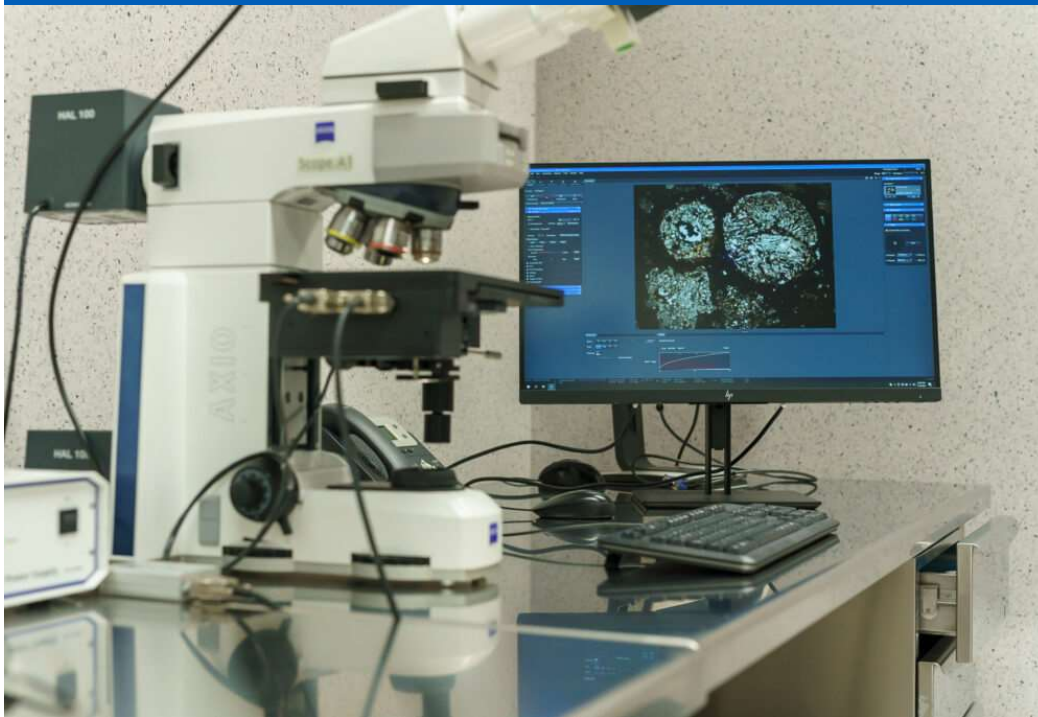


Estudiant meteorits per a conèixer les propietats fisicoquímiques d'asteroides, cometes i planetes

Dr. Josep M. Trigo i Rodríguez

Institut de Ciències de l'Espai (CSIC-IEEC), Barcelona.



Sala Blanca de Meteorítica i Mostres Retornades de l'ICE-CSIC

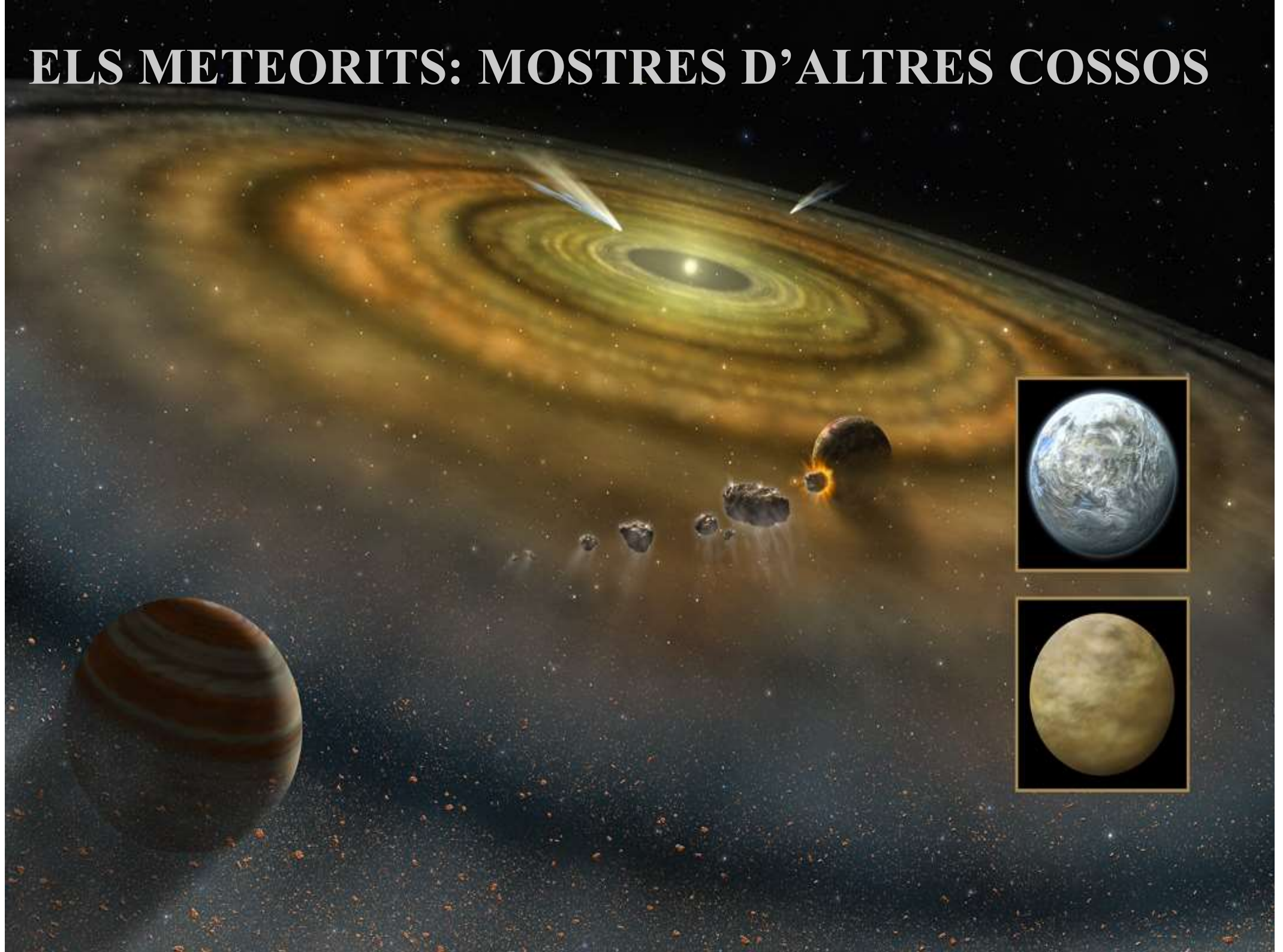
IEEC^R
Institut d'Estudis
Espacials de Catalunya

