



Neil deGrasse Tyson

Astrofísica per a gent amb presses

Com funciona l'univers?
Com hi encaixem?

edicions
62

Neil deGrasse Tyson

Astrofísica
per a gent
amb presses

Traducció de Núria Parés Sellarès

Edicions 62

Barcelona

Amb la col·laboració del Departament de Cultura



Títol original: *Astrophysics for People in a Hurry*

© 2017 by Neil deGrasse Tyson

Primera edició: novembre del 2017

© de la traducció: Núria Parés Sellarès, 2017

© d'aquesta edició: Edicions 62, s. a.
Diagonal, 662-664, 08034 Barcelona
www.edicions62.cat
info@edicions62.cat

Fotocomposició: Lozano Faisano, s.l.
Imprès a Egedsa

DIPÒSIT LEGAL: B. 21.612-2017

ISBN: 978-84-297-7631-7

*Queda rigorosament prohibida sense autorització escrita de l'editor
qualsevol forma de reproducció, distribució, comunicació pública o transformació
d'aquesta obra, que serà sotmesa a les sancions establertes per la llei.*

*Podem adreçar-vos a Cedro (Centro Español de Derechos Reprográficos,
www.cedro.org) si necessiteu fotocopiar o escanejar algun fragment d'aquesta obra
(www.conlicencia.com; 917021970 / 932720447).*

Tots els drets reservats.

SUMARI

| | |
|---------------------------------------------|-----|
| <i>Prefaci</i> | 11 |
| 1. La història més gran mai explicada | 15 |
| 2. A la Terra com en el Cel | 31 |
| 3. Que es faci la llum | 43 |
| 4. Entre galàxies | 55 |
| 5. Matèria fosca | 67 |
| 6. Energia fosca | 83 |
| 7. El cosmos a la taula | 101 |
| 8. Sobre la forma arrodonida | 117 |
| 9. Llum invisible | 129 |
| 10. Entre planetes | 145 |
| 11. Exoplaneta Terra | 157 |
| 12. Reflexions sobre la perspectiva còsmica | 171 |
| <i>Agraïments</i> | 185 |
| <i>Índex analític</i> | 187 |

I

LA HISTÒRIA MÉS GRAN MAI EXPLICADA

El món ha persistit en la infinitat del temps després d'haver experimentat tota mena de moviments convenients. A partir d'aquí, s'ha produït tota la resta.

LUCRECI, c. 50 aC

Al principi, fa prop de 14 mil milions d'anys, tot l'espai, tota la matèria i tota l'energia de l'univers conegut ocupava un volum més petit que una bilionèsima part del punt que hi ha al final d'aquesta frase.

Hi havia tanta escalfor, que les forces bàsiques de la natura que descriuen conjuntament l'univers es van unificar. Tot i que encara es desconeix com va arribar a existir, aquest cosmos de mida submil·limètrica no podia fer res més que expandir-se ràpidament, en el que avui dia anomenem *big bang*.

La teoria general de la relativitat d'Einstein, proposada el 1916, ens ofereix la comprensió moderna de la gravetat, en la qual la presència de ma-

tèria i energia deforma l'estructura d'espai i de temps que l'envolta. A la dècada de 1920, es va descobrir la mecànica quàntica, que ens proporciona l'explicació moderna de tot el que és petit: molècules, àtoms i partícules subatòmiques. Però aquestes dues concepcions de la natura són formalment incompatibles l'una amb l'altra, fet que va impulsar els físics a iniciar una cursa per combinar la teoria dels conceptes petits amb la teoria dels conceptes grans en una única teoria coherent de la gravetat quàntica. Malgrat que encara no hem arribat a la línia de meta, sabem exactament on són els obstacles més importants. Un d'aquests obstacles és durant l'època de *Planck*, quan es va formar l'univers. Es tracta de l'interval de temps entre $t = 0$ i $t = 10^{-43}$ segons (una deumilionèsima de bilionèsima de bilionèsima de bilionèsima de segon) després de l'inici, i abans que l'univers s'expandís 10^{-35} metres (deu bilionèsimes de bilionèsimes de bilionèsimes de metre). El físic alemany Max Planck, del qual reben el nom aquestes quantitats tan inimaginablement petites, va introduir la idea de l'energia quantificada el 1900 i en general és considerat el pare de la mecànica quàntica.

