Ekaia, 2023, 44, 153-199
https://doi.org/10.1387/ekaia.23754

ekaia
ZIENTZIA eta TEKNOLOGIA ALDIZKARIA

ISSN 0214-9001 – eISSN 2444-3255

Geologia 1-Fisika 1: duela 65 milioi urte Lurraren aurkako meteorito baten inpaktuaren afera

Geology 1, Physics 1: The affair of the impact of a meteorite against the Earth 65 million years ago

*Fernando Plazaola**

Elektrizitate eta Elektronika Saila, Zientzia eta Teknologia Fakultatea ZTF/FCT (UPV/EHU)

LABURPENA: Artikulu hau «Geologia 1-Fisika 0» artikuluaren jarraipena da, non XX. mendeko, eta bereziki mendearen lehen erdiko fisikaren nagusitasuna, ez zela arlo guztietara heldu erakutsi zen. Izan ere, Lurraren adinaren ezagutzan Geologiak gol galanta sartu zion Fisikari. Bigarren artikulu honetan, berriz, azalduko dut, XX. mendearen laugarren laurdenean, Fisikaren arrakasta hain handia ez zenean Fisikak partidua berdintzea lortu zuela, 1968ko Fisikako Nobel Saria jaso zuen *Luis Walter Alvarez*en eskutik bereziki. Hein handi batean bera izan baitzen Lurrak meteorito baten inpaktua duela 65 milioi urte jaso zuela proposatu zuena. Azken iraungipen/suntsipen masiboak adin hori du eta adin hori erabiltzen da Kretazeoaren eta Paleogenoaren arteko muga ezartzeko. Hipotesi hori azken suntsipen masiboaren kausa bezala 1980. urtean *Science* aldizkarian argitaratu ostean komunitate zientifikoan sortu zuen zirraraz, egonezinaz eta diziplina arteko eztabaida zientifiko aberatsaz arituko da artikulua. Artikuluak bide emango digu, baita ere, ikerketa zientifikoaren munduan maiz gertatzen den «migrantearen efektua» deitu dudana azaleratzeko, arazoei aurre egiteko bide desberdinak erakusteko, kuriositate zabaleko pertsonen garrantzia, komunitate zientifiko desberdinetan, eta baita bakoitzean ere, gerta daitezkeen jeloskeriak, parekideen berrikuspena prozesuan gerta daitezkeen «subjektibotasunak» eta, halaber, ikerketa arloaren adituen ezinegona eta erreakzioak hipotesi iraultzaile baten aurrean, hipotesia eremutik kanpoko zientzialariek egina bada.

HITZ GAKOAK: suntsipen masiboa, dinosauroen suntsipena, K/Pg muga, Luis Walter Alvarez, bolidoen inpaktua Lurraren aurka.

ABSTRACT: *This article is a continuation of the article «Geologia 1-Fisika 0», where I showed that the mastery of physics in the 20th century, and especially in the first half of the century, did not reach all areas, and in the knowledge of the age of the Earth Geology scored a great goal against physics. In this second article I will explain that in the fourth quarter of the 20th century, when the success of physics was not so great, physics tied the game, especially at the hands of the winner of the 1968 Nobel Prize in Physics,* Luis Walter Alvarez. *It was largely he who proposed the theory of the impact of a meteorite on Earth about 65 million years ago. The last mass extinction occurred 65 million years ago and is used to establish the boundary between the Cretaceous and the Paleogene. This article deals with the excitement, unrest, and rich interdisciplinary scientific debate that aroused in the scientific community after the publication in 1980 in the journal Science of the aforementioned hypothesis as the cause of the last mass extinction. The article will also allow us to highlight what I call the «migrant effect» that often occurs in the world of scientific research, show the different ways of dealing with problems, the importance of people with wide curiosity, the different jealousies that can occur in different scientific communities, the «subjectivities» that may occur in the peer review process, as well as the uneasiness and reactions of experts in the field of research to a revolutionary hypothesis, if it is made by scientists outside the field.*

KEYWORDS: mass extinction, dinosaurs' extinction, K/Pg limit, Luis Walter Alvarez, impact of fireballs against the Earth.

**** Harremanetan jartzeko / Corresponding author:*** Fernando Plazaola. Elektrizitatea eta Elektronika Saila. Zientzia eta Teknologia Fakultatea (UPV/EHU). – fernando.plazaola@ehu.eus – https://orcid.org/0000-0002-0081-8131

Nola aipatu / How to cite: Plazaola, Fernando (2023). «Geologia 1-Fisika 1: duela 65 milioi urte Lurraren aurkako meteorito baten inpaktuaren afera». *Ekaia*, 44, 2023, 153-199. (https://doi.org/10.1387/ekaia.23754).

Jasotze-data: 2022, uztailak 11; Onartze-data: 2023, martxoak 28.

ISSN 0214-9001 - eISSN 2444-3255 / © 2023 UPV/EHU

Lan hau *Creative Commons Aitortu-EzKomertziala-LanEratorririkGabe 4.0 Nazioartekoa* lizentzia baten mende dago

1. **SARRERA**

«Geologia 1-Fisika 0» artikuluan, XX. mendean eta, bereziki, mendearen lehen erdian Fisikaren nagusitasuna ez zela arlo guztietara iritsi erakutsi nuen [1]. Izan ere, Lurraren adinaren atzetik aritu zirenean, Geologiak gol galanta sartu zion Fisikari. Artikulu honetan azalduko dut, XX. mendearen laugarren laurdenean, Fisikaren arrakasta hain handia ez zenean, Fisikak partidua berdintzea lortu zuela.

Aurreko artikuluan fisikari garrantzitsu bat partiduaren «galtzailetzat» jo nuen: *William Thomson* (*Lord Kelvin*), XIX. mende amaierako «*Enfant Terrible*» izendatu nuena [1]. Artikulu honetan beste fisikari bat joko dut partiduaren «irabazletzat», *Luis Walter Alvarez*, hain zuzen ere. Ikerlari horrek, gehienontzat ezezaguna denak, 1968ko Fisikako Nobel Saria jaso zuen. Zenbat eta gehiago irakurri, are eta hari mutur gehiago topatzen ditut *Luis Walter Alvarez*i buruz. *Kepa Altonaga*k, nire adiskide idazleak eta zientzialariak, «Iridioaren mintzoa. Meteoritoa eta dinosauroen akabantza» dibulgazio zientifikoko liburua Pamiela argitaletxean argitaratu berri du [2] eta liburu horren orrietan, *Luis Alvarez*ek ere leku garrantzitsua du.

Luis Alvarez fisikariak eta *Walter Alvarez* bere seme geologoak, eta *Frank Asaro* eta *Helen Michel* kimikariek *Science* aldizkarian 1980. urtean argitaratu zuten artikulu batean dinosauroen suntsipenaren ardura meteorito bati eman zioten. *Science* aldizkariaren argitalpen horrek sortu zuen zirraraz, egonezinaz eta diziplina arteko eztabaida zientifiko aberatsaz arituko da artikulua.

Benetako istorioa ondo jarraitu ahal izateko lehen bi ataletan (1 eta 2), sartu-atera labur bat egingo zaio Geologiaren eta Paleontologiaren historiari eta bertan, 1980 arte nagusiak ziren ereduak azalduko dira.

Aurkikuntza bat egiten denean, ahaztu egiten gara horraino heltzeko igaro behar izan den bide malkartsuaz, sortu diren kezkez, zalantzez… Nire uste apalean, aurkikuntza berak baino irakaspen handiagoa bideak eman diezaguke. Bereziki, hemen hizpide izango dugun dinosauroen suntsipenaren adibidea oso adierazgarria da; hipotesia proposatu ostean beste 10 urte pasatu baitziren proposaturiko hipotesiak oin sendoak zituela ziurtatu arte. Tartean fisikarien eta geologo/paleontologoen arteko borroka zientifiko eta ez-zientifiko itzela dago. Hainbat arlotatik kritika zorrotzak egin zitzaizkion proposamen ausart horri, baina *Chixulub* kraterra topatu zenean gehienak isildu ziren.

Artikuluaren mamiarekin hasi aurretik, kontestuan jarriko dut lehenik irakurlea, historia irakurtzeko geologiak duen garrantzia argi gera dadin.

1.1. XX. mendera arteko Lurraren garapenari/eboluzioari buruzko ezagutza

«Geologia 1-Fisika 0» artikuluan Lurraren adinari buruz aritu ginen, azpimarratuz zein berandu jakin genuen zein den Lurraren adina, eta ezagutza hori geologoei esker lortu genuela [1]. Hori jakin eta gero, hainbat galdera datoz burura:

— Lur planeta, orain ezagutzen dugun modukoa izan ote da beti?
— Ez bada beti horrelakoa izan, Lurrak nola eboluzionatu du? Apurka-apurka ala bat-batean, gertaera katastrofikoen bidez?

Artikulu honek bide emango digu ikerketa zientifikoaren munduan maiz gertatzen den «migrantearen efektua» deitu dudana azaleratzeko, arazoei aurre egiteko bide desberdinak, kuriositate zabaleko pertsonen garrantzia, komunitate zientifiko desberdinetan, eta bakoitzean ere gerta daitezkeen jeloskeriak…

1.2. Charles Lyell. Uniformitarismoa

William Smith (1769-1839) bezalako ikertzaileen lan aitzindariari esker (ikus 1. irudia), 1800. urte hasierako geologoak gai izan ziren *arroka-formazioak* Lurraren historiaren erregistro kolosal bakar batean antolatzeko. Geologo askok epika itzela ikusi zuten erregistro horretan. Haien arabera, mendiak une katastrofikoetan eraiki ziren, eta prozesuan animalia talde osoak desagertu ziren, eta espezie berriek ordeztu zituzten. Landare tropikal erraldoiek, adibidez, Karbonifero Aroan beren fosilak Europa iparraldean utzi zituzten, eta ez ziren berriro agertu lurralde horretan.

1. irudia. *William Smith* (1769-1839) ingeniari britaniarra.

Kronologia biblikoek ematen zuten 6.000 urte inguruko Lurraren adina onartuz [1] Lur planeta sortu zenetik Lurraren azaleraren aldaketak, gertatuz gero, hondamendiek eragindakoek beharko zutela pentsatzen zen. Beraz, «katastrofismoa» eredutzat zuen pentsamendu-eskola zen nagusi XIX. mende hasieran.

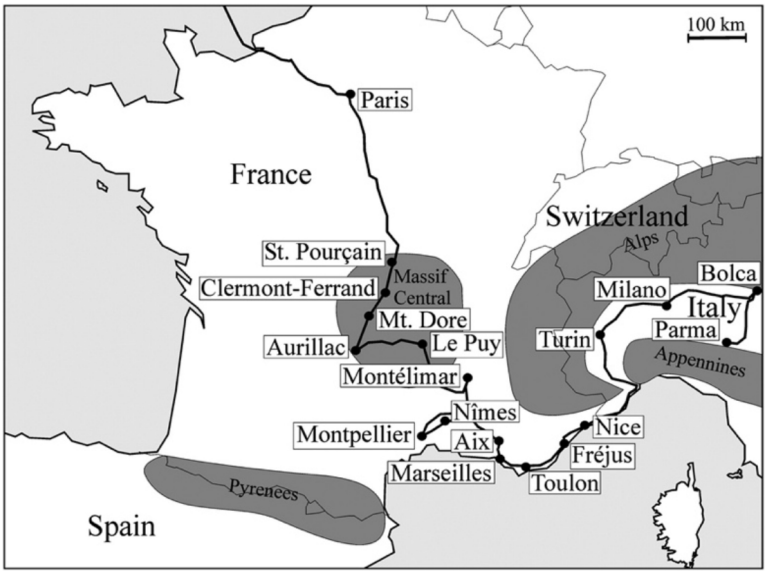
Hala ere, dagoeneko 1830. urtean, *Charles Lyell*ek (1797-1875), geologo bilakatutako abokatu britainiarrak, «katastrofismoa» oinarritzat zuen pentsamendu-eskolari eraso zion. *Lyell*ek *William Buckland* (1784-1856) katastrofistarekin hasi zituen ikasketak Oxforden. Baina *Lyell Buckland*ekin nahigabetu egin zen katastrofismoa Bibliarekin lotzen saiatu zenean, hondamendi berriena *Noe*ren uholdea izan zenaren bila jarri zenean, hain zuzen.

*Lyell*ek Geologia benetako zientzia propioa bihurtzeko modu bat aurkitu nahi zuen, behaketan oinarritua eta ez espekulazio basatietan edo naturaz gaindiko gertakizunetan.

Inspirazio bila, *Lyell*ek *James Hutton* (1726-1797) izeneko nekazari eskoziar baten ideietara jo zuen (nahiz eta nekazaria izan eta baserrian bizi, gaztetan Kimika eta Medikuntza ikasi zituen), ordurako 50 urte zaharrak ziren ideietara hain zuzen. 1790eko hamarkadan, *Hutton*ek argudiatu zuen Lurra ez zela eraldatu imajinatu ezinezko hondamendiengatik; alderantziz, aldaketa geldoak zirela eraldaketaren oinarri, horietako asko gaur egun gure inguruan ikus ditzakegunak. Euriak mendiak higatzen ditu eta ibaiek arroka puskak garraiatzen dituzte itsasoraino (Lurraren indar suntsitzaileak). Hor joaten dira metatuz eta, pixkanaka-pixkanaka, geruzak bata bestearen gainean jartzen dira. Lurraren barneko beroagatik metaketa trinkotu egiten da eta, zenbaitetan, zati bat urtzeraino hel daiteke. Beroak sortutako hedapena dela-eta arrokak deformatu eta itsasoaren mailaren gainera altxa daitezke (Lurraren indar eraikitzaileak). Prozesu horrek denbora luzea behar du eta «zirkularra» da (arroken zikloa). Aldaketa horiek txikiak dira, baina denbora nahikoarekin aldaketa handiak sor litezke. *Hutton*ek, beraz, Lurra oso antzinako mugimendu/higidura makina bat zela argudiatu zuen (betiereko moduko makina bat), gizateriarentzat egokia egiten zuten suntsiketa eta berreraikitze ziklo erregularretatik pasatzen zena. Ohart zaitezkeenez, irakurle, *Hutton*ek erabat mozten zuen «katastrofismoarekin», eta halaber, Bibliaren kronologietan oinarritutako Lurraren adinaren proposamenekin.

*Lyell*ek soineko bata etxean utzi, mailua hartu eta geologiako mugarri izaten hasi zen. Europan zehar bidaiatu zuen ezaugarri ezberdinak behatzen eta geruzaz geruzako aldaketen (aldaketa gradualen) ebidentziak bilatzen landako lanean (ikus 2. irudia). Izan ere, gaur egun gertatzen diren aldaketa gradualak, Lurrazalaren ezaugarriak azaltzeko giltza ziren. Itsas mailaren igoera eta jaitsiera askoren ebidentziak topatu zituen eta baita antzinako

bolkanak aztertu eta gaur eguneko bolkan aktiboen arroka bolkanikoen ezaugarriak ere. Lurrikarak, bolkanen erupzioak eta halako katastrofeak beharrezkoak direla mendikateak sortzeko ondorioztatu zuen. Haranak, hala ere, ez ziren uholde erraldoien ondorioak izan, haizearen eta uraren ehotze indar geldoarenak baizik.



2. irudia. *Charles Lyell* geologo bihurtutako abokatu britaniarrak Europan zehar egindako bidea geruzaz geruzako aldaketen (aldaketa gradualen) ebidentziak bilatzen.

*Lyell*en geologiaren bertsioa «uniformitarismoa» bezala ezagutua izatera iritsi zen, Lurra aldatzen duten prozesu geologikoak denboran zehar uniformeak direla behin eta berriz errepikatzen tematu zelako. Lurraren historia baldintzatu duten mekanismoek gaur egun ikusgai ditugunak dira, —lurrikarak eta erupzioak barne, baina ez dira derrigerrozkoak mendikateak azaltzeko. Izan ere, uniformitarismoaren arabera, esaldian zati garrantzitsuena gizaki-eskalarena da— ez-ohiko fenomenoek ez dute parte hartu beharrik. *Hutton*ek bezala, *Lyell*ek Lurraren historia zabal eta norabiderik gabea ikusi zuen.

*Lyell*ek lente boteretsu bat sortu zuen Lurraren historia ikusteko; adibidez, *Darwin*ek *Beagle* ontzian egin zuen bidaian Kanariar Uharteetako historia deszifratu ahal izan zuen, bertan aurkitu zuen harri bolkanikoari *Lyell*en ideiak aplikatuz. Gaur egun, satelite bidezko neurketek agerian uzten dute mendiak *hazbete* bat igo daitezkeela urtean, eta erloju erradioakti-

boek, berriz, milioika urtez modu horretan nola handitzen aritu diren erakusten laguntzen dute. Baina *Lyell*ek ezin izan zuen azaldu berak aipatzen zituen aldaketa geologikoen baitan zegoen mekanismoa edo sorburua: plaka-tektonika.

Gaurko geologoek badakite, ordea, iraganean Lurra aldatu zuten faktoreetako batzuk ezin direla gaur egun gertatu. Adibidez, Lur primitiboa planeta/gorputz zati erraldoiek jo zuten, batzuk Marte bezain handiak. Lurraren historiako lehen bat edo bi mila milioi urteetan, plaka-tektonika gaur egun ezagutzen dugun bezala ere ez zen existitzen.

*Lyell*ek ere eragin sakona izan zuen biziaren historia ulertzeko orduan. *Darwin*engan hain eragin sakona izan zuen, *Darwin*ek eboluzioa «uniformitarismo biologiko» moduko bat bezala irudikatu baitzuen. Eboluzioa belaunaldi batetik hurrengora gertatu zen geure begien aurrean, argudiatu zuen, baina mantsoegi funtzionatu zuen hauteman ahal izateko [3].