Institute of
Space Sciences



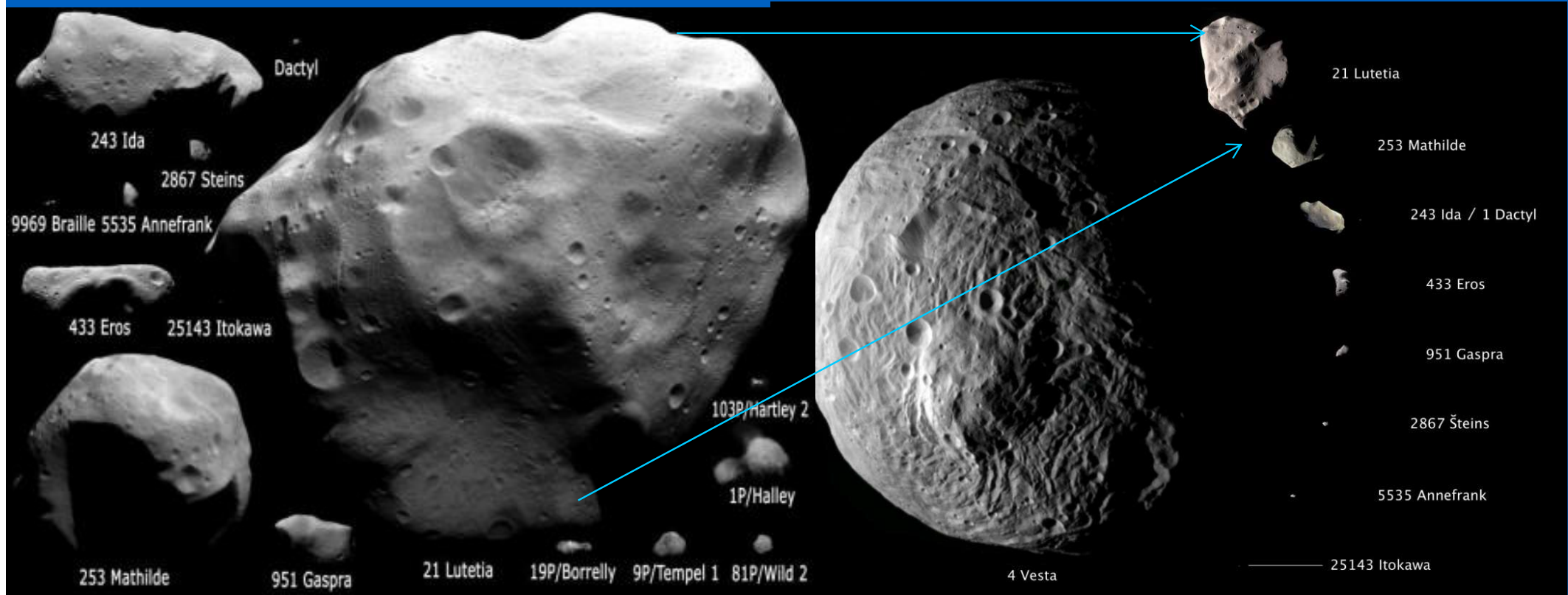
EXCELENCIA
MARÍA
DE MAEZTU

ELS METEORITS: MOSTRES D'ALTRES COSSOS



LES RESTES DE L'ACRECCIÓ:

majoritàriament asteroides no diferenciats (mai es van fondre)
però bombardejats i fragmentats per impactes



Els asteroides han patit nombroses col·lisions que els han esmicolat, tot generant roques en un rang ampli de propietats i dimensions

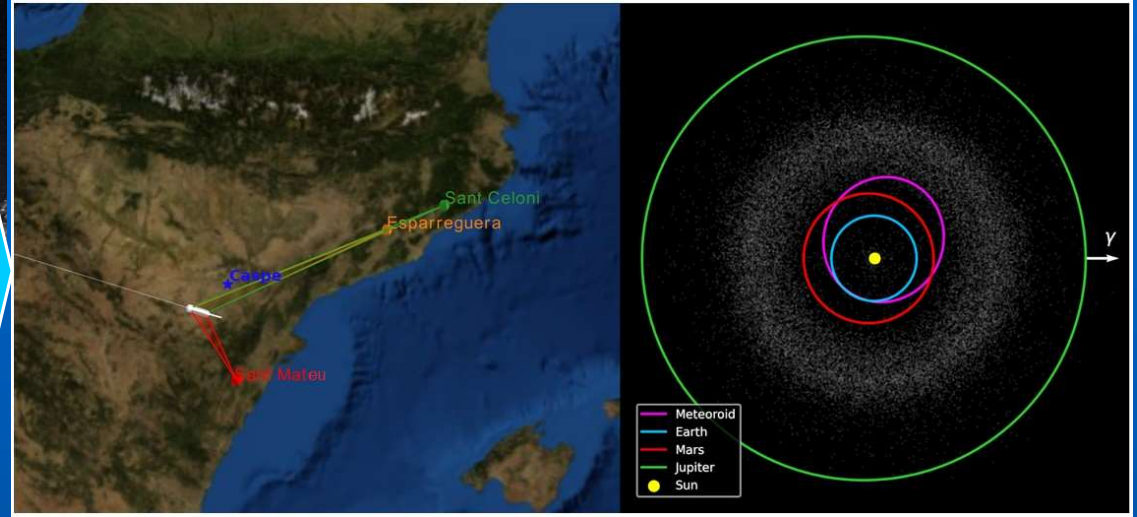
LA SEVA ARRIBADA CONTINUA...

- Unes 80.000 Tm de matèria interplanetària arriben anualment
- La majoria com a petites partícules que produeixen estels fugaçs (meteors)
- Bòlids o boles de foc: Meteors més lluminosos que el planeta Venus
- Meteoroides: Fragments de cometes o asteroides menors de 10 metres de diàmetre
- Meteorits: roques arribades a la superfície terrestre
- Estudiant cas a cas podem identificar els bòlids que generen meteorits (!)

Imatge TermCat

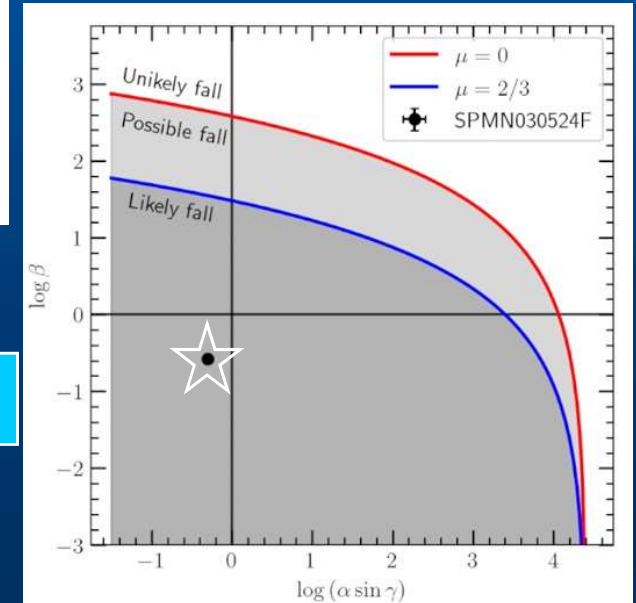
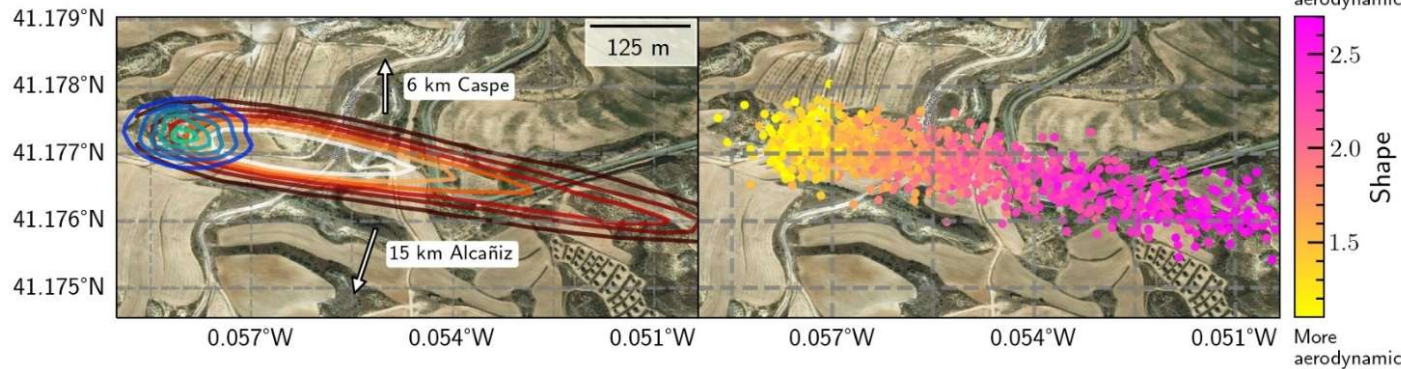
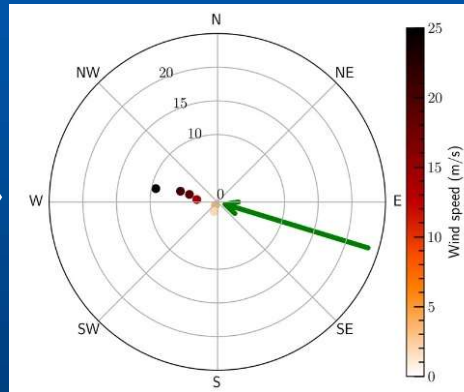