El xoc entre la gravetat i la mecànica quàntica no planteja cap problema per a l'univers contemporani. Els astrofísics apliquen els principis i les eines de la relativitat general i la mecànica quàntica a molts tipus diferents de problemes. Però al prin-

cipi, durant l'època de Planck, els conceptes grans eren petits, i sospitem que hi devia haver una mena de casament forçat entre els dos fenòmens. Malauradament, els vots que es van intercanviar durant la cerimònia continuen eludint-nos, i per tant no hi ha cap llei (coneguda) de la física que descriu amb certesa el comportament de l'univers durant aquella època.

Tanmateix, suposem que al final de l'època de Planck la gravetat es va desprendre de les altres forces de la natura, encara unificades, i va assolir una identitat independent molt ben descrita per les nostres teories actuals. A mesura que l'univers envellia durant 10^{-35} segons va seguir creixent, diluint totes les concentracions d'energia, i el que va quedar de les forces unificades es va dividir en la *força electrofeble* i la *força nuclear forta*. Més endavant, la *força electrofeble* es va dividir en la *força electromagnètica* i la *força nuclear feble*, revelant les quatre forces diferents que hem arribat a conèixer i apreciar: la força feble, que controla la desintegració radioactiva; la força forta, que cohesiona el nucli atòmic; la força electromagnètica, que cohesiona les molècules; i la gravetat, que cohesiona la matèria condensada.

Ha passat una bilionèsima de segon des del principi de l'univers.

Mentrestant, la interacció entre la matèria en forma de partícules subatòmiques i l'energia en forma de fotons (vasos d'energia lluminosa sense massa que tenen qualitat d'ona i de partícula) era incessant. L'univers estava prou calent perquè aquests fotons convertissin espontàniament la seva energia en parells de partícules de matèria-antimatèria, que immediatament després s'aniquilaven i retornaven la seva energia en forma de fotons. Sí, l'antimatèria és real. I la vam descobrir nosaltres, no els escriptors de ciència-ficció. Aquestes metamorfosis queden perfectament establertes en l'equació més famosa d'Einstein: $E = mc^2$, que és una fórmula de doble sentit per calcular quanta matèria representa la teva energia, i quanta energia representa la teva matèria. La c^2 és la velocitat de la llum al quadrat, una xifra enorme que, quan es multiplica per la massa, ens recorda la quantitat d'energia que es pot obtenir de l'objecte en qüestió.

Poc abans, durant i després de la separació de les forces fortes i electrofebles, l'univers era una sopa bullent de quarks, leptons i els seus germans antimatèria, i també bosons, les partícules que permeten les seves interaccions. Cap d'aquestes famílies de partícules es creu que és divisible en res més petit o més bàsic, tot i que cadascuna presenta diverses varietats. El fotó ordinari és membre de la família del bosó. Els leptons més coneguts pels no-físics són l'electró i potser el neutrí; i els quarks

més coneguts són... bé, no hi ha quarks coneguts. A cadascuna de les seves sis subespècies se li ha assignat un nom abstracte que no té cap objectiu filològic, filosòfic o pedagògic concret, excepte el de distingir-les de les altres: *quark u* i *quark d*, *quark s* i *quark c*, *quark t* i *quark b* (les inicials provenen de l'anglès *up* i *down*, *strange* i *charmed*, *top* i *bottom*).

Els bosons, per cert, es diuen així pel científic indi Satyendra Nath Bose. La paraula *leptó* prové del grec *leptos*, que significa 'lleuger' o 'petit'. *Quark*, en canvi, té un origen literari i molt més imaginatiu. El físic Murray Gell-Mann, que el 1964 va proposar l'existència dels quarks com a components interns de neutrons i protons, i que en aquell moment creia que la família dels quarks només tenia tres membres, va treure el nom d'una frase particularment difícil de trobar a *Finnegans Wake* de James Joyce: «Tres quarks per a Muster Mark!». El que s'ha de reconèixer dels quarks és que tots els seus noms són simples, cosa que els químics, els biòlegs i especialment els geòlegs semblen incapaços d'aconseguir quan posen noms als seus descobriments.