1.3. **Alfred Wegener. Plaka-tektonika**

XVI. mendean *Abraham Ortelius*ek, kartografo eta geografo flandestarrak, lehen atlas modernoa gauzatu zuen: «Theatrum Orbis Terrarum». Aipaturiko atlasa egiten ari zenean ohartu zen Amerikako eta Europa/Afrikako itsasertzen geometriek puzzle bateko piezen antzera bat egiten dutela. Hori dela eta, lurrikaren eta uholdeen eraginez kontinenteak pixkanaka-pixkanaka urrunduz joan direla proposatu zuen. Baina ia 4 mende pasa ziren *Alfred Wegener* (1880-1930) zientzialari alemanak «kontinenteen jitoari» buruzko hipotesi sendo bat plazaratu zuen arte (ikus 3. irudia). *Wegener*-ek 1904. urtean Berlineko Unibertsitatean doktorego-tesia Astronomian aurkeztu zuen, baina bere interesak ez ziren horretara mugatu, geofisika, meteorologia eta klimatologia oso gogoko baitzituen. Ohart gaitezen orduko hainbat zientzialariren ezagutza grina edo kuriositatea oso zabala zela, eta espezializazioa, berriz, ez zela gaurkoa bezalakoa. Marburg Unibertsitateko liburutegian argitalpenak arakatzen zegoelarik oso interesgarria iruditu zitzaion artikulu bat topatu zuen. Bertan zerrendatzen ziren Atlantiko itsasoaren bi aldeetako landareen eta animalien fosilak (gogoratu tesia Astronomian egin zuela). Zirudienez, landareen fosilek oso ondo egiten zuten bat bi aldeetan. «Ideia zentzuduna izatearen konbikzioa nire buruan sustraitu zen» idatzi zuen beranduago.

1912ko urtarrilaren 12an, Frankfurten, «German Geological Society» erakundean aurkeztu zuen lehen aldiz «kontinenteen jito» delakoaren hipotesia. Aurreko teoria geologiko onartuenek zioten kontinenteak aurreko denbora batean lurrezko zubiz konektatuta zeudela, garai berrian itsaso azpian murgilduta edo hilobiratuta zeudenak. Beraz, *Wegener*ek proposaturiko hipotesia erabat aurkakoa zen. *Wegener*en hipotesiak zioen antzina kontinenteek Lur-masa bakarra osatzen zutela eta apurka-apurka banatu eta

urrundu zirela, bai Lurraren biraketak eragindako indar zentrifugoaren kausaz, eta baita prezesio astronomiko baten kausaz ere. Hurrengo urteetan gogor aritu zen hipotesia frogatu asmoz, kontinente desberdinetako antzeko organismo fosilen adibideak topatzen. 1915erako, zientzia diziplina desberdinetatik ebidentzia anitz lortuak zituen «The Origin of Continents and Oceans» teoriaren alde [4]. Azkeneko edizioa 1930ean argitaratu zuen.

3. irudia. *Alfred Wegener* (1880-1930) kontinenteen jitoaren hipotesia plazaratu zuen zientzialaria. Artikulu honetako lehen «migrantea».

*Wegener*en hipotesia ez zen oso ondo hartua izan; beharbada zuzenagoa da esatea era oso eszeptikoan hartua izan zela. Geologoek bereziki ez zuten batere ondo ikusi, beren «ikerketa-eremutik kanpoko» ikerlari batek ideia iraultzaileak proposatzea (artikulu honetan lehen aldiz agertzen den hasieran aipatu dudan «migrantearen efektua», *Wegener* ez baitzen ikerketa-eremukoa). Aurkakotasunaren maila noraino heldu zen ohart zaitezen, irakurle, adibide bat: *Wegener*en lana ingelesera itzuli bezain pronto, «The American Association of Petroleum Geologists» erakundekoek *Wegener*en lana horrenbeste desatsegin zuten, ezen berehala sinposio bat antolatu baitzuten «kontinenteen jito» teoriaren aurka egiteko. Aurkarien artean *Franz Kossmat* geologoa zegoen; hark zioen lurrazal ozeanikoa gogorregia zela kontinenteek «besterik gabe bidea irekitzeko». Chicagoko Unibertsitateko *R.T. Chamberlin* bereziki gogorra izan zen: «*Wegener*en hipotesia … gure globoarekin askatasun handiegia hartzen duen teoria sinpleen tankerakoa da, eta horregatik aurkako teoria gehienak baino gutxiago dago murrizketen mende edo egitate itsusi eta deserosoen mende».

Wegener-ek ez zuenez benetako mekanismo sendo eta konbentzigarririk «kontinenteen jitoa» azaltzeko, teoriak ez zuen zabalkunde askorik lortu. Hala ere, teoriak jarraitzaile garrantzitsu bi lortu zituen: lehena,

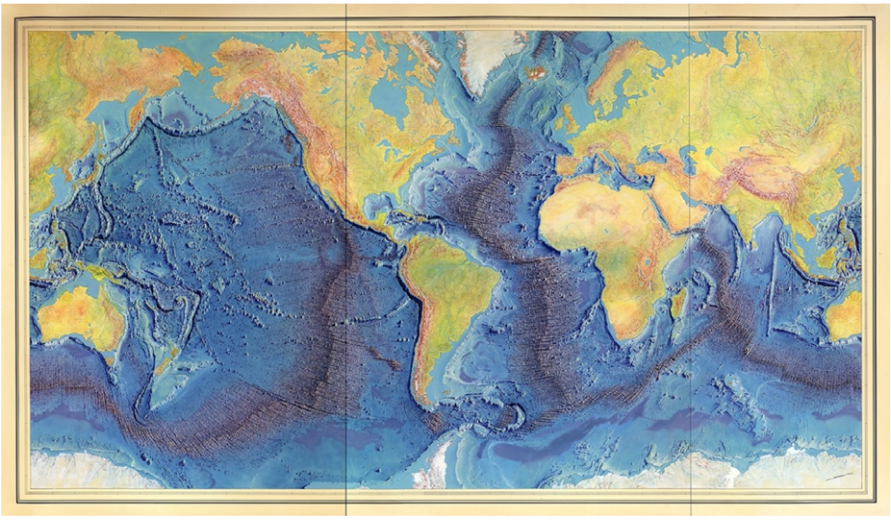
«Geologia 1-Fisika 0» artikuluaren izarretako bat, *Arthur Holmes* (1890-1965) geologo britaniarra hain zuzen ere [1], eta bigarrena, *Alexander Du Toit* (1878-1948) Hego Afrikako geologoa. 1950eko hamarkadan ozeanoaren zola erabiliz lurrazalaren esplorazio anitz egin ziren, eta teoriarekin bat egiten zuten hainbat froga lortu ziren. Izan ere, *Marie Tharp* (1920-2006) geologo eta ozeano-kartografo estatubatuarrak (ikus 4. irudia), *Bruce Heezen* geologo estatubatuarraren laguntzarekin, ozeano zolaren mapa egin zuen eta lan horrek egiaztatu zuen «kontinenteen jitoa» gertatzen dela. Lan horrek Atlantikoko gandor erdiozeanikoa deskribatu zuen eta horrek «kontinenteen jitoaren» ulermen zientifikoa irauli zuen plaka tektonikoen teoriaren onarpena bultzatuz.

4. irudia. *Marie Tharp* geologo eta ozeano-kartografo kementsua (1920-2006).

Garapen horrek emakume zientzialarien egoerari buruz hainbat hausnarketa egiteko bidea ematen du. Izan ere, *Tharp* eta *Heezen* zientzialarien arteko hemezortzi urteetako lankidetzan, *Heezen*ek datuak bildu zituen *Vema* izeneko esplorazio-itsasontzian, eta *Tharp*ek mapak eraiki zituen jasotako datu hauetatik abiatuta. Garai hartan emakumeak debekatuta zuten itsasontzietan lan egitea.

*Marie Tharp*en ikerketa-karreraren hasieran itsasontzietara igotzea eta bertatik datuak biltzea galarazita zuen, baina 1965ean, bere kemenari esker, datuak bildu zituen espedizioarekin bat egitea lortu zuen. *Tharp*ek,

modu independentean, «Woods Hole» erakunde ozeanografikoaren *Atlantis* esplorazio-itsasontzitik jasotako datuak eta itsaspeko lurrikaren datu sismografikoak erabili zituen. *Heezen*ekin egindako lana, ozeano-zola osoaren mapa bat egiteko lehen saiakera sistematikoa izan zen. *Tharp*ek eta *Heezen*ek Ipar Atlantikoko lehen mapa fisiografikoa argitaratu zuten 1957an. *Heinrich Berann* austriar margolari paisajistarekin elkarlanean, ozeano-zola guztiaren mapa argitaratu zuten 1977an (ikus 5. irudia); *Heezen* hil zen urtean hain zuzen. Denbora batez *Heezen* Lurraren hedapenaren hipotesiaren alde egon zen arren, *Tharp*en zuzendaritzapean, «plaka tektonikoen» eta «kontinenteen jitoa» teoria alternatiboetara aldatu zen.



5. irudia. *Heinrich Berann*-en ozeanoaren erdiko gandorren marrazkia (1977) *Marie Tharp* eta *Bruce Heezen*-en profil zientifikoetan oinarrituta.

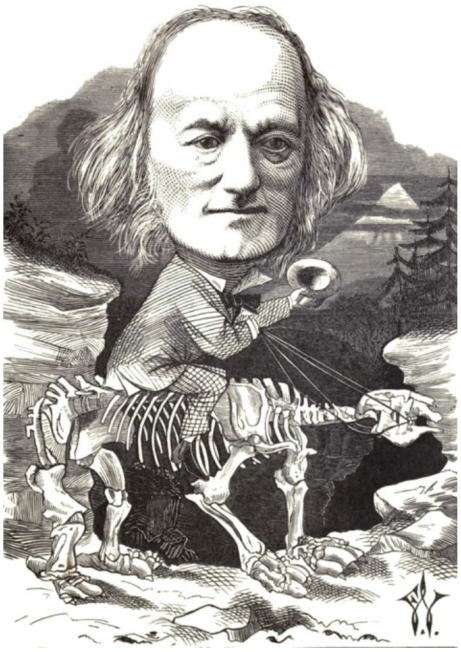
Esplorazio horiek erakutsi zuten, lurrazal-plakak higitu egiten direla eta ozeanoaren erdiko gandorretan hedatu edo lurrazaleko plaketan barrena subdukzioa jasaten dutela. 1960ko hamarkadaren azken alderako «plaka tektonikoen» teoriari buruzko kontsentsu zientifikoa zegoen geologoen artean [4].

1.4. **Dinosauroen suntsipena**

1842rako, hainbat dinosauro-genero deskribatu ziren, horien artean «Megalosaurus», «Iguanadon» eta «Hylaeosaurus», eta urte hartan, *Richard Owen*ek (1804-1892) «Dinosauria» terminoa asmatu eta ordena bereizgarri gisa aurkeztu zuen [5].

1830 eta 1855 artean, biziaren progresioak historian duen garrantziari buruzko eztabaida aktiboa egon zen. XVIII. mendean *Buffon* kondeak (1707-1788) eta *Jean Baptiste Lamarck*ek (1744-1829) zuten ikuspegian oinarrituta, ikuspegietako bat zen biziak denboran zehar era sinpleetatik, gero eta era konplexuagoetara progresatzen duela.

Richard Owen (ikus 6. irudia) ideia xume horren aurka agertu zen, eta argudiatu zuen fosil-erregistroak degenerazioa erakusten zuela, eta ez progresioa. Horren lekuko, izendatu berria zuen «Dinosauria» ordena jarri zuen; animalia bezala deskribatu zuen dinosauroa, hots, «beren egituretan ia Mammaliara hurbiltzen direnak», eta «lurreko bizimodura egindako egokitzapenetik abiatuta, zirkulazio-zentro hain antolatu bat gozatu dutela ondoriozta daiteke, eta odol epeleko ornodunen ezaugarria duen horretara gerturatzen da». *Owen*ek «ugaztunen antzekoak» terminoa erabiliz deskribatu zituen dinosauroak, *Lamarck*en eta beste batzuen doktrina progresisten aurkako ebidentzia zuzena bezala. Lehen narrasti horiek guztien artean aurreratuenak zirela argudiatzen zuen, eta populazioak beste animalia aurreratuagoak bilakatu beharrean, gaur egungo maila atzeratuagokoak bere ustez diren krokodilo, musker, suge eta dortoketara degeneratu zirela, *Lamarck*ek eta beste «jakintsuek» argudiatzen zutenaren aurka.



6. irudia. *Richard Owen* (1804-1892) zientzialariaren karikatura Megatherium darwini bere «hobbya zamalkatzen» *Frederick Waddy*-k 1873an egina.

Halaber, *Owen*ek argudiatu zuen dinosauroak bizi izan ziren denboran oxigeno aldetik eskasa zela airea, eta hori komeni zitzaiela. Narrastien moduan, hegaztiek eta ugaztunek baino tasa metaboliko baxuagoak zituzten, eta energia gutxiagorekin biziraun zezaketen. Garai mesozoikoan, berriz, oxigeno mailak handitu zirela argudiatu zuen, atmosfera «indartsuago» bihurtuz. Beraz, mundua bizigaitz bihurtu zen saurio erraldoientzat, eta desagertu egin ziren, itsas narrasti erraldoiekin eta pterosauro hegalariekin batera.

Hala ere, aipatu beharra dago progresistek eta biziaren historiarako degenerazio-ereduen aldekoek, ez zutela dinosauroen iraungipena gai partikulartzat hartu, oso ezagutza gutxi baitzegoen.

Beranduago, 1859an hautespen naturalaren bidezko eboluzioaren teoria *darwind*arraren etorrerak eta ondoren *Haeckel*, *Huxley*, *Cope*, *Marsh* eta beste batzuek egindako fosil-erregistroen filogenia-ikerketek ez zuten masa-suntsipenen benetako eztabaidara eraman, ezta dinosauroen desagerpenera ere. Masa-suntsipenen fenomenoak azalpen bat merezi zuenik ere ez zuten ikusten. Izan ere, *Darwin*ek (1859) Kretazeoaren amaieran amoniteen desagerpen azkarra, bai fosil-erregistroaren hutsuneei, zein benetako edozein fenomenori egotzi zion. *Marsh*ek (1831-1899) 1895ean Dinosauro ordenaren 68 genero zerrendatu zituen [6], baina ez zuen haien suntsipena inola ere aipatu.

XIX. mendeko bigarren erdiko eta XX mendeko lehen hamarkadetako paleontologia orokorreko eta ornodunen paleontologiako testu-liburu estandarrek kasik ez dute aipatzen dinosauroen suntsipena. 1950eko eta 1960ko hamarkadetan ere, ornodunen paleontologiaren hainbat autorek dinosauroen iraungipena ia alde batera uzten jarraitzen zuten (adibidez, *von Huene*, 1956; *Orlov*, 1964; *A.H. Müller*, 1968 autoreen tratatuak) [7].

Hala ere, XX. mendearen hasieran autore gutxi batzuek dinosauroen suntsipena ikerketa-gai bezala hartzen hasi ziren. Lehena, *Arthur Smith Woodward* (1864-1944) izan zen, 1910. urtean dinosauroak arraza-senilitatearen ondorioz desagertu zirela adierazi zuen. *Audova*k 1929an Alemaniako «Palaeobiologica» aldizkarian dinosauroen suntsipenaren auzia xehetasun apur batekin berrikusi zuen. Arrazaren senilitatea eta hautespen natural soila baztertu zituen azalpen gisa, eta ingurumen-aldaketan zentratu zen. *Jepsen*ek 40 hipotesi bereizi zerrendatu zituen 1964an, eta 1990ean *Benton*ek [7] *Chixulub* kraterra topatu aurreko historian barrena agertu diren dinosauroen suntsipenaren hipotesi desberdinak azaldu zituen. Aipatu beharra dago, urte berean, 1990ean, meteoritoak jo zuen tokiaren aurkikuntza argitaratu zela.

2. LURRAREN HISTORIAREN KRONOLOGIA ARROKETAN

Gure planetaren historiaren zatirik handiena arroketan idatzita dago. Arrokak dira Lurraren historiaren gakoa, solidoek gogoratzen dutelako, oroimena dutelako. Likidoek eta gasek berriz, historia ahaztu egin ohi dute. Aspaldi galdutako oroitzapen horiek berreskuratzea geologo eta paleontologoen zeregina da, Lurraren historialari izatea aukeratu duten pertsonena hain zuzen.

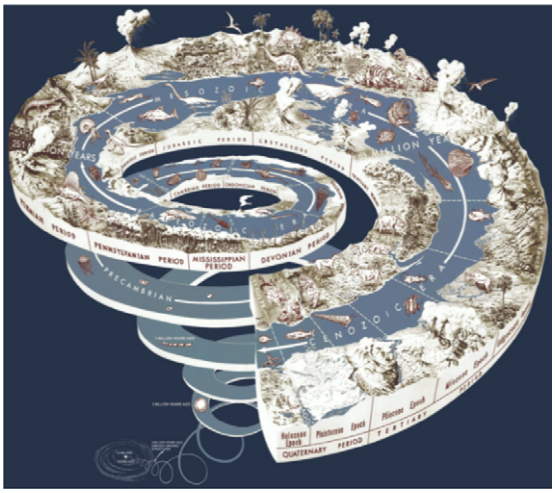
Mundu osoko aztarnategi geologikoek arroketan idatzitako historiaren oinarrizko araua erakusten dute: geruza/estratu berrienak zaharrenen gainean daude. Hau da gainjartzearen legea, estratigrafia osoaren oinarria dena. Arroka geruzatuak bata bestearen segidan metatzen dira sekuentziak osotuz; geruza baten gainean beste geruza bat.