EXAMPLE: SPMN030524F “CASP”



apliquem la deriva del vent

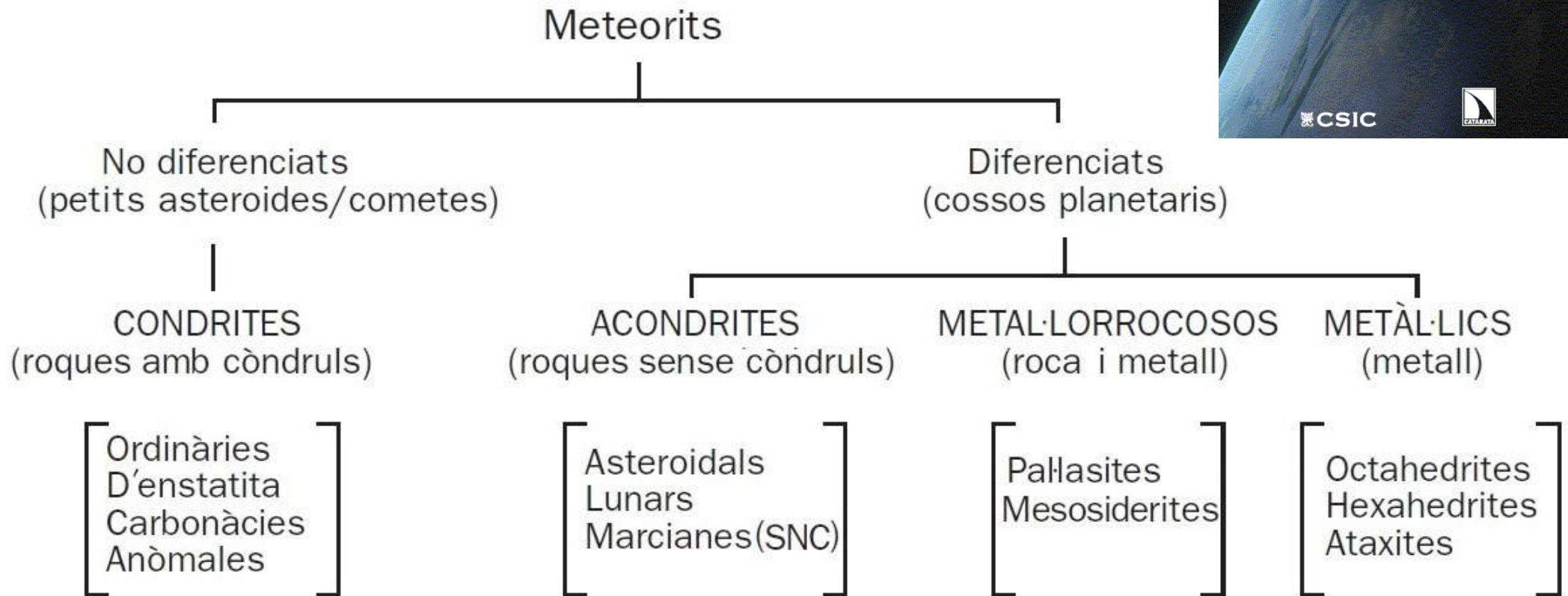
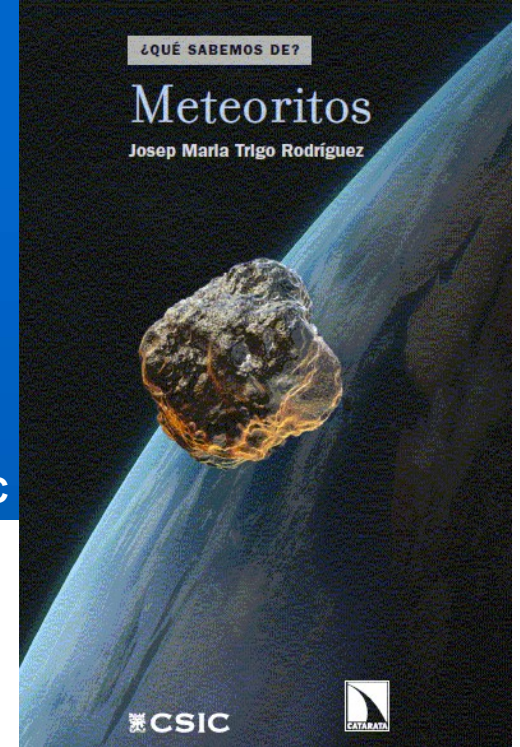
El·lipse de distribució dels meteorits



Probable caiguda!

TIPUS DE METEORITS

Adaptat del llibre "Meteorits" de Josep M. Trigo, Ed. Catarata-CSIC



ESTUDIS DE METEORITS



Meteorit Puerto Lápice 20-5-2007



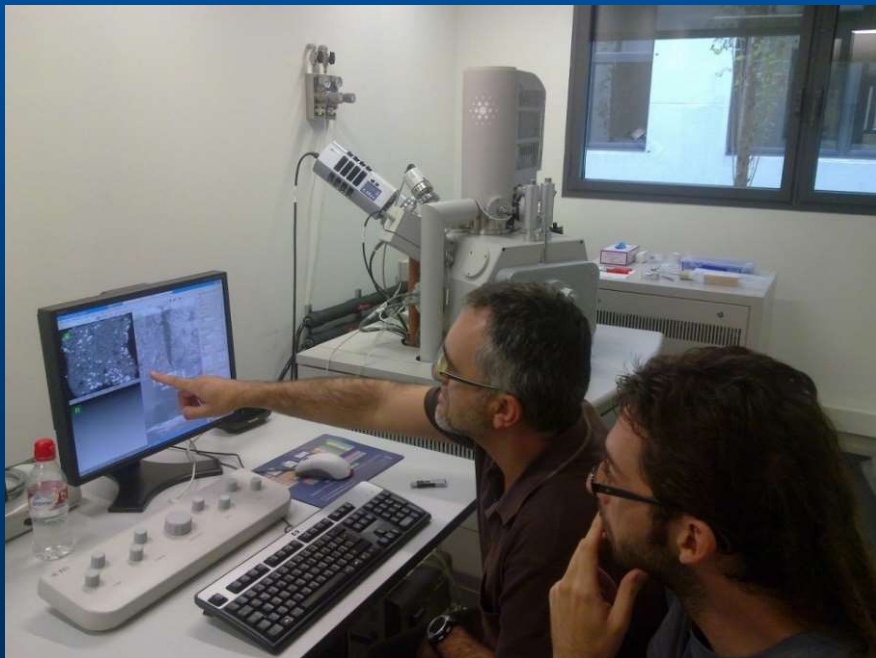
Villalbeto de la Peña caigut el 4-1-2004

- A l'Institut de Ciències de l'Espai (CSIC-IEEC) no només hem recuperat les últimes caigudes de meteorits a Espanya sinó que hem participat en la caracterització dels meteorits trobats a Espanya i d'altres països
 - Objectius principals:
 - Estudiar les fases inicials de formació del Sistema Solar
 - Identificar les diferents fases de formació de planetes, asteroides i cometes
 - Caracteritzar les fases minerals i l'origen dels diferents components
- Entre d'altres, fem servir els següents instruments:
 - Microscopi electrònic, SEM+EDX, TEM, Raman, microsonda, ICP-MS i espectròmetres UV-Vis-IR

TÈCNiques D'ANÀLISI



Anàlisi química: polvorització de la mostra



Microscopi electrònic (estudi secció prima)

- Petrologia i Mineralogia
 - Làmines primes: permeten conservar la informació de contorn en 2D
 - Instruments: Microscopi petrogràfic, SEM+EDX, microsonda, TEM
- Anàlisi Químic (destructives)
 - Determinació abundàncies químiques
 - Instruments: Absorció atòmica, ICP masses
- Tècniques físiques (no destructives)
 - Estudi de la composició en regions reduïdes de les làmines primes
 - Instruments: Microsonda iònica, SIMS (feix de $1\mu\text{m}$) ó nano-SIMS (feix de $\sim 50\text{ nm}$)
 - Tècniques complementàries: Ressonància magnètica Nuclear, ressonància de espín electrònica, espectroscòpia IR, i Raman
 - Propietats físiques: Magnetisme, porositat i densitat

CAMPANYES INTERNACIONALS

ANSMET: Antarctic Search for Meteorites

Imatges K. Joy







De l'Antàrtida fins a Barcelona...