Els quarks són unes bèsties ben extravagants. A diferència dels protons, que tenen una càrrega elèctrica de +1, i dels electrons, amb una càrrega de -1, els quarks tenen càrregues fraccionàries que es presenten en terços. I mai no trobaràs un quark tot sol, sempre s'acoblen a altres quarks del seu vol-

tant. De fet, la força que manté dos (o més) quarks junts s'intensifica com més els separen —com si estiguessin enganxats amb alguna mena de goma elàstica subnuclear. Si separen suficientment els quarks, la goma elàstica es trenca i l'energia emmagatzemada evoca la fórmula $E = mc^2$ per crear un nou quark a cada extrem, de manera que et quedes al mateix lloc on havies començat.

Durant l'època del quark-leptó, l'univers era prou dens perquè la separació mitjana entre els quarks no units fos comparable amb la separació entre els quarks units. En aquestes condicions, el vincle entre els quarks adjacents no es podia establir de manera inequívoca, o sigui que es movien lliurement malgrat que estaven units col·lectivament entre si. El descobriment d'aquest estat de la matèria, una mena de caldera de quarks, el va presentar per primera vegada l'any 2002 un equip de físics dels Brookhaven National Laboratories, a Long Island (Nova York).

Una ferma evidència teòrica suggereix que un episodi al principi de tot de l'univers, potser durant una de les divisions de forces, va dotar-lo d'una lleu asimetria, en la qual les partícules de matèria amb prou feines superaven les partícules d'antimatèria: una diferència entre mil milions u i mil milions. Aquesta petita diferència de població difícilment podia cridar l'atenció enmig de la contínua creació, aniquilació i recreació de quarks i antiquarks, d'elec-

trons i antielectrons (més coneguts com a *positrons*), i de neutrins i antineutrins. Per tant, aquest grup sobrant va tenir un munt d'oportunitats per buscar algú amb qui aniquilar-se, igual que tota la resta.

Però no va durar gaire temps. A mesura que el cosmos es continuava expandint i refredant, fent-se molt més gran que el nostre sistema solar, la temperatura va caure ràpidament per sota d'un bilió de graus kelvin.

Ha passat una milionèsima de segon des del principi de l'univers.

Aquest univers tebi ja no estava prou calent ni era prou dens per coure quarks, de manera que tots es van buscar una parella i van crear una nova família permanent de partícules pesants anomenades *hadrons* (del grec *hadros*, que significa 'fort, dens'). Aquesta transició de quark a hadró de seguida va produir l'aparició de protons i neutrons, així com d'altres partícules pesants i menys conegudes, totes formades per diverses combinacions d'espècies de quark. A Suïssa (tornem a la Terra), l'organització europea de física de partícules¹ utilitza un gran ac-

1. El Centre Europeu de Recerca Nuclear, conegut per l'acrònim CERN.

celerador per fer col·lidir feixos d'hadrons en un intent de recrear aquestes mateixes condicions. Aquesta enorme màquina s'anomena Gran Col·lisionador d'Hadrons.

La lleugera asimetria matèria-antimatèria que afectava el caldo de quarks-leptons després va passar als hadrons, però amb unes conseqüències extraordinàries.

Mentre l'univers es continuava refredant, la quantitat d'energia disponible per a la creació espontània de partícules bàsiques es va reduir de cop. Durant l'època de l'hadró, els fotons ambientals ja no podien evocar la fórmula $E = mc^2$ per crear parelles de quarks-antiquarks. I a més d'això, els fotons que van sorgir de totes les aniquilacions restants van perdre energia a l'univers en constant expansió, i així van quedar per sota del llindar necessari per crear parelles d'hadrons-antihadrons. Per cada mil milions d'aniquilacions —deixant mil milions de fotons al seu pas—, sobrevivia un únic hadró. Aquests solitaris al final gaudirien de tota la diversió: serien la font de matèria essencial per crear galàxies, estrelles, planetes i petúnies.