Nola esleitu ditzakegu arroka jakin batzuk Lurraren historiako periodoetara? Adin-sekuentzia gainjartzearen legea erabiliz erraz zehazten da. Izendaturiko periodoak laster agertu ziren Geologia zientzia bezala garatu zenean, eta arroketan aurkitzen diren fosiletan oinarrituta dago, gaur egun ere gertatzen den bezala. Zenbakizko adinak, numerikoak, milioika urtetan zehaztea XX. mendeko lorpena da; ezinezkoa izan zen erradioaktibitatea aurkitu eta datazio erradiometrikoa asmatu zen arte (ikus «Geologia 1-Fisika 0» artikulua [1]).

Oraindik ere muga handiak daude Lurraren historiaren kronologia osoa ezartzeko dugun gaitasunean, zenbakizko adinak eta fosiletatik ondorioztatutako adinak oso arroka mota ezberdinetatik datozelako (ikus 7. irudia). Adin numerikoak ematen dituzten mineral erradioaktibo gehienak tenperatura altuetan sortu ziren, magmak solidotzean, hau da, arroka igneoak kristalizatzean. Fosilak, berriz, ozeanoan edo lurrazalean dauden arroka sedimentarioetan daude, biziarekin bateragarriak diren tenperaturetan metatuak.

Geologoek aurrerapen motelak baino ez dituzte egin arrakala hori gainditzeko eta denbora eskala bat eraikitzeko, fosiletatik izendaturiko periodoen arteko mugetan adin zehatz batzuk jarriz. Hurbilketarik zuzenena bolkan-errautsetan datatu daitezkeen tenperatura altuko mineralak aurkitzean datza; erupzioan zegoen bolkanetik urrun sakabanatu zirenak eta fosilak dituzten arroka sedimentarioetan geruza moduan metatu zirenak. Zeharkako ikuspegi bat, baina oso eraginkorra, hirugarren denbora-eskala bat garatzea izan da, lurreko eremu magnetikoaren inbertsioetan oinarritua [8], arroka igneoetan zein sedimentarioetan erregistratuta geratzen baitira. Paleomagnetismoa funtsezkoa izan zen goian aipatu den 1960ko hamarkadako plaka-tektonikaren iraultzan. Kontinenteak inoiz mugitu ez baziren, XX. mendearen lehen erdian geologo gehienek uste zuten bezala, orduan arroka guztietako iparrorratz fosil guztiek oraindik iparraldea seinalatu beharko lukete; hori horrela ez dela lehen paleomagnetologoek frogatu zuten. Brujula fosilek (hondar magnetizazioa), sarri, beste norabide batzuk adierazten

zituzten kontinenteen errotazioaren ondorioz, arrokak, sortu zirenetik mugitzen ari zirela argi eta garbi adieraziz.



7. irudia. Lurraren historiako gertakari garrantzitsuenen irudikapen artistikoa.

2.1. **Datazio paleontologikoak**

Goian aipaturiko *William Smith* (ikus 1. irudia) portu eta kanaletako ingeniari ingeles bat izan zen, 1800 inguruan arroka sedimentarioetan dikeak induskatu zituena. *Smith* bere langileek aurkitzen zituzten fosil motekin ohitzen hasi zen, eta arroka sedimentarioetan erregistratutako denboraldi/periodo luzeetan fosilak modu jakin batean aldatzen direla onartu zuen. Arroka sedimentarioetan fosilak sekuentzia kronologiko bat irudikatzeko erabil daitezkeela konturatu zen, eta adin bereko harriak eta beren artean distantzia oso handietara egon arren korrelazionatzea posible zela ohartu zen. Ordutik, hori izan da paleontologia estratigrafikoaren oinarria. Ezaguna da arroka sedimentarioetan fosil gisa kontserbatutako animaliak eta landareak aldatu egiten direla arrokan gora egin ahala. Izan ere, fosilen bila, arretaz aztertzen dituen edonork baiezta dezake aldaketa. XIX. mendean zehar, Kretazeo eta Paleogenoa[1] bezalako izenak adin tarte jakin batzuetako arrokei eman zitzaizkien, fosiletako aldaketen sekuentzia pixka-

[1] Nahiz Kretazeo-Tertziario edo K/T iraungipen masiboa erabili ere, begirale baten aholkuz eta Estratigrafiako Nazioarteko Batzordeak «Tertziario» terminoa ez erabiltzeko aholkatzen duenez, K/T gertakaria izendatzeko, **Kretazeo-Paleogeno iraungipen masiboa** edo **K/Pg iraungipena** erabili da (ikus *Gradstein, F*; *Ogg, J*; *Smith, A.»A Geologic Time Scale 2004»*. ISBN 0521781426).

naka aurkituz zihoan heinean. Aldaketa horien arrazoia misterio bat izan zen, *Alfred Russell Wallace* (1823-1913) eta *Charles Darwin* (1809-1882) naturalista ingelesek hautespen naturalaren emaitza gisa azaldu zituzten arte. *Darwin*ek behin eta berriz esaten zuen eboluzio-aldaketa oso graduala dela. Hala ere, *Darwin*en eboluzio-aldaketa gradualak ez du zertan beti bete, bizian noizbehinkako gertaera katastrofikoek (adibidez, artikulu honetan adierazten den meteorito baten inpaktuak eragindako dinosauroen suntsipena) duten efektu ikusgarriak aitortuz.

XIX. mendean, itsas ornogabe fosilduak, bibalbioak, amoniteak eta koralak ziren datazio-tresnarik erabilgarrienak, landan erraz aurkitzen zirelako eta begi hutsez aztertu ahal izateko bezain handiak zirelako. XX. mendean, paleontologoek «mikrofosil» ñimiñoen erabilgarritasuna estimatzen jakin zuten. Mikrofosil horiek ugariak dira eta asko lor daitezke.

Mikrofosil garrantzitsuenak foraminiferoak dira. Itsas organismo unizelular horiek oskola ñimiñoak dituzte, espezie bakoitzarentzat desberdinak eta mikroskopioan doitasunez identifika daitezkeenak. Foraminifero gehienak itsas zolan bizi dira, eta beraz, haien fosilak bertako arroka sedimentarioetan agertuko dira. Hori dela eta, arroka sedimentario jakin batean dauden espezieek itsas zolako giroa islatzen dute batez ere. Baina, planktonaren osagai direnez (zooplanktona) ozeanoko uretan flotatzen dute ere. Foraminifero planktoniko horiek bereziki oso onuragarriak dira arrokak datatzeko, ozeanoko korronteek laster barreiatzen baitituzte munduko ozeano guztietan barrena. Eboluzioaren eraginez agertu berriak diren espezieak berehala erregistratzen dira mundu osoan hiltzen direnean, haien oskolak zolan metatzen dira.

1960ko hamarkadara arte, paleontologoak ez ziren konturatu sakonera ertaineko (kareharri pelagikoak) zola ozeanikoan metatzen diren kareharrietan kontserbatutako erregistro historiko ia jarraituaren balioaz. Olatu sakonenen higaduraren oso azpitik, han jarraitzen dute hamarnaka milioi urtez aldatu gabe. Kareharri pelagiko asko, Kretazeo eta Paleogeno adinekoak, foraminifero planktonikoz beteta daude, beraz, xehetasunez datatu daitezke.

Aurreko zatian kontestuan jarri dut Lurraren historia irakurtzeko geologiak duen garrantzia. Oso lagungarria izango zaigu artikulu osoa jarraitzeko. Beraz, behar-beharrezko zumitza jarri dugu istorioa era erraz batean jarraitu ahal izateko. Orain, kontatu nahi dudan istorioari helduko diogu.

3. **ISTORIOAREN HASIERA**

Kareharri pelagikoen azaleratze zabalak bakanak dira, eta horietako bat, oso ikusgarria, Apeninoen erdialdean dago; bertan oso agerian dago Kretazeoaren eta Paleogenoaren arteko muga. Are gehiago, lupa batekin foraminiferoen desagerpen ia erabatekoa bereiz daiteke. Foraminiferoak ugariak eta hondar aleak bezain handiak dira Kretazeoko goi estratuetan/

geruzetan; Paleogenoko lehen estratuetan, berriz, oso gutxi ageri dira, eta aurkitzen direnak txikiak dira. Ohi denez, Kretazeoaren eta Paleogenoaren arteko mugari K/Pg muga deritzo, eta azaleratze horietan gainera, gutxi gorabehera *1 cm*-ko lodiera duen buztinezko geruza bat dago, *fosilik gabea*. Geruza estu hori foraminiferoz beteriko Kretazeoko kareharrizko azken estratuaren eta Paleogenoko foraminifero gutxi, berri eta txikiak baino ez dituen kareharrizko lehen estratuaren artean kokatuta dago (ikus 8. irudia). K/Pg mugako buztin geruzaren behaketa lehen aldiz 1964. urtean argitaratua izan zen [9]. Hori guztia jakinda, hainbat galdera bururatzen zaizkigu:

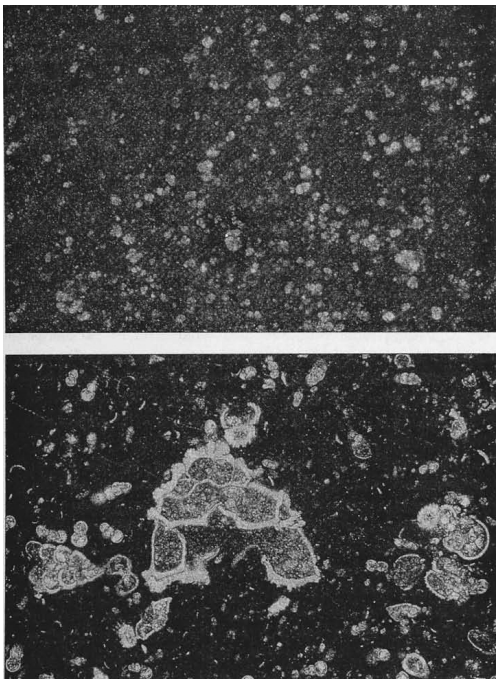
«Zergatik desagertu ziren ia erabat foraminiferoak?»

«Zer gertatu zen halako suntsipena eragiteko?»

«Zergatik buztineko geruzak ez du fosilik?»

«Ba al du buztinak suntsipenarekin zerikusirik?»

«Erantzuna baiezkoa bada, zergatik suntsipena hain bat-batekoa izan zen?»



8. irudia. Foraminifero planktonikoak Gubbion topatutako K/Pg mugaren bi aldetan. Beheko mikrografiak K/Pg muga azpiko Kretazeoko goi estratuetan foraminifero handiak erakusten ditu, 1 mm tamainakoak. Goiko mikrografian berriz, K/Pg muga gaineko Paleogenoaren lehen estratuetan eta eskala berean, foraminiferoak askoz txikiagoak dira. (Iturria [11]).

Erdialdeko *Apenino*en kareharrietan aurkitutako K/Pg muga, suntsipen guztien artean ospetsuena den dinosauroen desagerpenaren adin berekoa da gutxi gorabehera. K/Pg mugan dagoen *1 cm*-ko lodierako buztinezko geruza hain estua izanik, Kretazeoko foraminiferoen desagerpena, bat-batean gertatu zela dirudi, agian, modu katastrofikoan. Alabaina, 1970eko hamarkadaren erdialdean Lurraren historian gertaera katastrofiko batean pentsatzea asaldagarria zen. Garai hartan, ikusia zen teoria gradualista zein baliagarria izan zen Lurraren historiaren erregistroa irakurtzen zuten geologoentzat; «uniformitarismoa/gradualismoa» zen orduko dotrina.

«K/Pg + Buztina» deigarria egiten duen arrazoi bakarra da, haren gainetik eta azpitik dauden geruzetan foraminiferoak erabat ezberdinak direla. Beraz, *1 cm* inguruko buztinezko geruza estu eta txikia, gradualismoarekin gatazkan egon zitekeen, geologian 1970eko hamarkadan zegoen kontzeptu baliagarrienarekin eta preziatuenarekin hain zuzen.

3.1. **Apeninoen Erdialdera, Gubbiora bidaia 1970eko hamarkadaren erdialdean**

Galdera horiek guztiak buruan ditugula, joan gaitezen Erdialdeko Apeninoetara, Gubbiora hain zuzen, bertan abiatzen baita kontatu nahi dudan istorioa. Gubbioko errepidearen alboetan harri arrosa ageri da, italieraz «scaglia rossa» deiturikoa. Zumaiako *flyschean* gertatzen den bezala, geruzatan edo estratutan ageri da arroka. «Scaglia rossa» arroka sedimentarioa da (ikus 9. irudia), itsas zolaren gainean sedimentu-pikorrak metatzean eratua, beranduago altxatu zena, Italiako penintsula azaleratu arte. Metatutako partikulak gehienbat kaltzita mineral aleak dira (kaltzio-karbonatoa edo $CaCO_3$), kareharri izeneko arroka sedimentarioa eratzen dutenak.

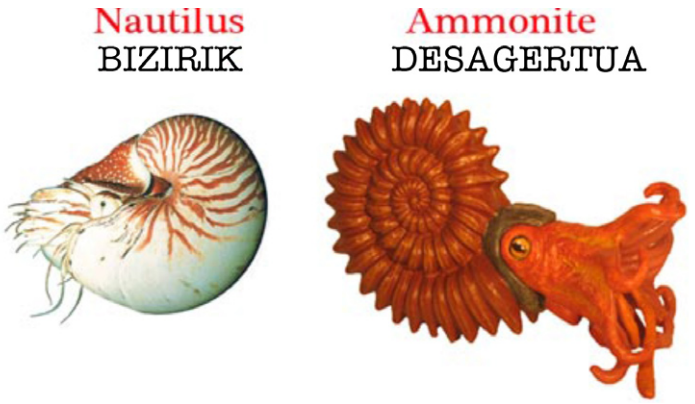
«Scaglia rossa» deituriko kareharrizko azaleramendu horiek 400 metroko lodiera dute, eta horien gainetik eta azpitik beste kolore batzuetako kareharri gehiago daude. Argi dago geruza horietan historia asko dagoela iltzatuta, baina ze historia mota? «Scaglia» puska bat apurtu eta geologoaren eskuko lupa txikiarekin behatuz gero, arroka osoan banatuta mikrofosil txikiz osaturiko orban txikiak aurkituko genituzke. Foraminiferoen oskolak dira, ozeano sakonen azaletik gertu flotatzen ari ziren harrapari unizelularrak, eta ia guztiak (baina ez denak), dinosauroak suntsitu ziren garai berean desagertu ziren. Foraminiferoen presentziak «scagliak» itsasoko kareharria izan behar duela erakusten du. Bestalde, garai hartan itsaso ezsakonetan ugari ziren ornogabeen fosilik ez dagoenez, ur sakoneko kareharri bat dela ere ondoriozta daiteke. Gainera, edozein ibairen bokaletik urrun metatu zen, ia harearik eta lohirik gabe baitago.

9. irudia. Scaglia Rossa.

Agian, pentsatuko duzu urpeko kareharri hori ez dela lur gainean metatutako sedimentu bat bezain interesgarria, baina itsas mailaren gainean dagoen lurra higaduraren domeinu nagusia da, muino eta mendiak lautuz aurretik metatutako sedimentua askatzen edo disolbatzen duena. Higadurak Lurraren historiaren erregistroa desagerrarazten du (askaturiko sedimentuak garraiatuak izaten dira ibaien bidez itsasora eta zikloa berriro hasten da), nolanahi ere, ozeanoen sakoneko hondoan higadura gutxi dago, olatuek ezin dutelako hondora iritsi, korronteak motelak eta leunak direlako. Itsaso sakoneko sedimentuak Lurraren historiaren erregistro ezin hobeak dira, eta Gubbioko kareharria mundu osoko sekuentzia historiko onenetarikoa.

Fosil txikienak, mikrofosilak eta nanofosilak, ugariagoak direnez, zehatzago muga dezakete fosil-erregistroan duten desagertze maila. K/Pg mugan desagertu ziren itsas ornogabe ezagunenak amoniteak dira, egungo nautilusaren ahaideak (ikus 10. irudia). Hasiera batean, K/Pg muga baino lehen desagertu zirela zirudien, baina K/Pg mugan amoniteak suntsitu zirela ondorioztatu zen ostean. Izan ere, *Peter Ward*, Washington Unibertsitateko paleontologoak, Sopelako eta Zumaiako *flyschean* hasiera batean eta gero Hendaian, Bidarten eta Miarritzen topatu zuen lagin-andana

hartu eta aztertu ondoren, K/Pg mugan amoniteak suntsitu zirela ondorioztatu zuen [10, 2]. Zumaiako *flyscha* nazioarte mailan ezaguna izateak, eta ondorioz, dinosauroen suntsipenaren istorioan daukan papera aitortzearen lorpena zenbait pertsonari eskertu behar diogu, baina bereziki EHUko geologoek egindako lan ugariei eta horren inguruan egindako hainbat kongresuren antolatzaileei ([11] erreferentzian azken mende eta erdiko Zumaiari buruzko ikerketaren historia topatuko duzu), ikus halaber, 1 KUTXA eta 11. irudia.



10. irudia. Amonitea K/Pg mugako suntsipen masiboan desagertu zen eta Nautilusa berriz, ez zen desagertu. (Iturria: Everything Dinosaur/Safari Ltd.).

1 KUTXA

Euskal Kostaldeko Geoparkea (Deba, Mutriku eta Zumaian kokatua), Europako eta Munduko Geoparkeen Sarearen parte da 2010etik (ikus 11. irudia). 2015eko azaroan, Geoparkea UNESCOren Munduko Geoparke izendatu zuten, eta izen horrek aparteko balioa duten leku eta paisaia geologikoen garrantzia nabarmentzen du.

UNESCOren Euskal Kostaldeko Geoparkeak, 2019ko maiatzaren 22an «Ohorezko Geoparkezale» saria eman zion Zientzia eta Teknologia Fakultateko (UPV/EHU), Estratigrafia eta Paleontologia saileko Xabier Orue-Etxebarria irakasleari.

