il Vallese e il bacino lemanico. Nel 58 a.C. l'arrivo di Giulio Cesare e delle sue legioni marca la fine della preistoria e l'inizio della conquista romana della Svizzera.

¹<http://www.musees-vd.ch/fr/musee-darcheologie-et-dhistoire/expositions/alpes-au-leman/>

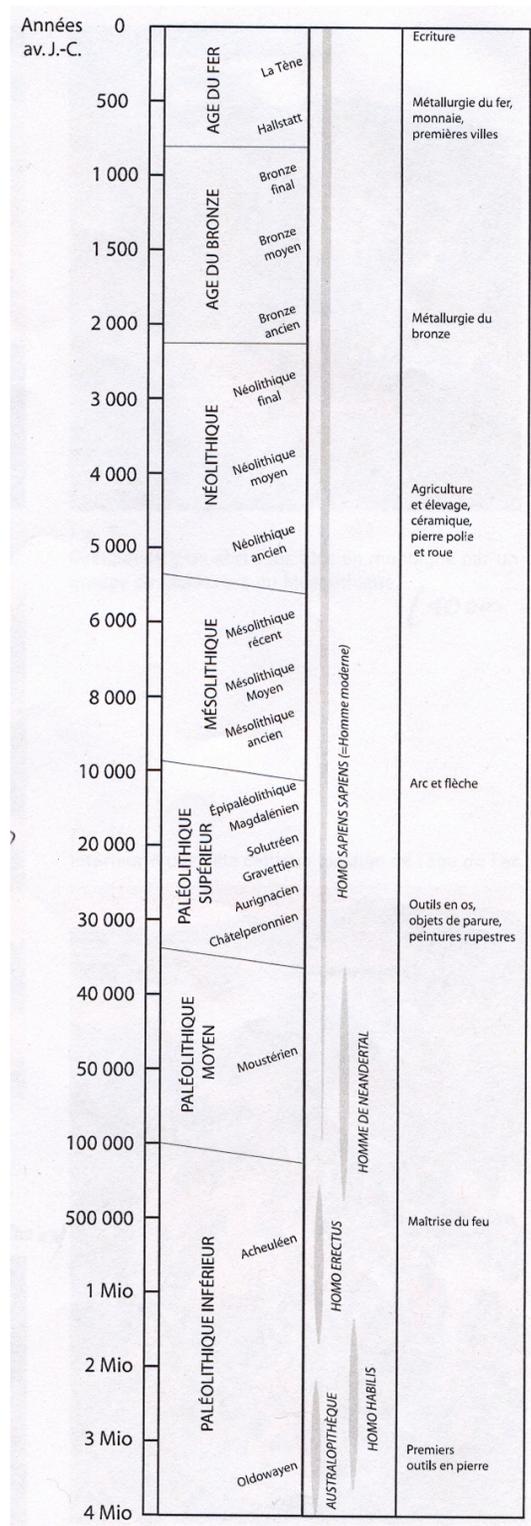


FIGURA 7.1— Periodi della preistoria con le specie della famiglia umana e gli eventi più importanti.

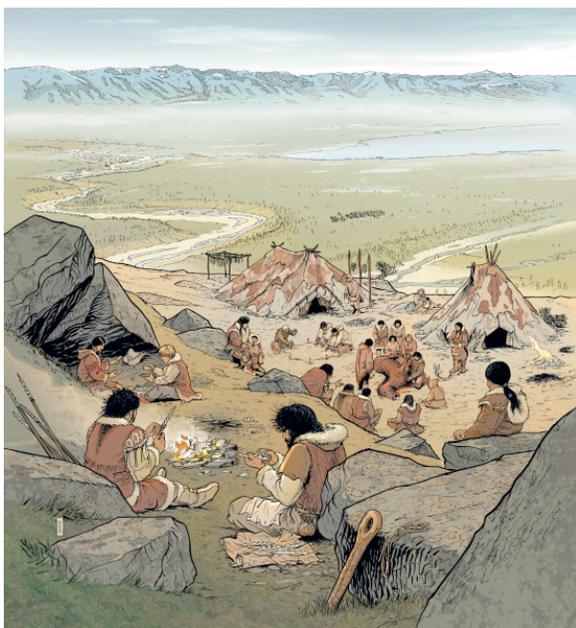


FIGURA 7.2— Insedimento *Magdalénien* del **Pa-leolitico superiore** (40'000–12'500 a.C.).

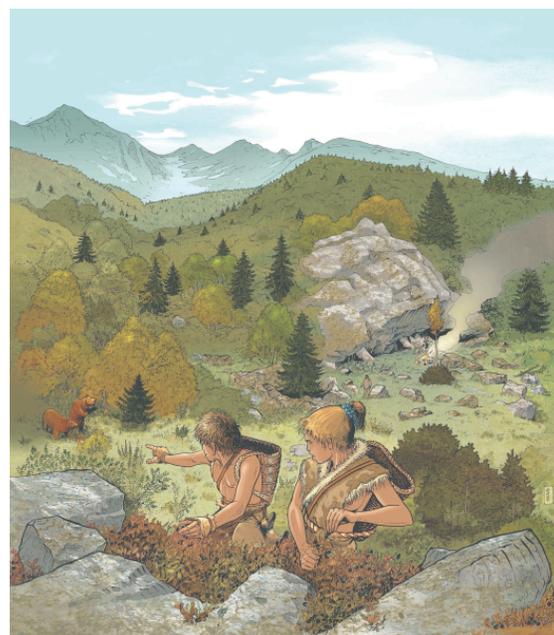


FIGURA 7.3— Occupazione di un riparo di mon-tagna da parte di un gruppo di cacciatori del **Mesolitico** (10'000–5'500 a.C.).

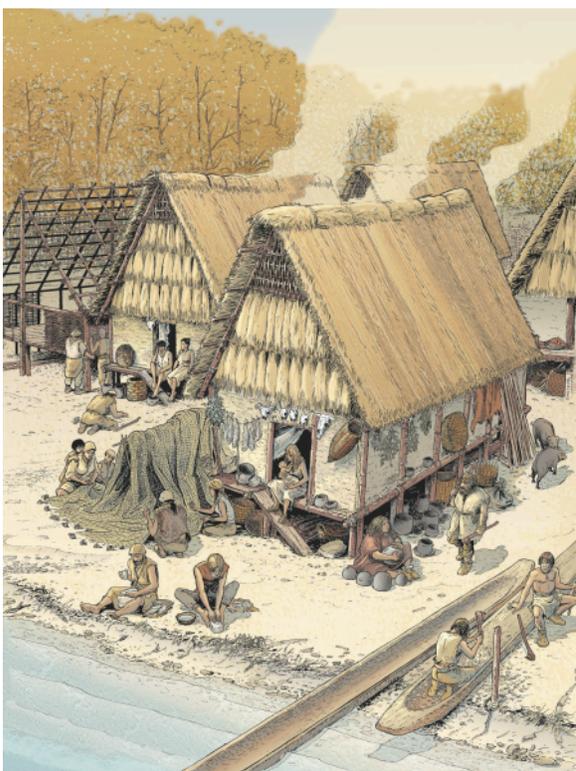


FIGURA 7.4— Paese lacustre del **Neolitico** stabilito sulle rive di un lago (5'500–2'200 a.C.).

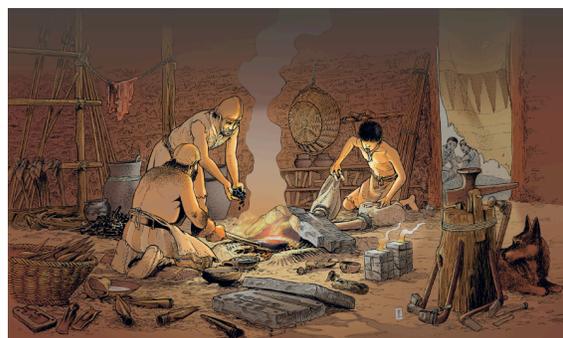


FIGURA 7.5— Officina del fabbro dell'**età del Bronzo** (2'200–800 a.C.). L'operazione mostrata qui è la fonte del bronzo. L'officina è disposta su un suolo in terra battuta. Essa è immersa nella semi-scurita, perché è il colore del metallo fuso che permette di stimare la temperatura raggiunta. È anche isolata per evitare le correnti d'aria e la perdita di calore. Il focolaio è un semplice catinella nel suolo. Il crogiolo in pietra refrattaria viene depositato sul fuoco e ricoperto di carboni incandescenti; il fuoco è attizzato da due mantici collegati a un tubo di terra con un gomito finale. Al primo piano uno stampo in due parti, aperto, servirà a colare una punta di lancia e degli anelli.



FIGURA 7.6— Interno di una città fortificata celtica dell'età del Ferro, verso il 100 a.C. Questa città potrebbe essere Ginevra, solo che nessuna traccia archeologica di mura è stata scoperta. Vista di un quartiere animato vicino ad una porta d'entrata monumentale. La presenza di qualche militare romano si spiega con il fatto che il territorio degli *Allobroges* era, all'epoca, già integrato nella provincia romana di Narbonnaise. Un soldato contempla il lavoro dei ceramisti: fabbricazione dei recipienti al tornio per ceramica, vendita di stoviglie. Le prime monetazioni accadono già, quindi l'acquisto dei recipienti si fa in soldi. Qualche anfora segnala la presenza di vini importati dal Sud dell'Italia (Campania). I negozi si allineano lungo un portico "alla romana".

7.2 Evoluzione del paesaggio e della vegetazione

Lungo gli ultimi 40'000 anni il paesaggio si è considerevolmente modificato. La flora è anche fortemente cambiata non solo in funzione del clima, ma anche in seguito all'impatto sempre più marcato delle attività umane.

Le rare vestigia del **Paleolitico superiore** in Svizzera risalgono al *Magdalénien*, verso il 13'000 a.C. circa. Prima di questo periodo, il ghiacciaio del Rodano copriva tutta la Svizzera (fino alla regione di Lione al momento di massima estensione intorno al 20'000 a.C.) raggiungendo l'altitudine di 1400 metri a Losanna e 1500 metri nel Vallese centrale, cioè uno spessore di ghiaccio di 1000 metri (figura 7.7). In tali condizioni, nessuna presenza umana era possibile e tutte le tracce anteriori a quest'ultima glaciazione sono state cancellate dal passaggio del ghiacciaio. Queste condizioni climatiche spiegano perché le rare vestigia del **Paleolitico medio** (*Moustérien*), anteriori all'ultima glaciazione, siano state conservate solo in alcune grotte in altitudine, risparmiate dall'azione dei ghiacciai.

È l'azione di questi ghiacciai che ha modellato il paesaggio. Essa si osserva ancora oggi: il profilo ad U della valle del Rodano tra Martigny e Brig è caratteristico del passaggio di una lingua glaciale; il fondo è ostruito da sedimenti dai 600 agli 800 metri di altezza.

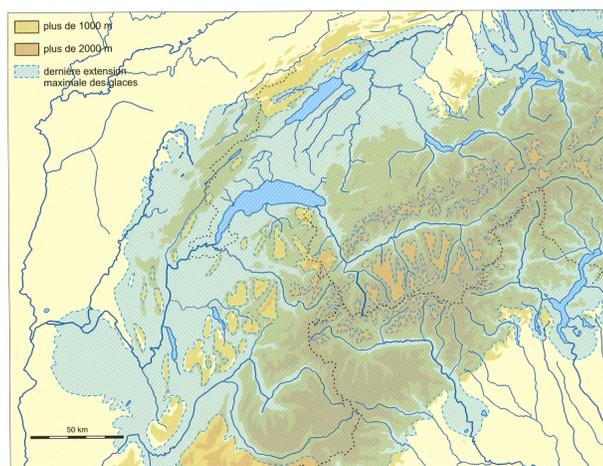


FIGURA 7.7— Estensione massima dei ghiacciai durante l'ultima glaciazione del Würm (20'000 a.C.)

Si stima che l'altipiano svizzero sia stato libero dai ghiacci a partire dal 15'000 a.C., mentre la valle del Rodano era ancora probabilmente occupata da resti glaciali. Una volta sparito il ghiaccio, un certo lasso di tempo fu necessario alla ricolonizzazione vegetale. Gli uomini del Paleolitico superiore (*Magdalénien*, tra il 16'000 e il 12'500 a.C.) si sono quindi stabiliti sull'altipiano svizzero e sulle rive del lago Lemano, ma non hanno penetrato il massiccio alpino, ancora parzialmente occupato dai resti dei ghiacciai, che rendevano l'accesso a queste zone impraticabile. La vegetazione di questo periodo era principalmente costituita di erbacei e di arbusti di piccola dimensione, come betulle nane e salici, che si trovano ancora oggi in altitudine (vedi approfondimento 8.12 per più dettagli). La fauna cacciata era quella tipica della steppa: renne e cavalli selvatici costi-

tuivano una parte importante delle risorse, insieme ad altre specie come lo stambecco, la volpe polare, la marmotta, il bisonte, uccelli e pesci.

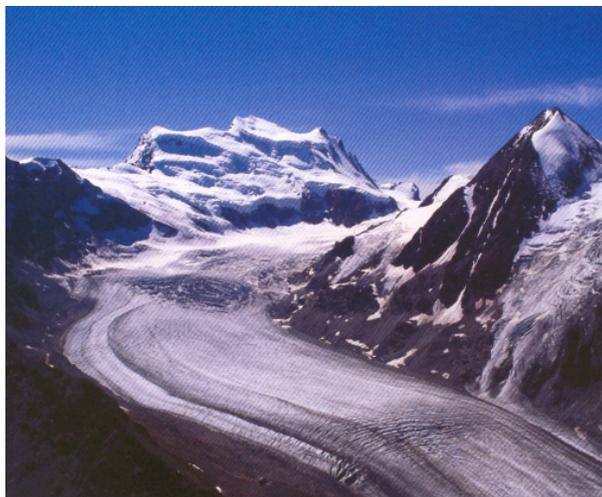


FIGURA 7.8— Il *Grand Combin* e il ghiacciaio di Corbassière (Vale di Bagnes, Vallese). Una visione che potrebbe corrispondere all'immagine della valle del Rodano durante l'apice dell'ultima glaciazione 25'000 anni fa.

Intorno al 12'500 a.C. (**Epipaleolitico**), le condizioni climatiche si addolciscono e la vegetazione si modifica. I primi alberi di betulla e pino appaiono e formano una foresta abbastanza aperta. In seguito queste specie sono progressivamente sostituite da foreste di alberi a foglia, tra cui il nocciolo, la quercia e l'olmo sono le specie dominanti. Sono in queste foreste più dense che vivono le popolazioni di cacciatori del **Mesolitico** (10'000–5'500 a.C.). Gli animali cacciati sono quelli che si incontrano ancora oggi in Europa: cervo, capriolo, alce, cinghiali, orso, volpe, lince, bisonte, castoro. Con questo netto miglioramento climatico la montagna sarà abitata nella bella stagione (primavera ed estate). Si trovano così degli indizi di passaggio di gruppi di cacciatori in numerose regioni delle Alpi o Prealpi ad altitudini spesso superiori ai 2000 metri.

Durante il **Neolitico** (5'550–2'200 a.C.), le condizioni sono più o meno paragonabili al clima attuale. La foresta evolve per raggiungere uno stadio di foresta mista dove sono presenti numerose specie termofile: quercia, frassino, tiglio, olmo, acero. A partire del Neolitico l'impatto umano avrà un effetto importante sull'ambiente. Il passaggio dal sistema di vita dei cacciatori ad un modo di sussistenza basato sull'agricoltura e l'allevamento influisce sul paesaggio: importanti superfici saranno diboscate per stabilire zone di coltura di cereali e pascoli.

Il querceto misto è successivamente sostituito da foreste di faggio e abete, che modellano il paesaggio dell'**età del Bronzo** (2'200–800 a.C.) e dell'**età del Ferro** (800–0 a.C.), paragonabile al paesaggio attuale. L'impatto dell'uomo è sempre più significativo.

Nelle 4 sezioni che seguono, guarderemo quattro periodi che si susseguono cronologicamente: 1) i cacciatori-raccoglitori dal Paleolitico al Mesolitico, 2) i primi contadini del Neolitico, 3) l'età del Bronzo e 4) i celtici dell'età del Ferro.

7.3 I cacciatori-raccoglitori dal Paleolitico al Mesolitico

Durante millenni, tutte le popolazioni umane sono sopravvissute grazie alla caccia, alla pesca e alla raccolta, spostando i loro insediamenti in funzione delle risorse naturali. Nelle Alpi la storia del popolamento umano è strettamente legata alla storia delle glaciazioni. Ad eccezione di rare testimonianze della presenza dell'uomo di Neandertal (30'000 a.C.), è solo dopo l'ultima ritirata dei ghiacciai che il territorio sarà colonizzato dalla flora, dalla fauna e in seguito dall'uomo moderno. Attorno al lago Lemano, i primi insediamenti risalgono alla fine del Paleolitico, verso il 13'000 a.C. Si deve aspettare ancora un millennio o due per vedere i cacciatori dell'Epipaleolitico penetrare nelle Prealpi. In Vallese, i più vecchi insediamenti risalgono all'8500 a.C. (Mesolitico).



FIGURA 7.9— Una grotta vicino a Tanay (Vallese) all'altitudine di 1660 m. Paleolitico medio 35'000 a.C. Una femmina di orso con i cuccioli sta per ibernare.

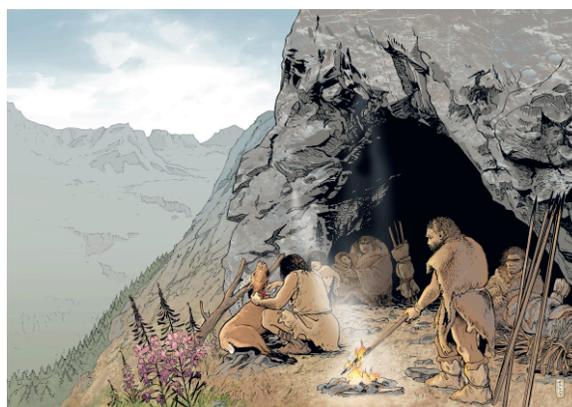


FIGURA 7.10— Un gruppo di Neandertal nella stessa grotta. Le due scene *non* sono contemporanee, ma separate da un lungo lasso di tempo, durante il quale la sedimentazione ha modificato il suolo della grotta e ricoperto le tracce dell'orso.

Periodicamente nell'ultimo milione di anni (vedi figure 8.1 e 6.22), importanti calotte glaciali si sono sviluppate e hanno reso queste regioni inaccessibile ad ogni vita umana e animale. Durante le fasi temperate i popoli che erano rimasti nella periferia delle zone ghiacciate colonizzano di nuovo questi territori. Tuttavia, ogni avanzata glaciale, grazie alla sua temibile forza di erosione, ha cancellato tutte le tracce umane anteriori. Molto raramente sono state preservate tracce, nelle grotte come a Tanay sopra Vouvry in Vallese o al Baré, vicino a Onnion in Haute-Savoie. Di conseguenza, nelle zone tra le Alpi e il Lemano, ci sono arrivate solo qualche briciole della storia dei cacciatori-raccoglitori; è solo dopo l'ultimo ritiro glaciale che i resti si moltiplicano, 15'000 anni fa, cioè non molto più di 500 generazioni fa!

7.3.1 Il Paleolitico

Durante il Paleolitico, tre discendenze umane si succedono in Europa (figura 7.1):

- il *Paleolitico inferiore* corrisponde all'arrivo dell'Homo Erectus (figura 6.13), che sa dominare il fuoco e che per primo popola l'Europa a partire dall'Africa, poco più di un milione di anni fa.
- il *Paleolitico medio* vede l'emergere dell'uomo di Neandertal, artigiano della cultura *moustérienne*, a cui dobbiamo le più antiche sepolture identificate.
- la colonizzazione progressiva di tutta l'Europa da parte dell'uomo moderno (Homo sapiens) a partire dal 40'000 a.C. introduce le civiltà del *Paleolitico superiore*.

Il Paleolitico inferiore

Il Paleolitico inferiore si estende su parecchie centinaia di migliaia di anni. Durante questo periodo, diversi cicli glaciali si alternano con episodi più clementi, a volte più caldi del clima attuale. Nelle Alpi i resti di un'occupazione non sono stati ritrovati, ciò non significa che l'uomo non abbia mai frequentato questi territori, ma piuttosto che l'attività glaciale ne ha cancellato tutte le tracce.

Il Paleolitico medio

Il Paleolitico medio coincide con la piena espansione delle popolazioni neandertaliche in Europa. Durante questo periodo, due cicli maggiori di glaciazioni si succedono, con le loro incessanti oscillazioni climatiche. Il secondo, chiamato Pleniglaciale inferiore o Würm antico raggiunge la sua intensità massima verso il 65'000 a.C. Esso è seguito da un miglioramento sensibile tra il 50'000 e il 30'000 a.C. (nel periodo chiamato Würm medio).

È grazie a questo netto addolcimento del clima, che coincide con la fine del Paleolitico medio, che i cacciatori che percorrono le Alpi lasciano tracce del loro passaggio. Sopra i 1200 m, alcune grotte contengono attrezzi tagliati dall'uomo (figura 7.11), accompagnati da numerose ossa di orso preservate dall'erosione.

Tutto il territorio era libero dai ghiacci ed accessibile quando l'uomo di Neandertal si stabilì: contrariamente ad alcune stampe popolari di Epinal, non ci sono mai stati uomini delle caverne rifugiati in cima alle montagne, contemplando un mare di ghiaccio. Tutte le caverne abitate dall'uomo, situate tra i 1200 e i 2400 m d'altitudine indicano brevi soste, durante le spedizioni di caccia. Gli attrezzi e i detriti vari, sottoposti durante decine di migliaia di anni ad un'intensa azione del gelo sono fortemente alterati e la loro forma è spesso difficile da riconoscere. Tuttavia non c'è ragione di pensare che questi attrezzi scoperti nelle Alpi siano diversi dagli altri oggetti della stessa epoca scoperti nel resto d'Europa. Queste scoperte hanno dato vita al mito del "Paleolitico alpino", associato al "culto dell'orso". Queste teorie sono oggi totalmente abbandonate.



FIGURA 7.11— Raschino, Paleolitico medio (Haute-Savoie, Francia)

Il Paleolitico superiore

Il Paleolitico superiore corrisponde all'arrivo degli uomini di tipo moderno in Europa occidentale, a partire dai Balcani. 40'000 anni fa appaiono gli attrezzi in ossa, accompagnati da diversi oggetti di ornamenti insieme alle prime manifestazioni di arte parietale, come per es. le famose pitture della grotta Chauvet, in Ardèche (Francia), che risalgono a più di 30'000 anni fa.

Dal punto di vista climatico il Paleolitico superiore si inserisce nell'ultima grande avanzata dei ghiacciai, che inizia verso il 30'000 a.C. e che raggiunge il suo massimo verso il 22'000 a.C. La fine della glaciazione inizia verso il 18'000 a.C. con un riscaldamento generale in alternanza con fasi più fredde. Da questo momento, a nord delle Alpi, i territori liberati dai ghiacci sono progressivamente ricolonizzati dai cacciatori del *Magdalénien*. La cultura *magdalénienne* copre la maggior parte dell'Europa occidentale, dalla Spagna alla Polonia attuali. È caratterizzata da attrezzi, tipo lame, lamelle, raschini, bulini, foratoi (vedi figure 7.12 e 7.13).

La lavorazione delle ossa e delle corna di renna è molto sviluppata (arponi, propulsori, bastoni bucati, spesso decorati da motivi animalistici). In Svizzera i settori più ricchi si trovano nel Jura e nel nord del Plateau. Nel bacino del Lemano, le testimonianze sono più rare: Veyrier vicino a Ginevra (figura 7.2), Villeneuve (Vaud) che risalgono al 13'000 a.C. A Neuchâtel, i siti di Monruz e Champréveyres testimoniano del modo di vita dei cacciatori *magdaléniens* che è stato fortemente influenzato dalle condizioni climatiche abbastanza rigorose di quest'epoca.

7.3.2 L'Epipaleolitico e il Mesolitico

Con il rapido miglioramento climatico che marca la fine dell'ultima glaciazione, l'ambiente dei cacciatori si trasforma completamente. Lo sviluppo della foresta, dove i pini lasciano progressivamente il posto a spesse foreste a fogliame, porta alla sparizione del-



FIGURA 7.12— Utilizzo sperimentale di un raschino. Gli studi confermano che questo tipo di strumento era utilizzato per la lavorazione delle pelli.