Sense el desequilibri de mil milions u i mil milions entre la matèria i l'antimatèria, tota la massa de l'univers s'hauria autoaniquilat, deixant un cosmos fet de fotons i res més —el màxim escenari del que-es-faci-la-llum.

Ara per ara, ha passat un segon des del principi de l'univers.

L'univers ha crescut uns quants anys llum,² aproximadament la distància entre el Sol i les seves estrelles més properes. A mil milions de graus encara fa molta calor, i per tant encara es poden cuinar electrons, els quals, juntament amb els seus homòlegs positrons, continuen apareixent i desapareixent. Però en un univers en constant expansió i en constant refredament, tenen els dies (de fet, els segons) comptats. Igual que en el cas dels quarks, i en el cas dels hadrons, va passar amb els electrons: finalment només un electró entre mil milions sobreviu. La resta s'aniquila amb els positrons, els seus companys antimatèria, en un mar de fotons.

Ara mateix, ha quedat viu un electró per cada protó. Mentre el cosmos es continua refredant —caient per sota de cent milions de graus—, els protons es fusionen amb protons i també amb neutrons, formant nuclis atòmics i incubant un univers en el qual el noranta per cent d'aquests nuclis és hidrogen i el deu per cent és heli, juntament amb traces de deuteri (hidrogen «pesant»), triti (hidrogen encara més pesant) i liti.

2. Un any llum és la distància que recorre la llum en un any terrestre: prop de sis bilions de milles o deu bilions de quilòmetres.

Ara han passat dos minuts des del principi de l'univers.

Durant 380.000 anys més no passarà gairebé res amb la nostra sopa de partícules. Al llarg d'aquests mil·lennis, la temperatura es manté prou elevada perquè els electrons es desplacin lliurement entre els fotons, sacsejant-los d'un costat a l'altre mentre interactuen entre si.

Però aquesta llibertat arriba a un final abrupte quan la temperatura de l'univers baixa per sota de 3.000 graus kelvin (aproximadament la meitat de la temperatura de la superfície del Sol), i tots els electrons lliures es combinen amb els nuclis. Aquest matrimoni deixa rere seu un bany omnipresent de llum visible, imprimint perpètuament en el cel el lloc on era tota la matèria en aquell moment, i completant la formació de partícules i d'àtoms en l'univers primigeni.

Durant els primers mil milions d'anys, l'univers es va continuar expandint i refredant mentre la matèria gravitava formant les concentracions massives que anomenem *galàxies*. Se'n van formar gairebé cent mil milions, cadascuna amb centenars de milers de milions d'estrelles que van experimentar una fusió termonuclear en el nucli. Aquestes estre-

lles que superaven deu vegades la massa del Sol tenien suficient pressió i temperatura en el seu nucli per fabricar dotzenes d'elements més pesants que l'hidrogen, incloent-hi els que conformen els planetes i qualsevol forma de vida que s'hi pugui desenvolupar.

Aquests elements haurien estat increïblement inútils si s'haguessin quedat allà on es van formar. Però les estrelles de gran massa van explotar de manera fortuïta, i van escampar les seves entranyes químiques per tota la galàxia. Després de 9 mil milions d'anys d'aquest enriquiment, en una part qualsevol de l'univers (els voltants del supercúmulo de la Verge), en una galàxia qualsevol (la Via Làctia), en una regió qualsevol (el Braç d'Orió), va néixer una estrella qualsevol (el Sol).

El núvol de gas a partir del qual es va formar el Sol contenia una provisió suficient d'elements pesants per fusionar i generar un complex inventari d'objectes en òrbita que inclou diversos planetes rocosos i gasosos, centenars de milers d'asteroides i milers de milions de cometes. Durant els primers centenars de milions d'anys, grans quantitats de residus en òrbites incontrolables es van fusionar amb cossos més grans. Això es va produir en forma d'impactes a gran velocitat i d'elevada energia, cosa que va fer fondre la superfície dels planetes rocosos, implicant la formació de molècules complexes.