Lehen aldiz ematen den aitorpen horrek geoparkeko ondare natural eta kulturalaren ezagutzan ekarpen garrantzitsuak egin dituzten pertsonen lana eskertu eta plazaratu nahi du. Xabier Orue-Etxebarria irakasleak berrogei urtetan zehar egindako ikerketa lanak, dudarik gabe Zumaiako flyscharen ezagutza eta nazioarteko balioa bultzatu du. Azpimarratzekoa da adibidez Itzurun hondartzan 2010ean estratotipoak izendatzeko egin zuen apustua.

11. irudia. Sakoneta, Deba, geoparkeko flysch ikusgarriak agerian uzten duen tokietako bat. UNESCOk izendatutako **Euskal Kostaldeko Geoparkea.**

Walter Alvarez geologoak K/Pg mugako buztinezko geruza txiki hori uniformitarismoaren/gradualismoaren aurka zegoela pentsatzen zuen [12]. *Charles Lyell*, uniformitarismoaren aita, dagoeneko 1830ean konturatu zen Kretazeoko goiko geruzetan dauden fosilak Paleogenoko oinarrietan daudenetatik gehiago bereizten direla, azkenekoak gaur egungo animalietatik baino. Hala ere, bere iritzi gradualistek bultzatuta, *Lyell*ek mugako eten estratigrafikoa Paleogeno osoan zehar igarotakoa baino erregistratu gabeko denbora luzeagoa zela proposatu zuen. 1970eko hamarkadaren erdialdean agerikoa zen interpretazio hori okerra zela.

*Walter Alvarez*ek bi galdera egin zizkion bere buruari:

> «Zer galdera zehatz egin genezake Gubbioko buztin-geruzari buruz?»
>
> «Zer neurketa erabilgarri egin genitzakeen?»

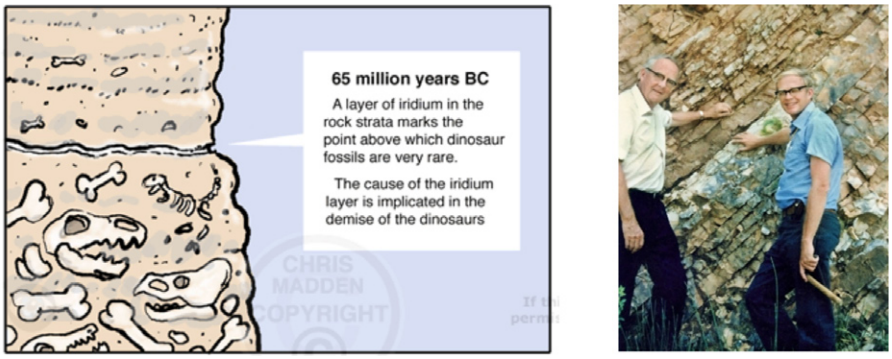
Lehen galdera erantzuteko «buztinezko estratuak metatzeko zenbat denbora behar izan zen» jakitea garrantzitsua litzatekeela pentsatu zuen. Izan ere, buztina oso azkar metatzeak bat-bateko suntsipen-kausa bat iradokiko luke, baina mantso metatzeak, berriz, mekanismo graduala.

Bestalde, adinaren datazio erradiometrikoek (ikus «Geologia 1-Fisika 0» artikulua [1]), ugariak ez ziren arren, K/Pg muga, gutxi gorabehera

oraina baino 65 milioi urte lehenago kokatzen zuten (neurketek ematen zuten zehaztasuna milioi gutxi batzuena zen). Beraz, denbora-tarte labur batean fauna-aldaketa handiak gertatzeak suntsipen masibo bat eragin zuela esan nahiko luke, eta *Lyell*en hipotesi graduala okerra zela.

Paleontologoek hori ezagutzen zuten, baina oraindik milioi gutxi batzuen urtetako tartea zuten eta K/Pg mugako suntsipen masiboa tarte horretan zehar graduala bezala interpreta zezaketen. Hala ere, *Walter Alvarez* eta lankideek paleomagnetismoaren bitartez K/Pg mugako tarteak 0,5 milioi urte ingurukoa izan behar zuela ondorioztatu zuten, eta probabilitate handiz 0,1 milioi urte baino gutxiagokoa.

Horrek guztiak adierazten du denbora eskala geologiko batean, masa-suntsipena bat-batekoa (tarte oso laburrekoa) izan zela. Baina, giza eskala batean ere bat-batekoa izan al zen? Urtebetean edo gutxiagoan metatu zen *1 cm*-ko buztina, ala milurtekotan? Horretarako, derrigorrezkoa zen K/Pg buztinaren sedimentazio-tasa neurtzea (ikus 12. irudia).



12. irudia. Ezkerrean: K/Pg muga adierazten duen marrazkia. Azpian dinosauroen fosilak topatzen dira, goian berriz ez. Eskuman: *Luis Alvarez* eta *Walter Alvarez* aita-semeak, Gubbioko K/Pg muga adierazten duen *1 cm* lodierako buztin-tartea erakusten.

3.2. **Fisikariak tartean sartzen dira**

Berriro ere, lehen egindako galderak aipatuko ditut.

> «Gubbion suntsipen-muga adierazten duen buztin-geruzak zenbat denbora adierazten du?»
>
> «Zein arin gertatu zen suntsipen masiboa?»

Galdera zientifiko bat egiaztagarria izan dadin, argi eta garbi formulatuta egon behar du. *Alvarez*tarrek formulazio zehatz horren oinarri izan zi-

tekeen informazio-jatorria parez pare zeukaten: «Scaglia rossa» kareharria itsaso nahiko sakon baten zoruan metatu zen, eta % 90 eta % 95ean kaltzio-karbonatoz osotua dago. Kaltzio-karbonatoaren zati bat foraminiferoetatik dator, eta gainerakoa askoz txikiagoak diren kokolitodun matrizetik, edo itsasoko alga planktonikoek jariatutako plaketetatik, mikroskopio indartsu batekin bakarrik ikus daitezkeenak. «Scagliaren» beste % 5-10 buztinezko partikula finek osatzen dute, jatorrian, ibaien edo haizeen bidez itsasora iritsi zirenak, eta, ondoren, itsas zolan metatutakoak, foraminifero eta kokolitoekin batera. Baina, K/Pg mugan dagoen *1 cm*-ko geruza, desberdina da: gehienbat buztinez osatuta dago. Ez du kaltzio-karbonatorik, eta horregatik ez du ez foraminiferorik ez eta kokolitorik ere; beraz, ez du ahalbidetzen suntsipen-garaiko biziaren historia zehatza erregistratzea. Buztinezko geruzak zenbat denbora adierazten duen galdetzean, bi aukera desberdin ikusi zituzten:

1. Buztinaren sedimentazio-tasa konstantea izan zen, eta kareharriaren (kaltzio-karbonatoaren) metatze-tasa eten egin zen suntsipenaren tartean, agian suntsipenak kaltzio-karbonatoa sortzeko foraminifero edo alga gutxi utziko zituelako. Kasu horretan, buztinezko geruza metatzeko milaka urte beharko lirateke.
2. Kaltzio-karbonatoaren metaketak etenik gabe jarraitu zuen, eta buztin-pultsu labur bat egon zen ozeanoa buztin-kopuru handiz elikatu zuena, agian ibai-higadura aktiboago baten edo ekaitz handien ondorioz. Kasu horretan, buztinezko geruzak urte batzuk baino ez lituzke izango.

Zerk iraun zuen konstante, kareharriaren ala buztinaren pilaketa-tasak? Orain, bi aldaerekin, era zehatz batean egin zitekeen galdera:

1. Buztinezko geruzak, urte batzuk ala *milaka* batzuk adierazten ditu?
2. Kareharria ekoizten duten organismoak *milaka* urtetan ekintzaz kanpo geratu ziren, ala *era anormalki azkarrean* metatu zuten buztina urte batzuetan?

Nola erantzun galdera hauei?

«Scagliaren» kareharrian eta buztinezko geruzan erritmo konstantean metatutako zerbait behar zen, eta hori edukita buztinezko geruzak zenbat denbora adierazten zuen kalkula genezake.

3.2.1. *Berilioa*

*Walter*ren aitak, *Luis*ek, 1968. urtean esperimentalki hainbat partikula azpiatomiko aurkitzeagatik Fisikan Nobel Saria jasotakoak, hura jakiteko

modu bat proposatu zuen. Izan ere, Berilio-10 isotopoaren, ^{10}Be (4 protoi eta 6 neutroi nukleoan dituena) ugaritasuna K/Pg buztinean neurtzea iradoki zuen. ^{10}Be isotopo erradioaktiboa da eta energia handiko izpi kosmikoek (galaxiako oso gune urrunetatik datozen eta oso arin higitzen diren nukleo atomikoak) atmosferako oxigenoarekin eta airearen nitrogenoarekin talka egiten dutenean etengabe sortzen ari da.

^{10}Be isotopoa beta desintegrazioaren bidez boro izatera transmutatzen da:

$$^{10}\mathrm{Be} \rightarrow {}^{10}\mathrm{B} + \mathrm{e}^{-}$$

Jakina da, eta sasoi hartan jakina zen, eratu berri diren berilio atomo horiek sedimentuetan bil daitezkeela, Gubbioko K/Pg buztinean esaterako, eta bertan luzaroan bizi bere desintegrazioaren erdibizitza luzeari esker. K/Pg mugako buztin tarte mehe horrek (*1 cm* ingurukoa) zenbat eta denbora luzeagoa adierazi, orduan eta ^{10}Be gehiago edukiko luke. Gainera, suposatuz azken milioika urtetan atmosferan sortutako ^{10}Be isotopoaren ekoizpen-tasa ez dela aldatu, egun ezagutzen duguna erabiliz jakin daiteke zein neurritakoa izango litzatekeen zentimetro karratu bakoitzeko sekzioan *sakonerako 1 mm bakoitzean* metatutako ^{10}Be isotopoaren N_0 kopurua. Garaiko ezagutzaren arabera, ^{10}Be isotopoaren erdibizitza 2,5 milioi urtekoa zen, *Luis Alvarez*ek proposatutako neurketa egiteko oso egokia. Izan ere, erdibizitza hori azkarra litzateke K/Pg muga baino lehenagoko atomoak desintegratuta egoteko eta behar bezain motela ^{10}Be atomo/nukleo batzuk gutxienez K/Pg mugaren buztinean mantentzeko.

^{10}Be isotopoaren egungo kopurua 1970ean literaturan argitaraturiko erdibizitza erabiliz erraz kalkula dezakegu. Demagun duela 65 milioi urte K/Pg buztin horretako zentimetro karratu batean metatutako ^{10}Be isotopoaren kopurua N_0 izan zela. 65 milioi urte pasatu eta gero, egun geratuko zen kopurua $N_0 \times 1{,}49 \times 10^{-8}$ balioa izango litzateke (ikus 2 KUTXA).

Balio oso txikia dirudien arren, hots, ^{10}Be isotopoaren kopuru hori neurketa limitean egon arren, *Luis Alvarez*ek bazekien ziklotroi bat (nukleo atomikoak abiadura oso altura bizkortzen dituena gero talka eginarazteko) masa-espektrometro supersentikor bezala erabiliz neur zitekeela, eta baita nork neur zezakeen ere: *Richard Muller*, haren doktoregaia izandakoak hain zuzen. Esan beharra dago *Muller*ek aipaturiko teknika doktorego-tesian asmatu eta garatu zuela.

2 KUTXA

Desintegrazioaren ondorioz isotopoaren kopurua erdira jaisteko pasatu behar den denbora-tarteari isotopo erradioaktiboaren erdibitza deituko diogu (artikulu honetan semidesintegrazio-periodo deitura zuzenagoari erdibizitza deituko diogu), eta isotopoaren «hatz-marka» da.

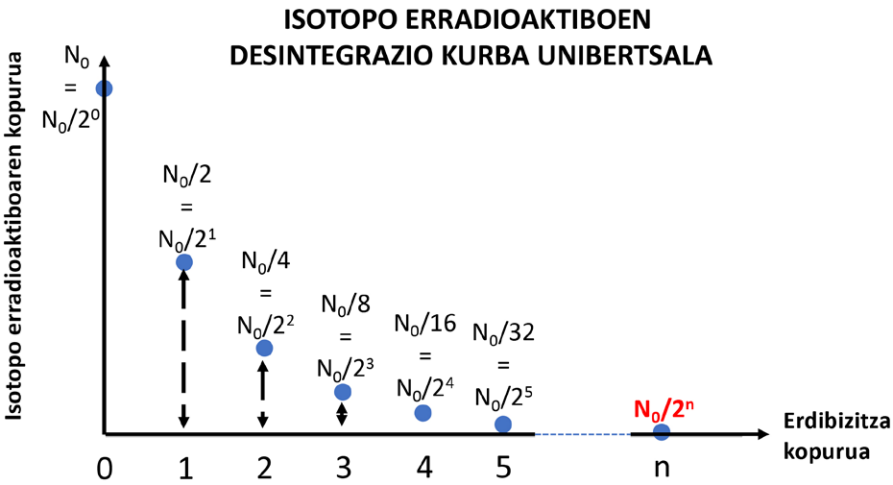
13. irudiak kurba unibertsal bat erakusten du, hots, edozein isotopo erradioaktiboren desintegrazio-portaera hasieratik igarotako *erdibizitzen* kopuruaren arabera. Irudi horretan denbora-unitatea *erdibizitza* da, aipatu bezala, isotopoaren ezaugarria.

Erdibizitza bat pasatzen denean N_0 kopurua erdira gutxitzen da ($N_0/2 = N_0/2^1$). Bi erdibizitza pasatzen direnean N_0 kopurua laurdenera gutxitzen da ($N_0/4 = N_0/2^2$), eta *n erdibizitza* pasatzen direnean N_0 kopurua $N_0/2^n$ kopurura gutxitzen da.

Defini dezagun: 1 Ma = 1.000.000 urte = 10^6 urte.

^{10}Be isotopoaren *erdibizitza* 2,5 Ma bada, 65 Ma pasa ostean (1 *cm*-ko buztinezko geruza metatu ostean) *erdibizitza*-kopurua da, n = 65 Ma/2,5 Ma = 26.

Beraz, n = 26 *erdibizitza* pasatu ostean, geratuko den ^{10}Be isotopoaren kopurua izango da: $N_0/2^{26} = N_0 \times 1{,}49 \times 10^{-8}$.



13. irudia. Isotopo erradioaktiboen desintegrazioaren portaera, isotopoaren erdibizitza kopuruaren arabera. Kurba hau unibertsala da.

Esperimentua egiteko prestatzen ari zirenean, literaturan argitaraturiko ^{10}Be isotopoaren *erdibizitza* okerra zela jakinarazi zieten. Izan ere, egun dakigu ^{10}Be isotopoa askoz arinago desintegratzen dela: *erdibizitza* 1,39 milioi urtekoa da [12]. Hots, balio hau zuzena izanik, den bezala, egun buztinean geratuko litzatekeen ^{10}Be kopurua, $N_0 \times 8{,}4 \times 10^{-15}$, neurtezina da (ikus 3 KUTXA).

3 KUTXA

^{10}Be isotopoaren *erdibizitza* 2 KUTXAn agertzen dena baino arinagoa izanik, hots, 1,39 Ma, 65 Ma igaro ostean *erdibizitza*-kopurua da, n = 65 Ma/1,39 Ma = 46,8.

Beraz, n = 46,8 erdibizitza igaro ostean, ^{10}Be isotopoaren kopurua izango da:

$N_0/2^{46} = N_0 \times 8{,}4 \times 10^{-15}$, neurtezina.

Beraz, 65 milioi urteren ondoren ^{10}Be hain gutxi geratuz, ez zuten neurtzeko inolako itxaropenik. Proiektua amaituta zegoen.

Ikerketa zientifikoak arrakasta bakoitzeko desengainu asko ditu. Kasu horretan ere, proposamen osoa ezerezean geratu zen eta proiektua amaituta, ikerketa zientifikoan hainbatetan gertatzen den bezala.

3.2.2. *Iridioa*

Berilioaren proiektua berez amaitu zen, baina *Luis W. Alvarez*ek buruari buelta eta jira ematen jarraitu zion berilioaren ordez beste bide fisikorik ba ote zegoen Gubbioko K/Pg mugan zegoen *1 cm*-ko buztina (CO_3Ca gabea) zenbat denboran metatu zen ezagutzeko. Urtebetera *Luis W. Alvarez*ek bazuen buruan beste ideia bat: ordurako proposatua zegoen arroka sedimentarioetan ageri den platino taldeko elementuen kopuru urria, meteoritoak atmosfera zeharkatzean ablazioz sortzen duten hautsetik etor zitekeela. Meteorito handiak oso noizbehinka Lurrera erortzen dira eta edozein lekutan eror daitezke baina meteorito txikiek eta oso txikiek hauts fina eratzen dute, «meteoritoen hautsa» deitua, eta atmosfera etenik gabe zeharkatzen dutenez, Lurrazalaren toki guztietara era uniformean heltzen dira. Izan ere, ikerketa-lan batek zioen korrelazio ona dagoela sedimentazio-azkartasun tasaren eta iridioaren kontzentrazioaren artean.

Lurrazalera heltzen diren meteoritoetatik, % 85 inguru meteorito *kondritikoa* da. Meteorito horiek eguzki-sistemaren hasierako hautsak eta ale txikiek bat egin zutenean (akrezioa) eratu ziren (≈ 4.500 milioi urte). Beraz, eguzki-sisteman bataz besteko platino taldeko elementuen kopurua meteorito kondritikoen neurrikoa da.

Bestalde, platino elementuaren taldeko elementuak (platinoa, iridioa, osmioa eta rodioa) Lurrazalean eta Lurraren mantuan oso urriak dira, eta meteorito kondritikoetan, berriz, ugariagoak. Horren arrazoia desberdintze planetarioan dago (ikus 4 KUTXA).

4 KUTXA

Meteorito kondritikoa: Sekula urtu ez den edo desberdintze planetariorik jasateko aukera izan ez duen asteroidea (asteroide txikiak eta ertainak).

Haien ezaugarrietako bat kondruluak edukitzea da, mineral desberdinez osatutako ale biribilak (ikus 14. irudia).