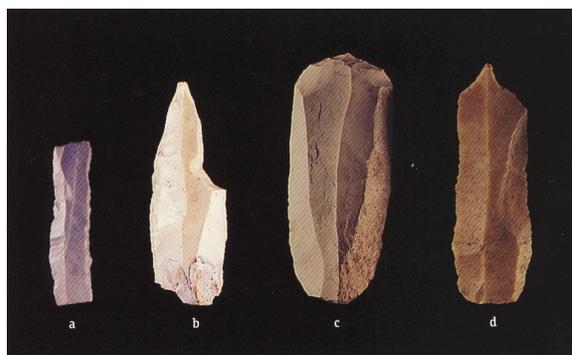


FIGURA 7.13— Veyrier, Haute-Savoie. Attrezzi in selce caratteristici del *Magdalénien*, verso il 13'000 a.C. a. La lamella a schiena è un'armatura caratterizzata da una schiena rettilinea con un bordo tagliente: fissati in serie sulle punte delle zagaglie in legno di renna, i bordi taglienti verso l'esterno aumentavano il potere penetrante di questi proiettili. b. Il bulino è un attrezzo usato per il lavoro delle materie ossee, ossa e corna di renna. c. Il raschino è usato per la grattatura delle pelli. d. Foratoio.

le specie della steppa fredda (come la renna e poi il cavallo) a profitto di una fauna forestiera composta da cervi, cinghiali e caprioli. Queste nuove condizioni portano ad una trasformazione radicale della sussistenza e dell'organizzazione sociale dei gruppi di cacciatori: vivono ormai in un ambiente naturale dove le risorse sono più diversificate.

L'Epipaleolitico e il Mesolitico corrispondono ad una vera e propria conquista dei territori alpini da parte delle popolazioni di cacciatori-raccoglitori, a parte durante l'undicesimo millennio, dove un ritorno a condizioni climatiche rigorose provoca una netta retrocessione del popolamento, o un quasi abbandono delle regioni di montagna.

L'Epipaleolitico

L'adozione dell'arco per la caccia provoca la sparizione del propulsore e delle armi a getto del Paleolitico superiore. Le zagaglie sono sostituite da frecce, con punte e armature di selce (figure 7.14, 7.15 e 7.16). L'Epipaleolitico si caratterizza anche con una diminuzione generale della dimensione dei prodotti di taglio e dei attrezzi stessi (processo chiamato "azilianizzazione" che tocca la maggiore parte dell'Europa).

Il Mesolitico

Il Mesolitico si sviluppa all'inizio del Postglaciale, tra il 9500 e il 5500 a.C. circa. In Svizzera tutti i settori geografici e gli ambienti naturali sono occupati. Con il Mesolitico la tendenza a ridurre la dimensione degli attrezzi in selce continua e si rinforza, particolarmente per le armature di freccia. Questo fatto è stato al lungo considerato come una degrado delle tecniche da taglio, ma dovrebbe spiegarsi piuttosto come una scelta voluta: altri savoir faire legati particolarmente all'uso della legna (archi, frecce e manici) non necessitano di consacrare così tanto tempo alla produzione di attrezzi di pietra come

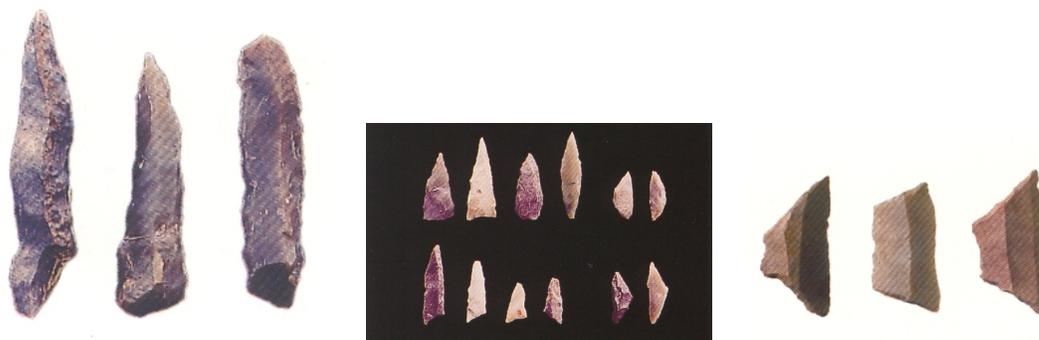


FIGURA 7.14— Rifugio di Château-d'Éx (Vaud). Punta a schiena rettilinea, 9'500 a.C.
 FIGURA 7.15— Rifugio di Châble-Croix (Collombey, Val- lese). Armature di frecce in selce, 8'500–7'500 a.C.
 FIGURA 7.16— Vidy, Losan- na (Vaud). Armature di frecce in (trapezio) in selce. Mesolitico.

durante il Paleolitico superiore. Inoltre la produzione di attrezzi di dimensione ridotta permette di accontentarsi di materia prima di qualità inferiore o mediocre, che non avrebbe potuto soddisfare le esigenze nel Paleolitico superiore. I cacciatori-raccoglitori possono così affrancarsi da un obbligo economico esigente: l'approvvigionamento di rocce silicee di buona qualità.

7.3.3 Risorse alimentari: caccia e raccolta

Il termine cacciatore-raccoglitore si riferisce a tutte le popolazioni (passate o presenti) il cui sistema di sussistenza è basato solo sullo sfruttamento di specie selvatiche, sia di caccia, che di pesca o di raccolta di molluschi o di piante. Numerosi esempi etnografici mostrano che i prodotti vegetali occupano un ruolo importante nell'alimentazione delle popolazioni di cacciatori.

Da un punto di vista nutritivo è provato che le diete molto ricche in proteine sono povere in calorie, anche se le quantità di carne consumate superano diversi chilogrammi al giorno. L'assimilazione di proteine è costosa e il loro ruolo energetico è minore. Gli idrati di carbonio, presenti nei vegetali, e soprattutto nei grassi (sorgente d'energia considerevole) sono indispensabili all'organismo. La cacciagione è una carne particolarmente magra. Tutte le popolazioni con un'alimentazione basata essenzialmente sulla carne attribuiscono un grande valore ai pezzi più grassi.

Durante i periodi climatici rigorosi del Pleistocene, in cui l'ambiente offriva solo magre possibilità di raccolta di vegetali, si può immaginare che le risorse d'origine animale prevalgano. Durante questi episodi freddi, strategie alimentari come l'estrazione sistematica del midollo osso (grasso) dovevano equilibrare questa dieta. La frantumazione della ossa degli animali, osservata in numerosi siti archeologici, ne testimonia in modo eloquente.

Durante i periodi interglaciali temperati, le foreste potevano fornire all'uomo una vasta gamma di prodotti commestibili, come piante, frutti, radici, tuberi, funghi, noci o semi. Si stima che con un clima temperato, l'ambiente di foresta fornisca una biomassa considerevole, 4 o 5 volte superiore a quella dell'ambiente aperto del tipo tundra-steppe. Un ettaro di foresta può fornire 500 chili di nocciole. Considerate che

100 grammi di nocciole seccate forniscono 650 calorie e 14 grammi di proteine, mentre 100 grammi di carne di renna forniscono 127 calorie e 22 grammi di proteine. A parte le importanti accumulazioni di guscio di nocciole carbonizzate scoperte negli strati di abitazioni mesolitiche (come a Châble–Croix nella valle del Rodano) prove dirette del consumo di vegetali sono rare.

Dove le condizioni di conservazione erano favorevoli, sono stati preservati gusci d'uova, resti di tartarughe, di pesce o conchiglie di acqua dolce. Questi resti mostrano che i cacciatori preistorici raccoglievano una moltitudine di prodotti nel loro ambiente. Malgrado lo sviluppo di nuove tecniche di analisi chimiche che si possono effettuare sulle ossa umane, resta difficile per il momento valutare la proporzione dei vari contributi alimentari e stimare l'importanza relativa delle proteine animali e dei vegetali nella dieta delle popolazioni preistoriche. Grazie alla buona conservazione dei resti animali, le attività di caccia sono molto meglio documentate che la raccolta.

7.3.4 Caccia e raccolta durante il *Magdalénien*

Il modo di sussistenza degli ultimi cacciatori del Paleolitico superiore, ammirevolmente adattato ad un clima difficile e ad un ambiente tipo steppa con poca copertura vegetale è ben conosciuto. Malgrado lo spettro degli animali cacciati vari a seconda dei siti e delle stagioni, lo sfruttamento della renna e del cavallo selvatico, grandi erbivori che si spostano in branco nelle praterie aperte, giocava dappertutto un ruolo cruciale.

Determinare l'età degli animali cacciati (principalmente giovani di meno di un anno) permette di conoscere la stagione di occupazione del sito. Per esempio, a Champréveyres (Hauterive, Neuchâtel), i resti di due giovani renne di meno di otto mesi e di due cavalli di meno di 6 mesi attestano un'occupazione tra la primavera e l'inizio dell'autunno. La presenza di gusci di uova di cigni è anche un buon indicatore stagionale (primavera). Nello stesso modo la scoperta di resti ossei d'animali ibernanti (marmotta per es.) permette di escludere un'occupazione in inverno.

A Champréveyres per es. la fauna cacciata comprende essenzialmente mammiferi (cavallo, renna, bisonte, stambecco, volpe polare, lince, marmotta, lepre), ma anche uccelli (strolaga artico, svasso a collo nero, cigni, anatre, aquila reale, lagopodo) e pesci (salmoni, temolo fluviale, lasca e bottatrice). Questo spettro molto diversificato presuppone una caccia opportunista usando tutte le risorse dell'ambiente, in opposizione alla caccia specializzata della renna messa in evidenza nel bacino parigino (Pincevent).

Lo stato di frantumazione e le tracce da taglio sopra le ossa rivelano le tecniche di macelleria: la carne di tutte le specie era sistematicamente distaccata dalla ossa allo stato crudo; le ossa erano poi frantumate per recuperare il midolloso, una delizia e una sorgente di grasso molto apprezzata da tutte le popolazioni di cacciatori–raccoltori.

7.3.5 Caccia e raccolta durante l'Epipaleolitico e il Mesolitico

Durante l'Epipaleolitico e il Mesolitico la caccia ha un carattere meno prevedibile e si estende a una larga gamma di specie sparse in un ambiente sempre più boschivo. La grande diversità degli ambienti e delle risorse sfruttate appare nettamente nel sito di pianura alluvionale di Châble–Croix in Vallese. La caccia, soprattutto orientata verso le specie forestali come il cervo e il cinghiale, concede un largo spazio ai piccoli animali da



FIGURA 7.17— Riparo "Freymond", passo del Mollendruz, Mont-la-Ville, Vaud. Altitudine: 1100m. **Mesolitico antico**, verso il 9000 a.C. Insediamento autunnale di un piccolo gruppo familiare in un riparo d'altitudine del Jura Vedese. Si tratta di un habitat stagionale nel quale tutto il gruppo è riunito (adulti e bambini, uomini e donne). A destra vicino al fuoco, un cacciatore ripara il suo materiale di caccia. Un altro leviga le sue frecce. Un bambino risale il pendio del riparo, esibendo fieramente un uccello che ha appena catturato. Il paesaggio è composto da una foresta di pini con qualche albero a foglia tra cui le orme. In lontananza, le creste delle prealpi del Chablais.

pelliccia, come la martora e il gatto selvatico, che potevano essere catturati con trappole. Lo sfruttamento degli ambienti acquatici o paludosi della pianura del Rodano si deduce



FIGURA 7.18— Châble-Croix (Collombey-Murray, Vallese), altitudine: 385 m, **Mesolitico medio**, verso il 7500 a.C. Caccia, pesca e raccolta primaverile nei dintorni di un piccolo accampamento installato nella pianura alluvionale del Rodano. Sulla riva di uno stagno con salici e betulle, una giovane donna raccoglie uova di anatra; dietro di lei, una giovane ragazza tiene una nassa e contempla le due trote che ha appena pescato. Sull'altra riva, un'altra ragazza tira fuori dall'acqua una nassa; due uomini tornano dalla caccia con un capriolo. Si indovina la presenza dell'insediamento grazie al lieve fumo ai piedi del versante coperto da una fitta foresta di alberi a fogliame.

dalla presenza di resti di castoro, di tartarughe di acqua dolce, di gusci d'uovo di anatra e da abbondanti resti di trota. Dai pochi resti di stambecchi e camosci, sembra che lo sfruttamento delle zone rocciose o d'altitudine, a partire da questo insediamento di pianura, sia molto limitata.

Invece nel riparo di Château-d'Œx in montagna, resti di ossa mesolitici recenti (6'000 a.C.) mostrano una fauna variata nella quale le specie alpine – camosci, stambecchi e lepri – sono ben presenti, ma dove il cervo è predominante, come nella maggior



FIGURA 7.19— La renna e il cavallo, grandi erbivori vivendo in branco nelle praterie aperte, erano molto apprezzati dai cacciatori *magdaléniens*. Le renne (a) si sono ritirati verso le regioni circumpolari quando le foreste si sono installate. Gli ultimi rappresentanti dai cavalli selvatici europee sono il cavallo di Przewalski (b) che sopravvive oggi in cattività e il tarpan (*Equus ferus ferus*) sparito all'inizio del 20° secolo. Alcuni tratti del tarpan si ritrovano probabilmente nel piccolo cavallo polacco come il suo colore grigio e la sua criniera scura (c). Il cervo (d) e il cinghiale (e), ben adattato ai ambienti forestali, costituisce la selvaggina di predilezione delle popolazione mesolitiche.

parte dei siti di pianura. Le altre specie cacciate sono il cinghiale, il tasso, la volpe, l'orso bruno e vari uccelli, di cui l'aquila reale.

7.4 I primi contadini del Neolitico

Mentre gli ultimi cacciatori percorrono ancora le foreste delle regioni del Rodano, grandi cambiamenti si preparano nel Medio–Oriente mediterraneo. Alla fine del periodo glaciale le piogge sono diventate più abbondanti. Foreste di quercia e vasti campi di graminacee riparano ormai una ricca fauna diversificata di bovidi, antilopi e caprini.

Dal 12'000 a.C. l'uomo si sedentizzerà in accampamenti stabili e si volterà progressivamente verso la raccolta di cereali selvatici e verso un controllo più stretto di alcuni erbivori: montoni, capre e bovi. Nonostante ciò si dovrà aspettare più di 5000 anni per compiere, verso il 7000 a.C., una lunga evoluzione che sconvolgerà il nostro mondo: il cacciatore–raccoltore diventerà agricoltore e allevatore. Dall'8000 a.C. infatti, l'agricoltura e l'allevamento si diffondono in tutta l'Europa, dalle zone dove sono stati inventati nel Medio–Oriente mediterraneo, tramite contatti tra le popolazioni e lenti movimenti migratori. Nuove popolazioni, probabilmente originarie dell'Italia si installano dal 6000 a.C. nel sud della Francia, portando con loro la cultura dei cereali, grano ed orzo, l'allevamento del montone e della capra e, in misura ridotta, del bove.

Due novità che accompagnano il nuovo popolamento trasformeranno la vita quotidiana: l'ascia levigata, che permette di aprire nella foresta primordiale gli spazi necessari alle colture, e la tecnica della ceramica, che è una vera rivoluzione nella preparazione degli alimenti. Questo periodo, chiamato **Neolitico**, è attestato dal 5'500 a.C. nella regione di Sion e sulle rive del lago Lemano: le foreste sono disboscate, i campi coltivati, i villaggi periodicamente spostati perché i campi si impoveriscono. Le diverse comunità intrattengono stretti contatti, in particolare tramite passi alpini.

Per più di 1'000 anni, i morti sono inumati in posizione ripiegata in cofani a lastre, le ciste. Alla fine del Neolitico (terzo millennio a.C.) grandi dolmen vengono eretti per riparare un grande numero di defunti.

7.4.1 Scene di vita del Neolitico



FIGURA 7.20— Collina di Tourbillon, Sion, Vallese. **Neolitico antico**, 5'000 a.C. Uno dei più antichi insediamenti agricoli del Vallese centrale. Coloni venuti probabilmente dall'Italia settentrionale si sono installati per la prima volta sulle colline rocciose nella valle del Rodano. I campi di cereali sono stabiliti attorno alla collina sulle terrazze naturali che dominano la valle. Lo spazio relativamente ristretto in cima alla collina non doveva permettere di costruire più di 3 o 4 case. La pianura paludosa dove straripa il Rodano è popolata d'alni, frassini, pioppi, betulle. Salici e cespugli isolati occupano le rive del fiume.

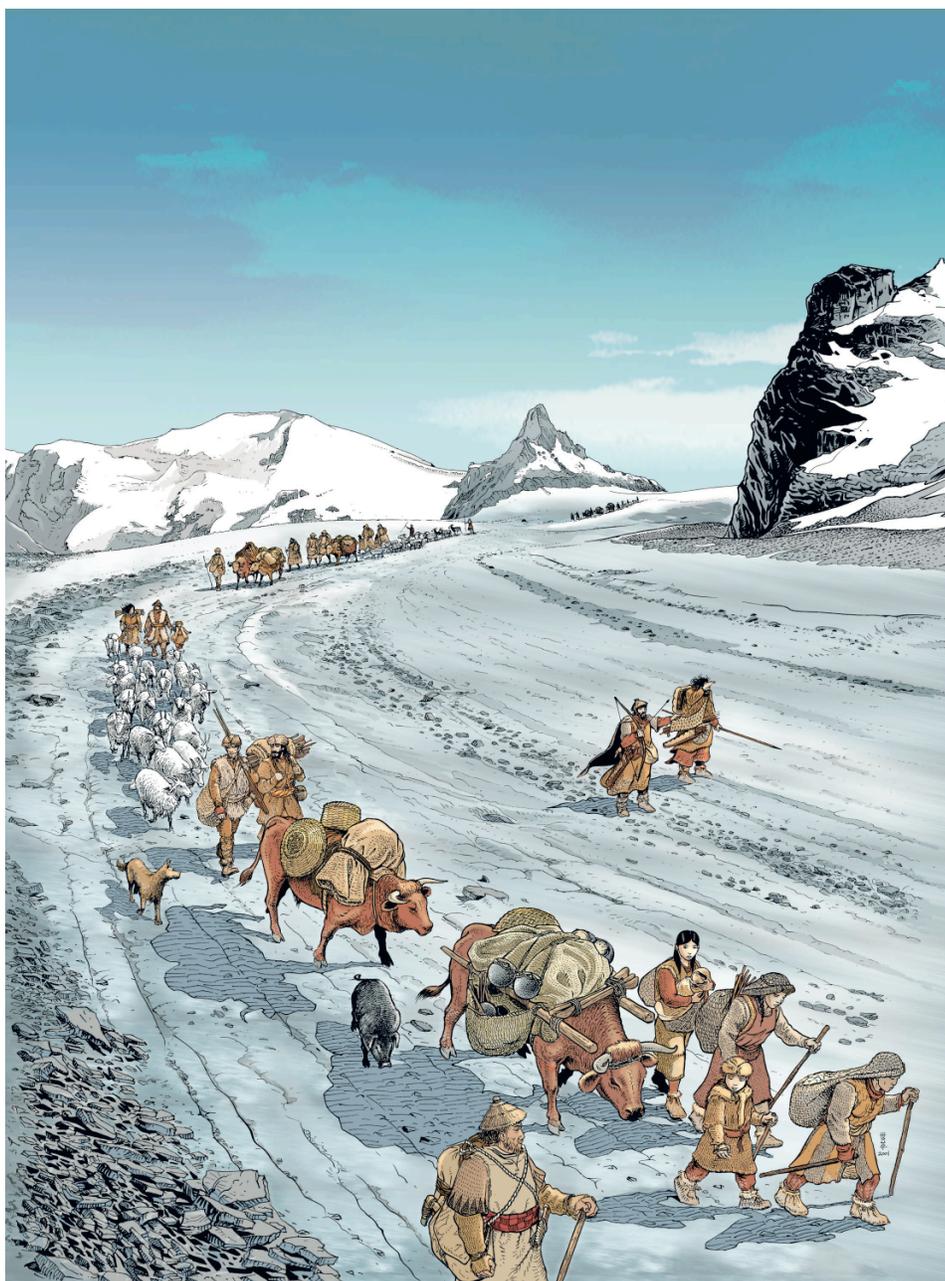


FIGURA 7.21— Migrazione alpina, Passo Collon (Arolla, Vallese). **Neolitico antico**, 5000 a.C. Sopra Arolla in Vallese, il passo Collon (3080 m) collega il val d'Hérens con la val d'Aosta. È stato in tutti i tempi un passaggio privilegiato tra il nord e il sud delle Alpi. All'orizzonte la cresta del Mont Brûlé (3591 m), la punta della Vergine (3232 m) e a destra il passo. All'epoca la strada comprendeva un corto passaggio sul ghiacciaio d'Arolla. Un coltello in silice del Neolitico finale scoperto su questa strada, salendo la valle d'Arolla testimonia della frequentazione di questa via nell'epoca preistorica. La scena illustra il primo popolamento del Vallese da parte di comunità venute dall'Italia settentrionale. La colonna cammina sul ghiaccio (d'estate) lungo una morena. Recente ricerche potrebbero rimettere in dubbio questa ricostruzione, perché l'inizio del quinto millennio a.C. corrisponde ad un periodo di netto riscaldamento: contrariamente alla situazione attuale, il passaggio potrebbe essere stato libero dal ghiaccio, con magari solo un po' di neve.

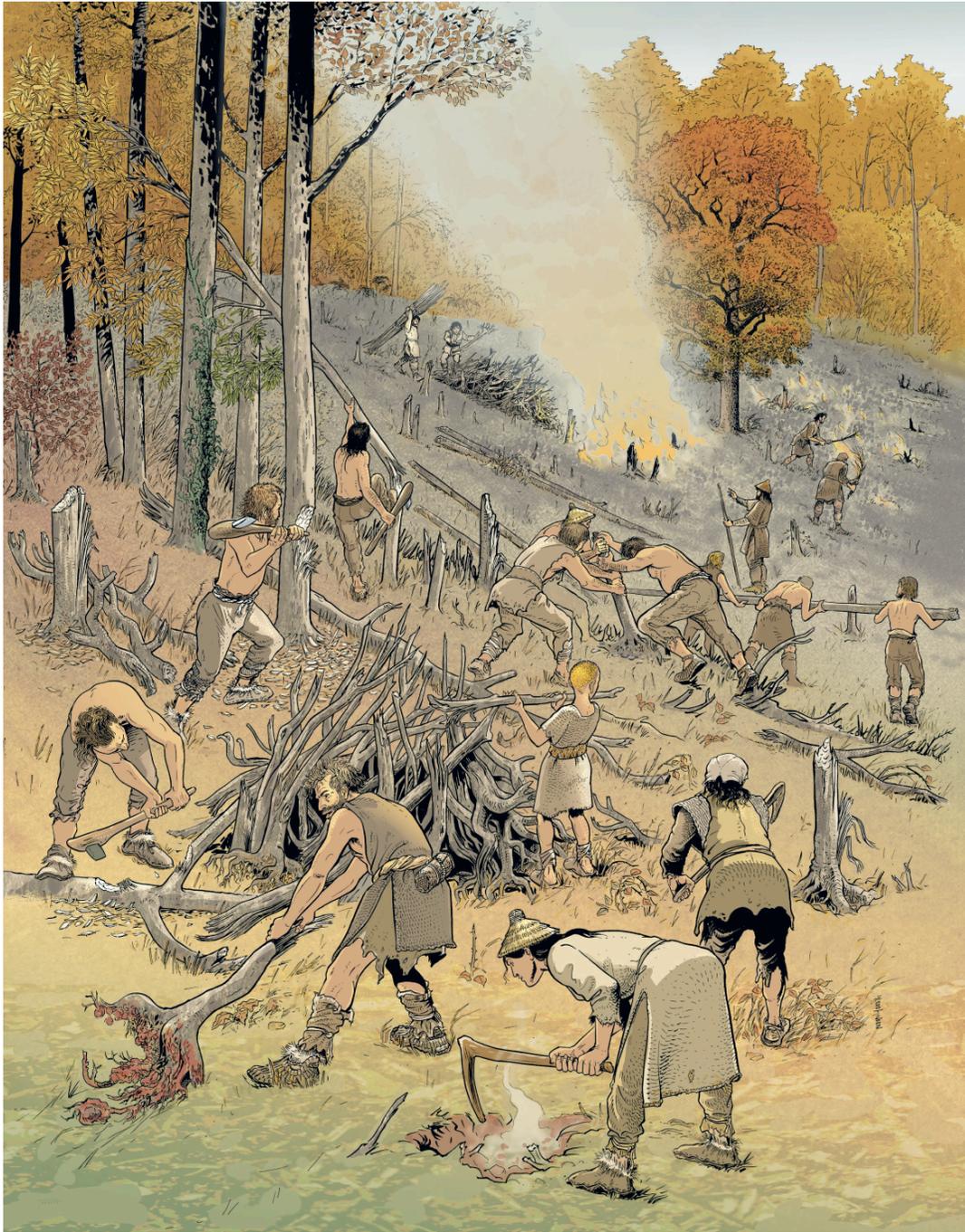


FIGURA 7.22— Disboscamento di una foresta primaria, **Neolitico medio**, 4500 a.C. Una comunità paesana sfolta i boschi di una foresta ai bordi del Lemano. Siamo in autunno. La vegetazione è quella di un querceto misto composto essenzialmente di querce, d'olmi e di tigli con qualche alno e frassino. L'attrezzo dell'agricoltore è la pesante ascia di pietra con lama levigata inserita direttamente nel manico. I solchi degli alberi più piccoli sono sterrati e bruciati, mentre le basi dei tronchi più grossi sono lasciate sul campo a marcire perché non impediscono l'agricoltura alla marra. L'uso dell'aratro (senza avantreno) si generalizza solo più tardi, nel corso del terzo millennio a.C.