- L'ICE-CSIC és repositori internacional de meteorits Antàrtics de la NASA des del 2010.
- Formem nous investigadors en recerca puntera en aquesta disciplina:
 - 5 tesis doctorals Cum Laude

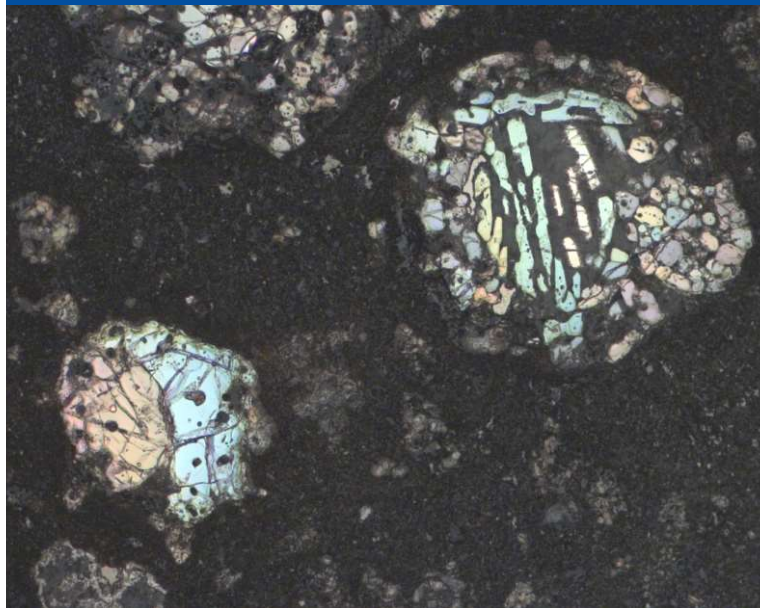


Sala blanca de Meteorítica i mostres retornades per missions espacials de l'ICE-CSIC

ALGUNES CONDRITES ANTÀRTIQUES DE NASA



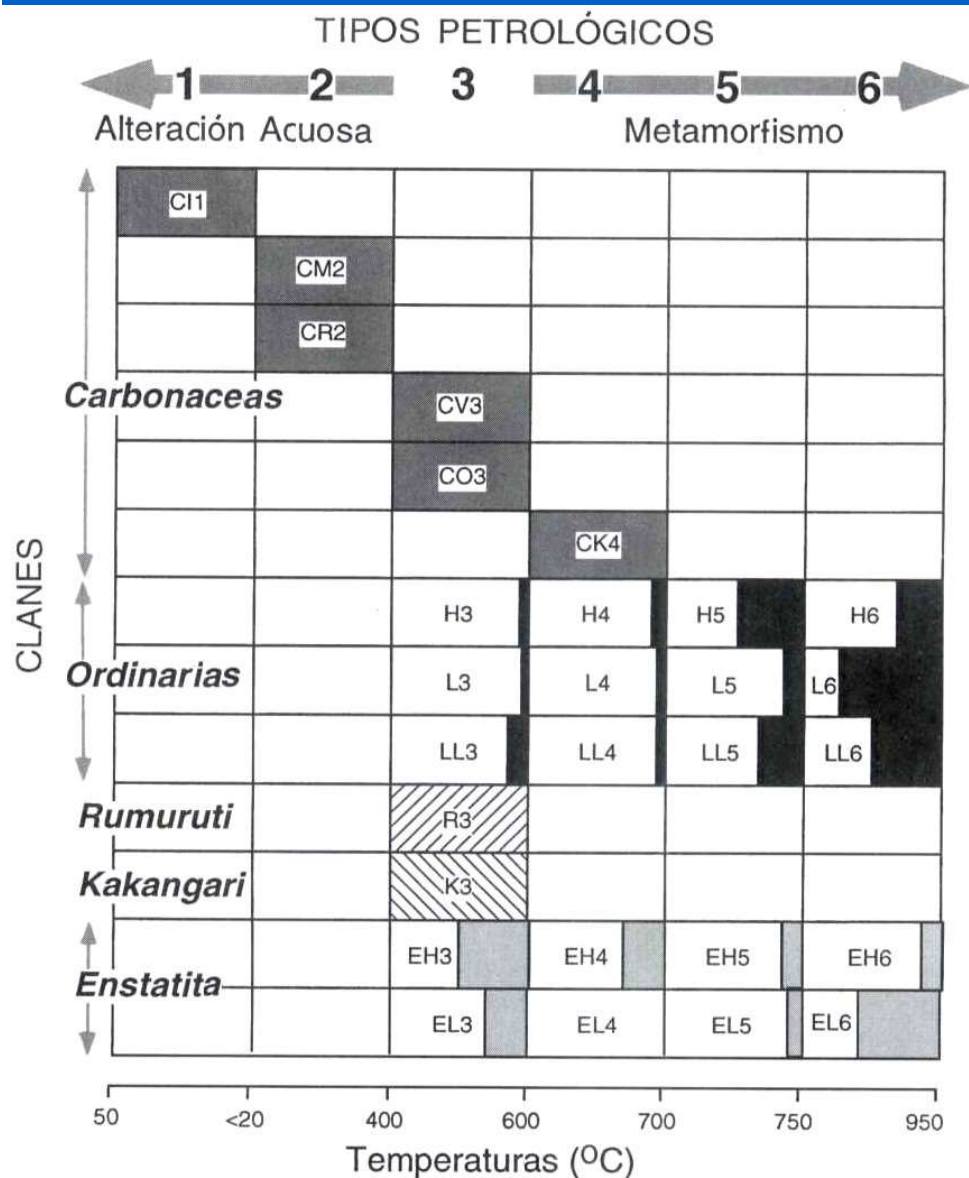
ALH 84028 CV3 chondrite



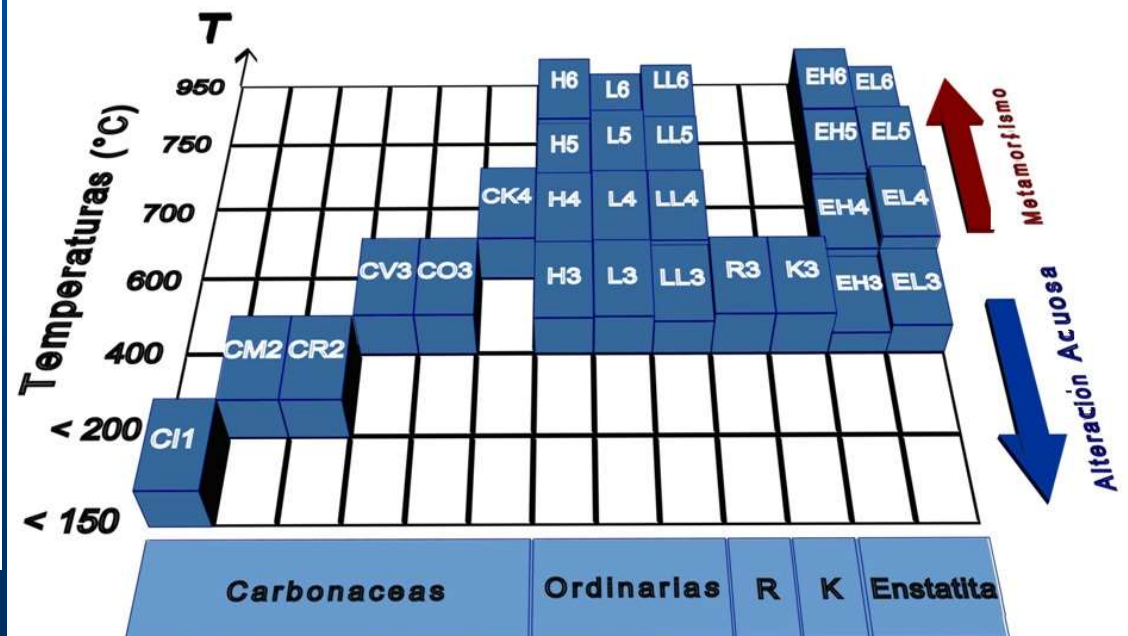
QUE99038 CM2

Meteorit	Grup	Grau d'alteració terrestre	Any
ALH 77003	CO3.6	Ae	1977
ALH 83108	CO3.5	A	1983
ALH 84028	CV3	Ae	1984
EET 92159	CR2	B/C	1992
GRA 95229	CR2	A	1995
LAP 02342	CR2	A/B	2002
MAC 02606	CM2	A	2002
MET 01070	CM1	Be	2001
MET 01074	CV3	B	2001
MIL 07689	CM1	C	2007
PRE 95404	R3	A	1995
QUE 97990	CM2	Be	1997
QUE 99038	CM2	A/B	1999
QUE 99355	CM2	B	1999
SCO 06043	CM1	~B	2006