Planeta-zientziatan «desberdintze planetarioa» planetaren gorputzeko osagai desberdinak bereizteko prozesuari esaten zaio. Horien portaera fisiko edo kimikoaren ondorioz, planeta-gorputzak konposizio desberdineko geruzak garatzen ditu. Planeta bateko material trinkoenak erdigunera hondoratzen dira, material ez hain trinkoak gainazalera igotzen diren bitartean, oro har, magma-ozeano batean. Horrelako prozesu batek nukleoa eta mantua sortu ohi ditu.

14. irudia. 700 gr-ko pisuko meteorito kondritikoa, NWA 869 erreferentziaduna. Ale honen aurpegi moztu eta leunduan metalezko malutak eta kondruluak ikus daitezke. NWA 869 meteorito kondritiko arrunta da (L4-6). (Iturria: H. Raab).

Horrek esan nahi du eguzki-sisteman dagoen platino taldeko elementu kopurua Lurrazalean eta Lurraren mantuan dagoena baino handiagoa dela.

*Luis Alvarez*ek hori guztia erabili zuen ^{10}Be isotopoarekin jarraitu zuen arrazoibide antzekoa egiteko: meteoritoen hautsak, apurka-apurka

milaka urtetan barrena metatuz joan izan direnak, «scagliako» sedimentuetako platino taldeko elementuen iturri nagusia izan behar du (Lurrazalean eta Lurraren mantuan dagoena oso urria eta neurtezina baita). K/Pg mugako buztinezko *1 cm*-ko geruza milaka urtetan metatu izan bada, nahiko denbora izan da platino taldeko elementuak bertan detektagarriak izateko. Nolanahi ere, denbora-tarte oso laburrean metatu izan bada, urte gutxi batzuetan, horrelako elementuak ez lirateke bertan detektatzeko moduan egongo.

Platino taldeko elementuak aztertu zituenean, *Luis Alvarez* ohartu zen halakoak detektatzeko teknikarik onena Neutroien Aktibazio bidezko Analisia (NAA) delakoa zela (ikus 5 KUTXA). Halaber, NAA teknikaren bidez elementu hauetatik detektatzeko errazena iridioa dela jakitun izanik, neutroi geldoetarako harrapatze-sekzio eragile handiena duelako, iridioa erabiltzea erabaki zuen, platino-taldeko beste elementuak zailagoak baitira NAAren bidez detektatzeko.

5 KUTXA

Neutroien Aktibazio bidezko Analisia (NAA): material askotan elementuen kontzentrazioak zehazteko erabiltzen den teknika nuklearra da.

NAAk laginen egitura kimikoa alde batera uzten du, eta elementuen nukleora soilik mugatzen denez, elementuen laginketa diskretua ahalbidetzen du.

NAA Teknika Neutroien bidezko aktibazioan oinarritzen da (ikus beherago); beraz, neutroi-iturri bat behar du.

Lagina neutroien bidez bonbardatzen da, eta ondorioz, isotopo erradioaktiboak sortzen dira. Nukleo bakoitzaren igorpen erradioaktiboa eta desintegrazio-bidea ezaguna da, eta informazio hori erabiliz erradioaktibo bilakaturiko laginaren igorpen-espektroak azter daitezke, eta baita azterturiko nukleoen/elementuen kontzentrazioa lortu ere. Teknika horren abantaila da lagina puskatu gabe neurtu daitekeela, eta horregatik arte-lanak eta material arkeologikoa aztertzeko erabiltzen da.

Neutroien bidezko aktibazioa: Neutroien erradiazioaren bidez materialetan erradioaktibitatea induzitzeko prozesua da.

Hori gertatzen da atomoaren nukleoak neutroi askeak harrapatzen dituenean. Orduan, atomoaren nukleoak neutroi bat gehiago du, pisutsuagoa bilakatuz, eta nukleoa egoera kitzikatu batera pasatzen da.

Kitzikaturiko nukleoa berehala desintegratzen da gamma izpiak (edo beta partikulak, alfa partikulak, fisio-produktuak) eta neutroiak (fisio nuklearraren kasuan) igorriz.

Laginak K/Pg mugako buztinezko *1 cm*-ko geruzatik, mugaren goiko sedimentuetatik (mugatik gora 10 m-taraino), zein beheko sedimentuetatik (mugatik behera 100 m-taraino) hartu ziren NAAren bidez neurketak egiteko. NAA teknikaren bidez eginiko neurketak ez ziren iridiora mugatu, NAAren bidez erraz neur daitezkeen beste 27 elementuetara ere zabaldu ziren.

*Luis Alvarez*ek egindako estimazioek zioten *1 cm*-ko buztinezko geruza era oso geldoan metatu balitz, iridio kopurua 0,1 ppb ingurukoa izango zela, baina arin metatu balitz ordea, ez zela ia ezer neurtuko.

Mota horretako gogoetek eman zuten *Luis Alvarez* Gubbioko *1 cm*-ko buztinean iridioaren kontzentrazioaren neurketa proposatzea.

Lortu zituzten emaitzak 15. irudian ikus daitezke. Irudiak iridio-kontzentrazioaren joera orokorraren ikuspegi argia eskaintzen du, K/Pg mugaren gainetik eta azpitik. Kretazeoan zehar patroiak 0,3 ppb-ko hondoko maila egonkorra erakusten du.

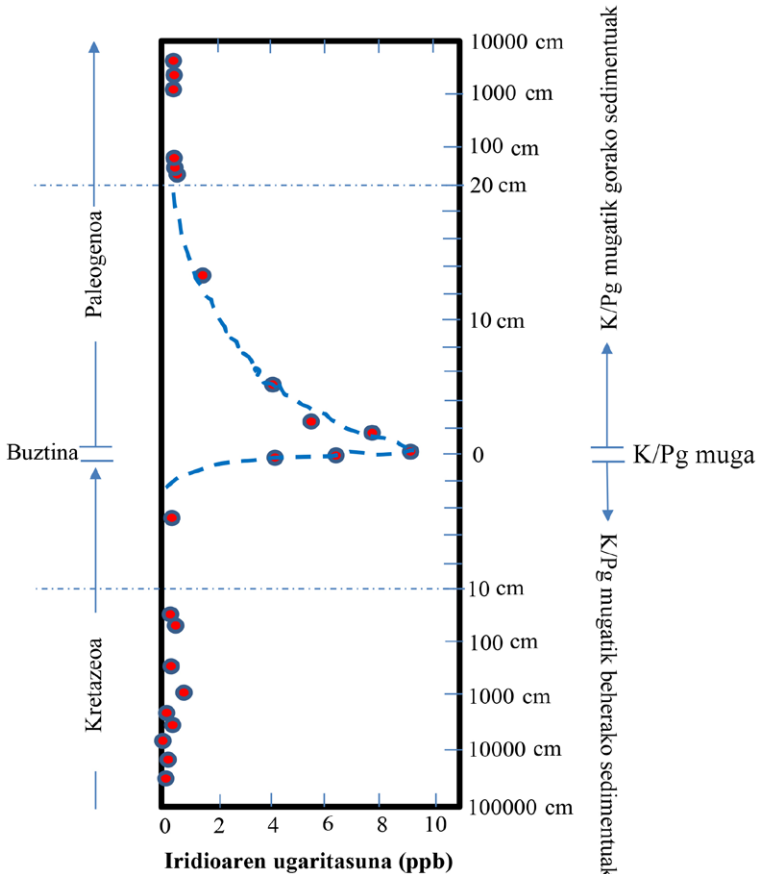
Maila hori, gutxi gorabehera, itsas-hondo sakoneko buztinean neurtzen den iridio-ugaritasunarekin konpara daiteke. Baina maila horrek bat-batean eta nabarmen egiten du gora, 30 aldiz handituz, 9,1 ppb lortu arte, *1 cm*-ko buztin-geruzaren erdian.

Iridio-mailak handiak dira Paleogenoko lehen zatiko buztin-hondakinetan ere, baina era esponentzialean, K/Pg muga baino 1 m gorago, hondoko mailetara jaisten dira. Izan ere, gutxipena lerro esponentzial baten bidez egokitzen badugu (ikus 15 irudia), esponentzialaren ezaugarria 4,6 cm-raino heltzen da.

Aipatu beharra dago NAA bidez neurtu ziren beste 27 elementuetan ez zela aldaketarik nabaritu *1 cm*-ko K/Pg mugako buztinean.

Emaitza harrigarria zen, ez zen espero zutena, eta orduz gero *iridioaren anomalia* bezala ezaguna da. Nondik zetorren iridio kopuru hori? Zerk azaldu zezakeen iridio hori guztia?

Aipatu dugunez iridio-kopurua Lurrazalean eta mantuan *1 cm*-ko buztinean topatutakoa baino askoz txikiagoa da. Beraz, *iridioaren anomalia* azaltzeko iturri estralurtar baten bila hasi ziren.



15. irudia. *Gubbio*ko eskualdean, K/Pg mugaren goragoko eta beheragoko sedimentuetatik harturiko laginetan NAA teknikaren bidez lortutako iridio-kopurua. Oso argi ikus daiteke K/Pg muga bertan dagoen buztineko *1 cm*-ko laginetan iridio-kopurua tarte horretatik kanpo baino 30 aldiz handiagoa dela. 20-10.000 cm tartea eta 10-100.000 cm tartea eskala logaritmikoan irudikatuta daude. 10 cm-0-20 cm arteko tartean berriz, eskala lineala da. [15] erreferentziako 5. irudia hemen erakusteko egokitu da.

4. HIPOTESI DESBERDINAK

4.1. Supernobaren hipotesia

Dinosauroen suntsipenari buruzko espekulazio desberdinak aztertu ostean, bat baino argitalpen gehiagok iturri estralurtarra aipatzen zutela ohartu ziren. Besteen artean, *Russell*-ek eta *Tucker*-ek proposatzen zu-

tena, hots, hurbileko supernoba batek eragindako suntsipena zela dinosauroena [7, 13]. Supernoba bat indar oso handiz lehertzen den izarra da, eta leherketari berari ere supernoba deritzo.

*Luis Alvarez*ek, hipotesi hori posiblea izan ote zitekeen aztertu zuen, eta azterketa aurrera eraman ahal izateko balioespen batzuk egin zituen.

Estimatu zuen lehen puntua izan zen, supernoba eguzki-sistematik zein distantziatara gertatu zen. Horretarako, kontuan hartu zuen:

1. Supernoba leherketa batean zenbat iridio kanporatzen den (norabide guztietan kanporatuko dela onartuz, izan behar duen bezala).
2. Balio horretatik eguzki-sistemara hel zitekeena lortu zuen, eta hel zitekeena Gubbion topatutako iridio-kopuruarekin bat eginarazi zuen, horrela supernoba zein distantziatara gertatu zen kalkulatuz.

Era horretan, supernoba eguzki-sistemarekiko zenbat distantziatara gertatu zen balioetsi zuen.

Lortu zuen balioa 0,1 argi-urtekoa izan zen. Eguzkitik distantzia horretara supernoba bat azken 100 milioi urtetan gerta zedin probabilitatea oso-oso txikia zen, 10^{-9} [14]. Probabilitatea hutsaren hurrengoa izan arren, ez zen lasaitu eta beste bi test proposatu zituen supernobaren hipotesia posible ote zen erabakitzeko.

Xabier Letek 1974 urtean «Bigarren Poema Liburuan», hainbat musikarik abestu duten «Izarren hautsa» poema argitaratu zuen. Poema horren hasierak dio «izarren hautsa egun batean bilakatu zen bizigai». Eta oso ondo dio, Lurra eta gu geu izarren hautsez osatuta baikaude. Helioa baino pisu handiagoko elementu guztiak izarretan sortzen dira, eta nikela baino elementu pisutsuagoak, bereziki supernoba-leherketetan, neutroien harrapaketa eta osteko beta desintegrazioen bidez.

Supernoba-hipotesia aztertzeko isotopo apropos bat, NAAren bidez oso erraz detekta daitekeena, eta $80{,}5 \times 10^6$ urteko *erdibizitza* duena, ^{244}Pu isotopoa da. Eguzki-sistema sortu zenean (duela 4.500 Ma, ikus «Geologia 1-Fisika 0» [1]) egon zitekeen ^{244}Pu guztia desagertuta legoke (ikus 6 KUTXA).

6 KUTXA

^{244}Pu isotopoaren *erdibizitza* 80,5 Ma bada, 4.500 Ma igaro ostean *erdibizitza*-kopurua da, n = 4.500 Ma /80,5 Ma = 55,9.

Beraz, n = 55,9 erdibizitza igaro ostean, egun geratuko litzatekeen ^{244}Pu isotopoaren kopurua izango da:

$N_0 / 2^{55,9} = N_0 \times 1{,}5 \times 10^{-17}$. Hutsaren hurrengoa. Neurtezina da.

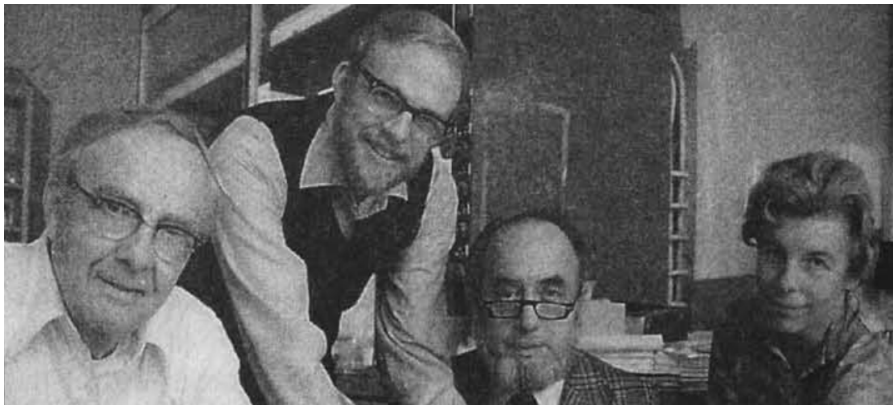
Baina K/Pg suntsipena supernoba batek eragindakoa balitz, eta supernobak *iridioaren anomalia* sortu izan balu, iridio-atomo bakoitzari gutxi gorabehera 1/1.000 ^{244}Pu atomok lagunduko liokete. Gainera, K/Pg muga duela 65 milioi urte (65 Ma) sortutakoa denez, ez zen *erdibizitza* bat ere orain arte pasatuko, hots $n \approx 1$ ($N_0/2^{65Ma/85Ma} \approx N_0/2$). Beraz, supernobaren hipotesia egia balitz, ^{244}Pu isotopoaren kopurua ez zen erdira ere gutxituko.

Gubbion ez zuten ^{244}Pu isotoporik detektatu; beraz, emaitza negatibo hau Supernoba-hipotesiaren aurka doa. Hala ere, honekin nahikoa ez eta beste bigarren metodo bat ere erabili zuten, iridioaren isotopo egonkorren arteko ratioarena (^{191}I/^{193}I) hain zuzen, baina bigarren metodo horrek ere kale egin zuen [15].

Emaitza negatibo horietatik ondorioztatu zuten *iridioaren anomalia*ren jatorria seguru asko eguzki-sisteman zegoela, baina ez datorrela ez supernoba batetik edo eguzki-sistemaren kanpoko beste iturri batetik.

4.2. **Meteorito baten inpaktuaren hipotesia**

Supernobaren hipotesia ezeztatu ostean, Luisek buruan zuen galdera honako hau zen: Zein iturri estralurtar, baina eguzki-sistemaren barnekoa, izan daiteke *iridioaren anomalia*ren jatorria?



16. irudia. 1980 urtean *Science* aldizkarian argitaratu eta hautsak harrotu zituzten zientzialarien argazkia. Ezkerretik eskumara: Luis Alvarez, Walter Alvarez, Frank Asaro eta Helen Michel. (Iturria [12]).

Aurreko baldintzak kontuan hartuz proposatu zuten hipotesia honako hau da:

> «Meteorito/Asteroide batek Lurra jo zuen, talkak krater bat sortu zuen eta materialaren zati bat, hauts tamainakoa, kraterretik kanporatua estra-

> tosferara heldu eta globo osoan barrena zabaldu zen. Hauts horrek, eguzkiaren argia lurrazalera heltzea eragotzi zuen zenbait urtetan, hautsa lurrean pausatu zen arte. Eguzkitiko argiaren galerak fotosintesia eragotzi zuen eta, ondorioz, elikadura-kate gehienek kolapsatu egin ziren eta suntsipenak gertatu ziren».

Aurreko hipotesia oso «potoloa» da, eta 1980ko *Science* aldizkariko artikulu famatuan proposatu zuten [15]. Hipotesi hori sostengatzeko segidako ebidentzia-lerroak topatu zituzten ere.

4.2.1. *Krakatoa bolkana*

Meteoritoaren inpaktua existitu izan bazen, inpaktuak krater bat sortuko zukeen, eta kraterretik estratosferara kanporatutako hautsak eguzkiaren argia itzaltzeko, eta berarekin urte batzuetan fotosintesia eragozteko zein baldintzak bete behar diren hasiko naiz azaltzen lehenik. Horretarako aipatuko dugu oso ongi aztertuta zegoen 1883. urtean Java eta Sumatra tarteko Sunda estugunean gertatutako Krakatoa bolkanaren erupzioa.

1883. urteko abuztuaren 26 eta 27an Krakatoaren erupzioek 18 km^3 material atmosferara igorri zuten eta horietatik 4 km^3 estratosferan amaitu. Erupzioek estratosferara igorritako hautsak Lur osoa oso arin inguratu zuen, ilunabar oso distiratsuak eta koloredunak munduko toki guztietan eraginez. Izan ere, ilunabar distiratsu horiek 2-2,5 urtez iraun zuten dirdira bereziarekin. Beraz, esan daiteke estratosferara igorritako hautsa 2-2,5 urtez bertan iraun zuela Lurrazalera jausi aurretik.