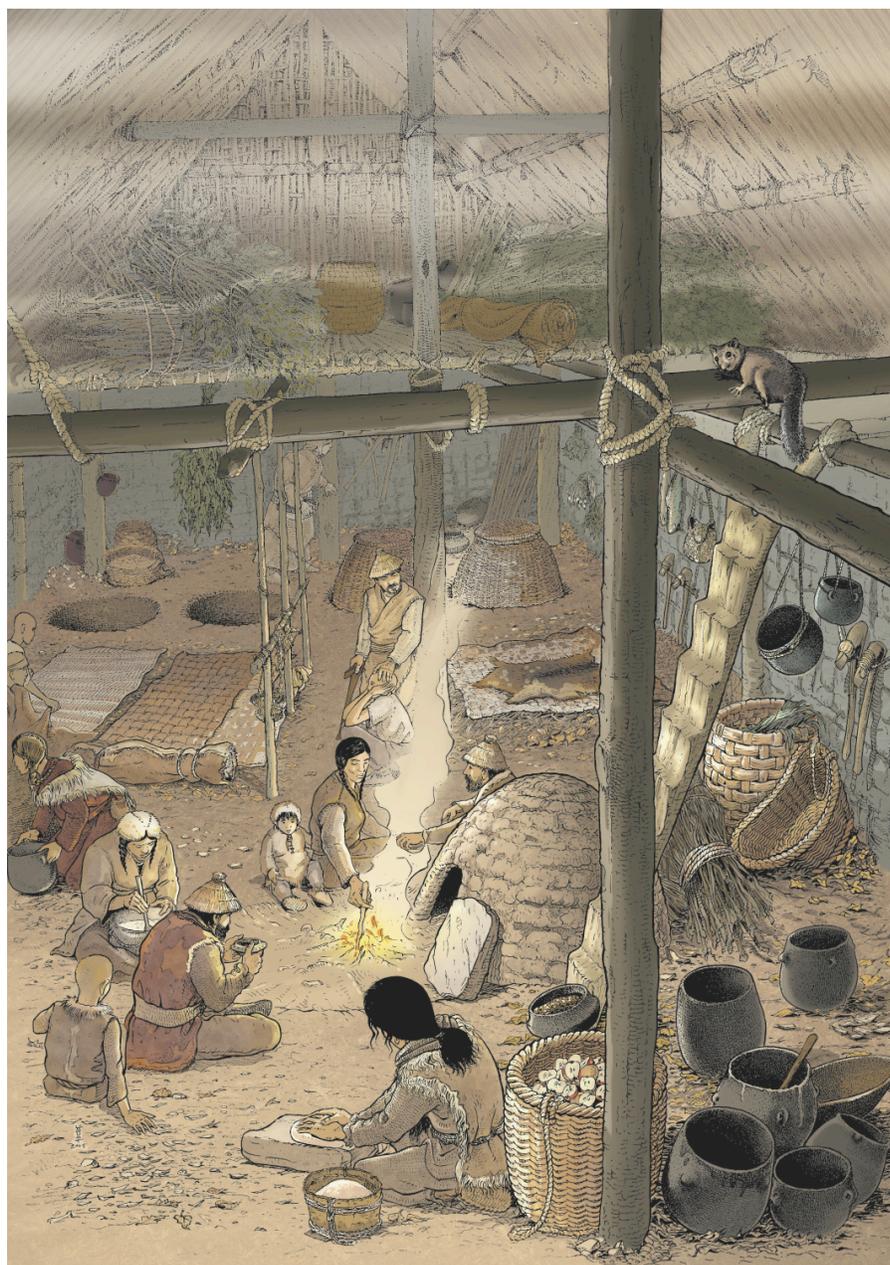


FIGURA 7.23— Interno di una casa del **Neolitico medio** (verso 4'000 – 3'800 a.C.) a Sion, Vallese. Lo spazio domestico è suddiviso in tre parti. Vicino all'ingresso l'attività familiare si concentra attorno al focolare e al forno: macinazione dei cereali, preparazione del cibo, attività tecniche diverse come l'intaglio del cristallo di roccia. Al primo piano, un panierino di mele selvatiche seccate testimonia delle attività di raccolta. Nella parte centrale lo spazio riservato al riposo è delimitato da ingratricciate dove sono appesi diversi effetti personali. Quattro larghe fosse scavate nel suolo appaiono nel fondo della casa. Grandi vimini dovevano essere depositati in questi buchi caratteristici delle case neolitiche vallesane. Dovevano contenere le riserve di cereali. Nell'assenza di una cappa del focolare, il fumo era semplicemente evacuato tra gli interstizi del tetto: lo impregna di fuliggine e assicura così una protezione indispensabile contro insetti e parassiti. Sotto il tetto sono immagazzinate riserve di foraggio e combustibile.



FIGURA 7.24— Cottura della ceramica all'esterno di un villaggio sul litorale lemanico, **Neolitico medio**, verso il 4'000 a.C. Le operazioni hanno luogo all'esterno del villaggio, dal lato della terra ferma, per evitare i rischi di incendi. Si svolgono in un quadro familiare. Detriti diversi, frammenti di legno, vecchi vimini, ceramiche fuori uso cospargono il suolo. Un ponto permette l'accesso al villaggio. Le uniche piante presenti in quest'ambiente molto frequentato e degradato sono quelle commestibili (ortica, piantaggine). Liane di luppolo si arrampicano alla palizzata. La cottura si fa in "carbonaia" nella quale le ceramiche sono in contatto diretto con il combustibile. I membri di una prima famiglia dispongono i vasi verticalmente prima di ricoprirli di rami e di paia. In primo piano una vecchia donna decora recipienti già cotti con strisce di corteccia di betulla fissati con la colla di pece di betulla. In secondo piano, i membri di una seconda famiglia controllano la cottura che è appena cominciata.



FIGURA 7.25— Lutry, Vaud. **Neolitico medio**, verso il 3800 a.C. Scene di baratto. Gli scambi ritualizzati sembrano essersi sviluppati in modo spettacolare durante il corso del quarto millennio. La cerimonia ha luogo davanti all'allineamento di menhir di Lutry. Alcune pietre – ricostituite qui perché sono oggi rotte – presentano una protuberanza in cima. Si scambia tra l'altro le ascie di pietra levigata in roccia dura, la nefrite estratta, per esempio, dei giacimenti del Val d'Hérens. In recipienti, prismi di cristallo di roccia. Il bestiame, qui un toro, faceva anche parte degli scambi, insieme ad alcuni prodotti più locali come i piastroni in difesa di cinghiali, una produzione specifica del bacino lemanico.



FIGURA 7.26— Corsier-Port, Ginevra, **Neolitico finale**, verso il 3'000–2'800 a.C. Una comunità abbandona il villaggio dopo averlo incendiato. Nello sfondo la punta d'Yvoire e la cresta del Jura. Si distingue attorno al paese la spiaggia di gesso parzialmente invasa dall'erba e la zona di palude che separa l'insediamento dalla terra ferma. Più a monte i campi abbandonati sono parzialmente invasi dalla vegetazione. Il paesaggio evoca una vegetazione degradata: la foresta disboscata più volte e invasa da rovi si presenta sotto forma di cedui dove dominano gli alberi formati da rigetti di ceppi. In primo piano, cardi e rosai selvatici. Il grosso della comunità si dirige verso un nuovo punto della riva, già disboscato e inseminato da pionieri due anni prima.

7.5 L'età del Bronzo

Durante il Neolitico, le comunità paesane si sviluppano e prosperano: esse occupano presto le migliori terre. I cacciatori-raccoglitori spariscono definitivamente dal continente Europeo, con l'eccezione dell'estremo Nord. Il modo di vita agro-pastorale genera una nuova simbologia religiosa, i miti e i riti restano concentrati sulla fecondità della terra (l'alma terra) e sulla fecondità femminile che assicura la sopravvivenza delle società.

Le reti di scambio favoriscono le relazioni tra individui e tra gruppi umani. Alcuni beni – rari, molto elaborati, difficile accesso – acquistano più prestigio e il loro possesso suscita l'emulazione tra individui e tra le comunità. Un sistema complesso di doni e di contro-doni, che non si limita ai beni materiali, permette di sigillare alleanze e di sviluppare solidarietà in un mondo dove i conflitti potrebbero essere più frequenti di quello che si immaginava una volta.

Dalla metà del Neolitico, ai confini orientali del continente europeo, nelle steppe vivono allevatori-guerrieri che conoscono l'uso della ruota e dominano il cavallo. Essi penetrano in varie tappe nei territori delle comunità agricole più vicine. E con il Mediterraneo orientale dove nascono le prime civiltà europee, a contatto della Mesopotamia e dell'Egitto, si creano relazioni sempre più forti. Sotto queste influenze incrociate nasce progressivamente un'età nuova, l'**età del Bronzo**. Questa lega scintillante di riflessi dorati o di color rame è solo il simbolo di un mondo in evoluzione nel quale il prestigio del potere sembra affermarsi più maestosamente e che è personificato dall'eroe guerriero e dalla bella principessa come nei romanzi di Omero; ma è solo una visione molto limitata di questo periodo. Le comunità si ancorano su un territorio per lunghi periodi, le condizioni di sussistenza migliorano, la specializzazione artigianale si sviluppa progressivamente e inizia lo sfruttamento industriale di alcune



FIGURA 7.27— Carro di bronzo trovato nel 1902, Trundholm, Danemark, 1'400 a.C.

risorse. Dalla zona del Danubio, la più vicina alle civiltà mediterranee, i nuovi modelli sociali e religiosi investono poco a poco tutta l'Europa continentale che forma, a partire dalla metà dell'età del Bronzo, una vasta comunità culturale. A partire dall'età del Bronzo, gli archeologi possono basarsi sui primi scritti antichi per tentare di ricostruire un'immagine della società. La civiltà greca ci ha trasmesso grandi scritti, come l'Iliade e l'Odissea. Questi racconti, fissati dalla scrittura intorno all'8°-7° secolo a.C., evocano un mondo molto antico. Paragoni tra questi testi, descrizioni di alcune armi per es. e ricerche archeologiche mostrano che questi racconti fanno riferimento ad oggetti usati verso il 1'400-1'500 a.C.

Invece le società extraeuropee vicine, come l'Egitto dei faraoni e i regni asiatici, consegnano documenti soprattutto economici, giuridici e religiosi, scritti dalla fine del terzo millennio e nel secondo millennio a.C., quindi contemporanei alla nostra età del Bronzo. Le migliaia di tavolette dei banconi assiri di Kanesh e d'Alishar in Anatolia ci rivelano per es. la presenza di una rete commerciale organizzata dal 1'900 a.C.: Carovane portavano materie prime, prodotti agricoli e artigianali tra l'Assiria e l'Anatolia.

Le società del Mediterraneo orientale e del Medio-Oriente erano allora più complesse e più raffinate delle nostre, la loro influenza economica e culturale ci tocca, come ne testimoniano alcuni oggetti importati da queste regioni o ispirati dalla loro produzione. Il celebre modello ridotto (figura 7.27) di un carro in bronzo trovato nel 1902 in Danimarca è un esempio probante: rappresenta un cavallo che tira un disco di bronzo con una faccia che simbolizza la Luna e l'altra, coperta di oro, il Sole. Quest'oggetto del 1'400 a.C. costituisce una delle più antiche rappresentazione del Sole tirato attraverso il cielo da un cavallo. Questo mito appare nei testi dell'India antica e della Mesopotamia; si ritrova dopo in Grecia, sotto forma di un carro solare associato al Dio Apollo, e poi a Roma. Non si tratta di convergenze, ma piuttosto di un fondo mitologico comune molto antico.

L'Europa centrale non è solo una semplice zona periferica del mondo mediterraneo: sul suo territorio si sviluppa un mosaico di gruppi culturali originali. Un disco di bronzo con incrostazioni d'oro ritrovato a Nebra (Germania) del 1'600 a.C. testimonia per es. di conoscenze astronomiche che non devono niente apparentemente all'Oriente.

Questi cambiamenti non mutano i fondamenti della società: L'economia si fonda sempre sull'agricoltura, l'allevamento e una parte di raccolta e di caccia. È sempre organizzata nel quadro della comunità familiare che condivide la stessa casa. Le tecniche diventano più complesse: la metallurgia usa leghe che necessitano manipolazioni sempre più complesse. La ceramica comincia ad usare forni dove si può controllare la temperatura di cottura. La lavorazione del legno conosce anche un progresso notevole grazie ai nuovi attrezzi di metallo. Una produzione specializzata interviene quindi in vari campi tecnici, in particolare per la produzione dei beni di prestigio.

7.5.1 Scene di vita dell'età del Bronzo

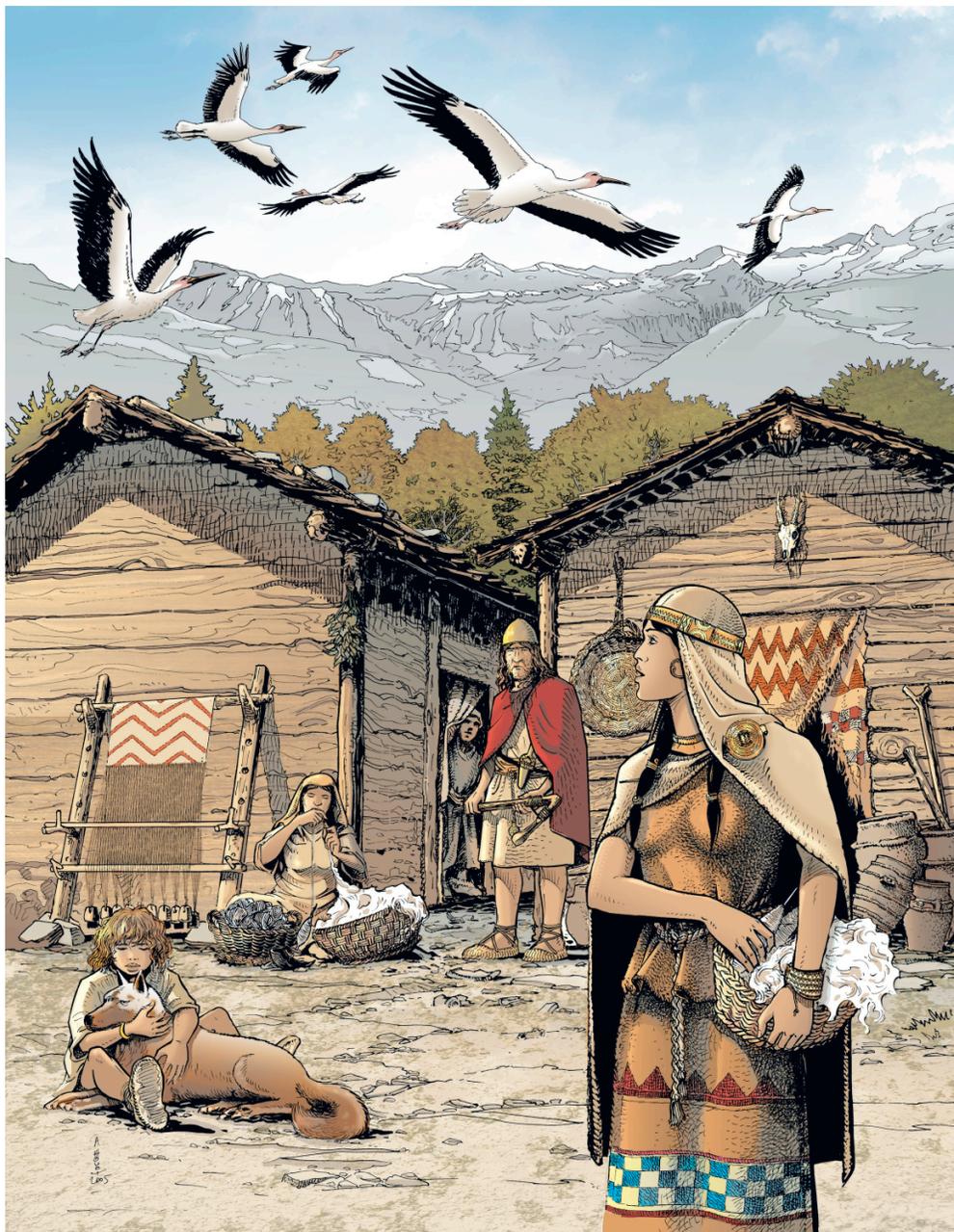


FIGURA 7.28— Ayent, Valais, 950 m d'altitudine, **età del Bronzo**, 2000 a.C. Nel fondo, il massiccio del Wildhorn (3248 m). La scena accade alla fine dell'estate, al momento della migrazione delle cicogne. La parure e le armi sono caratteristiche della cultura del Rodano del Vallese centrale. In primo piano una donna porta un paniere in vimini con della lana. Porta un diadema, degli orecchini, un torchio, spirali nei capelli, un bracciale vallesano al polso e un grosso spillo originario dell'Europa centro-orientale. È la combinazione di questi oggetti che permette d'identificare il genere, l'età e la classe sociale della persona. In secondo piano un uomo è armato di un'ascia e di un pugnale. Porta solo uno spillo senza decorazione. Accanto al telaio una donna fila la lana. Davanti l'ingresso dell'altro edificio grosse giare in terracotta costituiscono recipienti per lo stoccaggio, frequenti in Svizzera occidentale durante l'età del Bronzo antico.



FIGURA 7.29— Le Crêt-de-Châtillon (Sévrier, Haute-Savoie), **età del Bronzo**, 2'200 – 800 a.C. Un forno circolare al suolo, perforato e coperto è stato scoperto sul fondo del lago di Annecy (Francia), nella periferia di un piccolo paese sul litorale della fine dell'età del Bronzo. In uso doveva riposare su una fossa che serviva da focolaio e era alimentato con il combustibile da una apertura laterale. Un esperimento ha mostrato che si potevano cuocere una sessantina di recipienti. La piccolezza delle impronte digitali trovate sui vasi dell'età del bronzo aveva lasciato immaginare agli archeologi del 19° secolo che la ceramica era un'attività femminile... I piccole dimensioni dei manici delle spade non le avevano fatte attribuire a delle guerriere... I numerosi sterchi ritrovati mostrano che gli animali domestici frequentavano questi luoghi.



FIGURA 7.30— Morges, Vaud, **età del Bronzo antico** 1'800–1'600 a.C. Pesca dei lucci nella baia di Morges. È la fine di febbraio, momento della riproduzione del luccio. I membri della comunità ribattono i pesci e li catturano grazie alle fiocine. Le pietre e i pali che emergono in primo piano sono le ultime vestigia di un antico paese del Neolitico abbandonato da vari secoli. L'investimento tecnico importante e la rarità delle scoperte suggeriscono che il numero di barche per villaggio doveva essere limitato. Le case sono disposte lungo il litorale libero di vegetazione vicino ad una foresta rivierasca composta essenzialmente di salici.

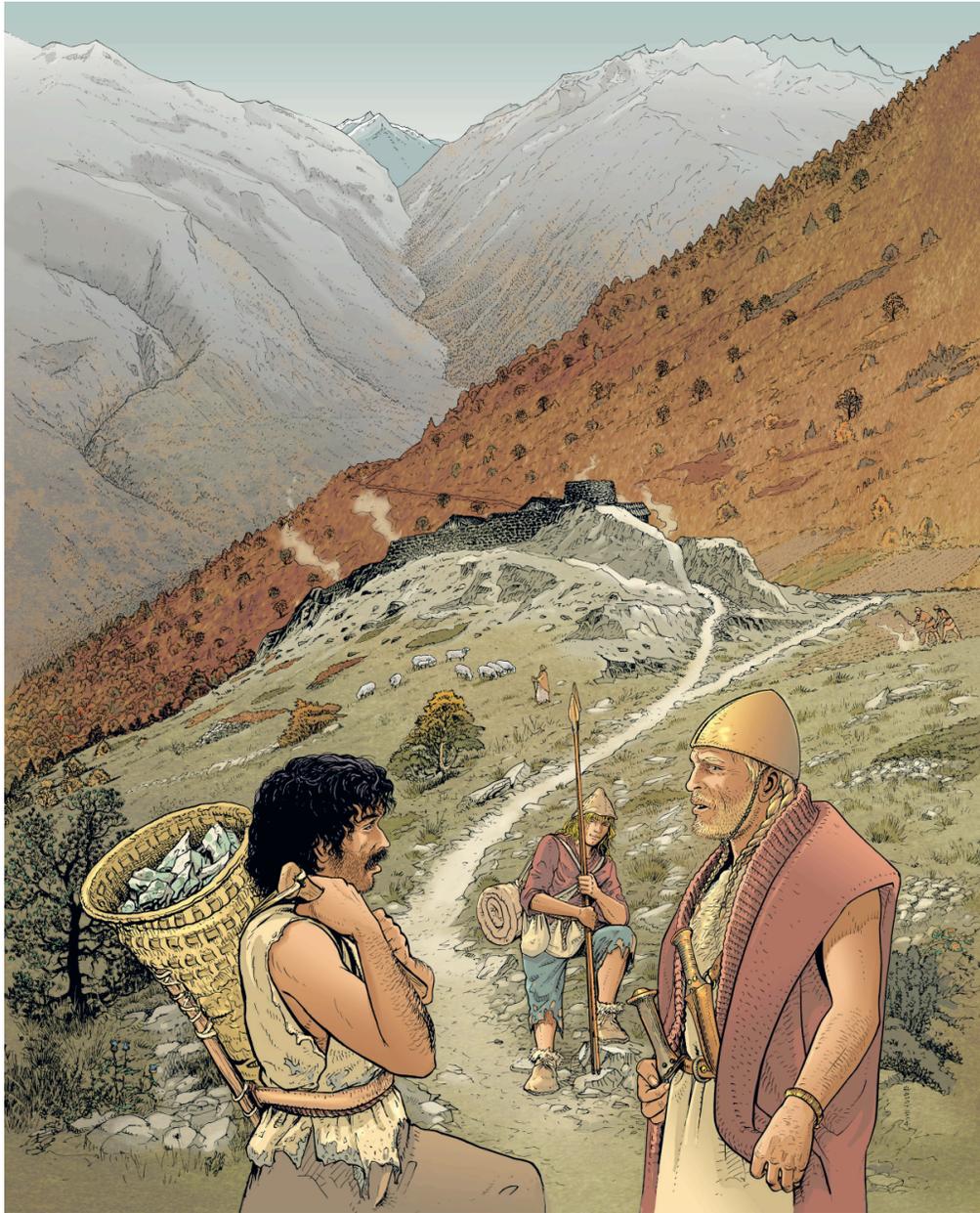


FIGURA 7.31 — Zeneggen, Vallese, paese fortificato di Kasteltschuggen, **età del Bronzo medio – inizio del Bronzo finale**, 1'400–1'300 a.C. Lo stabilimento si trova a 1'600 m d'altitudine su una collina. È circondato da un riparo in pietre secche e sormontato da una torre. Un piccolo gregge di capre e di montoni pascola nel mezzo dei ginepri in una radura al bordo di una pineta. Visto il mobilio raccolto in questo giacimento, i suoi occupanti intrattenevano stretti contatti con i loro vicini del sud delle Alpi. Il guerriero in primo piano porta armi scoperte in Lombardia occidentale: casco, spada, lancia e pugnale in bronzo. Parla con un minatore, pesantemente carico di una gerla di minerali. Giacimenti di rame sono stati repertoriati non lontano dal villaggio; scorie sono state raccolte sul sito stesso, a testimonianza di un'attività metallurgica. Questi piccoli stabilimenti fortificati dell'età del Bronzo giocavano sicuramente un ruolo sulla gestione delle risorse e sul controllo delle vie di passaggio. Nello sfondo, la valle di Vièges e il Fletschhorn (3993 m).