A mesura que es va anar reduint la quantitat de matèria fusible en el sistema solar, les superfícies dels planetes es van començar a refredar. El que anomenem Terra es va formar en una zona d'habitabilitat estel·lar al voltant del Sol, on els oceans es mantenen en gran mesura en forma líquida. Si la Terra hagués estat més a prop del Sol, els oceans s'haurien evaporat. Si la Terra hagués estat més lluny, els oceans s'haurien congelat. En qualsevol dels dos casos, la vida tal com la coneixem no hauria evolucionat.

Dins dels oceans líquids químicament rics, mitjançant un mecanisme que encara es desconeix, les molècules orgàniques es van convertir en formes de vida autoreproductives. En aquesta sopa primigènia predominaven els bacteris anaerobis simples: un tipus de vida que es desenvolupa en entorns buits d'oxigen però que, com a conseqüència, excreta oxigen químicament potent. Aquests organismes primitius unicel·lulars van transformar involuntàriament l'atmosfera rica en diòxid de carboni de la Terra en una atmosfera amb suficient oxigen per permetre que els organismes aeròbics apareguessin i dominessin els oceans i la terra. Aquests mateixos àtoms d'oxigen, que normalment es troben en parelles (O_2), també es van combinar en trios per formar l'ozó (O_3) a l'atmosfera superior, la qual fa d'escut per protegir la superfície de la Terra de la majoria de fotons ultraviolats del Sol, que danyen les molècules.

Devem l'extraordinària diversitat de vida a la Terra, i suposem que en altres parts de l'univers, a l'abundància còsmica de carboni i a la increïble quantitat de molècules simples i complexes que en contenen. D'això no n'hi ha dubte: existeixen més varietats de molècules basades en el carboni que tots els altres tipus de molècules combinades.

Però la vida és fràgil. Les topades ocasionals de la Terra amb cometes i asteroides grans i imprevisibles, que abans era un fet habitual, causaven estralls de manera intermitent al nostre ecosistema. Fa tan sols 65 milions d'anys (menys del dos per cent del passat de la Terra), un asteroide de 10 bilions de tones va col·lidir contra l'actual península de Yucatán i va eliminar el setanta per cent de la flora i la fauna de la Terra, incloent-hi els famosos i enormes dinosaures. Una autèntica extinció. Aquesta catàstrofe ecològica va permetre als nostres avantpassats mamífers ocupar els llocs que acabaven de quedar vacants, en comptes de continuar sent els entremesos per als *T. rex*. Una branca d'aquests mamífers amb el cervell gran, el que anomenem primats, va evolucionar en un gènere i una espècie (*Homo sapiens*) amb suficient intel·ligència per inventar mètodes i eines científics —i per deduir l'origen i l'evolució de l'univers.

Què va passar abans de tot això? Què va passar abans del començament?

Els astrofísics no en tenim ni idea. O, més ben dit, les nostres idees més creatives tenen molt poca o gens de base en la ciència experimental. Com a resposta, hi ha persones religioses que afirmen, amb un punt de rectitud moral, que *alguna cosa* ho va haver de començar tot: una força superior a totes les altres, una font de la qual va sorgir tot. Un motor primari. En la ment d'aquestes persones, *aquesta cosa*, per descomptat, és Déu.

Però i si l'univers ja hi ha estat sempre, en un estat o condició que encara no hem sabut identificar —un multivers, per exemple, que contínuament crea universos? I si l'univers simplement va aparèixer del no-res? I si tot el que coneixem i apreciem fos només una simulació per ordinador creada per una espècie extraterrestre superintelligent?

Aquestes idees filosòficament tan divertides normalment no satisfan ningú. Tanmateix, ens recorden que la ignorància és l'estat natural de la ment per a un científic investigador. La gent que creu que no ignora res no ha buscat ni ha topat amb el límit entre el que és conegut i el que és desconegut en l'univers.

El que sabem, i el que podem afirmar sense dubtar, és que l'univers va tenir un principi. Que l'univers continua evolucionant. I sí, cadascun dels

àtoms del nostre cos és atribuïble al big bang i als forns termonuclears de l'interior de les estrelles de gran massa que van explotar fa més de cinc mil milions d'anys.

Som pols d'estrelles a la qual se li va donar vida, i a la qual després l'univers va donar el poder per desxifrar-se a si mateix. I tot just acabem de començar.