Aipaturiko balioekin lor daiteke zein balio zuen estratosferan kokatu zen hauts-geruzaren masa-dentsitateak, $1{,}6 \times 10^{-3}$ g/cm^2 hain zuzen. Jakin badakigu geruza horrek ez zuela xurgatu eguzki-argi zuzen guztia (ilunabar bereziak mantendu ziren), baina balio hori 1.000 faktorez biderkatzen badugu ([15] artikuluan dagoen teoriaren aurreikuspena), oso litekeena da eguzki-argia maila oso handi batean gutxitu izana.

Ondorioz, esan dezakegu duela 65 Ma eguna gau bilakatu zela urte batzuetan zehar. Ostean, eta nahiko arin, atmosfera berriro gardena bilakatuko zen.

Hipotesia zuzena bada, *iridioaren anomalia* ez da Gubbiora bakarrik mugatu behar, Lur planetako toki askotan eta hemisferio desberdinetan topatu beharko litzateke. Hori buruan izanik, *Walter Alvarez* Berkeleyko liburutegian ibili zen *iridioaren anomalia* beste lekuren batean egon ote zitekeen arakatuz. Egun, mundu osoan barreiaturiko ehun toki baino gehiagotan (Zumaia barne) topatu da *iridioaren anomalia*, baina 1970eko hamarkadaren amaieran, bakarrik beste toki posible bat topatu zuten, Kopenhagen hiriburuaren hegoaldean kokaturiko Stevns Klint itsaslabarretan zehazki. Eta bai, neurketak egin ostean *iridioaren anomalia* han ere topatu

zuten. 1982 urtean *Luis Alvarez* eta lankideek [16] beste artikulu bat argitaratu zuten *iridioaren anomaliaz* munduko eskualde desberdinetan. Bertan, Zumaia eta Donostia agertzen dira, non *iridioaren anomalia*ren balioa 4,0 ppb-raino heltzen den.

Behar bada, une aproposa da 1 ppb balioaren txikitasunaz ohartzeko. Horretarako, Lur planetan egun dagoen populazioa adibide bezala erabiliko dut: gaur egun, gutxi gorabehera, 8.000 milioi biztanle bizi gara munduan, eta 8 da munduko populazioaren 1 ppb-a, ohart zaitezkeenez oso-oso txikia.

4.2.2. *Meteoritoaren tamaina*

Inpaktuaren hipotesia zuzena bada, zenbateko tamaina eduki beharko zukeen meteoritoak eguzki-argia indargabetzeko? *Luis Alvarez*ek 4 bide desberdin proposatzen ditu meteoritoaren tamaina kalkulatzeko, laugarrena estratosferara igorritako hautsak eguzki-argia indargabetzeko gai izan behar duela oinarri bezala hartuta. Aipaturiko lau balioespenak egin eta gero ondorioztatu zuten, informazio edo datu guztiak bateragarriak direla 10 ± 4 km-ko diametroko meteoritoarekin [15]. Hala ere, esan beharra dago Krakatoa bolkanarekin alderatuz, desberdintasun nabarmen bat dagoela, hots, inpaktuaren ostean sortutako muturreko turbulentzia/zurrunbilo atmosferikoarena, hain zuzen. Meteoritoa atmosferara gutxi gorabehera, 25 km/s-ko abiaduraz sartuko litzateke/zen eta atmosferan 10 km inguruko «zulo bat aitzurtuko luke». Meteoritoaren energia zinetikoa oso erraz kalkula daiteke eta ematen duen balioa itzela da: 100.000.000 TNT megatoi. Hiroshiman lehertu zuten «Little Boy» uranioko lehergailu nuklearra 0,016 TNT megatoikoa zen (16 TNT kilotoi), eta Nagasikin lehertu zutena ordea, «Fat Man» plutoniozko lehergailu nuklearra 0,021 TNT megatoikoa (21 TNT kilotoi). Beraz, ohart zaitezkeenez irakurle, Bigarren Mundu Gerran lehertu ziren lehergailu nuklearren potentzia meteoritoaren inpaktuarekin alderatuta, hutsaren hurrengoak dira. Izan ere, meteoritoaren inpaktuaren potentzia, Gerra Hotzean Mundu osoan pilatutako armategi nuklear osoan bilduta zegoena baino 10.000 aldiz handiagoa litzateke. Gainera, potentzia itzel oso hori, bat-batean askatu zen.

5. **ARTIKULU IRAULTZAILEAREN NONDIK NORAKOAK ETA ONDORENGOAK**

Argitalpenaren aurreko zatien ostean istorio honen urte garrantzitsu batera heldu gara, 1980. urtera hain zuzen. Urte horretan duela 65 milioi urte gertaturiko suntsipen masiboaren ikaragarriko iraultza proposatzen zuen artikulua argitaratu zen [15] (17. irudian artikulu horren lehen orriaren egokitzapen laburtua ageri da). Aurretik aipatu dudan bezala, argitaraturiko artikuluak jatorrizko bekatu bi zituen:

1. Proposaturiko iraultza guztiei gertatzen zaiena, hots, akademian ongi errotua zegoen teoriaren aurka joan izana.
2. Arlo horretako komunitate zientifikoarentzat oso gogorra izan zena, «migrantearen efektuarena» hain zuzen, suntsipenei buruzko artikulua sinatzen zutenak ez baitziren paleontologoak.

6 June 1980, Volume 208, Number 4448 **SCIENCE**

Extraterrestrial Cause for the Cretaceous-Tertiary Extinction

Experimental results and theoretical interpretation

Luis W. Alvarez, Walter Alvarez, Frank Asaro, Helen V. Michel

In the 570-million-year period for which abundant fossil remains are available, there have been five great biological crises, during which many groups of organisms died out. The most recent of the great extinctions is used to define the boundary between the Cretaceous and Tertiary periods, about 65 million years

microscopic floating animals and plants; both the calcareous planktonic foraminifera and the calcareous nannoplankton were nearly exterminated, with only a few species surviving the crisis. On the other hand, some groups were little affected, including the land plants, crocodiles, snakes, mammals, and many kinds

Summary. Platinum metals are depleted in the earth's crust relative to their cosmic abundance; concentrations of these elements in deep-sea sediments may thus indicate influxes of extraterrestrial material. Deep-sea limestones exposed in Italy, Denmark, and New Zealand show iridium increases of about 30, 160, and 20 times, respectively, above the background level at precisely the time of the Cretaceous-Tertiary extinctions, 65 million years ago. Reasons are given to indicate that this iridium is of extraterrestrial origin, but did not come from a nearby supernova. A hypothesis is suggested which accounts for the extinctions and the iridium observations. Impact of a large earth-crossing asteroid would inject about 60 times the object's mass into the atmosphere as pulverized rock; a fraction of this dust would stay in the stratosphere for several years and be distributed worldwide. The resulting darkness would suppress photosynthesis, and the expected biological consequences match quite closely the extinctions observed in the paleontological record. One prediction of this hypothesis has been verified: the chemical composition of the boundary clay, which is thought to come from the stratospheric dust, is markedly different from that of clay mixed with the Cretaceous and Tertiary limestones, which are chemically similar to each other. Four different independent estimates of the diameter of the asteroid give values that lie in the range 10 ± 4 kilometers.

SCIENCE, VOL. 208, 6 JUNE 1980 0036-8075/80/0606-1095$02.00/0 Copyright © 1980 AAAS 1095

17. irudia. *Science*ko artikulu apurtzailearen lehen orria (egokitua).

1980ko iridioari buruzko artikuluak ekaitz itzela sortu zuen, eta 1980ko hamarkada osoan zehar komunitate zientifikoan orro galanta egin zuen: nola ausartu dira berena ez den zientzia-arlo batean sudurra sartzen?

Ez zen lan erraza izan, artikulua *Science* aldizkarian argitaratzea, kostata lortu zuten. Ikerketa lan bat nazioarteko aldizkari zientifiko batera argitaratzera bidaltzen denean, ez da bat-batean argitaratzen, protokolo oso garrantzitsu bat dago: artikulua jasotzen duen editoreak lehen begirada ematen dio eta erabakitzen badu materiala aldizkari horretan argitaratzeko

interesgarria izan daitekeela, arlo konkretu horretako, gutxienez bi adituri pasatzen die (*erreferiak*) lana zehatz-mehatz azter dezaten (*parekideen berrikuspena* deitzen zaio prozesu honi; ingelesez *peer-review*), eta gainera, aditu bakoitzak ez daki zein den beste aditua. Beraz, aditu bakoitzak editoreari bere iritzia bidaltzen dio bestearen iritzia jakin gabe. Adituak esan dezake artikulua onartzen duen, aldaketa batzuk eginez gero (gutxi zein asko izan daitezke) onar litekeen, edo ez duela onartzen. Ondoren, lanaren autoreek editorearen erabakia jasotzen dute, aditu ezezagunen iruzkinekin batera (adituen iritziak ez dute zertan berdinak izan). Txosten horietan *erreferiek* agertzen dituzten trabak aztertu ostean, era positiboan erantzuteko gai badira, artikuluaren beste bertsio bat bidaltzen diote editoreari eta horrek berriro aurreko prozesua hasten du. Bide horretan, artikuluaren lehen bertsioa eta argitaratzen direnak nahiko ezberdinak izan daitezke, eta orokorrean argitaratzen den bertsioa lehen bertsioa baino askoz hobea izaten da.

Gure istorioaren kasuan, aipaturiko artikuluaren *erreferi* baten txostenaren nondik norakoak ezagutzen ditugu, liburu batean plazaratu baitzituen [17]. *David Raup* paleontologoak editoreari idatzitako txostenean adierazten da «artikuluaren hipotesia zuzena bada, eragin itzela izango du geologian eta eboluzioan, baina zuzena ez dela ondorioztatzen bada, kalte itzela eragingo du eta sortutako kaltea berreskuratzen urteak joango dira». Ohi den bezala artikulua hobetzeko puntuak ere aipatzen ditu, eta *Science* aldizkariari helarazten dion erabakia EZ ARGITARATZEA da. Gainera, bere txostenaren amaieran idazten du: «Ikasle graduatu batek eskuizkribu hau irakur nezan emango balit, lan bikaina irudituko litzaidake (ikasleak ahalmen handia duenaren zentzuan), baina itzuli egingo nioke ondo egin zezan».

Ohart zaitez irakurle, *David Raup* ikerlariak Fisikako Nobel Saridun bat gauzak ondo egin ez dituen ikasle batekin alderatzen duela!!! Nire ustez ez da oso ohikoa. [17] erreferentzian *David Raup*ek zientziaren bideak komentatzen dituenean, 1980an *Science* artikulua argitaratu zenean akademikoen arteko lehen erreakzioak zeintzuk izan ziren aipatzen ditu. Erreakzio horiek 11 dira eta 7 KUTXAn ageri dira.

7 KUTXAn ageri diren erreakzio batzuk zentzuzkoak dira, baina beste batzuk berriz, oso deigarriak, eta argudioak ez dira batere zientifikoak; horien artean 6, 7, 8, 10 eta 11 erreakzioak. Seigarren planteamenduan «oportunista» eta «ez da sinesgarria», proposamena ezeztatzeko argudio eskasak dira. Zazpigarrenaren kasuan, orduko ezagutza dogma aldaezina bezala hartzen da, argudio zientifiko eskasa ere. Zortzigarrenean, berriro ere, oso errotuta zegoen eta zenbait esparrutan oraindik ere horrela dirauen «migrantearen efektua» ageri zaigu. Hamargarrenean, «ez da beharrezkoa» eta «Lyell» ageri da berriro, hots, garaiko dogma. Azkenekoan, hamaikagarrenean, «presa handiegia izan zutela prentsa deitzen» aipatzen da, jakinik «*parekideen berrikuspena*» bideari jarraituz argitalpen bat zegoela, *Science* aldizkari ospetsuan gainera.

7 KUTXA

Akademikoen erreakzioak 1980an *Science* artikulua [15] argitaratu ostean:

1. Gubbion egindako interpretazioak justifikatzeko iridioaren geokimikari buruz ez dakigu nahikoa.
2. K/Pg mugako buztinean topatutako iridioaren aberasteak jatorri biologikoa izan dezake. Azken finean, organismo askok zenbait elementu hainbesteraino biltzen dituzte, ezen, historikoki zenbait elementu aurkitu baitira itsas animalietan itsasoan bertan aurkitu baino lehen. Alvarezen artikuluak ez du ezer esaten aukera horri buruz.
3. Iridioaren bila K/Pg mugatik gertu dauden arrokak soilik aztertu dira. Zutabe geologiko osoaren laginketa egin arte, ez dugu jakingo *iridioaren anomalia*k ezohikoak diren ala ez. Suntsipenaren interpretazio guztia *iridioaren anomalia*ren bitxitasuna jakintzat ematean oinarritzen da.
4. Nola dakigu *iridioaren anomalia*ren jatorria K/Pg mugaren gainean zegoen kareharrizko soluzio kimiko batez (elementuaren kantitate txikiak dituena) osatutako kontzentratu-geruza bat besterik ez dela?
5. 10 km-ko diametroko meteorito batek Lurra jo bazuen zergatik ez du inork kraterra topatu?
6. Eguzkia estali zuen hauts-hodei batean oinarritutako suntsipenaren planteamendua oportunista da eta ez da sinesgarria. Zergatik ez ziren, aldi berean, landareen artean iraungitze garrantzitsuak gertatu?
7. Kretazeoaren amaierako suntsipenak milioika urtetan zehar gertatu ziren, beraz, ezin da iraupen laburreko gertaera bakar batean oinarritutako interpretaziorik egin.
8. Alvarezen taldeak ez du paleontologian aditurik, beraz ez dago suntsipen masiboei buruz iritzia emateko egoeran.
9. Masa-suntsipenak oso arazo konplexuak dira, eta organismoen arteko eta organismoen eta beren ingurunearen arteko elkarreragin ugari eta korapilatsuen ondorio dira. Kretazeoko suntsipena bezalako gertaera korapilatsu baten azalpen sinple bat ez da egokia, eta probableena da okerra izatea.
10. Ez da beharrezkoa eta ez da justifikatzen indar estralurtarrengana jotzea lurreko arazoak konpontzeko. *Deus ex machina* ikuspegia duela urte batzuk baztertu zen. (Eskerrik asko, Lyell jauna!)
11. Alvarezen taldeak presa handiegia izan zuen prentsa deitzen. Horrela ezin da ondo aurrera eraman ikerketa zientifiko bat. Prentsaren arretak ondorioa susmagarri egiten du.

Iturria: David M. Raup, 1986. «The Nemesis affair. A Story of the death of Dinosaurs and the Ways of science» *WW Norton & Co*. ISBN-10: 0393319180 [17].

7 KUTXAn ageri diren erreakzioek, bereziki aurreko paragrafoan aipatutakoek, dogma bezala hartuta zegoen ezagutzaren aurka (uniformitarismoa/gradualismoa) joatea da azpian dutena. Are gehiago, ikerketa arlokoak ez ziren ikerlariek Kretazeoko masa-suntsipenaz proposamen bat plazaratzeagatik (migrantearen efektua). Hori oso gogorra izan zen komunitate zientifikorako, eta lehen uneetan horrelako erreakzioak eragin zituen.

Hala ere, *David Raup* paleontologoak (*Science* aldizkariko artikulu ospetsua ez argitaratzeko proposamena eman zuen *erreferia*k) 1986. urtean argitaratutako «The Nemesis affair. A Story of the death of Dinosaurs and the Ways of science» liburuan [17], *Scienc*eko artikulua argitaratu eta 6 urtera honako hau aitortzen du «*Alvarez*en artikuluaren aurrean izan ditudan erreakzioez hitz egin dut, zientziaren funtzionamenduari buruzko zerbait azaltzen dutela uste dudalako. Azken batean, *iridioaren anomalia*k eta bere interpretazio estralurtarrak asko gogaitzen ninduenez, beharbada era irrazional batean eraso nion». Meteoritoaren inpaktuaren hipotesia plazaratu eta 6 urtera idazten du «orain artikulu bera emango balidate, agian *iridioaren anomalia* bati buruz erregistro geologikoaren beste punturen batean, ziur nago 1980an okerrak iruditu zitzaizkidan gauza gehienak onartuko nituzkeela, zeren orain «fededun» bat banaiz bolido handien inpaktuetan eta iridioaren arrastoan».

Horrek guztiak agerian uzten du zein garrantzitsua (eta arriskutsua) den zientzialari bakoitzak ikerketa gaiari buruz duen «pertzepzioa» ideia berriak onartzeko. Zientzialari *puru* batek edozein beste hipotesi metodo zientifikoaren bidez kontrastatu beharko luke ezer erantzun aurretik, baina ez da batere erraza, zientzialariak ere gizakiak gara. Aipatutakoari hain errotuta zegoen «migrantearen efektua» gehitzen badiogu, gauzak are gehiago zailtzen dira.

Science aldizkarian 1980an argitaraturiko artikuluak *erreferi* oso zorrotzak izan zituen (gutxienez lau), eta ziur naiz, *erreferi* zorrotz horiei esker artikuluak asko irabazi zuela argitaratu zenerako. Izan ere, artikulu hori behin eta berriro irakurtzen amaitzen dudanean nire buruari esaten diot zein ondo aztertzen eta ezabatzen dituen garaiko beste hipotesiak, eta zein ondo azaltzen dituen beren proposamenarekin bat egiten ez duten beste posibilitateak. Izan ere, nire aburuz oso era zorrotzean eta argigarrian idatzita dago artikulua.

Meteoritoaren inpaktuaren hipotesia geologiako eta paleontologiako adituen artean orokorrean era oso ezkorrean jasoa izan zela agerian geratu da. Hala ere, *Alvarez*en taldeak entzuna izatea lortu zuen, gutxi ez dena. Beste batzuek ez dute horrelakorik lortzen. Haserre handia sortu arren, *Science*ko artikuluak zera lortu zuen, kalitatezko zientzialari askok datu zaharrak berraztertzen hastea eta datu berriak lortzeko lanean jartzea.