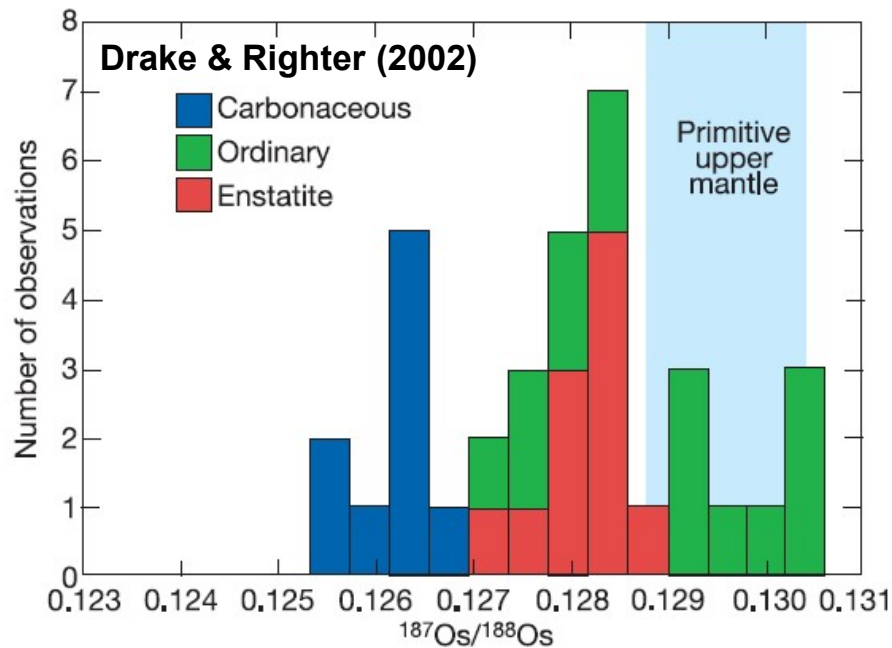
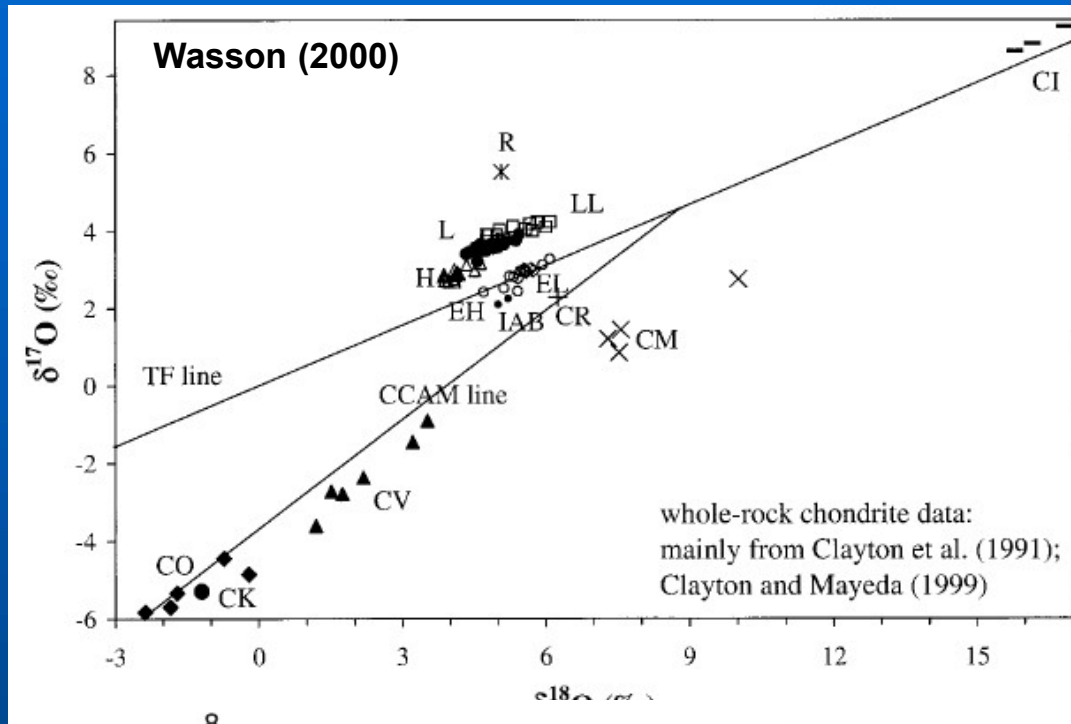
CONDRITES: GRUPS I TIPUS PETROLÒGICS



- Grups principals: carbonàcies, ordinàries i d'enstatita:
 - Grups condrites carbonàcies: CI, CM, CR, CO, CV, CK, CH i sense agrupar
 - Grups de condrites ordinàries: H, L, LL
- *Tipus petrològics* caracteritzen el grau de metamorfisme o alteració aquosa
 - Una condrita de grau 3.0 representa un material molt primitiu, essencialment inalterat: p.e. Semarkona LL3.0



ELS BLOCS FORMATIUS DE LA TERRA



- Clayton et al. (1973) evidencià que els quocients isotòpics d' O cauen lluny de la línia de fraccionament terrestre (TF)

$$\delta^{18}\text{O} = \left[\frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{muestra}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{SMOW}}} - 1 \right] \times 1000$$

– SMOW: *standard mean ocean water*

- Els diversos planetesimals, depenent de la seva regió i instant de formació retingueren abundàncies isotòpiques diferents (Wasson, 1972)

– Les CCs cauen a la línia CCAM (minerals anhidrins de condrites carbonàcies)

- Per major prova, els gasos provinents del mantell terrestre posseeixen signatures isotòpiques de les condrites:

– Isòtops de Os (Walker et al., 1996)

LES CONDRITES ORDINÀRIES

- A diferència de les carbonàcies formaren part d'asteroides grans on patiren processos d'alteració radioactiva, tèrmica i aquosa que modificaren els components de la matriu mineral.
- Tres grups principals: H, L, i LL.
- També un grup apart són les condrites d'enstatita: més reduït que la resta
- Es caracteritzen per una escorça de fusió prima, fosca i opaca feta de magnetita, conseqüència del fregament i l'ablació amb l'atmosfera a hipervelocitat
- En general per tenir 1 kg de condrita supervivent, la roca inicial (preatmosfèrica) hauria de tenir >100 kg (una roca al voltant de 20 cm a l'entrada a l'atmosfera)

Condritas ordinarias L6 de Villalbeto de la Peña ↓ y Viñales → (ICE-CSIC)