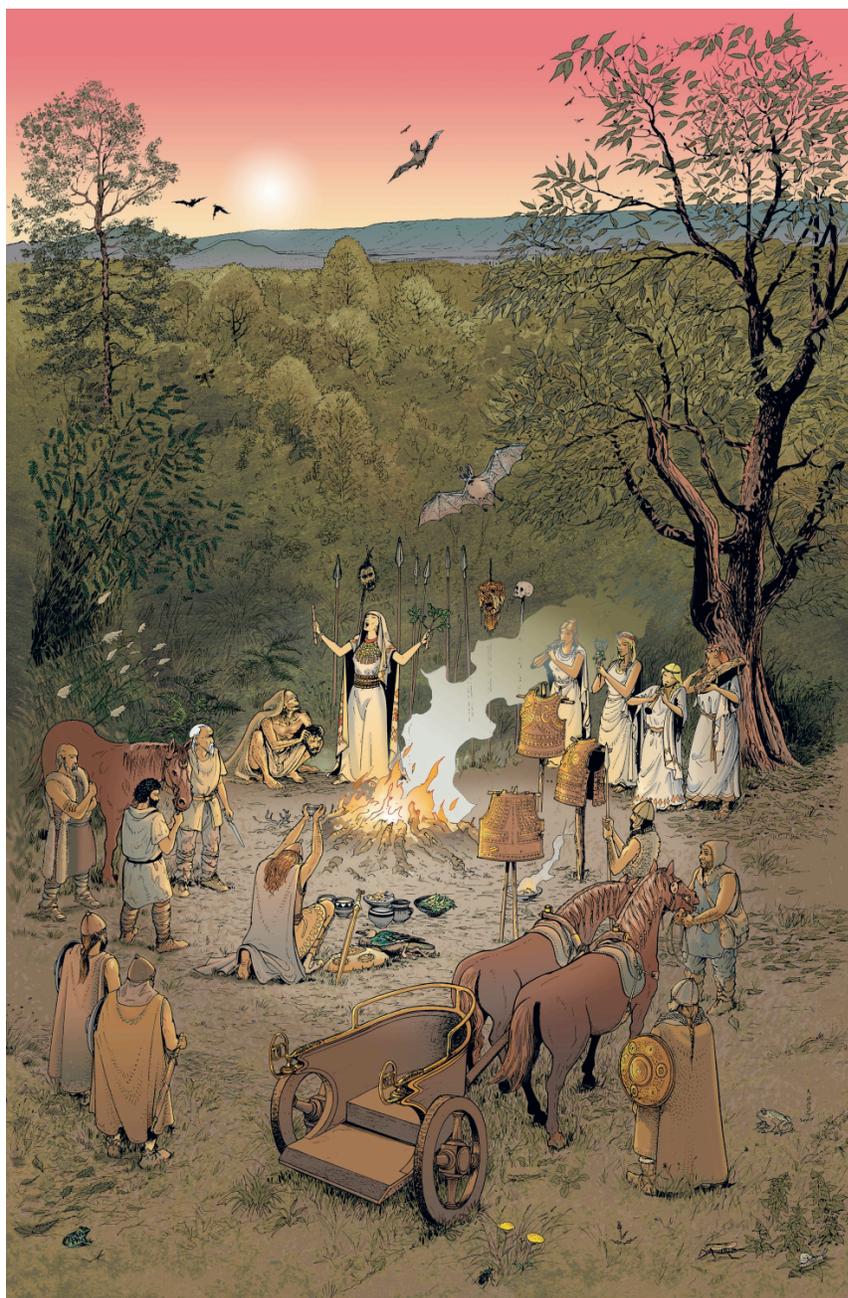


FIGURA 7.32— Fillinges, Haute-Savoie (Francia), **età del Bronzo finale**, 900 a.C. Una cerimonia enigmatica. Le sette corazze erano disposte senza ordine in uno strato carbonifero. Altri oggetti le accompagnavano: frammenti di ceramica grossolana, un mascellare inferiore di cavallo. L'assenza di osservazioni più precise lascia campo libero alle interpretazioni. Che cosa è successo esattamente? Scenario immaginario: una cerimonia di offerte. Le corazze sono esposte su pali di legno e le lance sono piantate nel suolo. La maestra di cerimonia porta un ricco pettorale in bronzo, un ramo di quercia e uno "scettro" che butterà nelle fiamme. Davanti a lei un guerriero inginocchiato e circondato da uomini in armi, offre una piccola tazza. Egli ha depositato davanti le sue offerte: recipienti in ceramica, fiori, lampade e un'anatra, animale sacro. Sulla sinistra un cavallo che sarà anche sacrificato. Nello sfondo, il piccolo Salève e le creste del Jura.

7.6 I celtici dell'età del Ferro

Nell'età del Ferro i villaggi, allora permanenti, sono stabiliti in media montagna e nelle valli laterali del Vallese: borghi lungo le vie di passaggio e rifugi fortificati in altitudine. Le prime città, con mura impressionanti, appaiono nel secondo secolo a.C. a nord delle Alpi. Il commercio si sviluppa con il sud del mediterraneo, con Roma in particolare; l'uso della moneta tende a generalizzarsi.

Nel 5° secolo a.C. il monumento funerario, il tumulus, fa posto alla tomba semplice in una fossa; i defunti, spesso raggruppati in necropoli, sono inumati in cofani di legno o tronchi scavati. La cremazione riappare nel 2° secolo a.C. sulle rive del Lemano. Gli abitanti del Vallese e del bacino lemanico sono celtici. Nel primo secolo a.C. diversi popoli occupano il territorio (figura 7.37). Nel 58 a.C. le legioni romane di Giulio Cesare sono a Ginevra, l'anno dopo a Martigny: è l'inizio della Guerra dei Galli.

L'inizio dell'età del Ferro, verso l'800 a.C. non è in rottura con la fine dell'età del Bronzo; il modo di vita tradizionale delle comunità agro-pastorali adattato ai diversi territori non sarà scombussolato dall'introduzione, tra l'altro molto limitata, del nuovo metallo. Invece i deterioramenti climatici, svelati grazie allo studio dei pollini e la messa in evidenza dell'avanzamento glaciale, hanno giocato un ruolo molto importante. Una prima deteriorazione, dall'850 a.C. fino al 720 a.C. Dopo un riscaldamento e un ritiro glaciale di almeno un secolo e mezzo, un brusco raffreddamento, senza dubbi più forte del precedente, interviene nel 420 a.C. e dura fino al 350 a.C. Più tardi brevi episodi più freddi sono di nuovo identificati nel corso del secondo secolo, poi verso il 100 a.C. e il 50 a.C. Come avvenuto molte volte già nella storia umana, l'influenza del clima ha marcato la vita degli uomini. Il clima ha influenzato l'economia degli abitanti del bacino lemanico e della valle del Rodano, più particolarmente in altitudine. Questi episodi corrispondono a periodi di grandi cambiamenti culturali, l'abbandono delle occupazioni litorali alla fine dell'età del Bronzo e soprattutto le grandi migrazioni celtiche dell'inizio del 4° secolo a.C.

7.6.1 Scene di vita dell'età del Ferro

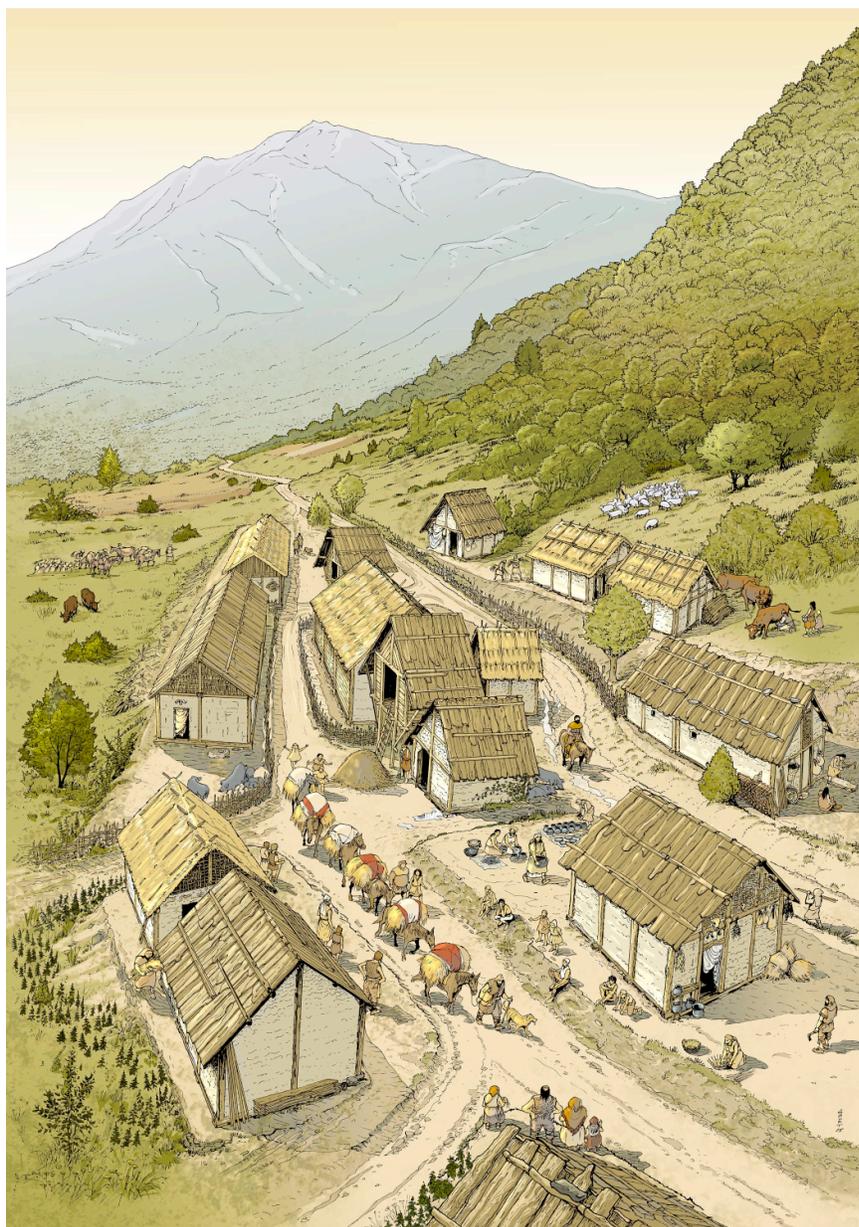


FIGURA 7.33— Waldmatte, Brig, Vallese. Un agglomerato in ambiente alpino dell'**età del Ferro**, verso il 650 a.C. L'agglomerato è stato occupato da una piccola comunità di pastori-agricoltori impiantati alla base del Glishorn, esposti al nord, un posto strategico lungo una via di comunicazione tra le Alpi, nella valle dello Sempione. Nel fondo a destra, la valle della Saltina che conduce al passo del Sempione. Il paese è composto da una ventina di edifici, essenzialmente di pino con le pareti ricoperte di argilla. Recinti lo protegge dell'incursione dei greggi. Le abitazioni di piccola dimensione, con un'unica stanza, sono occupate dalle famiglie. Accanto a piccoli granai sopraelevati, due grandi edifici servono a immagazzinare cereali in covoni. L'organizzazione dell'agglomerato riflette tutte le componenti di una comunità paesana che, in più trae profitto della presenza della via per esercitare qualche attività di portaggio e di accompagnamento delle carovane che attraversano le Alpi.

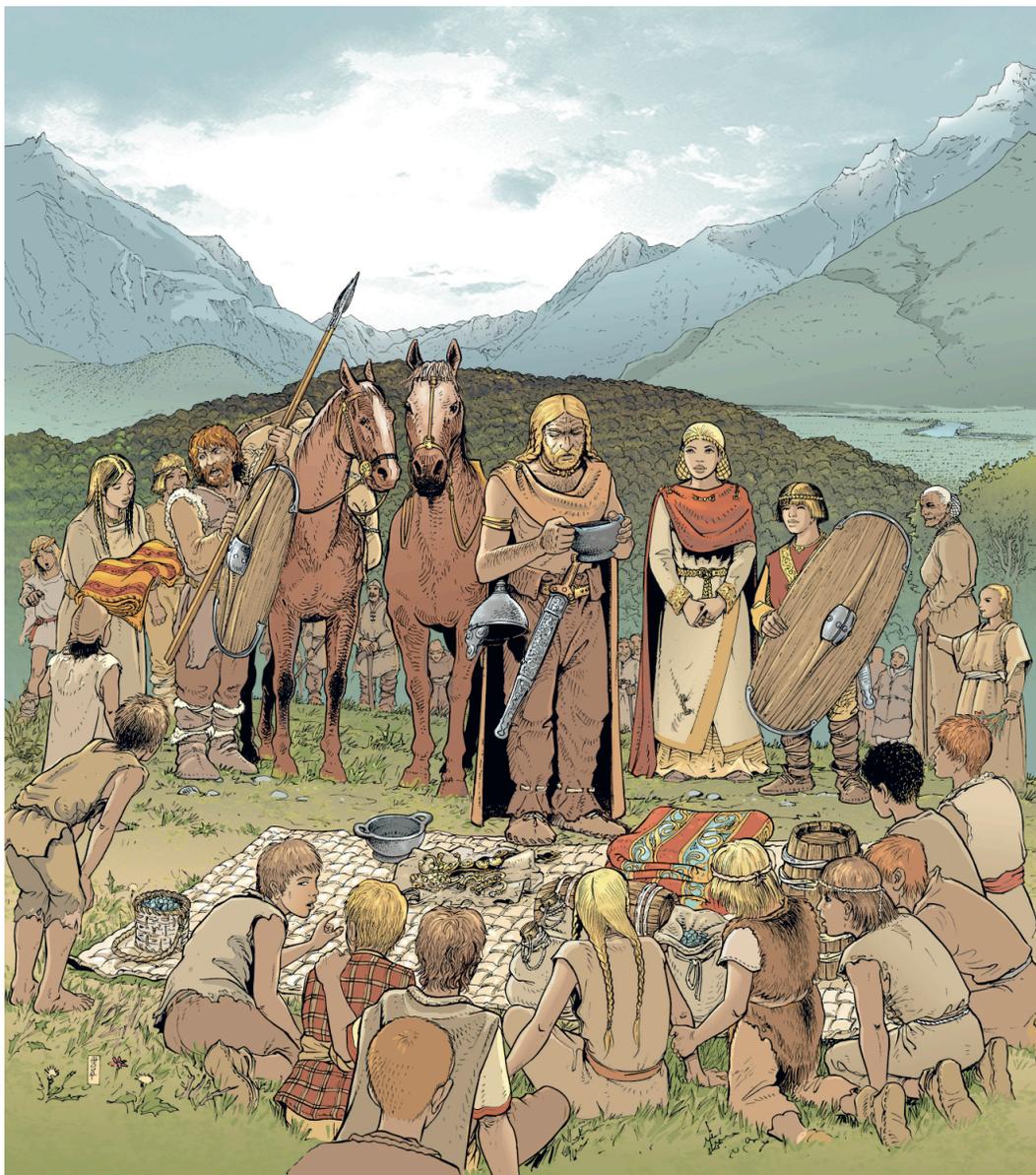


FIGURA 7.34— Saint-Triphon, Ollon, Vaud. Il ritorno del guerriero, **età del Ferro**, 300 a.C. La scena si svolge su una delle colline di Saint-Triphon, Vaud. La vista è orientata in direzione sud con, a destra, la pianura del Rodano con le "Dents du Midi" (Cime de l'Est, 3180 m). Un nobile guerriero al centro torna dall'Italia, dove ha servito come mercenario. Porta alla sua destra la spada nel suo fodero di ferro finemente cesellato; un elmo alla cintura; alla sua sinistra, la moglie, dalla postura nobile e con ricche parure in bronzo e il figlio che ostenta fieramente uno scudo e una spada. Sulla sinistra un servo e il suo cavallo con gli altri elementi dell'equipaggiamento militare celtico, la lancia e lo scudo. Il guerriero porta un torco in oro, ornamento spesso portato in combattimento. Tiene una coppa in ceramica verniciata di nero proveniente dall'Etruria, un pezzo di prestigio. Ha anche riportato dal suo periplo nel mediterraneo altri prodotti di lusso, fichi, vino, olio di oliva in otri. Egli racconta i suoi exploit ad un auditorio composto essenzialmente di adolescenti, che sognano forse un giorno di seguire il suo esempio.

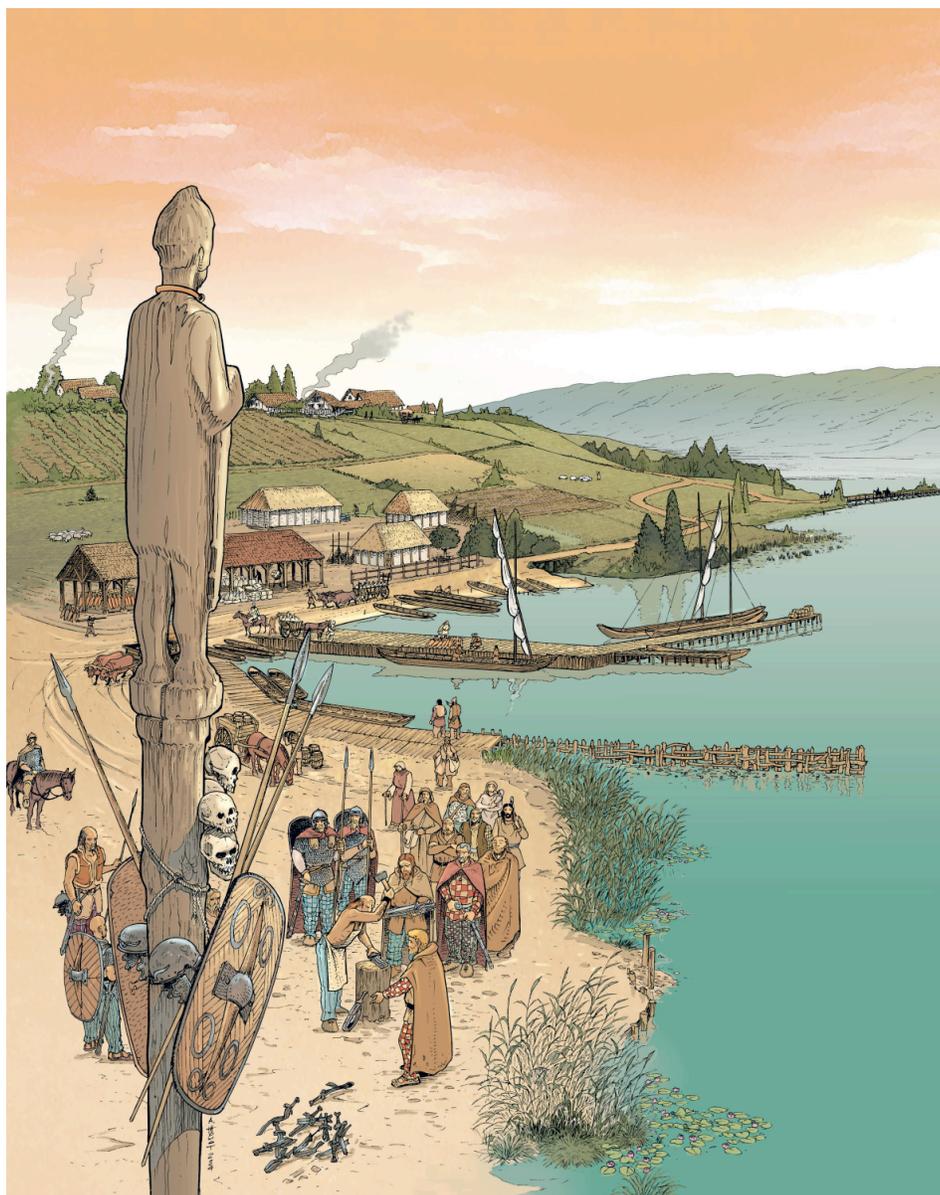


FIGURA 7.35— Il porto, Ginevra, **età del Ferro**, 80 a.C. Si distingue sullo fondo la collina della cattedrale. In secondo piano il porto è stato ricostituito. Le barche sono disegnate sulla base di relitti di tradizione celtica trovati nel lago di Neuchâtel; presentano un fondo piatto e un albero; un lungo remo funziona come timone. In primo piano una statua di legno rappresenta un guerriero eroe o una divinità. Questa statua è stata datata dalla dendrocronologia del 100 a.C. La divinità è oggetto di devozione; sul tronco sono attaccate le spoglie (lancia, scudo, teste sacrificate) di guerrieri vinti. Come testimonianza di queste pratiche, una ventina di scheletri d'adulti e di bambini il cui cranio porta segni di colpi, sono stati scoperti negli scavi del vecchio porto. Ai piedi della statua un capo gallo fa offerte di armi che sono ritualmente rotte prima di essere depositate ai piedi della divinità. Questi riti sono ben radicati nell'Europa celtica, per esempio vicino al lago di Neuchâtel.



FIGURA 7.36— 28 marzo, 58 a.C. Cesare e gli *Helvètes* a Ginevra, uno scontro storico. La scena si situa sulla riva sinistra del Lemano, in territori *allobroges*, integrati dal 121 a.C. alla provincia romana di *Narbonnaise*. Il ponte è stato smontato su ordine di Cesare per impedire agli elvetici l'accesso alla provincia. Nel loro piano iniziale, questi ultimi desideravano solo attraversare questa provincia per continuare la loro migrazione verso il sud-ovest della Gallia. Il tracciato preciso del ponte non è conosciuto. Sulla riva nord una parte del campo degli emigranti si stende senza ordine ai piedi di una collina, l'attuale quartiere di Saint-Gervais dove è stato ritrovato un santuario celtico. In primo piano a sinistra, i legionari e il proconsole Giulio Cesare, vestito del suo mantello rosso; davanti a lui, il vecchio capo elvetico Divico, accompagnato da qualche notevole e da guerrieri; un interprete traduce dal latino al gallico e inversamente.

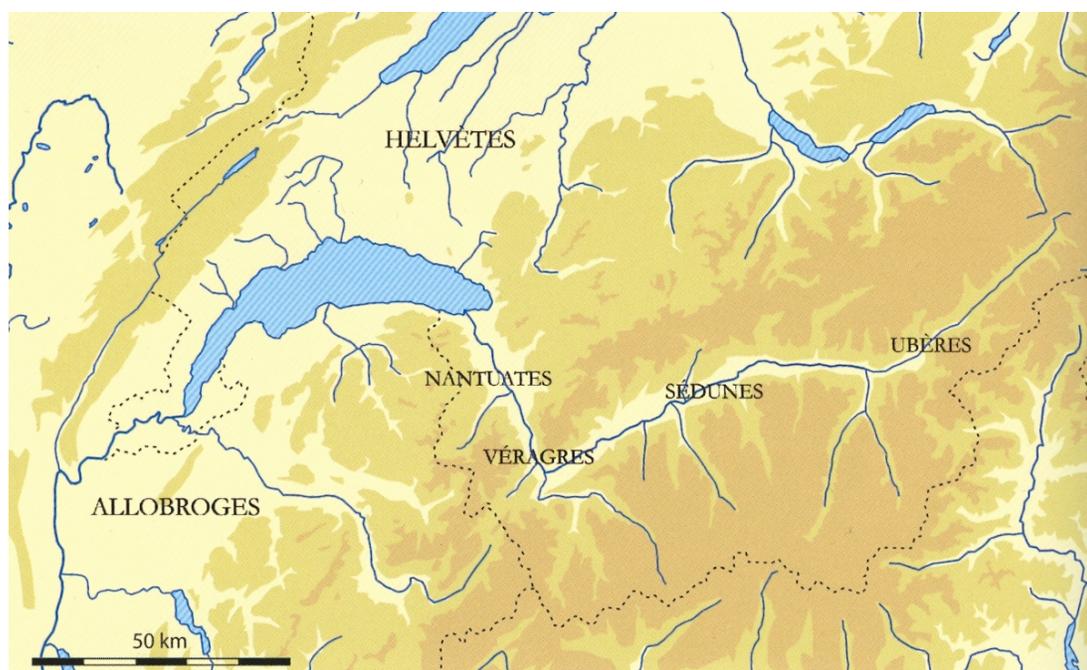


FIGURA 7.37— Popoli della valle del Rodano e del bacino lemanico del primo secolo a.C.

Capitolo 8

Approfondimenti

8.1 La storia climatica della Terra

La figura 8.1 mostra la temperatura media del pianeta nei ultimi 100 milioni di anni. Il ventesimo secolo (1900 – 2000) è mostrato secondo una scala lineare. Periodi precedenti sono mostrati in funzione delle potenze da 10 (-10^4 , -10^5 , -10^6 , ecc), ma sono lineari all'interno di ogni periodo (per esempio, tra $-100'000$ e $-10'000$ anni, il grafico è lineare). Le glaciazioni sono cominciati 2.5 milioni di anni fa. Prima di questo, la Terra era molto più calda (per esempio durante l'era dei dinosauri).

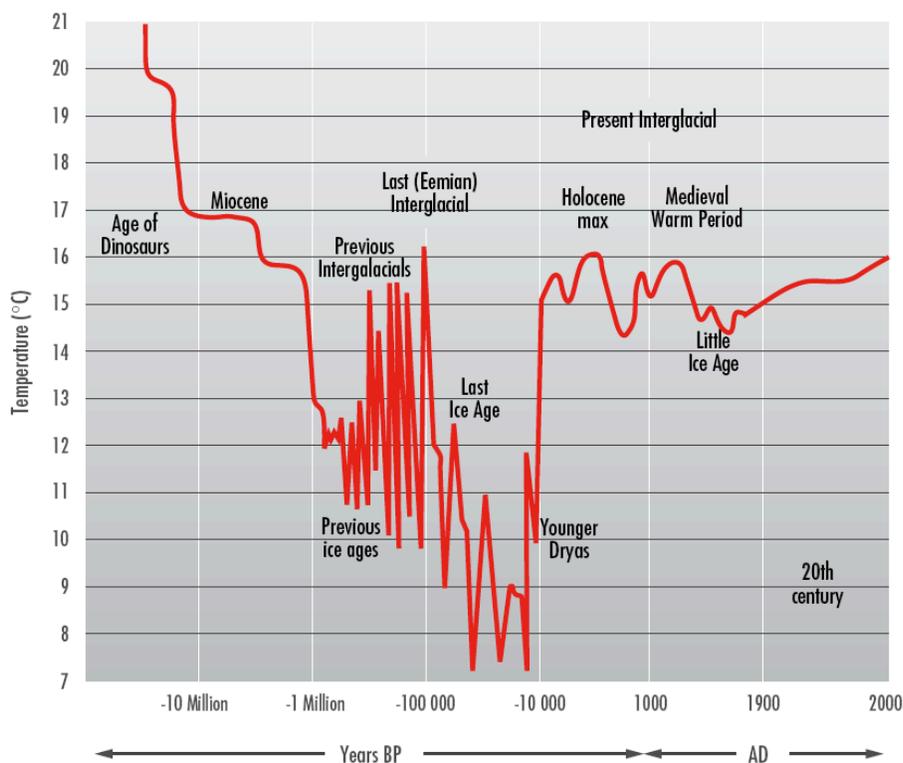


FIGURA 8.1— Temperatura nei ultimi 100 milioni di anni. BP significa "Before Present". Credito: Intergovernmental Panel on Climate Change, "The Greenhouse Effect and Climate Change", disponibile all'indirizzo: <http://www.bom.gov.au/info/GreenhouseEffectAndClimateChange.pdf>



à la **une**

1995

Année du lancement d'Epica, projet européen de forage de glace en Antarctique.