Mundu osoko hainbat laborategi, iridioaren bila, arrokak aztertzen hasi zen, eta erabat ezberdinak ziren bideetatik jarraitu zuten meteorito handi batek K/Pg mugan eta zutabe geologikoko beste toki batzuetan zuen eraginaren aldeko edo kontrako frogak aurkitzen. *Iridioaren anomalia* argi eta garbi erreala eta, ziur asko, globala zenez, inpaktuaren hipotesiak ehunka zientzialari erakarri zituen. Egiten ari zirena utzi eta suntsipenarekin zerikusia zuten ebidentzia berriak bilatzen hasi ziren. 1980ko hamarkadan, gai horri buruz 2.000 artikulu zientifiko inguru argitaratu ziren.

Gai zientifiko batek oso gutxitan erakarri du hainbat diziplina desberdinetako pertsonak. Egun diziplina anitzeko ikerketa modan dagoela esango nuke, baina garai hartan oso ezezaguna eta arraroa zen. Beraz, esan daiteke diziplina arteko ikerketari, hots, ikerketa gai bat ikuspegi desberdinetatik aztertzeari abiapuntua eman ziola.

Geologoak eta paleontologoak funtsezkoak izan ziren hasieratik, Lurraren historiaren irakurketan arazo bat zelako eta halaber, «uniformitarismoa» doktrina sendoaren aurkako erronka bat zelako ere. Kimikari analitikoak, mineralogoak eta geokimikariak gehitu ziren K/Pg muga-geruza aztertzeko eta iridioaren ebidentzia kimiko sotila interpretatzeko. Astronomoek kometei, asteroideei eta dinamika orbitalari buruz zuten ezagutzak oinarrizko garrantzia zuela ikusi zuten. Meteoritoaren inpaktuak munduko armategi nuklear guztia baino 10.000 aldiz energia handiagoa bat-batean askatu zuenez, fisikariak erakarrita sentitu ziren; batez ere laborategian inoiz erreproduzitu ezin diren eta konputazio-metodo egokirik ez zuten baldintzak sortuko lituzkeelako. Atmosferako zientzialariek airearen zirkulazioan eta kimikan eragin handia izan zuten ondorio fisiko eta kimikoak kalkulatu zituzten. Paleoekologoek biktimen eta bizirik atera zirenen jarraibideak bilatu zituzten, suntsipenerako mekanismoak argitzeko. Datu paleontologiko oso osatugabeetatik abiatuta fidagarritasunez zer inferentzia egin zitezkeen aztertu zuten estatistikariek.

Diziplina horietako bakoitzak bere tradizioak zituen, bere ezagutza-corpusa eta bere semantika espezializatua. Desberdintasun hauek traba handiak sortzen dituzte, adituek elkarrekin lan egitea eragozten dutenak, baina diziplinen arteko mugak salbatuz aurrera egin zuten. Traba hauek mantendu izan balira, oso aurrerapen gutxi lortuko ziren K/Pg mugan gertatutako suntsipenen ulermenean.

1981eko udazkenean, Snowbirden (Utah, AEB), hainbat diziplinatako zientzialariekin kongresu bat antolatu zen beren artean komunikatzen ikasteko. Bertan mintegiak prestatu ziren, paleontologoek inpaktuen fisikari buruz ikas zezaten, eta baita astronomoek arroken erregistroa irakurtzen ikas zezaten ere. Beste bi Snowbird kongresu egin ziren, 1988an eta 1994an, inpaktuan eta suntsipenetan zentratu zirenak. Snowbirdeko lehen kongresuak ordura arte ezaguna ez zen kultura zientifiko bakarra sortu zuen, non iker-

keta-esparru bateko espezialista batek ez duen beldurrik urruneko diziplina bati buruzko galderarik oinarrizkoenak planteatzeko, eta inor ez da ezkutatzen espezialistek hain maiz erabiltzen duten jargoi ilunaren atzean, sarkinak baztertzeko. Diziplinarteko ikerketa-eztabaidak oso atseginak bihurtu ziren, eta tradizio zientifiko bakoitzaren ohiturak eta lengoaiak ulertu eta estimatzera iritsi ziren.

Engainagarria litzateke Kretazeo-Paleogeno mugari buruzko eztabaida beti zuzena eta adiskidetsua izan zela esango banu. Zientzia ezberdinen tradizio eta metodo oso ezberdinak batera existitzera behartuak izan ziren, eta, batzuetan, ondoren deitoratzen zituzten adierazpenak egin ziren. Izan ere, herritarren artean piztu zen interesagatik prentsak gertaerei hurbiletik jarraitzen zien eta ohikoa zen ikerlarien komentario desegokiak zabaltzea. Kazetariak etsaitasunezko konfrontazioez baliatzen dira; zientzialariak, berriz, eztabaida sutsuaz baliatzen dira, baina orokorrean elkar errespetatzen dute. Hala ere, denek ez zuten jakin probokazioei behar bezala erantzuten, eta, kasu gutxi batzuetan, irainak larriak izan ziren, baina lanbidea, oro har, ongi moldatu zen eztabaida zibilizatuaren mailari eusteko. Bereziki, *Luis W. Alvarez*en ahoberotasunari buruz gehiago jakin nahi baduzu jo *Kepa Altonaga*k argitaratu berri duen «Iridioaren mintzoa» liburuaren 87. orrira [2].

Azaldu denez, *Science*ko artikuluak eztabaida sutsua sortu zuen K/Pg suntsipen masiboa zerk sortu zuen ondorioztatzean. Halaber, aurretik ezagutu gabeko diziplina desberdinen arteko lankidetza aberatsa ere sortu zuen. Hainbat zientzialarik zioten dinosauroak berezko arrazoiengatik apurka-apurka suntsituz joan zirela eta ez bat-batean. Are gehiago, meteoritoaren inpakturik gertatu balitz ere, dinosauroen suntsipenarekin ez zuela inolako zerikusirik izan. Hori zioten bereziki fosil-erregistroa hobekien ezagutzen dutenek, paleontologoek hain zuzen. Hala ere, dinosauroak hain handiak izanik ez dira hain errazak jarraitzen aipaturiko fosil-erregistroan. Fosil txikienak askoz ere ugariagoak dira, eta horri esker, fosil-erregistroan duten suntsipen-maila dinosauroen kasuan baino zehatzago azter daiteke.

5.1. **Meteoritoak dinosauroen suntsipena eragin al zuen?**

*Science*ko artikuluan aipatutako datuekin bat egiten zuen inpaktuaren kraterra topatuz gero, agerian utziko zukeen duela 65 milioi urte meteorito handi batek Lurra jo zuela eta horren ondorioz kraterretik kanporatutako hautsa estratosferara heldu eta globo osoan barrena zabaldu zela. Hauts horrek, eguzkitiko argia lurrazalera heltzea denbora luzean eragotzi zuen, hautsa lurrean pausatu zen arte. Plazaratutako hipotesi hau, edozein hipotesi zientifikok izan behar duen bezala, «faltsagarria» zen. Honek esan nahi du hipotesiaren faltsutasuna froga daitekeela, hipotesia faltsua den kasuetan. Meteoritoaren inpaktuaren kasuan *iridioaren anomalia* plazaratu ze-

nean hiru toki bakanetan ezagutzen zen: Gubbio, Kopenhagen eta Zeelanda Berria. Gaur berriz, munduan barreiaturiko 100 baino toki gehiagotan topatu da *iridioaren anomalia*. Honek esan nahi du iridioa zeraman hautsak globo osoa inguratu zuela. Hipotesia plazaratu zeneko unean ezagutzen ziren *iridioaren anomalia*ren tokiak ez baziren ugaritu, hautsak ez zuela globoa inguratu esan genezake eta meteorito handi baten inpaktuaren hipotesia kinka larrian geratuko zen. Hala ere, eta hipotesi zientifikoen faltsagarritasun posiblearekin lotuta dago: «ezin da inoiz erabat ziurtzat jo hipotesi bat zuzena dela, baina alderantziz ziurtasun osoz esan ahal da oker dagoela». Beraz, oin sendoak ditu meteorito handi batek duela 65 milioi urte inguru Lurrari eraso ziola dioen hipotesiak. Baina hipotesia harago doa, meteoritoaren eraginez dinosauroak suntsitu zirela ere baitio.

1980ko *Science* artikulua plazaratu eta berehala kraterraren bila hasi ziren zientzialariak. Lehen unetik, zientzialari batzuek zioten dinosauroak *gradualki* desagertu zirela, kausa naturalengatik, eta inpaktu bat egon bazen ere, ez zuela zerikusirik izan dinosauroen suntsipenarekin. Iritzi hori, fosil-erregistroaz gehien zekitenek mantentzen zuten: paleontologoek, bereziki dinosauro eta ugaztunetan espezializatuek. Horien artean ezagunena *Walter A. Clemens*, Berkeley Unibertsitateko irakaslea.

Animalia handiak txikiak baino bakanagoak dira, eta gauza bera gertatzen da hondakin fosilekin; hots, foraminifero unizelularrak erruz topatzen dira fosil-erregistroan eta dinosauroak berriz oso bakanka. Izan ere, *Clemens*ek, Montana ekialdean, goren zegoen dinosauro-hezurra, *iridioaren anomalia*tik 3 metro beherago zegoela aurkitu zuen (12. irudiaren ezkerrekoa begiratzen baduzu, horrek esan nahi du goien dagoen dinosauro-hezurra buztin-geruzak adierazten duen marra estu eta horizontala baino 3 metro beherago dagoela). *Clemens*entzat, horrek, meteoritoak Lurra jo baino lehen dinosauroak hil zirela frogatzen zuen, edo hobeto adierazita, horrek frogatzen zuen ezin zela baztertu dinosauroen suntsipena meteoritoa Lurra jo aurretik gertatu zenik. Argi dagoena da 12. irudian, ezkerrekoan, dinosauro-hezurren bat *iridioaren anomalia* (marra estu eta horizontala) baino gorago aurkitu izan balitz, horrek bai esan nahiko zukeela dinosauroen suntsipenaren eta meteoritoaren inpaktuaren artean ez dagoela inolako loturarik, baina aurkitu diren dinosauro-hezur guztiak beherago daude.

*Kepa Altonaga*k argitaratutako «Iridioaren mintzoa» liburuan [2], maisuki idatzita dago (74 orria) eztabaida hau, *Stephen Jay Gould* paleontologo eta dibulgatzaile oso ezaguna eta ospetsuari jarraituz, eta horregatik, zuzenean hona aldatu dut testu hori:

> «Zaila da hiru metroko tartearen interpretazioa. Hutsune horrek esan nahi al du dinosauroak meteorito-inpaktua baino askoz lehenago hil zirela? Horixe iradokitzen digu fosil-erregistroaren irakurketa literalak. Dena dela, erantzuna ezin da blaust bota berehalakoan; izan ere, ez da

ezagutzen dinosauroen mundualdiko azken egunetako egoera, urria baita fosil-erregistroa. Bateko, soilik ezagutzen dira hiru leku munduan zeintzuetan dinosauroen fosilak K/T (ikus (*) oharra 2.1. atalean) mugaraino bil baitaitezke — Albertan, Wyoming-en eta Hell Creek famatuan—, eta izatez, orotara, 33 dira Kretazeo berantiarreko dinosauroak kontserbatzen dituzten aztarnategiak. Besteko, soilik bizidunen frakzio ñimiño bat fosilizatu ohi da, eta, kasurako *Tyrannosaurus rex,* dinosaurorik ospetsuena, espezimen gutxi batzuei esker ezagutzen da, 50 bat. Horiek horrela, gaiari buruzko hurbilketa berriak bilatu ziren, datu-eskasiak geldiaraz ez zezan arazoaren ebazpena.

Paleontologo batzuek beharra sumatu zuten fosil-erregistroaren irakurketa literala birpentsatzeko. Gogoeta horretan, esan daiteke espezie batzuk oso arruntak direla eta erraz kontserbatzen direla fosil gisa; horrelakoetan, batez beste hainbat espezimen aurkituko dira estratu-zentimetroko. Badaude arraroak diren espezieak, gaizki fosilizatzen direnak, eta nekez aurkituko ditugu horien fosilak; demagun, goitik jota, fosil bakar bat sedimentuzko 30 metro bakoitzeko. Demagun orain, espezie horiek guztiak supituki suntsitu zirela, bat-batean eta denak batera, arruntak eta arraroak, arro ozeanikoan 120 metro sedimentu depositatu eta gero. Itxarotekoa litzateke espezie guztien fosilak aurkitzea 120 metroko estratuetan sekuentziaren goi-parteraino? Jakina ezetz. Espezie arruntenek estratuak beteko lituzkete, eta haien fosilak aurkituko lirateke zentimetrorik zentimetro. Aldiz, espezie arraroen kasuan, eta nahiz eta azken unera arte bizi, gutxi gorabehera fosil bat agertuko litzateke 30 metroko tarte bakoitzeko. Edo, beste era batera adierazita, bizirik iraun arren 120 metroko sekuentzia osoan, espezie arraro baten azken fosila goi-limitea baino 30 metro beherago agertuko litzateke, agertzekotan. Alegia, guztiz tronpagarria litzateke fosil-erregistroaren irakurketa literala, pentsaraziko bailiguke espezie arraroa desagertua zela benetako suntsipena baino dezente lehenago. Baina ez da dirudiena!

Zenbat eta arraroagoa izan espeziea, orokorrean esan daiteke probableagoa dela haren azken fosila oso beheko estratuetan aurkitua izatea, espezie horrek sekuentzia estratigrafikoaren goi-limiteraino iraun arren bizirik. Fosil-erregistroaren irakurketa literalean ikusiko dena da espezie arraroak *gradualki* iraungiz doazela eta espezie arruntek iraun egiten dutela azken unera arte, zeinean «supituki» suntsitzen baitira. Baina, ustez, bai batzuk eta bai besteak ere, denak suntsitu dira bat-batean azken limitean… Dinosauro gehienak lurralde idorretan bizi ziren, zeintzuetan erosio galanta pairatzen baitzen, baina sedimentaziorik kasik ez, halatan non oso nekez fosiliza baitzitezkeen. Esate baterako, *Tyrannosaurus rex* bezalako tamaina handiko goi-karniboro batek —banaketa geografiko nahikoa lokala zuena eta populazio erlatiboki txikia— espeziaren erregistro estratigrafikoan ozta-ozta ekoitz zezakeen fosil bat baino gehiago hain-

> bat metroko, eta, aldiz, foraminifero unizelularrak erruz agertzen dira milimetrorik milimetro. Hartara, nahiz eta gerta zitekeen *Tyrannosaurus rex* eta foraminiferoak batera suntsitzea katastrofe global berean, probableena da azken dinosauro fosila suntsipenaren muga baino hainbat metro beheragoko estratuetan agertzea, eta, foraminifero fosilek, aldiz azken geruzaraino irautea… Arrakastatsua gertatu zen egiteko modu berri hori, eta berriro ere lagindu ziren Montana eta Ipar Dakotako Hell Creek formazioko estratuak, eta laginketa-modu berriaren emaitzak ados daude suntsipen tupusteko baten eszenarioarekin.»

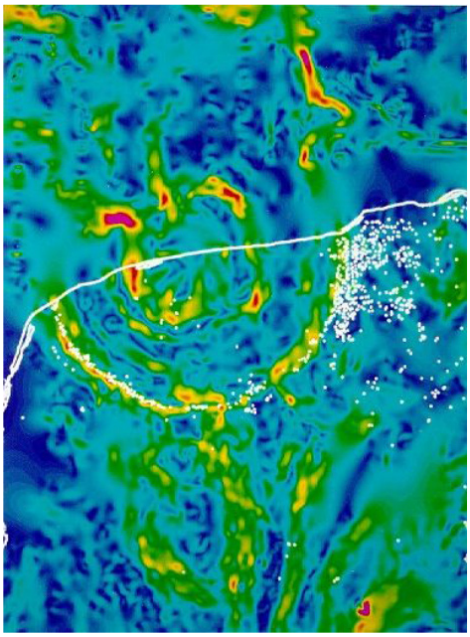
Philip Signor eta *Jere Lipps*, Kaliforniako Unibertsitateko paleontologoek ebatzi zituzten 1982an fosil-erregistroaren artefaktu horren xehetasun matematikoak. *Signor-Lipps* efektua deritzo fenomenoari [18].

Hala ere, esan beharra dago 80ko hamarkadan K/Pg mugako eztabaida polarizatu egin zela neurri handi batean, K/Pg mugako suntsitzea meteoritoaren inpaktuaren emaitza izan zela uste zutenen eta bolkanismo masibo bati egozten ziotenen artean. Hawaiko Kilauea sumenditik igortzen ziren gasek iridioa zutela aurkitu zenean, bolkanismoaren alde jarri zen eztabaida. Horrek esan nahi zezakeen K/Pg mugan behaturiko *iridioaren anomaliak* sumendietan izan zezakeela jatorria; beraz, meteoritoaren inpaktuaren proposamena zalantzan jarri zen. *George Bekov* fisikari errusiarrak eta haren taldeak platino taldeko elementuak neurtzeko gai zen «laser fotoionizazio teknika» garatu zuten [19], eta horren bidez, K/Pg mugan platinoaren taldeko elementuak (iridio, rodio eta rutenio neurtuak izan ziren) meteoritoetan aurkitzen diren proportzio berdinean zeudela frogatzea lortu zen. Sumendiek igorritako gasetan proportzio hori oso desberdina da. Neurketa horiek meteoritoaren inpaktuaren proposamena indartu zuten baina, hala eta guztiz ere, meteoritoaren inpaktuaren proposamenak oztopo gaindiezin bat zuen: inpaktua gertatu izan balitz, inpaktua gertatu zeneko kraterrak existitu beharko luke, eta 80ko hamarkadan ez zen kraterrik topatu. Hori inpaktuaren hipotesiaren aurkako arazo oso larria zen.