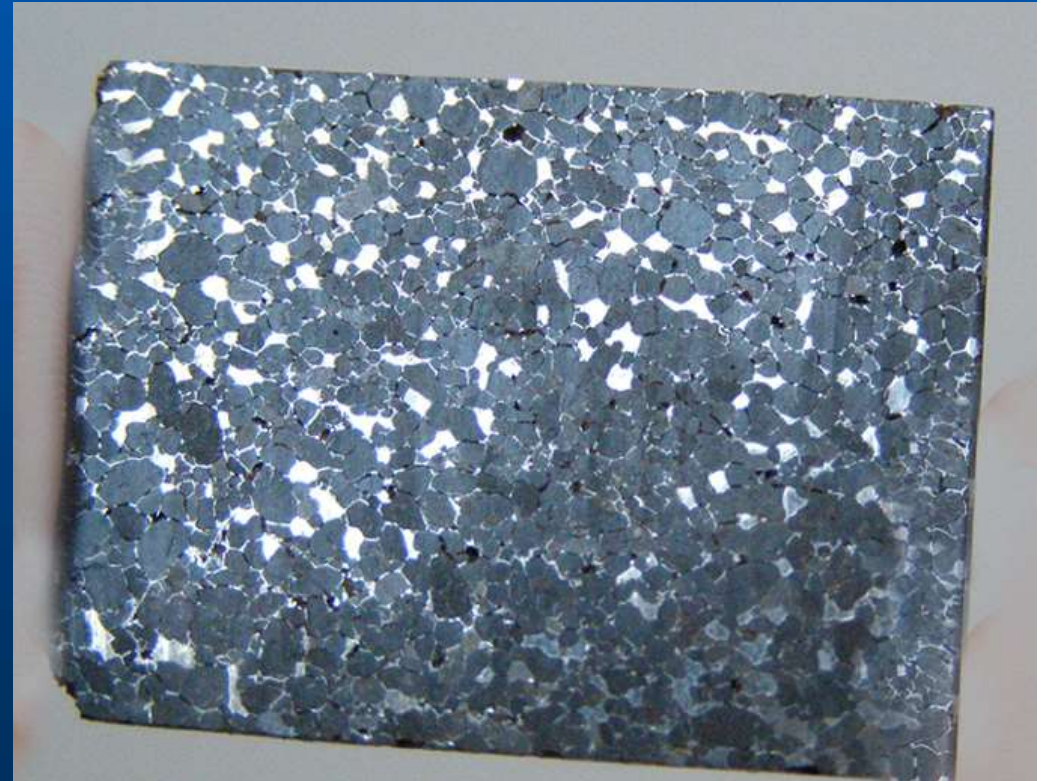


CONDRIITES D'ENSTATITA

- Contenen abundant enstatita (MgSiO_3) en composició
 - Silicats pobres en Fe y el metal contiene abundante Si
- Representatives del material que va formar la Terra (Clayton et al., 1984)
 - Posseeixen isòtops d'oxigen semblants als de les roques terrestres
 - Formades en condicions de manca d'oxigen i, particularment, d'aigua
 - Prou rares a les col·leccions (50 identificades per la Meteoritical Society)
- Dos grups principals:
 - EH: Riques en Fe, altament reduïdes (minicóndrules)
 - EL: Pobres en Fe (còndruls de tamany milimètric)



Condrita EH4 Abbe (New England Met. Serv.)

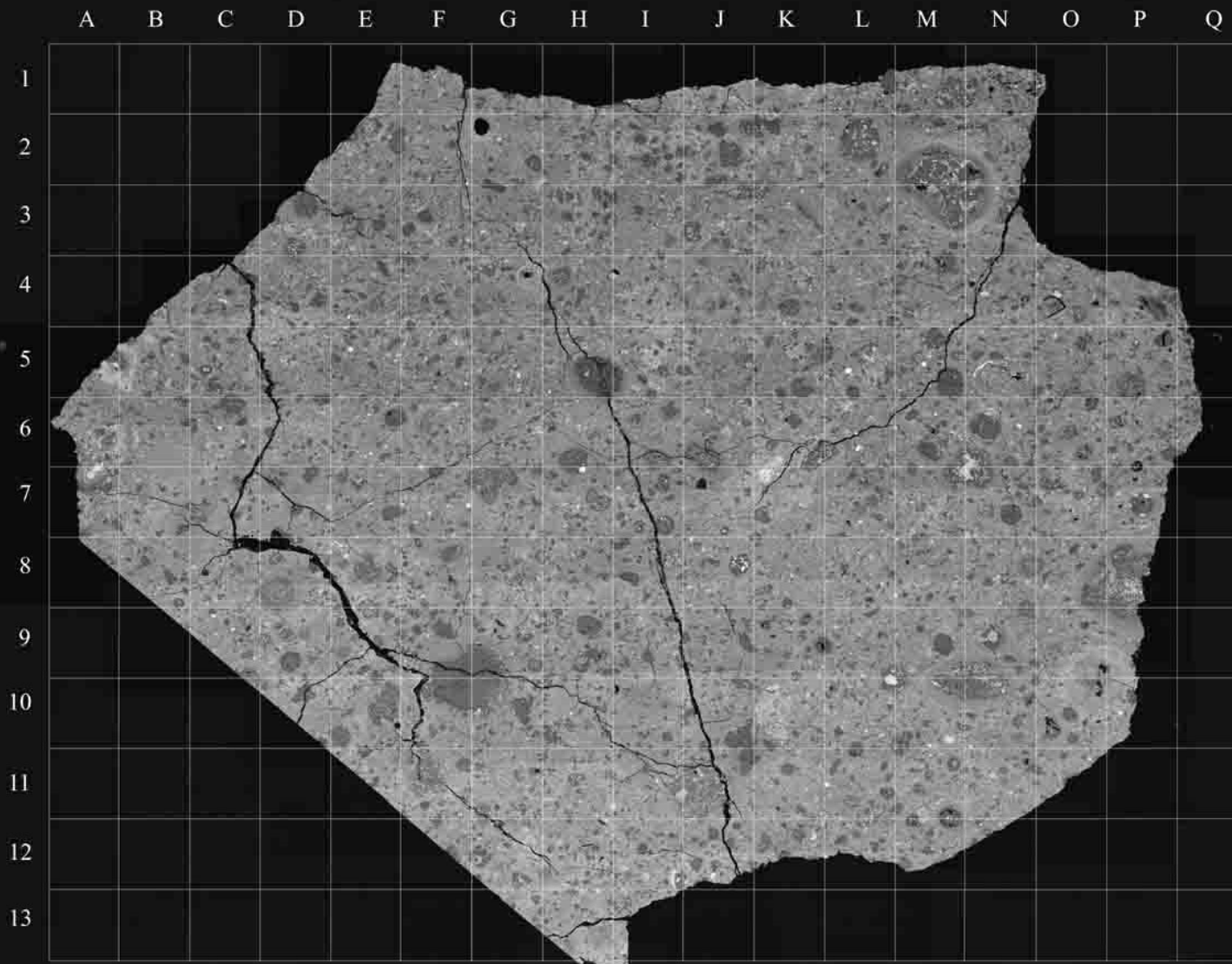


Condrita EH7 Itqiy (J. Redelsperger)