60 000

échantillons analysés et interprétés, dont un tiers par l'équipe du LSCE.

Il y a 800 000 ans, quel temps faisait-il ? Ou plutôt, quel était le climat ? Au prix de longues expéditions polaires, des scientifiques européens, dont ceux du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE), mènent l'enquête. Dans le cadre du projet Epica, ils prennent en filature la glace, indice de la nature assurément le plus bavard... Ils n'hésitent pas à descendre

à - 3 000 mètres pour lui extorquer des aveux sur les grandes variations climatiques, à savoir l'alternance des périodes glaciaires et des périodes chaudes. Les carottes glaciaires sont passées à la loupe et livrent aujourd'hui les températures des 800 000 dernières années. Des informations précieuses qui viennent défier les modélisateurs du climat. Objectif : comprendre



10 pays
investis dans le projet :
Allemagne, Belgique,
Danemark, France, Italie,
Norvège, Pays-Bas,
Royaume-Uni, Suède
et Suisse.

3 mois
Durée d'une mission,
de novembre à janvier,
pendant l'été austral.

-50 °C
Température moyenne
annuelle en Antarctique.

6700 m
Hauteur de glace prélevée
depuis le début du projet
Epica sur ses sites Dôme
Concordia [photo ci-dessous]
et Dronning Maud Land.

© Bios

EPICA
Le
climat
pris dans les **glaces**

Au fil des siècles, le climat laisse des indices emprisonnés dans la glace des pôles. | Le projet européen Epica a pour mission de libérer et de faire parler ces précieux témoins. | Objectif : préciser les modèles climatiques.

la « sensibilité » de la machine climatique, ou découvrir les facteurs déclenchant le début ou la fin d'une ère glaciaire. Si les analyses confirment que les gaz à effet de serre amplifient les changements climatiques, les climatologues ont encore beaucoup d'autres témoins à auditionner! Décoder les multiples et complexes paramètres du climat est un défi qui appelle de

nouvelles expéditions dans le temps et dans les glaces, et des modèles toujours plus précis pour que la machine climatique tourne rond!

1. Unité mixte de recherche du CEA, du CNRS et de l'université Versailles Saint-Quentin. 2. European project for ice coring in Antarctica.



800 000 ans sous les glaces

DOSAGE ISOTOPIQUE

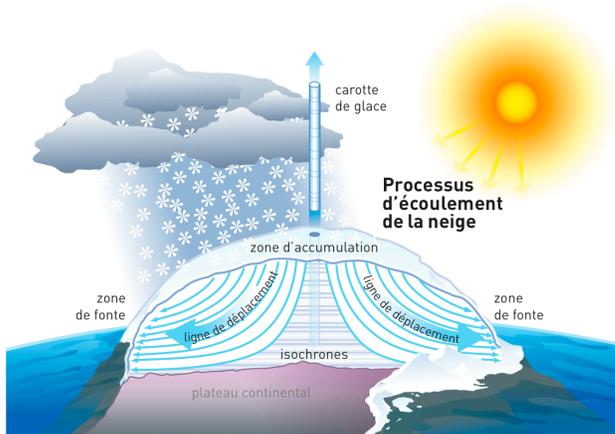
Mesure des concentrations des différents isotopes d'un même élément chimique.

Tout se passe dans l'univers hostile de l'Antarctique, aux sites de forage Dôme Concordia (Dôme C) et Dronning Maud Land (DML), où les climatologues du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE) affrontent des températures extrêmes pour remonter pas à pas le climat des 800 000 dernières années.

FAIRE PARLER LA GLACE

L'étude de la glace polaire est indispensable en climatologie : l'analyse de l'eau de la glace permet de reconstituer les températures de l'Antarctique, tandis que celle de ses bulles d'air renseigne sur la composition atmosphérique globale. Mais pour exploiter ces données, il faut pouvoir les dater. Ce qui nécessite, dans un premier temps, d'estimer la quantité annuelle d'enneigement basée sur la détection, sur les premiers mètres de la carotte, d'horizons temporels comme les pics de radioactivité issus des essais nucléaires menés

dans les années 1960 ou les poussières d'éruptions volcaniques datées. L'enneigement passé est également évalué à partir du dosage isotopique de l'eau de la glace. La datation repose enfin sur la modélisation de deux phénomènes. D'une part, l'écoulement de la neige, qui provoque le mélange des couches successives (voir schéma ci-dessous). D'autre part, la densification, qui permet d'expliquer que les bulles d'air soient plus jeunes que la glace qui les entoure : « La neige étant un milieu poreux, sa transformation en glace est un processus lent pendant lequel l'air continue de s'infiltrer. Sur des glaces vieilles de 4000 ans, on peut trouver des bulles contemporaines! », précise Valérie Masson-Delmotte, climatologue au LSCE. C'est en assemblant toutes ces données que les chercheurs peuvent remonter 800 000 ans au Dôme Concordia, avec une résolution de l'ordre du siècle, et 250 000 ans au DML (site où l'enneigement est plus abondant), avec une analyse affinée sur la dizaine d'années.



LES GRANDES VARIATIONS CLIMATIQUES

Une fois ces marqueurs temporels établis, la glace et les bulles d'air sont interrogées par les spectromètres de masse pour restituer les températures passées. Le dosage isotopique de l'hydrogène présent dans la glace consiste à mesurer sa teneur en deutérium (0,003 % de l'eau de mer), dont on sait qu'elle est d'autant plus faible que la température qui régnait lors des précipitations était froide (voir « Tout s'explique », pp. 16-17). Ainsi, à partir de milliers d'échantillons, la courbe des températures de l'Antarctique se dessine, présentant l'alternance des périodes glaciaires et chaudes tous les 100 000 ans. Ces dernières se révèlent



© B. Krist/Corbis

« Tout se passe comme si l'hémisphère Nord répondait au Sud, ou inversement... »

instables: nous vivons par exemple depuis 12 000 ans dans une période chaude plus tiède et plus longue que la précédente, il y a 130 000 ans. Des différences confirmées par les analyses d'autres sites de forage en Antarctique¹ et déjà remarquées dans l'étude des **sédiments marins** (autre discipline de la climatologie).

Quant à l'analyse des bulles d'air des carottes de glace, elle livre de précieuses données sur la concentration des gaz à effet de serre (GES) qui y sont présents. Sur 800 000 ans, la courbe de leur évolution s'avère parallèle à celle des températures de l'Antarctique. « À chaque grand cycle climatique correspond une variation des concentrations de dioxyde de carbone (CO_2) et de méthane (CH_4) », note Valérie Masson-Delmotte.

LE RÔLE DES GAZ À EFFET DE SERRE

Cette corrélation met en évidence le rôle des GES comme amplificateurs naturels des variations: par exemple, plus il fait chaud, moins l'océan stocke de dioxyde de carbone, et plus il est concentré dans l'atmosphère, ce qui amplifie le réchauffement. De plus, la comparaison conforte les chercheurs dans le caractère global des informations climatiques issues des glaces de l'Antarctique. Des glaces qui trahissent à la fois des températures locales et la présence des GES dans toute l'atmosphère. Mais si les glaciations sont des phénomènes globaux, leur histoire comporte des

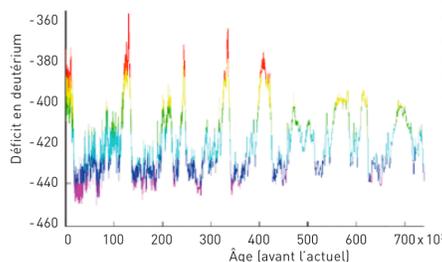
changements brutaux à caractère régional qu'il faut prendre en compte. C'est le cas des variations rapides de la dernière période glaciaire qui apparaissent dans les prélèvements du Groenland, au site de Northgrip, où le LSCE mène également des investigations. Les climatologues ont en effet enregistré des instabilités d'une amplitude de 15 °C environ en quelques dizaines d'années, de loin plus intenses que celles décelées en Antarctique. De même, en comparant les courbes de température des deux extrêmes de notre globe, un décalage temporel systématique est observé, comme si le Nord répondait au Sud, ou inversement... Les analyses d'Epica apportent donc la confirmation du rôle des courants marins dans ce décalage, la circulation océanique agissant en effet comme un transporteur de chaleur (voir encadré p. 9). Et c'est la première fois que

les climatologues peuvent montrer que les bascules Nord-Sud connues pour les plus gros événements antarctiques sont généralisées pendant tous les changements rapides des derniers 50 000 ans. Peut-on pour autant affirmer que ces accidents climatiques sont initiés exclusivement dans l'hémisphère Nord et que

l'on retrouve leurs traces dans le Sud, emprisonnées dans les glaces de l'Antarctique? Quel est leur rôle dans les changements plus lents, tel le passage aux périodes glaciaires? Des questions laissées en suspens, qui poussent les équipes du LSCE à affiner leurs analyses en augmentant leurs résolutions et à repousser les limites du temps pour remonter au-delà du million d'années.

I AUDE GANIER I

1. Des climatologues japonais, russes et américains ont également installé des sites en Antarctique.



Variation, au cours des 740 000 dernières années, des concentrations en deutérium au Dôme C, traduisant l'évolution des températures.

© Epica



Une planète modèle

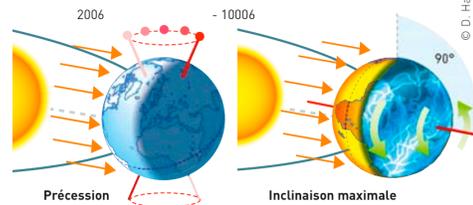
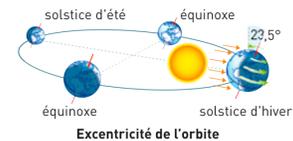
« Décrire l'alternance des périodes glaciaires et des périodes chaudes n'est pas tout, il faut maintenant comprendre quels mécanismes engendrent le passage de l'une à l'autre. » Parole de climatologue, en l'occurrence celle de Valérie Masson-Delmotte pour qui, après le temps des résultats scientifiques, vient celui de leur interprétation à l'aide de modèles numériques, développés par d'autres chercheurs du LSCE.

D'un côté, ces modèles restituent les mécanismes du climat ayant trait à la composition et à la circulation de l'atmosphère, à celles de l'océan (voir encadré « La circulation océanique », p. 9), à la végétation, au cycle du carbone¹... De l'autre, ils intègrent tous les facteurs susceptibles de le faire changer, comme les paramètres orbitaux (voir encadré ci-dessous), les éruptions du Soleil qui intensifient le rayonnement solaire sur Terre...

La réaction du climat dépend également de phénomènes amplificateurs tels que l'effet d'albédo (voir encadré « L'effet d'albédo », p. 9) ou celui des gaz à effet de serre (GES). La problématique du modélisateur

Les trois paramètres orbitaux

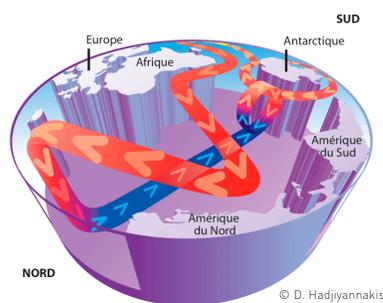
L'**excentricité de l'orbite** détermine la distance Terre-Soleil. Plus l'orbite est aplatie, plus cette distance est longue, et inversement. Ce paramètre joue sur les contrastes saisonniers et oscille tous les 100 000 à 400 000 ans. L'**obliquité de l'axe de rotation de la Terre** influe sur la différence d'ensoleillement entre les pôles et l'équateur. Plus l'axe est incliné, plus l'équateur se refroidit. Il évolue à un rythme de 40 000 ans. Le **précession des équinoxes** modifie la position des saisons sur l'orbite de la Terre pendant un cycle de 19 000 à 23 000 ans. C'est ce paramètre qui a l'effet le plus fort sur les différences d'ensoleillement, jusqu'à 60 W/m², par rapport à une moyenne de 340 W/m².



© D. Hadjyannakis

La circulation océanique

La circulation océanique profonde résulte de l'affrontement de masses aux températures et densités différentes. Les eaux froides, plus lourdes, plongent sous les eaux chaudes plus légères circulant en surface. De même, l'eau salée est plus lourde que l'eau douce. La circulation océanique agit comme un transporteur de chaleur : les courants chauds de surface convoient la chaleur des tropiques vers les pôles. Là, les eaux se refroidissent et plongent pour devenir des courants de fond. Certaines régions, comme l'Atlantique nord, sont particulièrement vulnérables aux changements climatiques. L'arrivée brutale d'eau douce (issue de la fonte des glaces) modifie la densité des eaux de surface et empêche leur plongée. Cela provoque un ralentissement du « tapis roulant » et un refroidissement régional avec, inversement, une accumulation de chaleur australe, détectée en Antarctique...



L'effet d'albédo

Amplification locale du réchauffement ou du refroidissement, liée aux propriétés réfléchissantes des sols. Lorsque la surface de la planète se couvre de banquise ou de neige, ses surfaces blanches réfléchissent le rayonnement solaire, amplifiant le refroidissement. Inversement, les sols sombres, issus de la fonte des neiges lors d'un réchauffement, absorbent la chaleur.

est alors d'assembler tous ces paramètres et de formuler des hypothèses à partir des observations du terrain. L'une des questions, et non des moindres, soulevées par les résultats d'Epica est de savoir quand et où interviendra la prochaine glaciation. La Terre, qui est dans une période chaude depuis 12 000 ans, n'a en effet toujours pas atteint le seuil minimal d'ensoleillement nécessaire au basculement vers une glaciation. Une curiosité par rapport aux précédentes périodes chaudes qui n'excédaient pas 10 000 ans. De plus, elle ne risque pas de l'atteindre avant 30 000 ans, au vu de ses données orbitales.

Sans compter que, d'après un autre modèle réalisé au LSCE, il existerait un risque que l'on saute la prochaine glaciation si l'émission des GES continue à augmenter de 1 % pendant 150 ans, comme c'est actuellement le cas... Des simulations sans complaisance qui font froid dans le dos!

I A. G. I

1. Voir l'infographie du cycle du carbone dans *Les Défis du CEA 109* ou sur www.cea.fr/defis.htm

Archivage des carottes de glace prélevées dans le cadre d'Epica dans différents laboratoires européens.



© CEA



Mot à mot

Nommer « carotte » un prélèvement réalisé dans la profondeur immaculée des glaces polaires peut surprendre. S'agit-il d'une allusion à la couleur blanche des premiers spécimens de la racine de cette ombellifère venue du Moyen-Orient ? À moins que « vivre de carottes », autrement dit chichement, soit le lot des chercheurs dont l'un des soucis est d'économiser leurs budgets... La glace étant « l'indice le plus bavard de la nature », ce mot rappelle aussi le vocabulaire des policiers pour lesquels « tirer la carotte » signifie faire avouer. En fait, cette carotte est ainsi dénommée tout simplement en raison de sa forme.

I MARIE-JOSÉ LOVERINI I

8.2 MRO Science Goals

Mars Reconnaissance Orbiter's (MRO) science investigations and engineering instruments directly support the Mars Exploration Program's overall science strategy of "**Fol-lowing the Water.**"

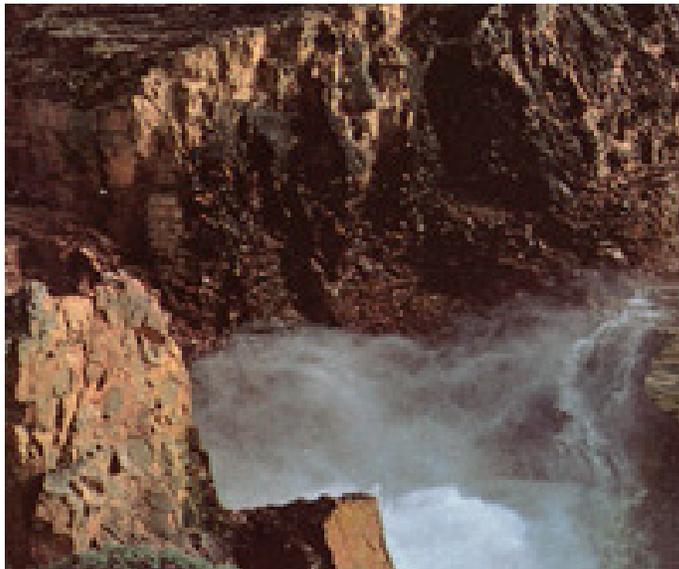
For more information on the MRO mission, see

- <http://mars.jpl.nasa.gov/mro/>
- http://www.lilu2.ch/lilu2dir/materie/scienze_sperimentali/Settimana_profondimento_astronomia/Mars/MRO/MRO.html.

The four science goals that support this strategy for discovery are:

8.2.1 Goal 1: Determine whether life ever arose on Mars

more on Goal 1 at <http://mars.jpl.nasa.gov/science/life/>



The presence of liquid water on Mars, past or present, is a key clue in revealing whether Mars ever harbored life. From the tiniest microbe to more complex organisms, life as we know it could not exist without liquid water. MRO's scientific payload includes instruments to zero in on water-related surface features such as outflow channels from ancient floods, and to study water-related mineral deposits in Mars' rocks and soil. Cameras and spectrometers will carry out these searches, and a sounder will use radar to search for liquid water beneath the martian surface.

8.2.2 Goal 2: Characterize the climate of Mars

more on Goal 2 at <http://mars.jpl.nasa.gov/science/climate/>



In the past, a warmer Mars might have supported a thicker, wetter atmosphere. But now, with its thin cold atmosphere, much of the water on Mars has left the surface and atmosphere. Most of it is probably trapped under the surface, either as ice or possibly in liquid form if any exists near a heat source on the planet, such as a volcanic "hot springs." MRO will search for evidence of present-day ice or liquid water beneath the surface and explore the subsurface structure of the polar caps and nearby terrain in search of evidence of the role water played in Mars' past climate.

The mission will also study how dust and water are currently transported in the martian atmosphere. Combining its measurements with those of other missions, MRO will help characterize the daily, seasonal and year-to-year climate variability.

8.2.3 Goal 3: Characterize the geology of Mars

more on Goal 3 at <http://mars.jpl.nasa.gov/science/geology/>



Folded in the layers of Mars surface, like geology's version of tree rings, is a record of Mars' history. With high-resolution instruments, MRO will look in particular for geologic settings that indicate the presence of liquid water on the surface at some point in the planet's history. Examples include ancient lakebeds, salt flats, and mineral deposits characteristics of hot springs. Hundreds of locales will be examined in unprecedented detail to reveal water-related mineralogy and water's role in shaping the terrain.

8.2.4 Goal 4: Prepare for human exploration

more on Goal 4 at <http://mars.jpl.nasa.gov/science/human/>



With eagle-eye vision, MRO will home in on rocks the size of ~ 1 meter. With this capability, mission planners will identify the most promising locales for scientific study and know, too, which are safe and which might be hazardous to future landers carrying humans.

8.3 Discoveries made by MGS

from http://www.nasa.gov/mission_pages/mgs/mgs-20061121.html

Mars Global Surveyor (MGS) launched on Nov. 7, 1996, and began orbiting Mars on Sept. 11, 1997. It pioneered the use of aerobraking at Mars, using careful dips into the atmosphere for friction to shrink a long elliptical orbit into a nearly circular one. The mission then started its primary mapping phase in April 1999. The original plan was to examine the planet for one Mars year, nearly two Earth years. Based on the value of the science returned by the spacecraft, NASA extended its mission four times.

The spacecraft evaluated landing sites for the twin NASA rovers that landed in 2004 and sites for future landings of the Phoenix and Mars Science Laboratory missions. It monitored atmospheric conditions during aerobraking by newer orbiters. It served as a relay link for the rovers and provided mapping information about their surroundings.

"When we watched the launch 10 years ago, we wondered if we would make the specified mission length. We certainly were not thinking of a 10-year operating life," said JPL retiree Glenn Cunningham, who managed the Global Surveyor project through development and launch.

A few of the mission's many **important discoveries about Mars** include:

- The spacecraft's camera found gullies cut into many slopes that have few, if any, impact craters. This indicates the gullies are geologically young. Scientists interpret this as evidence of action by liquid water, essentially in modern times.
- The mineral-mapping infrared spectrometer found concentrations of a mineral that often forms under wet conditions, fine-grained hematite. This discovery

led to selection of a hematite-rich region as the landing site for NASA's Mars Exploration Rover Opportunity.

- Laser altimeter measurements have produced an unprecedented global topographic map of Mars. The instrument revealed a multitude of highly eroded or buried craters too subtle for previous observation, and mapped canyons within the polar ice caps.
- The magnetometer found localized remnant magnetic fields, indicating that Mars once had a global magnetic field like Earth's, shielding the surface from deadly cosmic rays.
- The camera found a fan-shaped area of interweaving, curved ridges interpreted as evidence of an ancient river delta resulting from persistent flow of water over an extended period in the planet's ancient past.
- A long life allowed Global Surveyor to track changes through repeated annual cycles. For three Martian summers in a row, deposits of carbon-dioxide ice near Mars' South Pole shrunk from the previous year's size, suggesting a climate change in progress.

Credit: JPL manages MGS for the NASA Science Mission Directorate, Washington.



FIGURA 8.2— Artist's concept of Mars Global Surveyor

For more information on the mission, visit the Internet at:

http://www.nasa.gov/mission_pages/mgs/index.html

http://www.lilu2.ch/lilu2dir/materie/scienze_sperimentali/Settimana_approfondimento_astronomia/Mars/MGS/MGS.html.

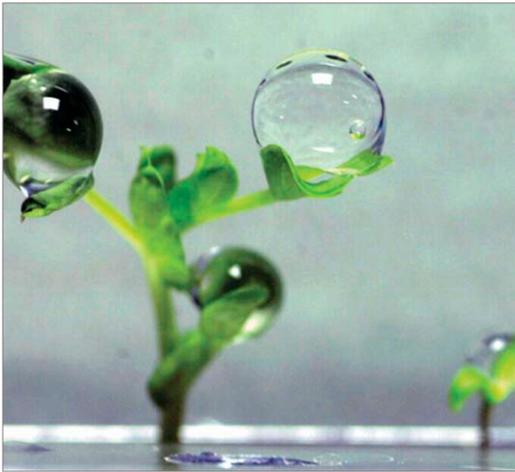
8.4 Phoenix Mars Mission: Why is liquid water important for life?

National Aeronautics and Space Administration
www.nasa.gov




Phoenix Mars Mission

Water and Life Fact Sheet



Why is liquid water important for life?

Life, as we understand it, requires liquid water. But why? The answer lies in the nature of the molecule itself.

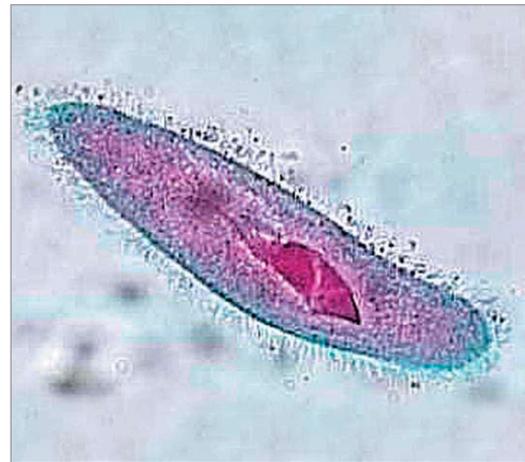
First, water must be in a liquid form to allow for transport of chemicals into and out of cells. Water vapor and water ice do not have nearly the same ability to transfer substances as liquid water does. **Second**, proteins act as catalysts within cells and require liquid water for proper function.

<< Water droplets on leaves aboard the apparent weightless environment of the International Space Station.