*Science*ko argitalpenean K/Pg mugako *iridioaren anomalia* Gubbiori dagokio bereziki, nahiz Danimarka eta Zeelanda Berria aipatu. Apurka-apurka munduko beste hainbat tokitan *iridioaren anomali*ak agertu ziren, Zumaian adibidez, eta egun 100 baino toki gehiagotan topatu da munduan zehar barreiatuta. 80ko hamarkadan barrena gero eta ebidentzia gehiago aurkitu ziren K/Pg mugan gertatutako suntsipenak inpaktuaren hipotesiaren bidez azaldua izateko, baina inpaktuaren kokapenak gordeta jarraitzen zuen, ez zen topatzen. Izan ere, *Luis W. Alvarez* Fisikan Nobel Saria jasotakoa eta inpaktuaren hipotesiaren aita 1988. urtean hil zenean, oraindik inpaktuaren kraterra aurkitu gabe zegoen, eta ez bazen topatzen zalantzan gera zitekeen hipotesia. Esan beharra dago *Luis W. Alvarez* azken unera arte borrokan ibili zela eta arlo horretan egin zuen azkenekoa neutroiak ak-

tibatzeko beste tresna bat asmatzea izan zen. Tresna berri horri esker iridio-analisiak kopuru handietan neur zitezkeen eta bidea eman zuen erregistro estratigrafikoaren sekuentzia osoak neurtzeko. 1986an neurketetarako prest zegoen eta, asmakizun horren bidez, *iridioaren anomalia* K/Pg mugan baino ez zegoela zehaztu ahal izan zen.

Inpaktuaren hipotesiak gutxienez froga bat gehiago behar du, iridioarena ez da nahiko. 10 km-ko diametroko meteoritoak Lurrarekin talka egin bazuen duela 65 milioi urte, krater handi bat sortu beharra zuen, 150-200 km-ko diametrokoa gutxi gorabehera. Non dago?



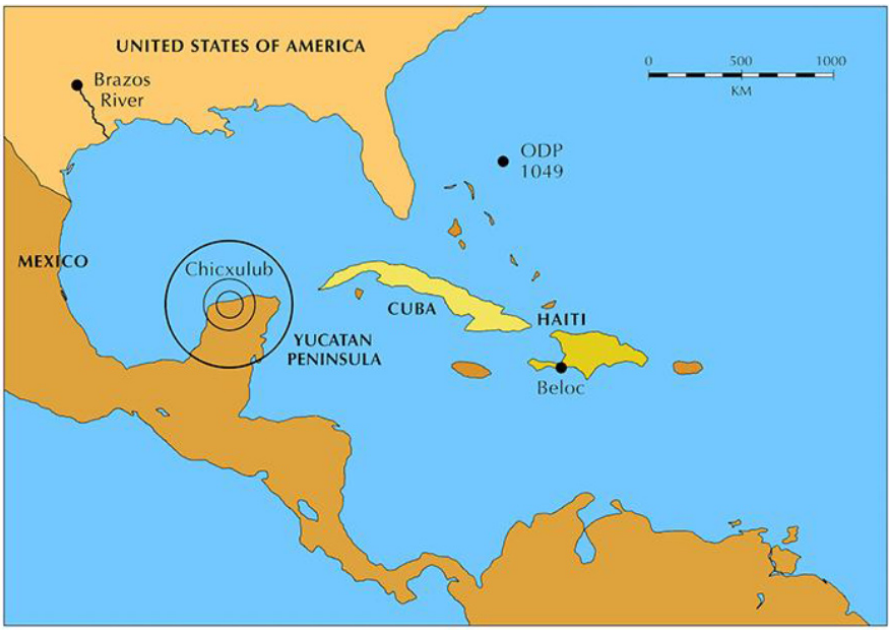
18. irudia. Grabitate-ikuskaritzaren mapa Chicxuluben. Lerro zuriak kostaldea adierazten du; beheko zatian lurra dago eta goikoan itsasoa. Ezaugarri kontzentrikoek kraterraren kokapena erakusten dute. Puntu zuriek «zenoteak» adierazten dituzte. «Zenoteen» eraztuna zirkuluerdiko ezaugarri handienarekin lotzen da, nahiz eta jatorri zehatza zein den argi ez dagoen. (Iturria [https://en.wikipedia.org/wiki/Chicxulub_crater]).

1990. urtean, «Petroleos Mexicanos (PEMEX)» enpresaren geologoek eta geofisikariek, petrolioaren bila, 1950ean Yucatánen egindako ikuskaritzak erakusten zuena jakin egin zen. Yucatán bezalako lautadetan, petrolioa aurkitzeko lehen urratsa grabitate-ikuskaritza egitea da, grabitate-indarraren aldaketa txikiak kartografiatzea, sakoneko arroken dentsitatean

aldaketak islatzen dituztenak, eta aldi berean, petrolioak izan ditzakeen egitura lurperatuak agerian uztea. Yucatánen grabitate-ikuskaritzak azaleraren azpian lurperatutako eta «Puerto Chicxuluben» zentratutako egitura biribil handi bat erakutsi zuen, iparraldeko kostaldean, Merida inguruan (ikusi 18. irudia). Enpresa baterako lana egiten duten profesionalek ez dute profesional akademikoek bezala artikulu zientifiko irekietan argitaratzen. Izan ere, lortzen duten informazioarekin enpresarako txosten konfidentzialak egiten dituzte. Hala ere, tarteka-marteka, eta bereziki kongresuetan, beren ikerketak publikoki erakusten dituzte. Izan ere, eta gezurra badirudi, 1981. urtean (*Science*ko artikulu apurtzailea argitaratu eta urte betera) PEMEXeko *Arturo Camargo* eta *Glen Penfield* geofisikariek [20] hitzaldi labur batean azaldu zuten PEMEXek Yucatán penintsulan zeraman proiektua.

Proposaturiko meteoritoaren inpaktuaren teoriarekin bat zetorren lurperaturiko egitura zirkular bat topatu zuten, 200 km inguruko diametroa zuena [21]. Inpaktuak sortutako kraterra izan zitekeen, baina kraterra zela ziurtatzeko, datazioen bidez duela 65 milioi urte sortua izan zela frogatu beharra zegoen, eta arroken egitura eta konposizioa inpaktu estralurtar batenak zirela. Oraindik beste ia bi urte luze pasatu ziren hori frogatu arte, eta horretan geologo eta geofisikari mexikarrek parte handia izan zuten. Gainera, frogapena sendoa izateko, ikerketa zientifikoak eskatzen duen bezala proposamen bakoitza beste zientzialariek jarritako kezkei aurre egin behar izan zien, proposamena gailentzeko komunitate zientifiko gehienak onar zezan. Topatutako meteoritoaren inpaktuaren kraterrari *Chicxulub*eko kraterra deitu ohi zaio (ikus 19. irudia), eta Yucatánen hain ezagunak eta turistikoki hain erakargarriak egiten diren «zenoteak» lurperatutako kraterraren manifestazioa dira. Izan ere, «zenoteek» *Chicxulub*eko kraterra oso ondo jarraitzen duen eraztun zirkular bat osotzen dute (ikus 18. irudia).

*Yucatán*eko *Chicxulbu* kraterra aurkitu ostean komunitate zientifikoan ia inork ez du zalantzan jartzen *Luis Alvarez*en hipotesiaren lehen zatia: K/Pg mugako *1 cm*-ko buztin-geruza duela 65 milioi urte inguru *Yucatán*en gertaturiko meteorito/asteroide baten inpaktuaren ondorio dela. Hipotesiaren bigarren zatia: besteen artean bolidoaren inpaktuak dinosauroen suntsipena eragin zuela, oso errotua egon arren komunitate zientifikoan aurkakoak ere baditu. Virginia Tech unibertsitateko *Dewey McLean* izan zen Indiako *Deccan Trap*-basaltoen [23] eta K/Pg mugako suntsipenen arteko loturaren alde argudiatu zuen lehena. *McLean*ek 1982 urtean *Deccan Trap*eko sumendi erraldoiek CO_2 kantitate oso handiak askatuz suntsipenak eragin zitzakeen berotegi-efektua eragin zutela [24] argitaratu zuen. Gaur egun ere, 2022. urtean, meteoritoak eragin zituen kalteak aztertzen dituzten argitalpenak [25] zein *Deccan Trap*-bolkanismoa/meteoritoa eztabaidan dihardutenak ere topa daitezke [26, 27].



19. irudia. Yucatán penintsulan 25 kilometro segundoko abiaduran talka egin zuen meteoritoak sortutako kraterraren kokapena. Meteoritoak 10 kilometro inguruko diametroa zuen eta 150-200 kilometro inguruko zabalera eta 25 eta 30 kilometroko sakonera duen kraterra sortu zuen. (Iturria [http://craterexplorer.ca/chicxulub-impact-structure/]).

6. **ONDORIOAK**

Amaitzeko, aipatu «Geologia 1-Fisika 0» artikuluan fisikariek proposaturiko (bereziki *Lord Kelvin*ek) Lurraren adinari buruzko hipotesiak geozientzialariek lortu zutela iraultzea azaldu zen eta egun ezagutzen dugun Lurraren 4.500 milioi urteko adina oinarrian berek proposaturikoa dela [1], eta horretarako hain baliotsua den datazio erradiometrikoa teknika garatu zuten. «Geologia 1-Fisika 1» artikulu honetan berriz, fisikariek (bereziki *Luis W. Alvarez*, Fisikan Nobel Sariduna) tortillari buelta ematea lortu zuten, eta oso errotuta zegoen uniformitarismoaren teoria, hots, Lurraren bilakaera eta haren biodibertsitatea gradualki (pixkanaka-pixkanaka) aldatuz doala dioen teoria ez dela nahiko zenbait jazoera azaltzeko. Orain jakin badakigu bat-bateko fenomeno katastrofiko batek egin gaituela gu munduko nagusi. Duela 65 milioi urte gertatutako kontingentzia horren ondoriozko eboluzio naturalak, gu, *Homo sapiens*ak, egin gaitu munduko nagusi. Yucatánen jauzitako tamainako meteoritorik ez balitz existitu, dinosauroak

mundu honetako nagusiak izaten jarraitu zuketen, segur aski. Beraz, egun ezagutzen dugun *Homo sapiens* kontingentzia baten ondorio da, eta nork daki beste kontingentzia batek ez ote duen beste nagusi bat ekarriko mundura. Egungo *Homo sapiens*, harrokeriaz betea, horrelako beste jazoera bat baztertu du hein handi batean, baina gogoratu dezagun 1994. urtearen uztailean komunikabideen estaldura handia atzean zuelarik, nola gutariko asko *Shoemaker-Levy 9* kometaren Jupiterren aurkako talka (ikus 20. irudia) ikusten egon ginen zuzenean gure ordenagailuetatik [28].

20. irudia. 1994ko uztailean gertatutako *Shoemaker-Levy 9* kometaren Jupiterren aurkako talka (adierazpen grafikoa).

Aurreko «Geologia 1-Fisika 0» artikuluan, «galtzaile» bat zegoen, *Lord Kelvin* fisikari ospetsua hain zuzen, eta «irabazle» argi bat *Arthur Holmes* geologoa [1]. Hori jakinda, dagoeneko ohartuko zinen zergatik jarri diodan artikulu honi «Geologia 1-Fisika 1» izenburua. *Luis W. Alvarez*, 1968ko Fisikan Nobel Saria jaso zuena, nire iritziz [15] artikuluaren arima eta «heroia» da. Berak proposatu zituen artikulu horretan aurkeztu diren proposamen guztiak (horrela dio *Walter Alvarez*ek [12]), eta bera izan zen ere guztiak kalkulatu zituena. Beraz, geologoen eta fisikarien arteko «partidua» berdintzea lortu zuen. Zoritxarrez, istorio horren amaiera dastatzeko aukerarik ez zuen izan.

ESKER ONAK

Maria Jesús Irabien eta Ainhoa Alonso UPV/EHUko Zientzia eta Teknologia Fakultateko Geologia Saileko irakasleak/ikertzaileak eskertzen ditut egin dizkidaten iruzkinengatik. Inari Plazaola eskertzen dut artikuluaren testua gainbegiratzeagatik.

BIBLIOGRAFIA

[1] Fernando PLAZAOLA, 2022. «Geologia 1-Fisika 0» *EKAIA*, **42**:253-281.
[2] Kepa ALTONAGA, 2021. «Iridioaren mintzoa. Meteoritoa eta dinosauroen akabantza» Pamiela argitalexea. ISBN: 978-84-9172-223-6.
[3] http://evolution.berkeley.edu/evolibrary/article/history_12.
[4] Alfred WEGENER, 1966. «The Origin of Continents and Oceans» (english Ed.), *New York: Dover*.
[5] Richard OWEN, 1842. «Report on the British Fossil Reptiles. Part II», *Rep. Br. Assoc. Advan. Sci.* **60**: 204.
[6] O. C. MARSH, 1895. «On the affinities and classification of the dinosaurian reptiles», *Am. J. Sci.* **50** (3): 483-498.
[7] M. J. BENTON, 1990. «Scientific methodology in collision: the history of the study of the extinction of the Dinosaurs» *Evolutionary Biology*, **24**: 371-400.
[8] Fernando PLAZAOLA, 1997. «Lurraren Eremu magnetikoa» *EKAIA*, **7**: 51-70.
[9] H.P. LUTERBACHER, I. PREMOLI SILVA, 1964. «Bioestratigrafia del limite cretaceo-terziario nell' Appenini centrale» *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, **70**: 67.
[10] Peter DOUGLAS WARD, 1992. «On Methuselah's Trail: Living Fossils and the Great Extinctions», *W.H. Freeman and Cia*, New York, ISBN 0-7167-2203-8.
[11] https://es.slideshare.net/JoaquinRibes/el-flysch-del-litoral-deba-zumaia; http://www.euskonews.eus/0568zbk/gaia56803es.html.
[12] Walter ALVAREZ, 1997. «Tyrannosaurus rex and the crater of doom» *Princeton University Press*, 41 William Street, Princeton, New Jersey 08540. Espainolezko bertsioa: Walter ALVAREZ, 1998. «Tyrannosaurus rex y el cráter de la muerte» *Crítica*, Barcelona, ISBN: 84-7423-902-8.
[13] Dale RUSSELL eta Wallace TUCKER, 1971. «Electromagnetic radiation and cosmic rays from the explosion of a nearby supernova» *Nature*, **229**: 553.
[14] I.S. SHKLOVSKY, 1968. «Supernovae» *Wiley*, New York, p. 377.
[15] Luis W. ALVAREZ, Walter ALVAREZ, Frank ASARO, Helen V. MICHEL, 1980. «Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary Extinction: Experimental results and theoretical interpretation» *Science*, **208** (4448):1095-1108.
[16] Luis W. ALVAREZ, Walter ALVAREZ, Frank ASARO, Helen V. MICHEL, 1982. «Current status of the impact theory for the Terminal Cretaceous extinction» *Geol. Soc. Am. spec. Pap*, **190**: 305-315.

[17] David M. Raup, 1986. «The Nemesis affair. A Story of the death of Dinosaurs and the Ways of science» *WW Norton & Co*. ISBN-10 : 0393319180. Espainolezko bertsioa: David M. Raup, 1990. «El asunto Némesis. Una historia sobre la muerte de los dinosaurios» *Alianza Editorial, S.A.*, Madrid, ISBN: 84-206-0514-X.

[18] Philip W. Signor, Jere H. Lipps, 1982. «Sampling bias, gradual extinction patterns, and catastrophes in the fossil record». Geological Society of America, Special Paper, **190**: 519-530.

[19] G.I. Bekov, V.S. Letokhov, V. N. Radaev, D.D. Badyuvkov, M.A. Nazarov, 1988. «Rhodium distribution at the Cretaceous/Terciary boundary analysed by ultrasensitive laser photoionization», *Nature* **332**: 146-148.

[20] G.T. Penfield, A. Camargo, 1981. «Definition of a major igneous zone in the central Yucatan platform with aeromagnetics and gravity» *Society of Exploration Geophysicists Technical Program*, Abstracts, and Biographies, **51**: 37.

[21] A.R. Hildebrand, M. Pilkington, M. Connors; C. Ortiz Alemán, R.E. Chavez, 1995. «Size and structure of the Chicxulub crater revealed by horizontal gravity gradients and cenotes». *Nature*, **376**: 415-417.

[22] https://en.wikipedia.org/wiki/Deccan_Traps.

[23] D. M. Mclean, 1982. «Deccan volcanism and the Cretaceous-Tertiary transition scenario: a unifying causal mechanism». *Syllogeus*, **39**: 143-144.

[24] D.G. Burtt, G. A. Henkes, T. E. Yancey, D. Schrag, 2022. «Hot atmospheric formation of carbonate accretionary lapilli at the Cretaceous-Paleogene boundary, Brazos River, Texas, from clumped isotope thermometry», *Geology*, **50**: 636-640. Doi:10.1130/G49674.1.

[25] E. Font, J. Chen, M. Regelous, A. Regelous, T. Adatte, 2022. «Volcanic origin of the mercury anomalies at the Cretaceous-Paleogene transition of Bidart, France», *Geology*, **50**:142-146. Doi:10.1130/G49458.1.

[26] V. Gilabert, S. J. Batenburg, I. Arenillas, J. A. Arz, 2021. «Contribution of orbital forcing and Deccan volcanism to global climatic and biotic changes across the Cretaceous-Paleogene boundary at Zumaia, Spain: », *Geology*, **50**: 21-25. Doi:10.1130/G49214.1.

[27] https://en.wikipedia.org/wiki/Comet_Sho.

Irakurtzeko gehigarriak

Stephen Jay Gould, 1995. «Dinosaur in a haystack. Reflections in natural history» *Harmony Books*. New York. ISBN 0-517-70393-9.

Wolfgang Frisch, Martin Mesched, Ronald Blakey, 2011. «Plate Tectonics: Continental Drift and Mountain Building» Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-540-76503-5. Doi:10.1007/978-3-540-76504-2.