LES FASCINANTS CONDRIITES CARBONÀCIES

Murchison USNM 5376-5

CM2 chondrite



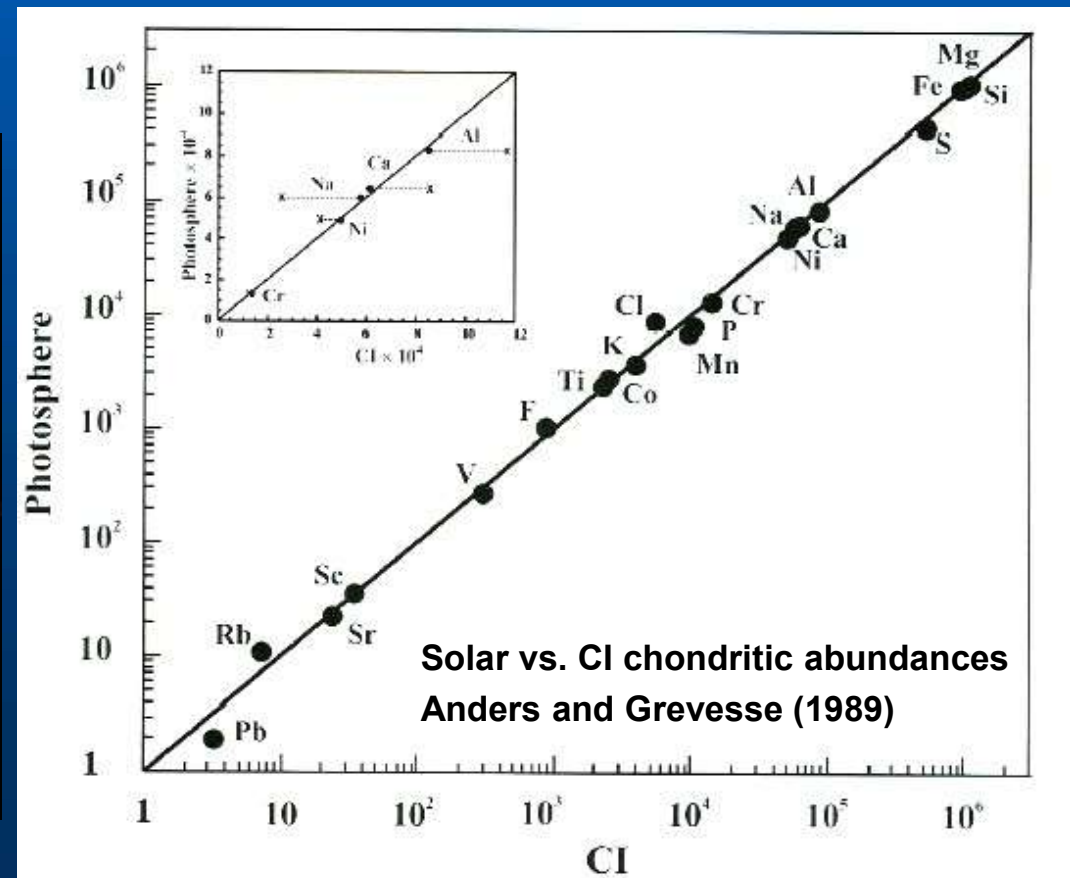
- **Procedents d'asteroides i objectes de transició petits**
- **Contenen fins al 12% en massa**
- **Incipient matèria orgànica (fins a 4% en massa de C):**
 - Aminoàcids
 - Bases nitrogenades
 - Fosfats
- **Degut a la seva baixa inèrcia tèrmica arriben a la superfície terrestre sense alteració**

COMPOSICIÓ “SOLAR”

- Anders & Grevesse (1989) van comparar les abundàncies químiques mesurades a la fotosfera solar amb les de meteorits primitius (condrites)
 - Excelent ajust amb les condrites carbonàcies del grup CI (Ivuna)
- A la literatura científica s'assumeix aquesta composició química com “solar”
- Les condrites CI es troben entre els materials més fràgils però han estat sotmesos a alteració aquosa extensa
 - Resultats de la missió Genesis indiquen que aquests meteorits posseeixen menor abundància en ^{16}O que el Sol (McKeegan et al., 2008)



CI chondrite Orgueil (caído en 1864)



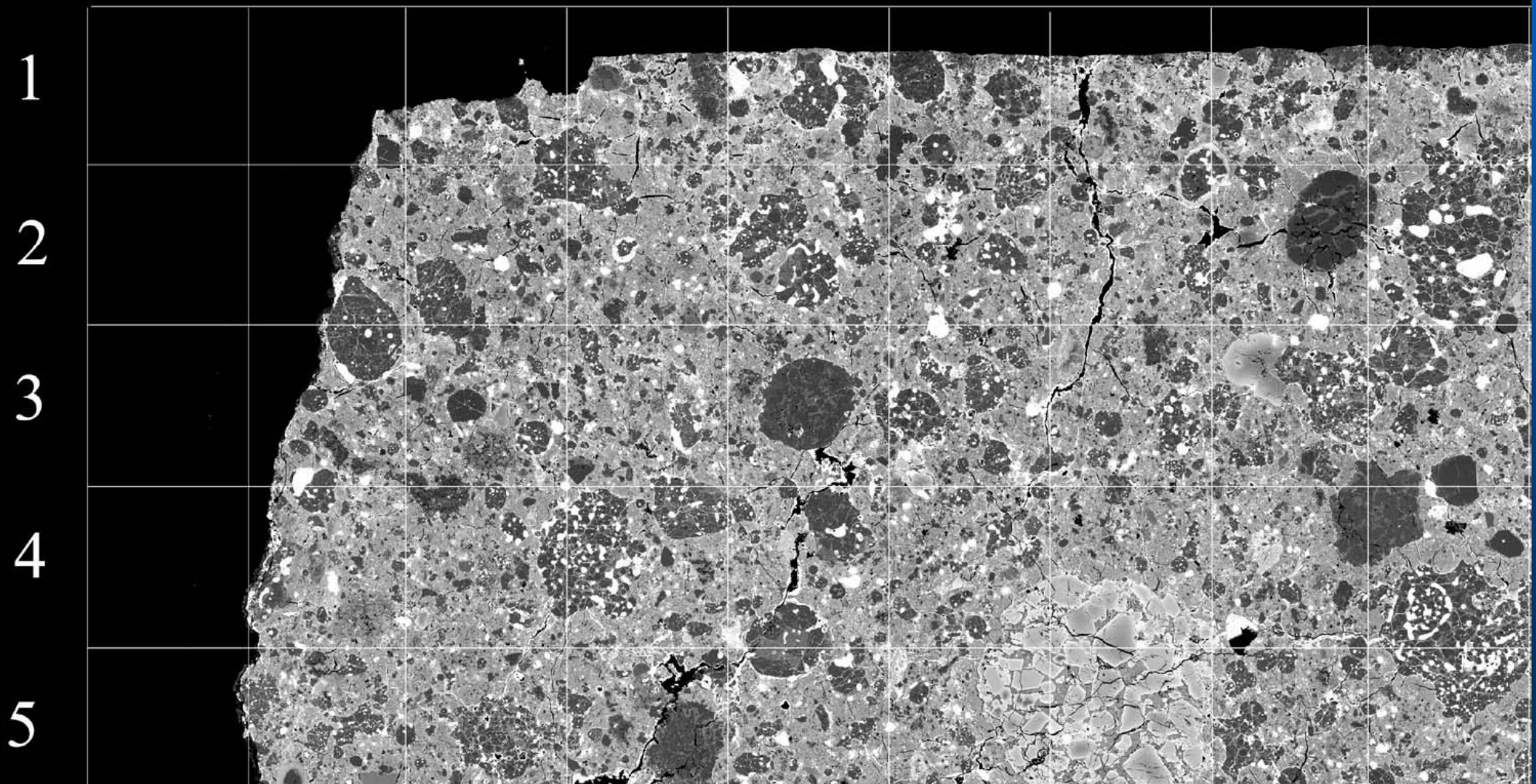
PRIMITIVES CONDRITES CARBONÀCIES

ACFER 094 M9324

1 mm

Ungrouped (CM-like) Acfer 094 (Trigo-Rodríguez et al., 2006)

A B C D E F G H I I



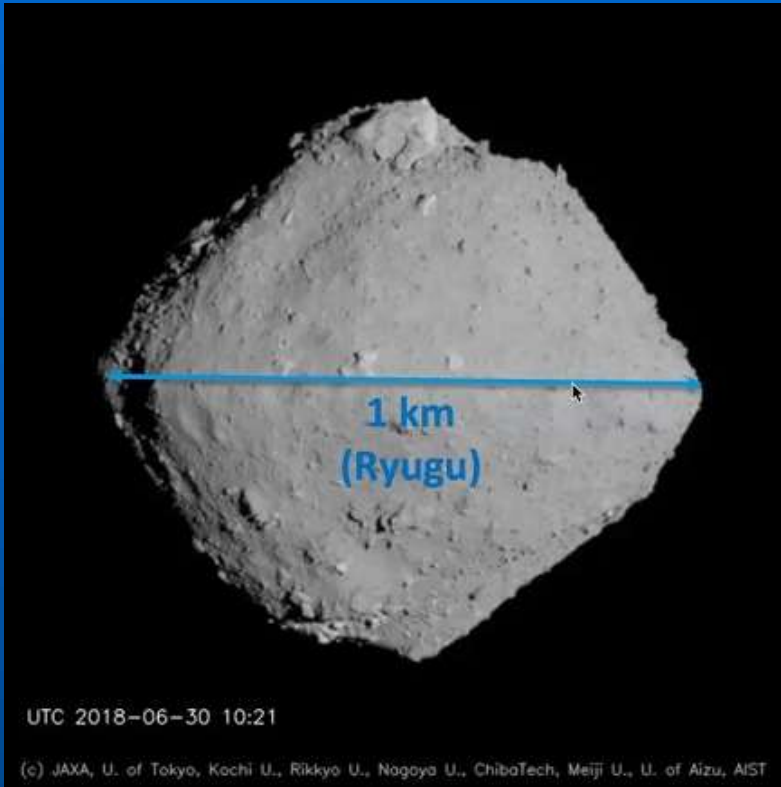
ASTEROIDES DE NATURA CONDRÍTICA

253 Mathilde, NEAR Shoemaker (NASA)



- Els progenitors de les condrites carbonàcies són asteroides carbonacis com ara 253 Mathilde
- Alguns d'aquests asteroides han patit cert escalfament (metamorfisme) associat a impactes
- Alguns altres han experimentat alteració aquosa fins a diferents graus (Trigo-Rodríguez et al., 2006, 2022)