Image Credit: NASA/JSC/Petit



^ Erosion of water ice layers near the north pole of Mars and genesis of nearby sand dunes. *Image Credit: NASA/JPL/IMSS*



^ A single-celled paramecium, with stained nuclei and cilia, is made mostly of water. *Image Credit: NASA/GSFC*



Phoenix Mars Mission



THE UNIVERSITY OF ARIZONA

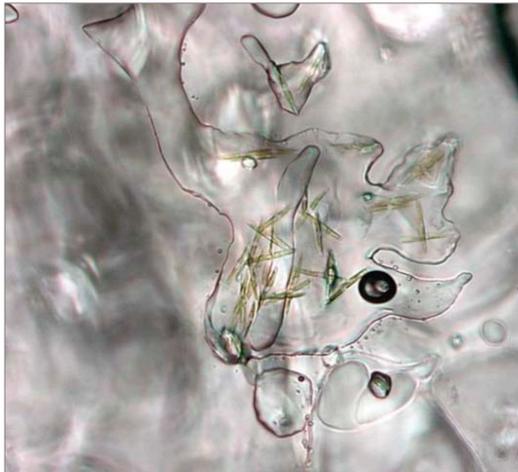
Lunar and Planetary
Laboratory

1

rev. 11/05

Phoenix Mars Mission

Third, water has a few unique properties compared to other liquids that make it essential for life. (A) Water remains liquid over a wide temperature range, permitting life to survive in climate and weather changes. (B) In an opposite sense, liquid water has a high capacity to hold energy, moderating weather and climate. (C) Unlike almost all other molecules, water floats when it freezes. This insulates the water below, which remains liquid and supports life...

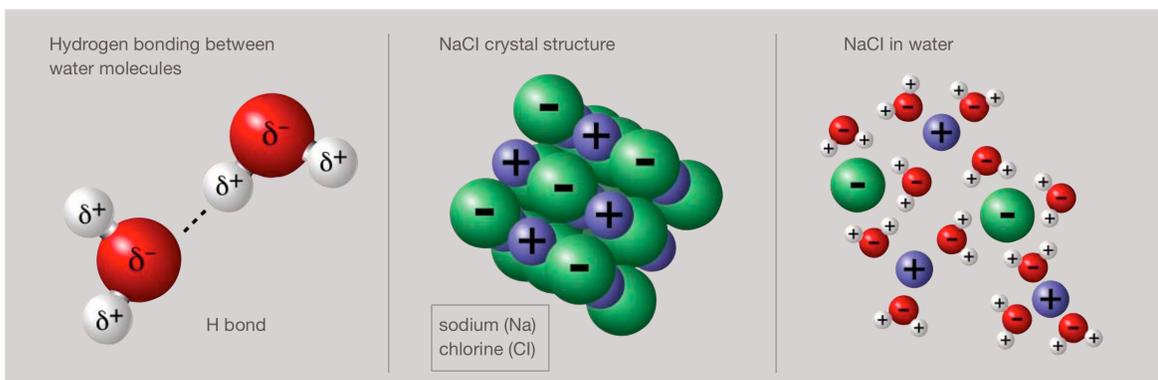


^ Single-celled algae dangling from an upper ice layer into seawater and providing an important component of the arctic marine food web. Image Credit: NOAA/Univ. of Wash./Krems



^ As seen from NASA's Terra satellite, Earth is a planet with an abundance of liquid water critical for a life-supporting climate. Image Credit: NASA/JPL

...And finally, (D) water molecules are "polar," with a slightly negative side and a slightly positive side. Each end of the water molecule attracts other electrically charged particles. These polar substances, like sugar and salt that are essential for living cells, will dissolve easily in water, while non-polar molecules, such as oils and lipids making up cell membranes, are very difficult to dissolve.



To learn more visit: <http://phoenix.lpl.arizona.edu>

Special thanks to Ms. Erika Offerdahl, Dr. Ed Prather, and Dr. Timothy Slater of the University of Arizona for providing the basic knowledge and inspiration to produce this fact sheet.

2

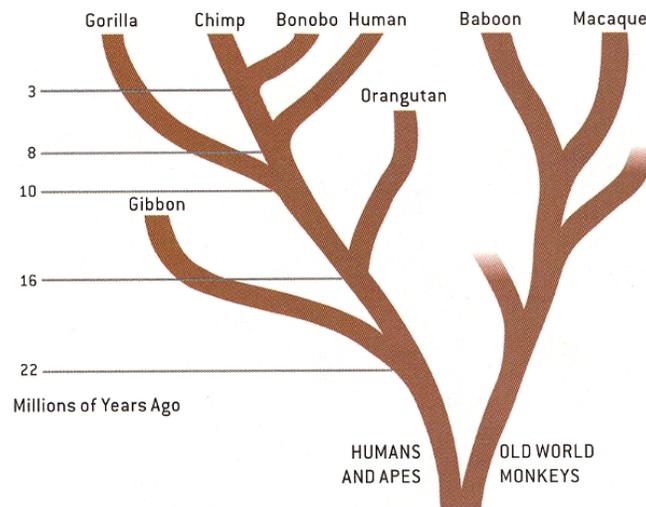
8.6 Humans, apes and monkeys

FIGURA 8.4— Quest'albero evolutivo dei primati, basato su analisi del DNA, mostra che gli umani si sono separati dai bonobos e dagli scimpanzé circa 5–6 milioni di anni fa. Le 3 specie condividono (oggi) più del 98% del loro DNA.

8.7 Una nuova teoria dell'origine umana, la scimmia acquatica

8.7.1 Problemi con la "teoria della savana" e l'origine del bipedismo

Il consenso tra gli scienziati conosciuto come la "teoria della savana" propone la seguente sequenza di eventi.

Durante un cambiamento climatico la foresta si restrinse: le scimmie che vivevano in questo ambiente sono state forzate a vivere nella pianura aperta o nella savana. Hanno imparato a camminare su due piedi per vedere meglio le prede che cacciavano. Faceva così caldo che hanno perso la peluria per lasciare il sudore scorrere liberamente sul corpo per raffreddarsi. Il linguaggio e l'intelligenza si sono sviluppati dal bisogno di comunicare e cacciare in gruppo.

Dato che Lucy è stata ritrovata nel Afar, una regione che ha subito cambiamenti geologici importanti in grado di cambiare il tipo di clima e di vegetazione, si è ipotizzato che i cambiamenti climatici sono all'origine dell'evoluzione verso l'uomo sapiens.

Apparentemente questa teoria sembra molto sensata, però alcuni scienziati la trovano piena di enigmi e di problemi. I primati come i babbuini e i cercopiteci verdi vivono nella savana e *non* sono diventati bipedi e *non* hanno perso i peli. Le migliaia di anni necessarie per passare da una corsa a quattro gambe ad una corsa veloce a due gambe avrebbero lasciato il proto-umano estremamente vulnerabile. I mammiferi non sono stati concepiti per camminare dritti, perché è un modo molto inefficiente per spostarsi. Se questi ominidi avessero provato a camminare su due piedi, sarebbero stati come dei bambini di un anno: avrebbero zoppicato e sarebbero caduti tutto il tempo.

La spina dorsale dei mammiferi funziona come un attaccapanni: tutto pende da essa. Essa consiste di un lungo bastoncino leggermente incurvato sostenuto da due coppie di gambe. Il peso del corpo dell'animale è distribuito ugualmente e il centro di gravità è basso, dando così una grande stabilità. L'evoluzione di tutte le altre specie ha dimostrato che camminare a quattro zampe è il modo più efficiente. Non c'è un altro animale che cammini sempre perpendicolarmente come l'uomo, non si tratta di un modo efficiente per spostarsi. Se non siete convinti, considerate per un attimo quanta gente soffra di mal di schiena...

Esiste però un'altra specie di primate che cammina regolarmente sulle sue due gambe posteriori, il proboscide di Borneo. Abita nelle mangrovie e nelle paludi e si tuffa regolarmente nell'acqua. È un eccellente nuotatore, ma se tocca il fondo allora cammina dritto come noi. Con l'aiuto dell'acqua l'instabilità e la scomodità del bipedismo terrestre spariscono. Gli altri primati che occasionalmente camminano dritti vivono tutti in un ambiente piuttosto umido che secco, per esempio i bonobo (specie di scimpanzé nani) abitano in foreste che sono inondate ogni anno. L'unico altro animale che abbia mai sviluppato un bacino come il nostro (adatto al bipedismo) è l'Oreopithecus, la scimmia delle paludi, estinto da tanto tempo.

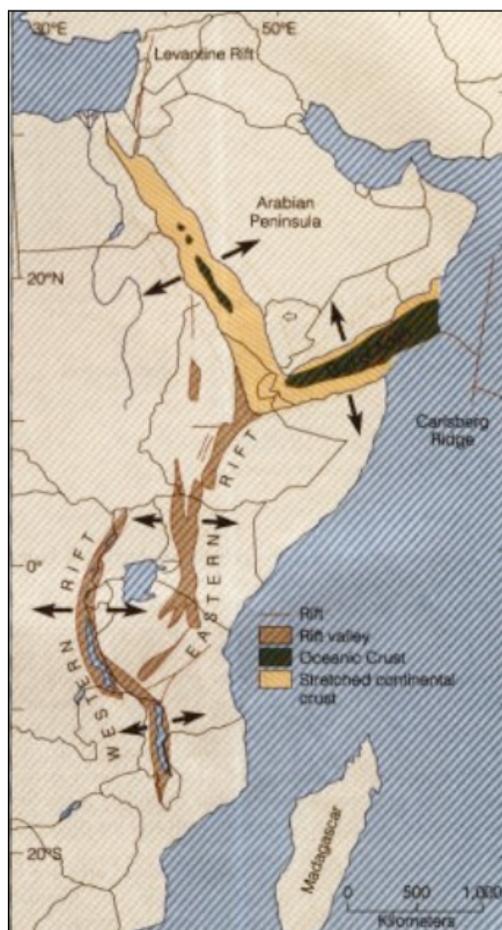


FIGURA 8.5— La depressione dell'Afar e la valle del Rift si sono create perché la placca Indiana, la placca Araba e la placca Africana si allontanano l'una dall'altra.



FIGURA 8.6— Il deserto dell'Afar in Africa oggi

La faccenda s'ingarbuglia quando ci si tuffa nella storia geologica e climatica del nord-est africano, dove i fossili di Lucy e altri famosi antenati umani sono stati ritrovati. Il nome scientifico di Lucy è *Australopithecus afarensis*, perché è stata ritrovata in una regione d'Etiopia chiamata Afar (vedi figura 8.5 e 8.7). Eppure da **7 milioni a 70'000 di anni fa questa regione era un mare interiore**, il mare di Afar. L'acqua del mare è entrata ed è poi rimasta bloccata, separata dal resto dell'oceano. Alcuni ominidi si sarebbero ritrovati isolati su isole e altri avrebbero dovuto sopravvivere in foreste inondate e paludi. Oggi si è seccato tutto lasciando un deserto con depositi di sale spessi migliaia di metri (figura 8.6). La maggior parte dei fossili africani sono stati ritrovati in o vicino all'acqua. Questo fatto era spiegato con argomenti del tipo "Passavano di lì e si sono fermati per bere" o "piogge molto forti hanno allagato le terre ferme e sono annegati." La spiegazione più evidente – vivevano accanto e in acqua, come tra l'altro la maggior parte dell'umanità oggi – è raramente considerata! Esistono considerevoli prove che mostrano che ci fu un tempo in cui alcune regioni d'Africa avevano le stesse caratteristiche delle mangrovie del Borneo.

8.7.2 Senza peli

Tra le 193 specie di scimmie che esistono oggi, solo una non è coperta di peli: l'*homo sapiens* (vedi a questo proposito l'eccellente libro di Desmond Morris, "La scimmia

"Whales and porpoises, dugongs and the hippopotamus are naked, and this may be advantageous to them for gliding through the water; nor would it be injurious to them from the loss of warmth, as the species which inhabit the colder regions are protected by a thick layer of blubber"¹.

Come vedremo nella prossima sezione, in una fase acquatica gli ominidi avrebbero potuto sviluppare un importante strato di grasso sottocutaneo per compensare la perdita dei peli come un sistema di isolamento termico. Invece, i peli sulla testa (i capelli) sono rimasti perché non generavano nessuna resistenza quando la testa è fuori dall'acqua ed erano utili per proteggersi dai raggi del sole. Animali come il babirusa (un maiale indonesiano selvatico) sono un altro esempio di mammiferi che si sono evoluti per vivere in acqua – perdendo i peli e guadagnando "blubber".

8.7.3 Il grasso

Paragonati a tutti gli altri primati, gli umani sono decisamente grassi. Rispetto ad un animale di simile grandezza, gli umani hanno 10 volte più grasso. Ma questa grassezza è normale per l'umano. Infatti, se il corpo di una donna è anormalmente sotto-peso, decide di non procreare più. Tipicamente una ragazza di 16 anni dovrebbe avere in media 27% del peso corporeale in tessuti grassi. Se questa percentuale cadesse sotto il 22%, il ciclo mestruale cesserebbe.

I unici altri mammiferi che immagazzinano il grasso come noi (cioè durante tutto l'anno e non profondamente nel corpo, ma sotto la pelle) sono acquatici, come i delfini, le foche e gli ippopotami.

8.7.4 Cibo e cervello

L'umano possiede il più grande cervello di tutti primati. La costruzione dei tessuti cerebrali dipende dalla disponibilità di acidi grassi Omega-3, che sono abbondanti nella catena alimentare marina e nei pesci di acqua dolce. Il mammifero che possiede il più grosso cervello (rispetto al suo peso) dopo l'umano è il delfino, un animale terrestre che è tornato nel mare nel corso dell'evoluzione.

8.7.5 Il sudore

Il concetto di sudore come un meccanismo di raffreddamento è stato messo in dubbio e trova una nuova spiegazione nel paradigma della scimmia acquatica. Questo sistema, unico negli umani (gli altri mammiferi che sudano lo fanno in modo molto meno proficuo e usano un altro tipo di ghiandola) è difettoso se il suo unico scopo è il raffreddamento: in effetti, si accende nei momenti sbagliati (per es. quando è umido, sudare non raffredda, però sudiamo lo stesso), è troppo lento per accendersi e spegnersi, genera

¹Il "blubber" è uno spesso strato di grasso vascolarizzato che si trova sotto la pelle di tutti cetacei, *pinnipeds* e *sirenians*. Il "blubber" è però diverso biochimicamente dalle altre forme di tessuto adiposo e serve come un efficiente isolante termico essenziale alla termoregolazione. Ha dei vantaggi sulla pelliccia: la pelliccia trattiene il calore imprigionando delle tasche d'aria, ma sotto pressione (durante un tuffo) queste vengono espulse. Il "blubber" invece non si comprime sotto la pressione e può anche aiutare al galleggiamento.

molto più acqua che il fine strato d'umidità necessaria per raffreddare (grazie all'energia prelevata sul nostro corpo durante l'evaporazione, vedi calore latente) e spreca del sale. L'uomo è l'unico mammifero che espelle del sale quando suda. Anche quando l'umano si trova vicino alla totale disidratazione continua a sudare fino a morire.

Allora perché sudiamo? Una possibile ragione è appunto per espellere il sale. Se i nostri antenati si fossero ritrovati vicino al mare e avessero mangiato pesci e frutti di mare (per definizione salati) e ingoiato accidentalmente dell'acqua salata. La sovraccarica su i nostri reni avrebbe creato la necessità di "fare evolvere" un secondo sistema per evacuare il sale. Per esempio gli uccelli di mare hanno ghiandole speciali per rimuovere il sale dal loro corpo. Il pianto è un altro modo per evacuare il sale, come per i coccodrilli marini.

Malgrado il fatto che assomigliamo di più alle scimmie, per certi aspetti abbiamo delle somiglianze con gli animali che amano l'acqua. Gli elefanti hanno la pelle liscia, nuotano bene, piangono, sono intelligenti, sociali – come noi. Sembra che si sono evoluti negli oceani in un passato molto remoto, ma hanno scelto di tornare sulla terra ferma invece di diventare delle balene. Gli umani hanno preso una simile decisione mentre invece i delfini hanno scelto il mare.

8.7.6 Nuotare & Tuffarsi

Nuotatori e tuffatori hanno bisogno di una grande apertura che permette una rapida inspirazione e espulsione dell'aria. Hanno anche bisogno di essere in grado di chiudere il passaggio dell'aria per non ingoiare accidentalmente dell'acqua.

"Several unrelated aquatic species have evolved some kind of movable flap either instead of, or in addition to, valvular nostrils. The penguin has one, and the crocodile has one. Alone among the primates, humans have such a flap - that is, the back of the soft palate, known as the velum, which in our species can be raised and lowered to isolate the nasal passages from the mouth cavity. It could not operate in this fashion if the larynx had not retreated out of its way to its present position below the back of the tongue. The only other mammals which are known to feature a descended larynx are diving mammals - the sea lion and the dugong. These two species are about as unrelated to one another as they are to humans. The descended larynx must have evolved independently in each of them, after their respective land-dwelling ancestors entered an aquatic environment." (Morgan, 1990)

Un cosciente controllo della respirazione è una caratteristica che dividiamo con tutti altri mammiferi marini (e che nessun altro mammifero non-acquatico ha) ed è probabilmente stato cruciale nello sviluppo del linguaggio (vedi anche sezione 6.7 e 6.9.1).

8.7.7 Il pene

Il maschio umano adulto ha il più grande pene dei primati (in erezione 14 cm in media per l'uomo, 3 cm per il potente gorilla!). Questo fatto può essere interpretato come la conseguenza necessaria del progressivo ritiro (e della relativa inaccessibilità) della vagina durante una fase acquatica dell'evoluzione.

"An aquatic environment seems to have had a broadly similar effect on some other species - that is, relative retraction of the femal sex organ leading to a corresponding extension of that of the males. For example, most birds and reptiles do not possess a penis; the pressing together of the cloacal apertures seems to suffice for the transference of the sperm. But many species of aquatic reptiles (crocodiles and turtles) and aquatic birds (swans, ducks, geese) have found it necessary to evolve a penis as part of their adaption to a watery habitat." (Morgan, 1990)

8.7.8 **Conclusione**

La teoria della scimmia acquatica sembra essere in grado di spiegare:

1. perché siamo così agili in acqua oggi, mentre il nostro più vicino parente vivente, gli scimpanzé, sono indifesi in acqua e annegano velocemente,
2. perché ci siamo lentamente evoluti verso il bipedismo senza correre troppi rischi,
3. perché siamo l'unica scimmia (quasi) nuda e perché i peli rimasti sulla schiena seguono le linee di flusso d'acqua,
4. perché abbiamo uno spesso strato di grasso sottocutaneo come i mammiferi acquatici,
5. perché il nostro cervello ha potuto crescere così velocemente durante i ultimi 2.5 milioni di anni,
6. perché sudiamo e piangiamo,
7. perché possiamo controllare volontariamente il nostro respiro,
8. perché i maschi umani hanno il più grosso pene di tutti primati.

Malgrado questa lista impressionante di caratteristiche umane che trovano una spiegazione credibile con questa teoria, non esistono prove dirette di una tale fase acquatica nell'evoluzione umana. Desmond Morris (1994) descrive altre possibili teorie sull'origine del bipedismo e della perdita dei nostri peli.

8.8 La ricostruzione del cranio di Toumai

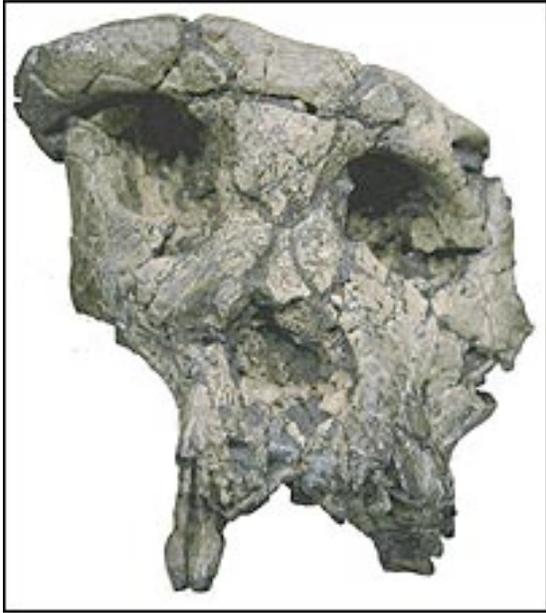


FIGURA 8.8— Il cranio originale di Toumai ha subito delle deformazioni severe



FIGURA 8.9— Stereolithocast della ricostruzione virtuale 3D. La forma ricostruita del cranio suggerisce che apparteneva ad un ominide.

Il cranio mostra una combinazione sorprendente di caratteristiche moderne e primitive, con un cervello e una forma del cranio simili a quelli di una scimmia, insieme ad una faccia e dei denti più umani. Possiede anche un notevolmente grande arco sopracciliare, più simile a quello degli ominidi.

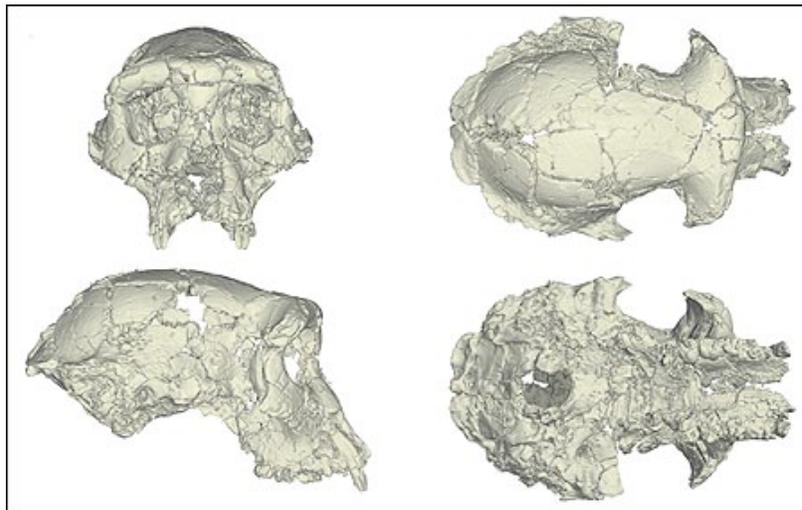


FIGURA 8.10— Quattro viste della ricostruzione virtuale fatta al computer del cranio di Toumai.

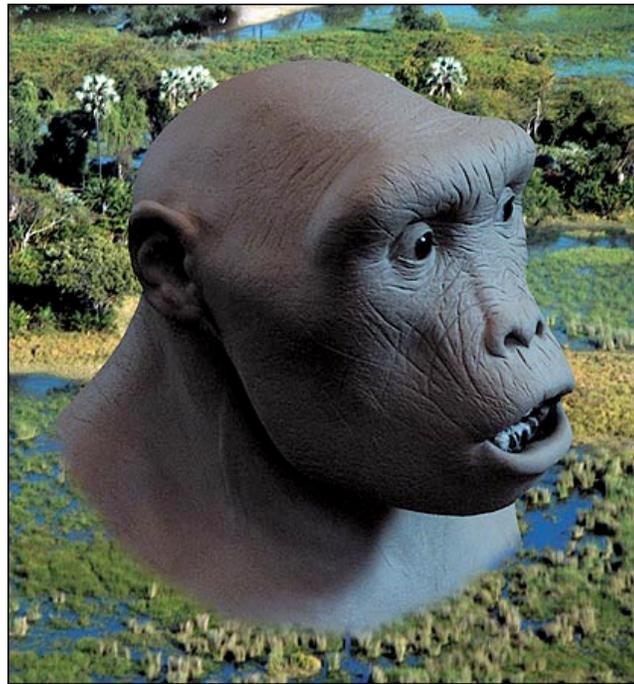


FIGURA 8.11— Ricostruzione della testa di Sahelanthropus tchadensis Toumaï.

8.9 La ricostruzione del vero volto del Neanderthal

RECONSTRUCTION DU VISAGE DE L'ENFANT DE GIBRALTAR

1 Les cinq fragments de crâne découverts en 1928 sont modélisés en trois dimensions. L'acquisition des données se fait par tomographie. Le programme FoRM-IT permet de transformer les fragments en objets 3D. Ils sont repositionnés sur l'écran selon des critères biologiques. Les parties manquantes sont complétées.

2 La reconstruction virtuelle est transformée en modèle physique par stéréolithographie laser.

3 Les tissus organiques sont extrapolés d'après le squelette et la chair d'un enfant moderne du même âge dentaire.

4 Les couches de tissus faciaux, les oreilles et autres traits sont reconstruits avec de la plastiline directement appliquée sur la réplique stéréolithographique.

5 Moulé en silicone, le modèle final est soigneusement peint pour produire la texture naturelle de la peau humaine et doté d'implants capillaires.

PHOTOS: M. FANES DE LEON ET G. ZULLIEMPER, UNIV. ALABAMA

FIGURA 8.12— Tappe nella ricostruzione al computer del volto di una bambina Neanderthal



FIGURA 8.13— Bambina Neandertal

FIGURA 8.14— Gio-
vane donna Neander-
tal

8.10 Datazione di Toumai

L'età di Toumai (*Sahelanthropus tchadensis*), il più antico proto-umano conosciuto, è stato confermato a 7 milioni di anni, con una misura diretta usando il decadimento radioattivo del Berillio. Lo studio è stato pubblicato nella rivista americana *Proceedings of the National Academy of Sciences* in marzo 2008 da una squadra francese diretta da Anne-Elisabeth Lebatard.

In un primo tempo, il team di scienziati che ha scoperto Toumai aveva stimato la sua età attorno ai 7 milioni di anni, basandosi sullo grado di sviluppo di mammiferi presenti accanto a Toumai, paragonandolo ad altri mammiferi africani. Ma l'ultimo studio di Lebatard et al. permette una misura diretta grazie al Berillio 10 (^{10}Be), un isotopo radioattivo del Berillio. L'età precisa è di 7.04 ± 0.18 milioni di anni. In questo caso, i metodi classici di datazione paleontologici che sfruttano il carbonio 14 o il potassio/argento non possono essere utilizzate per il deserto di Djurab, dove è stato scoperto Toumai. In effetti, il carbonio 14 permette di risalire solo fino a 50'000 anni e le cenere vulcaniche (dove si trova di solito il potassio e l'argento) sono estremamente rari nel Chad.

In questo metodo, si tratta di paragonare la quantità di ^9Be , un isotopo stabile fabbricato nelle stelle e incorporato nella Terra durante la sua formazione, e la quantità di ^{10}Be , un isotopo radioattivo prodotto dai raggi cosmici che colpiscono l'atmosfera.

Questo ^{10}Be si attacca alle particelle in sospensione nell'aria, rimane nell'atmosfera circa un anno e poi cade sulla Terra con la pioggia e si fa intrappolare nei sedimenti. Il ^{10}Be ha una tempo di dimezzamento di 1.36 milioni di anni.

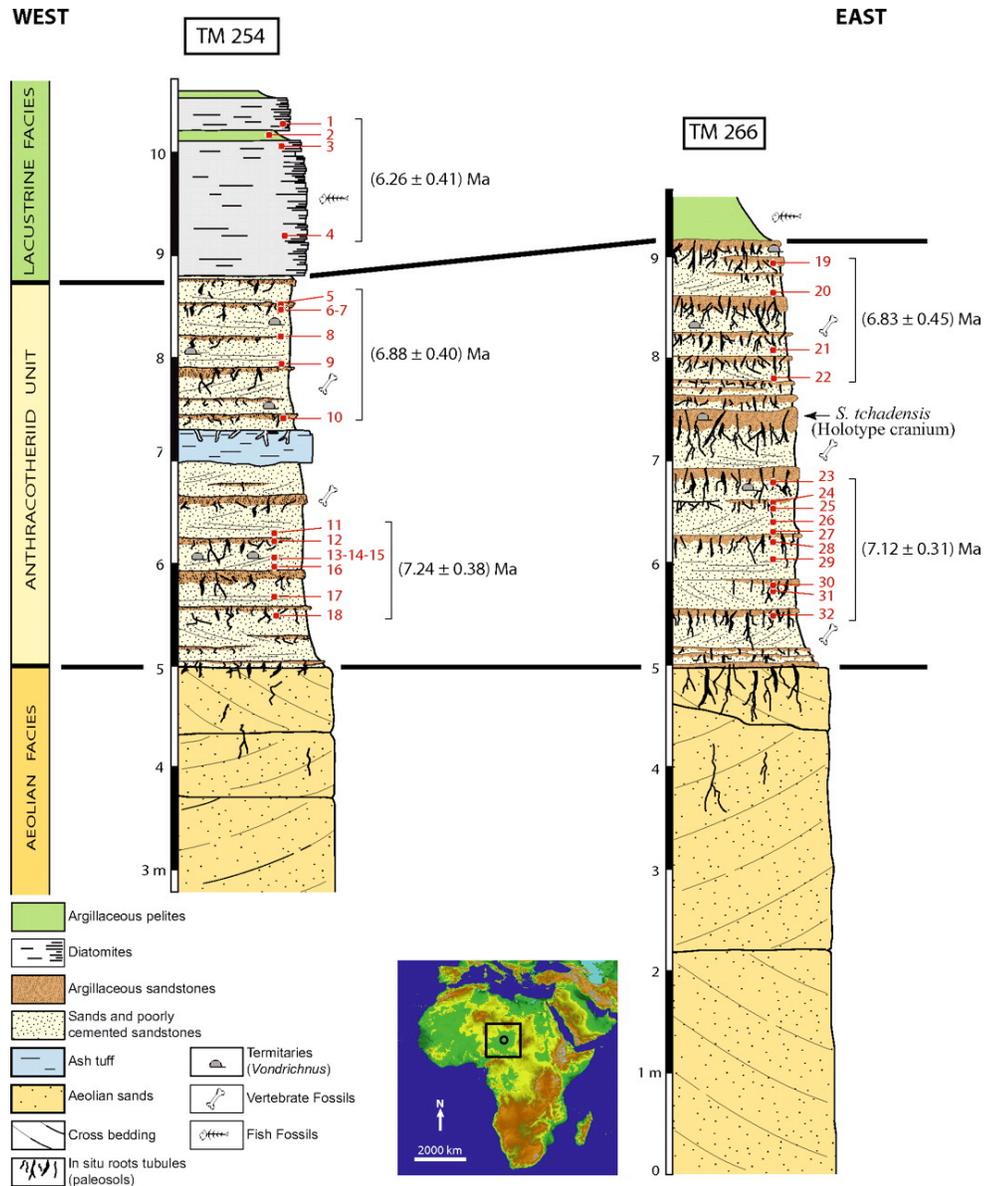


FIGURA 8.15— Colonne stratigrafiche e datazione del Berillio in due zone che contengono fossili: Toros–Menalla (TM) 254 e 266. In quest'ultimo è stato ritrovato Toumai (*S. tchadensis*) come indicato sulla colonna di destra.

8.11 Selam, Toumai e l'ultimo antenato comune

Chi era l'ultimo antenato comune alla scimmia moderna e alla specie moderna dell'Homo Sapiens? Quest'approfondimento contiene maggiori informazioni su questa domanda, in particolare sull' australopiteco (di cui fanno parte Selam e Lucy) e sul legame di parentela che hanno con la nostra specie. Questo paragrafo è tratto dalla rivista "Dossier, Pour la science", ottobre-dicembre 2007, intitolato "Sur la trace de nos ancêtres", in particolare gli articoli di Kate Wong (p. 78) e di Pascal Picq (p.99).



FIGURA 8.16— Il cranio fossilizzato di Selam, un *Australopithecus afarensis* di 3 anni. Il suo scheletro è notevolmente completo: mentre la maggior parte della faccia del cranio di Lucy manca, quella di Selam è quasi completa.

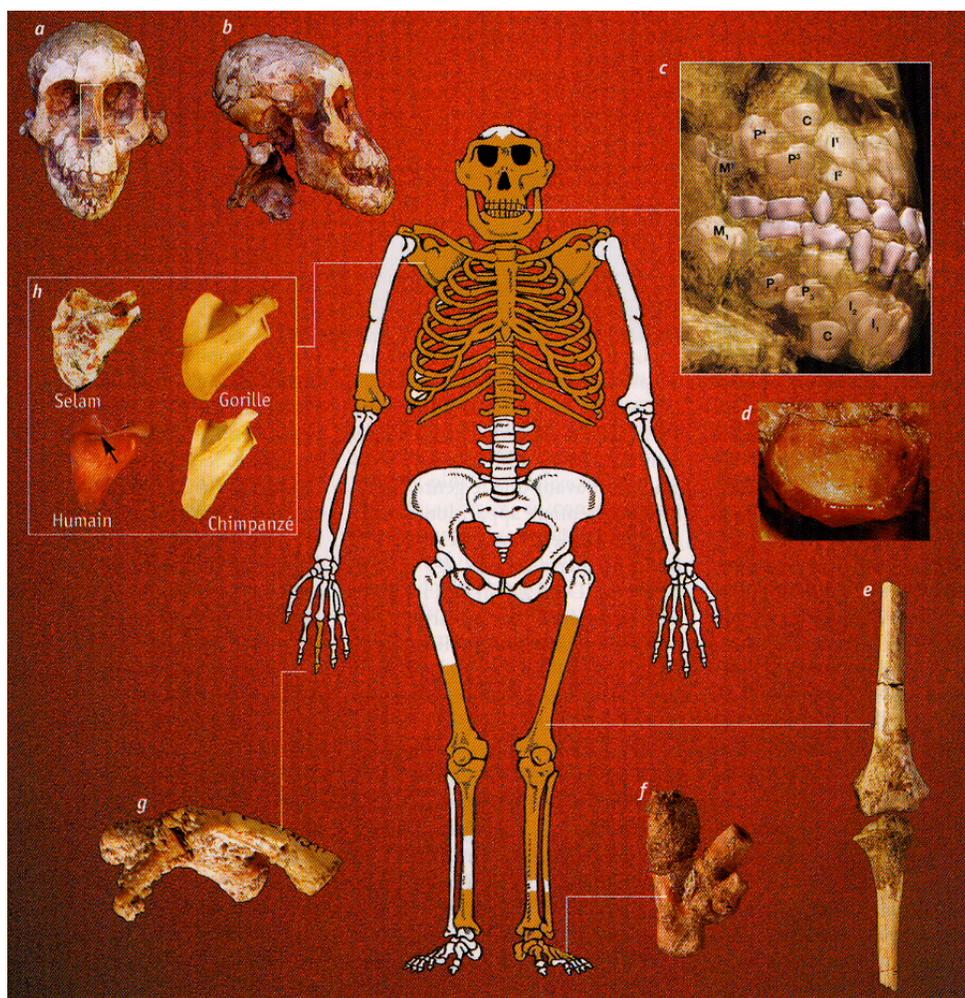


FIGURA 8.17— Selam è uno degli scheletri dei primi ominidi più completo mai ritrovato. Il disegno al centro rappresenta un *Australopithecus afarensis* adulto, con le ossa di Selam indicate in arancione. I tratti del viso di Selam (a), in particolare le piccole e strette ossa del naso, la identificano come un *Australopithecus afarensis* e non come un *Australopithecus africanus*, un vicino parente. Malgrado l'assenza della maggior parte del cranio, il fossile ha conservato uno stampo dell'interno del cranio naturale in arenaria (b). La dimensione apparente del cervello indica che per l'*Australopithecus afarensis*, la crescita di questo organo era forse ritardata rispetto a quello degli scimpanzé, tipica caratteristica umana. A parte l'insieme dei denti da latte, la tomografia ha rivelato i denti definitivi del bambino nella mascella (c). Il blocco d'arenaria ha anche consegnato un osso chiamato ioide (d), che partecipa all'inchiostrazione della lingua. La sua morfologia assomiglia all'ioide di uno scimpanzé: le due specie avevano probabilmente una laringe simile. Alla maniera di altri individui di *Australopithecus afarensis*, Selam è dotata di alcune caratteristiche delle ossa delle gambe (e) e del piede (f) che indicano che camminava dritta. La larghezza del tallone per esempio è quella di un tallone umano, ma al contrario, la parte alta del corpo è in parte adatta ad una vita sugli alberi. Selam ha dita lunghe e corte (g) per aiutarla ad aggrapparsi ai rami degli alberi. Inoltre, la cavità articolare della scapola (h) è orientata verso l'alto, come nelle scimmie antropomorfe, e non verso il lato come negli umani. Non i tutti ricercatori sono d'accordo su questa scapola: per alcuni assomiglia di più a quella di un gorilla, per altri a quella di un umano, fondandosi sulle proporzioni relative alle depressioni dove si inseriscono i muscoli di ogni lato della scapola (indicato con una freccia nera).

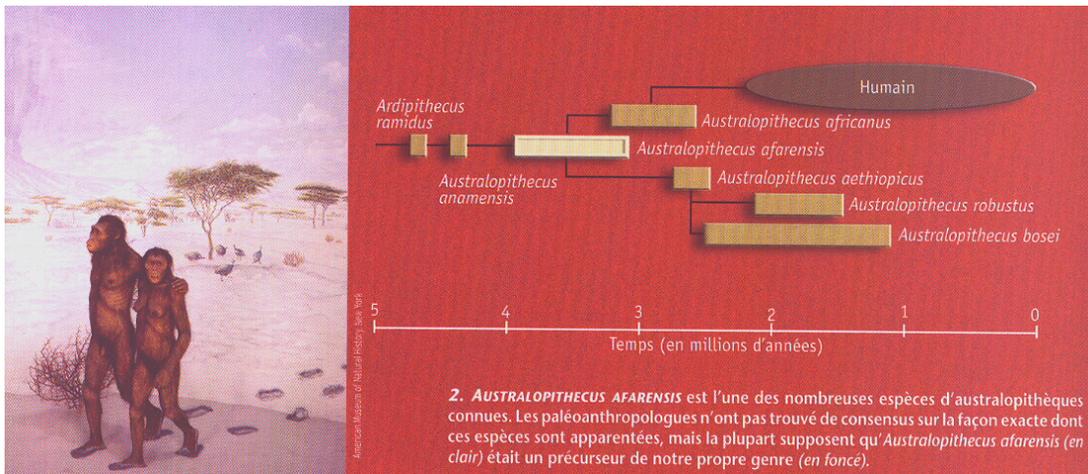


FIGURA 8.18— L'*Australopithecus afarensis* è una delle numerose specie di australopithecus conosciute. I paleoantropologi non sono tutti d'accordo sui legami precisi di parentela esistenti tra di loro, ma la maggior parte ritiene che l'*australopithecus afarensis* (in chiaro) fosse un precursore della nostra specie.

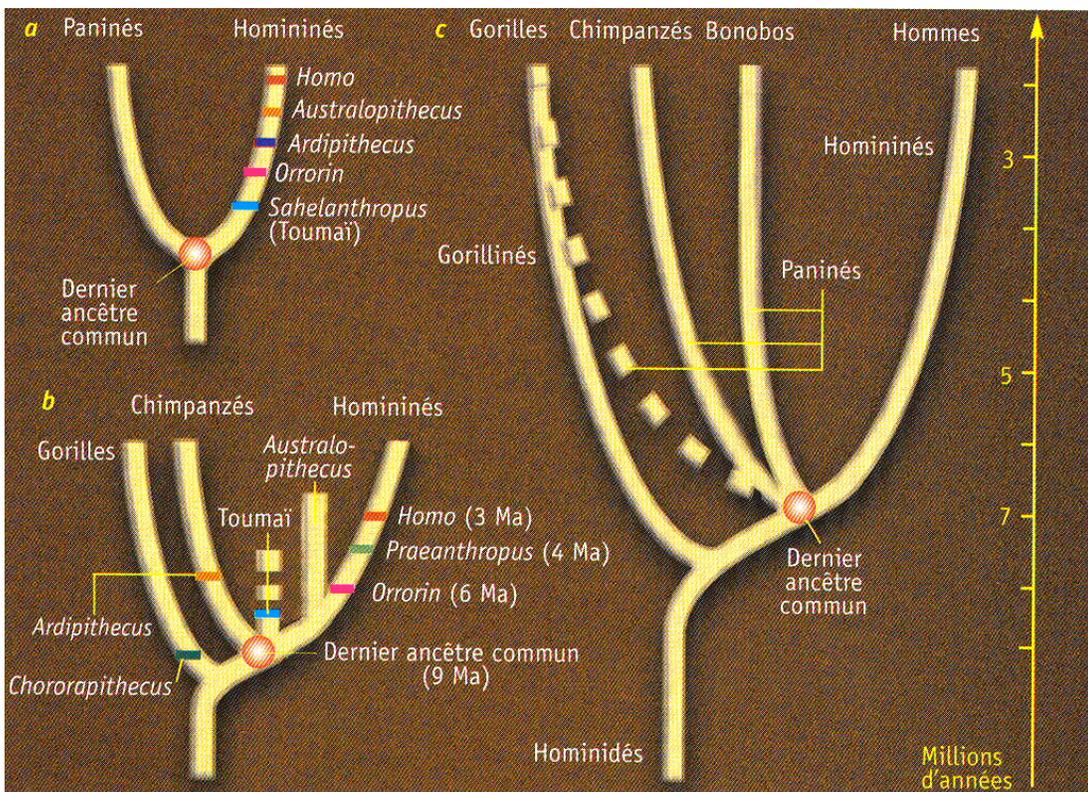


FIGURA 8.19— I legami genetici tra *Sahelanthropus* (Toumai), *Orrorin Tugenensis*, *Ardipithecus* e l'umano sono ancora molto ipotetici. Secondo una ipotesi (a), questi nuovi fossili si piazzano sullo stesso ramo dell'umano, *Sahelanthropus* (Toumai) essendo il più vecchio ominide conosciuto. Secondo un'altra ipotesi (b), *Orrorin Tugenensis* è un antenato dell'uomo, *Ardipithecus* è l'antenato degli scimpanzé e *Sahelanthropus* si trova su un altro ramo. Secondo i dati della biologia molecolare gli ominidi si dividono in due sottofamiglie (c), gli "homininés" e i "paninés".

TOUMAI, OU SAHELANTHROPUS TCHADENSIS

Date de découverte : juillet 2001.

Découvreurs : Michel Brunet et ses collègues.

Site de découverte : Toros-Menalla, dans le désert du Djourab, au Tchad.

Âge : de six à sept millions d'années, estimé par comparaison des faunes avec celles de Lukeino et de Lotagham d'Afrique de l'Est, datées par radiochronologie (datations absolues à partir de la décroissance radioactive de certains éléments).

Milieu de vie : forêts-galeries et savanes en bordure du vaste lac ancien Tchad, aux eaux claires et profondes, peuplées de grands poissons et de reptiles piscivores ; zones marécageuses habitées par des crocodiles, des hippopotames et des « ours à fourmis » (oryctéropes). Des singes colobes, arboricoles, occupaient les forêts-galeries des bords du lac. Des éléphants archaïques, des girafes et des antilopes témoignent de savanes à arbustes et à buissons, alors que d'autres antilopes, abondantes, semblent adaptées à des savanes ouvertes.

Pièce fossile de référence (holotype) : crâne presque complet, dont une canine et deux molaires fragmentaires, les autres dents étant représentées par leurs racines ou leurs alvéoles.

Pièces supplémentaires (paratype) : partie antérieure d'une mandibule contenant les alvéoles d'une incisive et d'une canine ; la moitié droite d'une autre mandibule avec les prémolaires et les molaires ; deux autres dents isolées, une inci-

sive centrale supérieure et une troisième molaire supérieure. La collection s'est enrichie de deux mandibules partielles, dont une avec une canine inférieure, et d'une prémolaire supérieure isolée. Tous ces ossements proviennent d'au plus neuf individus différents.

Le crâne : de taille comparable à celle des australopithèques, de forme basse et allongée, il présente un volume endocrânien de 360 à 370 centimètres cubes, le plus petit de tous les hominidés fossiles connus. En revanche, le bourrelet sus-orbitaire est le plus épais de toutes les espèces fossiles connues : il est plus épais que celui des gorilles, pourtant de bien plus grande taille ; il est également plus développé que chez les australopithèques, mais comparable à celui des hommes proches des origines de notre espèce, comme l'homme de Bodo, en Éthiopie. Ce caractère suggère que Toumai serait un mâle.

La face est courte, assez haute et peu prognathe, en comparaison des chimpanzés et d'*Australopithecus afarensis*, ce qui la rapproche des hominidés plus récents.

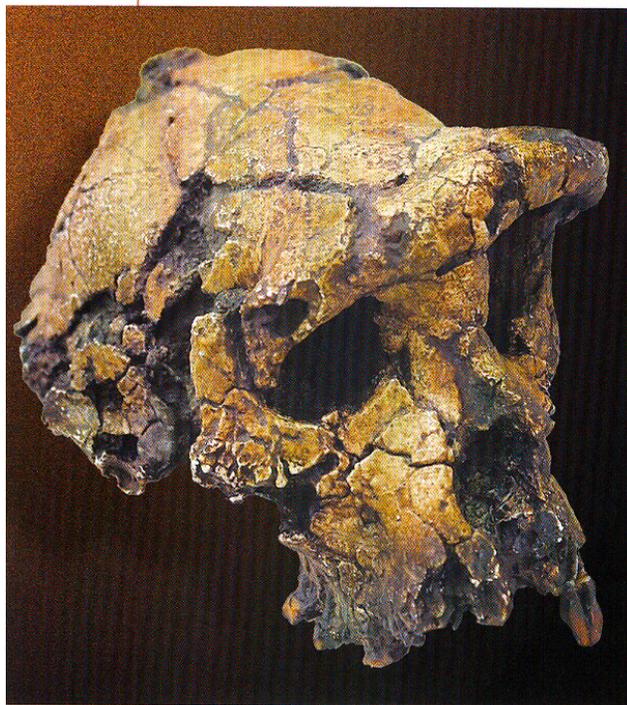
La base du crâne et la nuque : la base du crâne est longue et assez étroite, ce qui est un caractère archaïque. La position antérieure et l'orientation du trou occipital, où la moelle épinière se rattache au cerveau, sont considérés comme propres aux hominidés habitués à marcher debout. Les structures de la base du crâne sont disposées à la manière de celles des hominidés. En revanche, d'autres caractères témoignant d'une forte musculature des épaules et du cou pour maintenir la tête paraissent archaïques.

La mandibule : les trois mandibules fragmentaires connues sont de tailles comparables. Elles sont adaptées à une mastication plus puissante que chez les grands singes actuels, mais moins que chez les australopithèques plus récents.

Les dents : les dents ressemblent à celles des grands singes actuels, à l'émail plus épais, ce qui reflète des nourritures plus coriaces. La canine supérieure est de petite taille et s'use par la pointe et par la facette postérieure. Ce caractère représente un stade dérivé, intermédiaire entre l'homme et les grands singes. En outre, au cours de la croissance, les canines poussent plus tôt chez les humains que chez les autres singes, ce qui est aussi le cas chez Toumai.

Commentaire général : *Sahelanthropus* possède une mosaïque de caractères archaïques, propres et dérivés. Il annonce la « phase mégadonte » (dents épaisses) de la lignée des hominidés comprenant les australopithèques. Ce type d'adaptation s'accorde avec un environnement aux ressources alimentaires diverses, mais globalement plus coriaces que celles consommées par les grands singes actuels, vivants dans des forêts plus humides.

Le trou occipital situé vers l'avant et son orientation suggèrent une locomotion bipède, qui doit être confirmée par des éléments du squelette postcrânien encore inconnus. En attendant d'autres fossiles, Toumai possède un ensemble de caractères dérivés du crâne qui le placent au plus près des origines des hominidés.



P. Robert/Onis/Byrra

FIGURA 8.20— Toumai o *Sahelanthropus tchadensis*

ORRORIN TUGENENSIS

Date de découverte : automne 2000 pour les premiers spécimens, jusqu'en 2004 pour d'autres restes.

Découvreurs : Kiptalam Cheboi, Brigitte Senut, Martin Pickford et leurs collègues.

Site de découverte : formation de Lukeino, au Kenya.

Âge : six millions d'années, estimé par les faunes, la radiométrie complétée par le paléomagnétisme.

Milieu de vie : la présence de colobes, d'impalas, de civettes arboricoles, de galagidés, de chauve-souris frugivores et de chevrotins d'eau suggère des forêts sèches sempervirentes bordant un lac et l'existence d'étendues herbeuses, ce que confirment les plantes fossiles.

Holotype : mandibule en deux morceaux : portion gauche portant les deux dernières molaires et un fragment de la première ; portion droite avec la dernière molaire. Cette mandibule a été complétée par la symphyse.

Pièces supplémentaires (hypodigme) : trois extrémités supérieures ou proximales de fémurs ; la partie inférieure ou distale d'un humérus droit ; une phalange de la main ; une dernière phalange du pouce ; 12 dents : quatre molaires supérieures, une molaire inférieure, une incisive centrale inférieure, une première prémolaire inférieure, deux deuxième prémolaires inférieures, une deuxième prémolaire supérieure, une canine supérieure et une canine inférieure.

La face : les éléments indiquent une face plutôt courte.

La dentition : de taille modeste par rapport à la taille corporelle (microdontie). Les molaires ont une taille moyenne, comparable à celle des chimpanzés et des hommes actuels, et l'émail est épais. En revanche, les canines, plus fortes, ressemblent à celles des grands singes hominoides plus anciens et des grands singes femelles actuels.

Le membre supérieur : l'extrémité inférieure de l'humérus présente une morphologie commune aux grands singes habitués à se suspendre, et aux australopithèques comme Lucy. La crête latérale, développée, indique des muscles des bras bien développés. La phalange de la main, longue, mince et incurvée, et la morphologie de la deuxième phalange du pouce confirment une capacité à se déplacer dans les arbres.

Le membre inférieur : le fémur est une fois et demi plus grand que celui des australopithèques plus récents, comme Lucy. On estime la stature d'*Orrorin* à environ 1,20 mètre (d'après le fémur, de longueur évaluée à 298 millimètres) et son poids entre 30 et 50 kilogrammes. La tête du fémur est bien développée par rapport au col et orientée vers l'avant.

Ce caractère rapproche *Orrorin* des hominidés plus récents bipèdes, et le différencie des australopithèques, chez lesquels le diamètre de la tête excède de peu celui du col. L'étude par imagerie de la section du col du fémur révèle que l'os est bien plus épais dans sa partie inférieure que dans sa partie supérieure (voir *La locomotion visible dans les os*, par R. Macchiarelli, dans ce dossier). Ce rapport est encore plus marqué chez l'homme, alors que l'épaisseur apparaît plus homogène chez les grands singes actuels.



Commentaire général : par la mandibule, les dents et les membres supérieurs, *Orrorin* apparaît comme un hominidé archaïque, avec un régime alimentaire frugivore ou omnivore. En revanche, le fémur d'*Orrorin* atteste une bipédie plus humaine que celle des australopithèques plus récents. Si ce fossile était le premier représentant des hominidés, alors le caractère spécifique de cette lignée serait une bipédie qui n'exclut pas d'autres répertoires locomoteurs (voir *Les bipédies multiples des hominidés*, par G. Bérillon et F. Marchal, et *Ancêtre de l'homme ou du singe*, par B. Senut, dans ce dossier). Dans ce cas, les australopithèques, caractérisés par une mégadontie et des bipédies différentes, représenteraient une lignée propre qui n'aboutirait pas à l'homme. En conséquence, les ancêtres du genre *Homo* ne se trouveraient pas parmi les australopithèques. Les hominidés compteraient deux grandes lignées : l'une caractérisée par les espèces austropithèques mégadontes, c'est-à-dire à dents de grande taille par rapport au squelette de taille plus modeste, et pratiquant une bipédie associée au grimper ; l'autre, dont *Orrorin*, microdonte, aux dents de plus petite taille associé à un squelette de plus grande taille, avec une bipédie plus humaine. Cette hypothèse bouleverse tous les scénarios sur les origines de la lignée humaine.

FIGURA 8.21— *Orrorin Tugenensis*

ARDIPITHECUS RAMIDUS ET ARDIPITHECUS KADABBA

Dates de découvertes : 1994 et 2001.

Découvreurs : Tim White et ses collègues, et Yohannes Halié-Sélassié, Tim White et leurs collègues.

Site de découverte : site d'Aramis, dans la vallée moyenne de l'Awash, et formation de Gona, en Éthiopie.

Âge : de 4,4 millions d'années, estimé par la radioactivité et le paléomagnétisme, et de 5,6 à 5,2 millions d'années.

Milieu de vie : dans la vallée de l'Awash, les restes de flores et de faunes fossiles, comme de nombreux colobes et des antilopes, décrivent un milieu humide, boisé et assez fermé. Les faunes de Gona contiennent aussi des restes de rhinocéros, de girafes, d'éléphants et d'hipparions (cousins des chevaux) indiquant des forêts et des savanes arborées.

Holotype d'*Ardipithecus ramidus* : 17 fossiles de dents attribuées à un seul individu.

Paratype d'*Ardipithecus ramidus* : une trentaine de pièces fossiles appartenant à neuf individus. D'autres dents isolées complètent presque la dentition adulte. Le crâne, fragmentaire, est représenté par la partie postérieure de la base, les os temporaux et l'occipital, une partie du maxillaire et un fragment de mandibule. Le membre supérieur est connu par les trois os du bras gauche (fait rarissime) et une phalange de la main. Le membre inférieur n'est représenté que par une phalange du gros orteil. On connaît aussi une mandibule juvénile partielle, avec une première molaire de lait.

Holotype d'*Ardipithecus kadabba* : une moitié droite de mandibule, avec la troisième molaire ; des dents associées de l'arcade gauche, dont la deuxième incisive, la canine, la deuxième prémolaire, la deuxième molaire et la racine de la troisième.

Paratype d'*Ardipithecus kadabba* : la première phalange du pied ; une deuxième phalange de la main ainsi qu'une partie

d'une première phalange ; une partie de la clavicle et des fragments des trois os du bras gauche, dont la partie inférieure de l'humérus. La découverte ultérieure de six autres dents a permis de préciser les différences entre les deux espèces d'ardipithèques. Celles-ci étant fines, la description qui suit concerne tout le genre.

Le crâne : le fragment du maxillaire ne permet pas de dire si la face était haute, courte ou prognathe. La mandibule semble un peu moins robuste que celle de Lucy (qui avait une face prognathe dans sa partie inférieure). Plusieurs caractères de la région temporale évoquent les chimpanzés actuels, par exemple une articulation avec la mandibule aux reliefs plats. En revanche, le trou occipital occupe une position avancée qui rappelle celle, marquée et dérivée, des paranthropes bien plus récents.

Les dents : la taille relative des dents antérieures – les incisives – et des dents postérieures – les molaires – se rapproche de celle des chimpanzés actuels. Cependant, les incisives sont un peu moins grandes, alors que les molaires le sont un peu plus, notamment plus larges, mais pas autant que chez les australopithèques comme Lucy. La couche d'émail est mince. Ces caractères indiquent des nourritures coriaces et fibreuses. Les quelques canines préservées sont plus grandes que chez les australopithèques plus récents, mais moins développées que chez les grands singes actuels. Elles portent des traces d'usure à la fois sur la pointe et sur leur facette postérieure, comme celles des chimpanzés femelles.

Le membre supérieur : le bras est plus grand et plus robuste que chez Lucy, et le fragment de clavicle est plus robuste que chez les chimpanzés. Les phalanges de la main sont longues et incurvées, avec de fortes marques d'insertion des muscles fléchisseurs. Dans son ensemble, le bras long et puissant d'ardipithèque est celui d'un grand hominidé habitué à grimper et à se suspendre dans les arbres.

Le membre inférieur : la phalange du pied la plus complète est celle du quatrième orteil d'*Ardipithecus kadabba*. Elle est de taille comparable à celle d'*Australopithecus afarensis*. Elle est longue, incurvée et comprimée verticalement dans sa partie antérieure, comme chez les grands singes, mais plus aplatie dans sa partie postérieure, là où elle s'articule avec le métacarpien, comme chez l'homme. La description de la phalange plus fragmentaire d'*Ardipithecus ramidus* s'accorde avec cette description.

Commentaire général : un peu plus corpulent que Lucy, comparable à des chimpanzés femelles d'une trentaine de kilogrammes, *Ardipithecus* présente une mosaïque de caractères unique et semble le plus inféodé à des habitats fermés et humides, comme les chimpanzés. Selon ses inventeurs, dans la seule région de l'Éthiopie, les espèces d'homininés se seraient succédé entre 5,8 et 3 millions d'années selon la séquence *Ardipithecus kadabba* – *Ardipithecus ramidus* – *Australopithecus anamensis* – *Australopithecus afarensis*. Les fossiles plus anciens, *Orrorin* et *Sahelanthropus*, appartiendraient au grade le plus archaïque des homininés, avec *Ardipithecus kadabba*. Cette chronologie ne séduit pas la majorité des paléanthropologues, qui conçoivent mal un groupe aussi disparate.



L'IMAGE EST ALPHABETIQUE, MUS. OF ETHIOPIA

FIGURA 8.22— *Ardipithecus Ramidus* e *Ardipithecus Kadabba*

8.12 Evoluzione schematica del paesaggio in Vallese

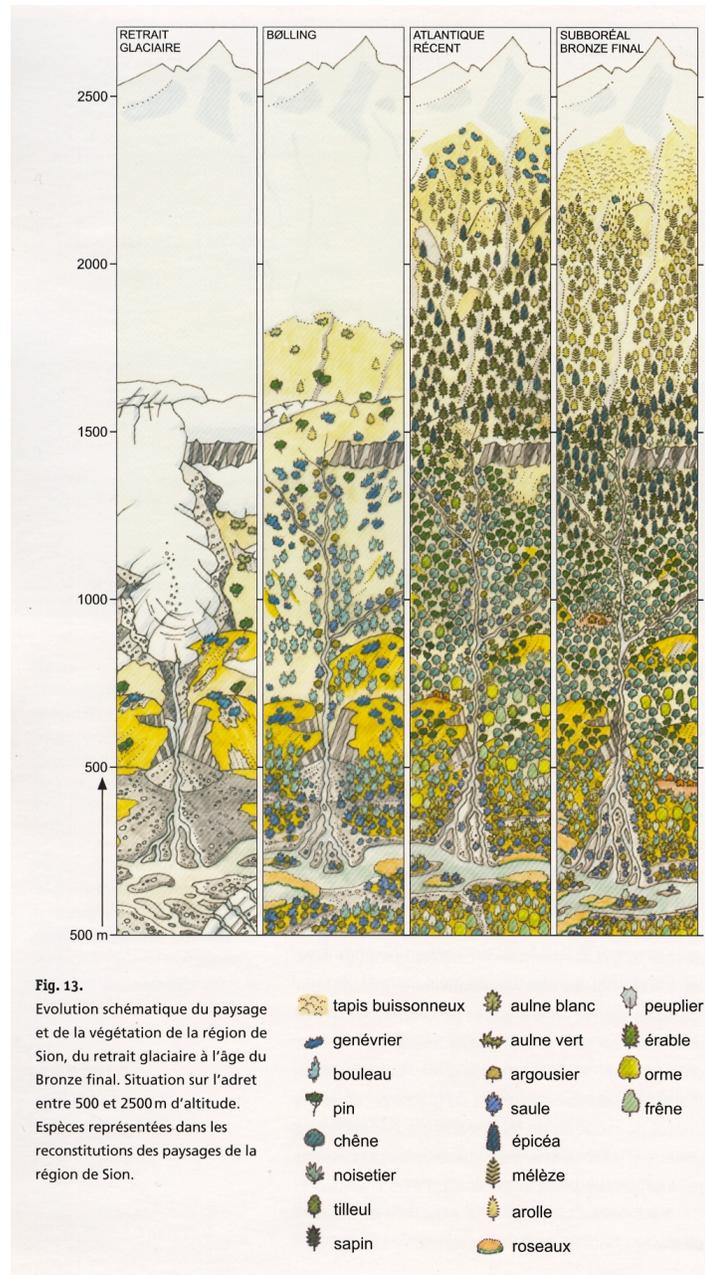


FIGURA 8.23— Evoluzione schematica del paesaggio e della vegetazione della regione di Sion (Vallese), dal ritiro dei ghiacciai alla l'età del bronzo finale. Situazione sul solatio tra 500 m e 2500 m d'altitudine. In ordine, dall'alto in basso, le specie indicate al fondo della figura sono; 1^a colonna: tappeto cespuglioso, ginepro, betulla, pino, quercia, nocciolo, tiglio, abete, 2^a colonna: alno bianco, alno verde, olivello spinoso, salice, abete rosso, larice, pino cembro, canna, 3^a colonna: pioppo, acero, olmo, frassino. Periodi: *Retrait glaciaire* = 17'000 – 11'000 a.C., *Bølling* = 12'700 – 11'950 a.C., *Atlantique récent* = 4'700 – 3'400 a.C., *Subboréal* = 3'400 – 800 a.C.

Capitolo 9

Glossario e risorse internet

9.1 Glossario di termini astronomici

<http://www.astronomia.com/glossario/> (in italiano)

<http://outreach.atnf.csiro.au/education/senior/astrophysics/astrophysics-glossary.html>

http://hubblesite.org/reference_desk/glossary/

<http://www.atlasoftheuniverse.com/glossary.html>

<http://astsun.astro.virginia.edu/~jh8h/astr124/glossary.html>

<http://www.r-cl Clarke.org.uk/glossary.htm>

9.2 Astrobiologia

The Astrobiology Web

<http://www.astrobiology.com/>

Il programma "Origins" della NASA è un gruppo di missioni spaziali, di osservatori sulla Terra e di programmi di ricerca che si concentra su 1. l'osservazione delle prime stelle e galassie, 2. la ricerca di pianeti attorno a altre stelle, 3. la ricerca della vita nell'universo.

<http://origins.stsci.edu/>

L'istituto di astrobiologia della NASA (NAI) è un'organizzazione virtuale che promuove, conduce e dirige ricerche multi-disciplinari in astrobiologia. Contiene anche dei link per risorse educative, incluso "Ask an Astrobiologist".

<http://nai.arc.nasa.gov/>

Planet Quest: questo sito segue le missioni della NASA che ricercano pianeti fuori del nostro sistema solare.

<http://planetquest.jpl.nasa.gov/>

Questo è un corso interdisciplinare di un anno per studenti di liceo che usa l'astrobiologia come tema unificatore, sviluppato da TERC e NASA.

<http://astrobio.terc.edu>

NASA – Astrobiologia – Educazione e divulgazione

<http://astrobiology.arc.nasa.gov/education/index.cfm>

SETI (Search for Extra-Terrestrial Intelligence) è un'organizzazione dedicata alla ricerca e la divulgazione scientifica. La sua missione è di esplorare, capire e spiegare le origini, la natura e la prevalenza della vita nell'universo.

<http://www.seti.org>

Lista di siti di astrobiologia

<http://ares.jsc.nasa.gov/Education/Websites/AstrobiologyEducation/resources.htm>

9.3 Corso di astronomia in italiano (Università di Padova)

<http://www.pd.astro.it/MOSTRA/NEW/A0000IDX.HTM>

9.4 Doppler Shift, redshift:

<http://www.astro.ucla.edu/~wright/doppler.htm>

Applet che mostra l'effetto Doppler: propagazione di onde in 2D

<http://www.psigate.ac.uk/newsite/spaceguide/redshift.html>

Effetto Doppler e boom sonico: $v < v_{\text{suono}}$, $v = v_{\text{suono}}$ e $v > v_{\text{suono}}$:

<http://www.kettering.edu/~drussell/Demos/doppler/doppler.html>

La luce come un'onda elettromagnetica: propagazione, lunghezza d'onda, righe d'assorbimento, spettri di galassie (Sloan Survey):

http://www.colorado.edu/physics/2000/waves_particles/

<http://www.phy.ntnu.edu.tw/ntnujava/viewtopic.php?t=52>

<http://www.colorado.edu/physics/2000/quantumzone/bohr.html>

<http://www.colorado.edu/physics/2000/quantumzone/index.html>

<http://cas.sdss.org/dr4/en/proj/advanced/galaxies/spectra.asp>

Spettro del Sole – applet che mostra il flusso stellare con 3 temperature diverse

<http://astro.unl.edu/naap/ebs/spectraltype.html>

9.5 Pianeti extra-solari

Il programma di ricerca di pianeti extra-solari di Ginevra:

<http://obswww.unige.ch/~udry/planet/planet.html>

Il primo pianeta extra-solare attorno ad una stella come il Sole:

<http://obswww.unige.ch/~udry/planet/51peg.html>

Siti sulla ricerca di pianeti extra-solari:

http://obswww.unige.ch/~udry/planet/link_exoplanet.html

Ricerca di pianeti extra-solari (G. Marcy):

<http://exoplanets.org/>

L'enciclopedia dei pianeti extra-solari:

<http://exoplanet.eu>

Come funziona la caccia ai pianeti:

<http://science.howstuffworks.com/planet-hunting2.htm>

9.6 Simulazioni N-body

La simulazione N-body cosmologica "The millenium"

<http://www.mpa-garching.mpg.de/galform/millennium/>

Simulazioni N-body della nostra galassia (stelle e gas), la Via Lattea:

<http://obswww.unige.ch/~fux/hydro.html>

Simulazioni N-body di collisioni di galassie, da John Dubinski

<http://www.cita.utoronto.ca/~dubinski/nbody/>

<http://www.cita.utoronto.ca/%7Edubinski/tflops/>

<http://www.galaxydynamics.org/>

Collisioni di galassie

<http://www.etsu.edu/physics/bsmith/collisions/collisions.html>

Modelli di galassie in interazione, da Josh Barnes

http://www.ifa.hawaii.edu/faculty/barnes/research/interaction_models/index.html

9.7 Mappe di galassie particolari

HI Rogues gallery (mappe di galassie particolari, distorte, in interazione)

<http://www.nrao.edu/astrores/HIrogues/webGallery/index.html>

9.8 Potenze da dieci

Una versione moderna di "Powers of Ten", il famoso filmato fatto in 1977 da Charles e Ray Eames (IBM). Alcune versioni del filmato originale si trovano su www.youtube.com

<http://www.wordwizz.com/pwrsof10.htm>

<http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/scienceopticsu/powersof10/>

9.9 Immagini di galassie (spirali, ellittiche, ecc)

http://www.noao.edu/image_gallery/

L'ammasso della Vergine (*Virgo cluster*)

<http://www.atlasoftheuniverse.com/galgrps/vir.html>

Galassie spirale: formazione stellare e braccia spirali, teoria delle onde di densità

<http://ircamera.as.arizona.edu/NatSci102/NatSci102/lectures/spiralarms.htm>

Immagini di galassie spirali (VLT)

<http://www.eso.org/outreach/ut1fl/astroim-galaxy-spiral.html>

Immagini di galassie vicine (VLT)

<http://www.eso.org/outreach/ut1fl/astroim-galaxy-nearby.html>

Immagini di galassie particolari (VLT)

<http://www.eso.org/outreach/ut1fl/astroim-galaxy-peculi.html>

Immagini di galassie doppie o multiple (VLT)

<http://www.eso.org/outreach/ut1fl/astroim-galaxy-multip.html>

9.10 FAQ (Frequently Asked Questions) sull'universo, il Big Bang...

<http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmology-faq.html>

9.11 The Sloan Digital Sky Survey

Sito molto interessante con progetti astronomici, foto, ecc, basato sulle (vere) osservazioni del "Sloan Digital Sky Survey":

<http://skyserver.sdss.org/dr1/en/>

Questo sito permette l'accesso a:

- Foto a colore di più di 80 milioni di oggetti
- Completa fotometria per ogni oggetto.
- Spettri per più di 180'000 oggetti.
- Accesso ai dati di qualsiasi tipo di oggetto astronomico

Progetti sono disponibili coprendo una grande varietà di soggetti, come p. es.:

- Il diagramma di Hubble
- I colori in astronomia
- Il tipo spettrale delle stelle
- Processare le immagine
- Asteroide
- Il diagramma H-R
- Galassie
- Survey di tutto il cielo
- Quasar

9.12 Pianeti del nostro sistema solare

Planetary Photojournal: Pagine d'accesso della NASA per le immagine di Galileo, Cassini-Huygens, HST, Mars Exploration Rovers, Mars Odyssey, Mars Reconnaissance Orbiter, Mars Global Surveyor, ecc:

<http://photojournal.jpl.nasa.gov/index.html>

9.13 Recenti missioni su MARTE

<http://marsprogram.jpl.nasa.gov/index.html>

MGS: <http://marsprogram.jpl.nasa.gov/mgs/>
Rovers: <http://marsrovers.jpl.nasa.gov/home/index.html>
MRO: <http://marsprogram.jpl.nasa.gov/mro/>
Odyssey: <http://marsprogram.jpl.nasa.gov/odyssey/>
Express: <http://marsprogram.jpl.nasa.gov/express/>

Multimedia

<http://www.jpl.nasa.gov/multimedia/mer-yr2/>

Panorama a 360° di Marte

<http://www.panoramas.dk/mars.html>

Mars Odyssey - Thermal Emission Imaging System (THEMIS)

<http://themis.asu.edu/>

Mars High Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE)

<http://marsweb.nas.nasa.gov/HiRISE/>

Il modo migliore per vedere le immagine HiRISE con "Zoomify"

http://marsweb.nas.nasa.gov/HiRISE/hirise_images/

Volo virtuale nella valle Mariner

http://themis.asu.edu/valles_video

La valle Mariner di Marte

<http://themis.asu.edu/features/vallesmosaic>

Volare su Marte e guidare i rovers

<http://www.marsquestonline.org/index.html>

9.14 La missione Cassini-Huygens verso Saturno e Titano

http://www.esa.int/SPECIALS/Cassini-Huygens/SEMVOZ1VQUD_0.html

<http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=12>

Cassini-Huygens, missione verso Saturno e Titano, JPL NASA

<http://saturn.jpl.nasa.gov/home/index.cfm>

Saturno:

<http://solarsystem.nasa.gov/planets/profile.cfm?Object=Saturn>

<http://www.solarviews.com/eng/saturn.htm>

<http://huygens.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=35131>

Video e foto di Saturno

<http://www.space.com/saturn/>

I satelliti di Saturno (al momento, ne conosciamo 47)

<http://huygens.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=35229>

Cassini e Saturno

<http://www.solarviews.com/eng/cassiniatsaturn.htm>

Enceladus, una delle "Lune" di Saturno

<http://www.solarviews.com/eng/enceladu.htm>

9.15 L'effetto fionda

<http://www.dur.ac.uk/bob.johnson/SL/1.html>

Caduta doppia – effetto fionda

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/doubal.html>

9.16 Il telescopio spaziale Hubble, *The Hubble Space Telescope (HST)*

Istituto per il telescopio spaziale Hubble: the Space Telescope Science Institute

<http://www.stsci.edu>

Immagini provenienti da HST (galassie, stelle, sonde spaziali, ecc)

<http://hubblesite.org/>

<http://hubblesite.org/gallery/album/>

La pagina Internet Europea per il telescopio spaziale (immagini, poster, video, ecc)

<http://www.spacetelescope.org/>

Ultra Deep Field (UDF) osservato da HST

<http://www.stsci.edu/hst/udf>

Attraversare l'UDF con Skywalker

<http://www.aip.de/groups/galaxies/sw/udf/index.php>

Immagine e video dell'UDF

<http://www.spacetelescope.org/news/html/heic0406.html>

9.17 ESO, Paranal e il VLT

ESO (European Southern Observatory)

<http://www.eso.org>

Very Large Telescope (VLT) e l'osservatorio di Paranal

<http://www.eso.org/outreach/gallery/par/>

Informazione generali sul VLT

<http://www.eso.org/outreach/ut1fl/>

VLT immagini astronomiche

Sistema solare – Stelle – Ammassi di stelle – Nebula – Galassie – Ammassi di galassie –

Cosmologia – Spettri, grafici, ecc...

<http://www.eso.org/outreach/ut1fl/astroimages.html>

VLT a Wikipedia (in italiano)

<http://it.wikipedia.org/wiki/VLT>

9.18 Buchi neri

Getto cosmico di M87

<http://www.nrao.edu/pr/1999/m87/>

[http://www.space.com/scienceastronomy/astronomy/
chandra_m87_010926.html](http://www.space.com/scienceastronomy/astronomy/chandra_m87_010926.html)

Supernova

<http://nrumiano.free.fr/Estars/supernova.html>

FAQ sui buchi neri

[http://amazing-space.stsci.edu/resources/explorations/blackholes/
teacher/sciencebackground.html](http://amazing-space.stsci.edu/resources/explorations/blackholes/teacher/sciencebackground.html)

Viaggio virtuale verso un buco nero

http://hubblesite.org/explore_astronomy/black_holes/modules.html

Piccola enciclopedia dei buchi neri (natura, formazione e esistenza di buchi neri)

[http://hubblesite.org/explore_astronomy/black_holes/
encyclopedia.html](http://hubblesite.org/explore_astronomy/black_holes/encyclopedia.html)

[...] La filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto inanzi a gli occhi (io dico l'universo), ma non si può intendere se prima non s'impara a intender la lingua, e conoscer i caratteri, ne' quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intenderne umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro labirinto. [...]

Galileo Galilei, Il saggiaiore, 1623

Capitolo 10

Referenze

- Darwin, Charles, 1859, "On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life". John Murray, London; modern reprint Charles Darwin, Julian Huxley (2003). The Origin of Species. Signet Classics.
- Forget, François, 2007, "Water and Climates on Mars". In: Muriel Gargaud et al. (eds), "Lectures in Astrobiology", Vol II, p.103–122.
- Gould, Stephen Jay, 1989, "Wonderful Life. The Burgess Shale and the Nature of History", Penguin, p. 46–47.
- Lejeune, Schaerer, 2001, "Database of Geneva stellar evolution tracks and isochrones", Astronomy & Astrophysics, 366, 538–546.
- Luca Cavalli-Sforza, L., & Feldman, M. W., 2003, Nature Genetics vol. 33, p. 266 – 275.
- Laskar, Joutel, Robutel, 1993, Nature, vol. 361, no. 6413, p. 615–617.
- Lebatard A.-E., et al. "Cosmogenic nuclide dating of Sahelanthropus tchadensis and Australopithecus bahrelghazali: Mio-Pliocene hominids from Chad", Proceedings of the National Academy of Sciences, March 4, 2008, vol. 105, no. 9, 3226–3231.
- Mayor M. & Queloz D., 1995, "A Jupiter-Mass Companion to a Solar-Type Star", Nature 378, 355.
- Morgan, Elaine, 1990, "The Scars of Evolution: What our bodies tell us about human origins", Penguin, p.135–140.
- Morris, Desmond, 1994, "The Naked Ape, a Zoologist's Study of the Human Animal", Vintage.
- Salem, A.H., Badr, F.M., Gaballah, M.F. & Pääbo, S., 1996, The genetics of traditional living: Y-chromosomal and mitochondrial lineages in the Sinai Peninsula. Am. J. Hum. Genet. vol. 59, p. 741–743.
- Tattersall, Ian, 2006, Scientific American, Special Edition, "Becoming Human, Evolution and the Rise of Intelligence", Volume 16, Number 2.
- Weidenreich, F., 1946, Apes, Giants, and Man, Univ. Chicago Press, Chicago, IL.
- Wolpoff, M.H., 1989, Multiregional evolution: The fossil alternative to Eden. In The Human Revolution: Behavioural and Biological Perspectives on the Origins of

Modern Humans (eds. Mellar, P. & Stringer, C) 62–108 (Princeton Univ. Press, Princeton, NJ).