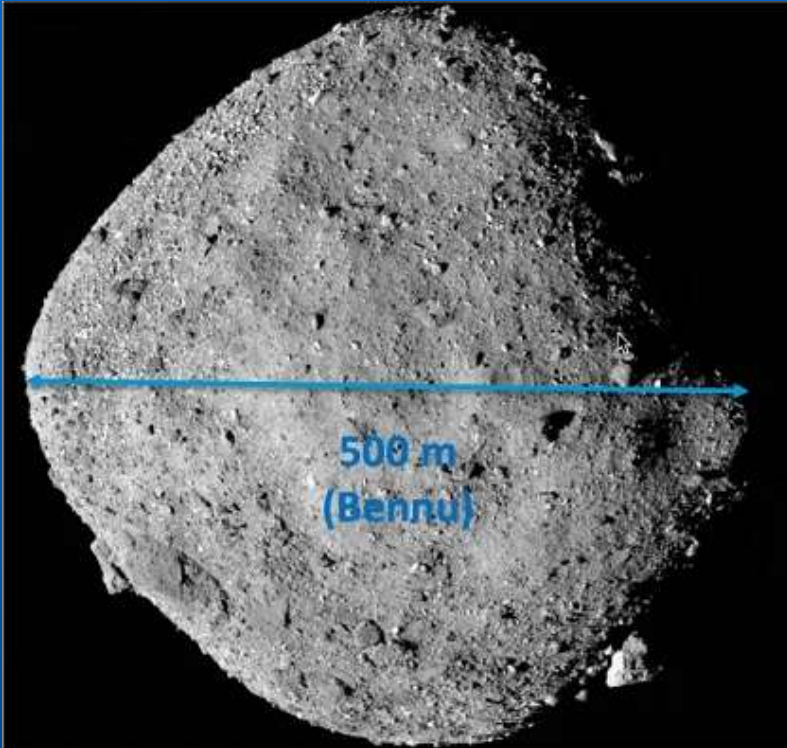
RYUGU CAPTAT PER HAYABUSA 2



Hayabusa 2 recollint mostres (JAXA)

- Després de visitar l'asteroide Itokawa amb la sonda Hayabusa, JAXA decidí fer una 2ona missió a l'asteroide de natura carbonàcia: Ryugu
- La sonda Hayabusa 2 assolí el seu objectiu en juny de 2018
- La missió ha estat exitosa en aconseguir mostres de dos llocs diferents de l'asteroide.
- Va situar també el primer “lander” a un asteroide (MASCOT)
- A més a més produïren un impacte artificial per tal d'aprendre sobre l'excavació de cràters sota baixa gravetat
- Espectres i mostres retornades han associat l'asteroide amb condrites carbonàcies tipus Ivuna (CI), afectades per alta temperatura

BENNU VIST PER OSIRIS-Rex (NASA)

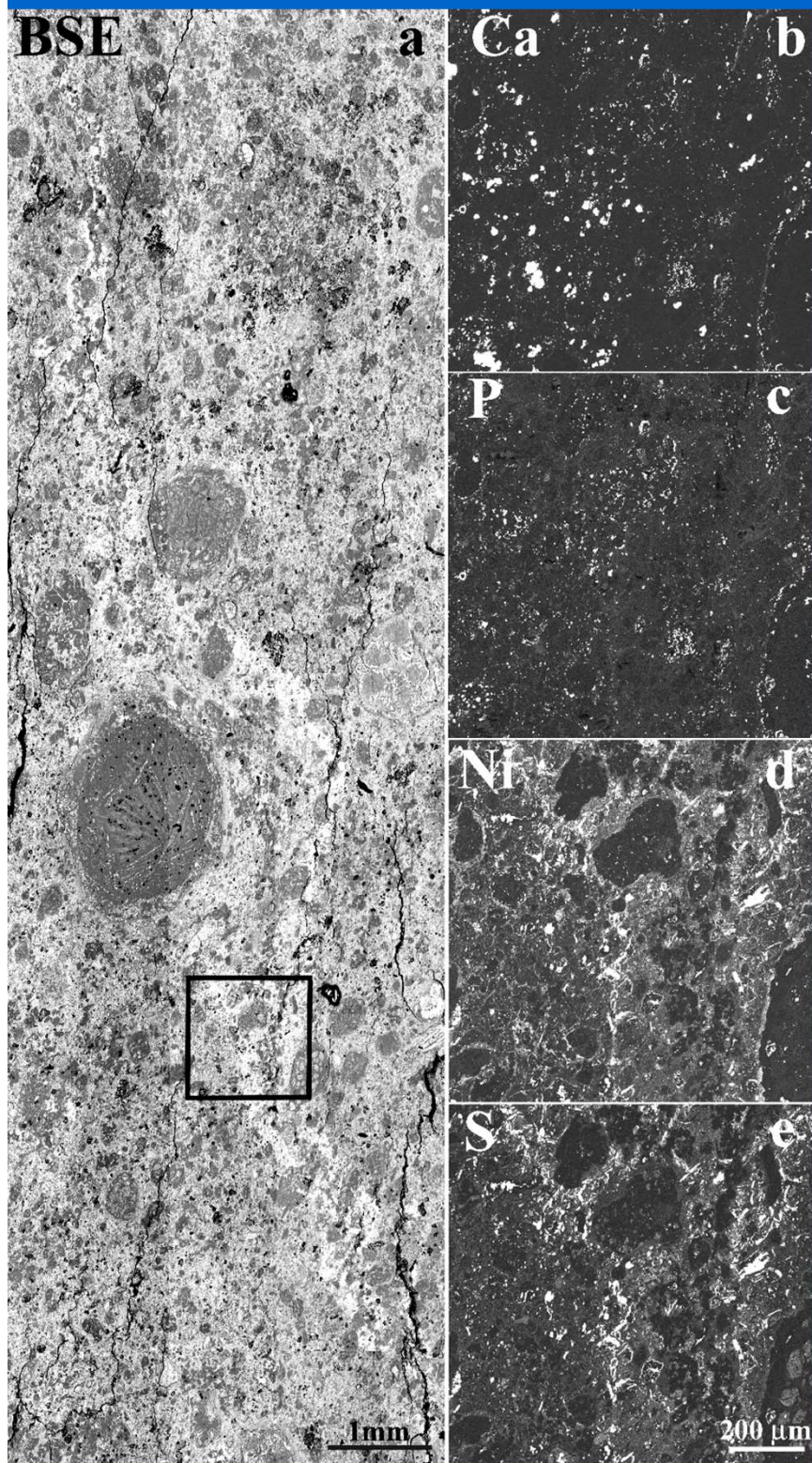


- Va arribar a Bennu en Dic. 2018
- Va aconseguir recollir 121 g
- La sonda que més s'ha acostat a un cos celeste
- El més petit "orbitat" fins ara
- Caracterització completa de l'asteroide Bennu, que tingué activitat aquosa extesa
- Minerals d'alteració aquosa
- Emparentats amb les condrites CI / CM



OSIRIS-REx imagery (NASA)





FLUXOS D'AIGUA A ASTEROIDES!

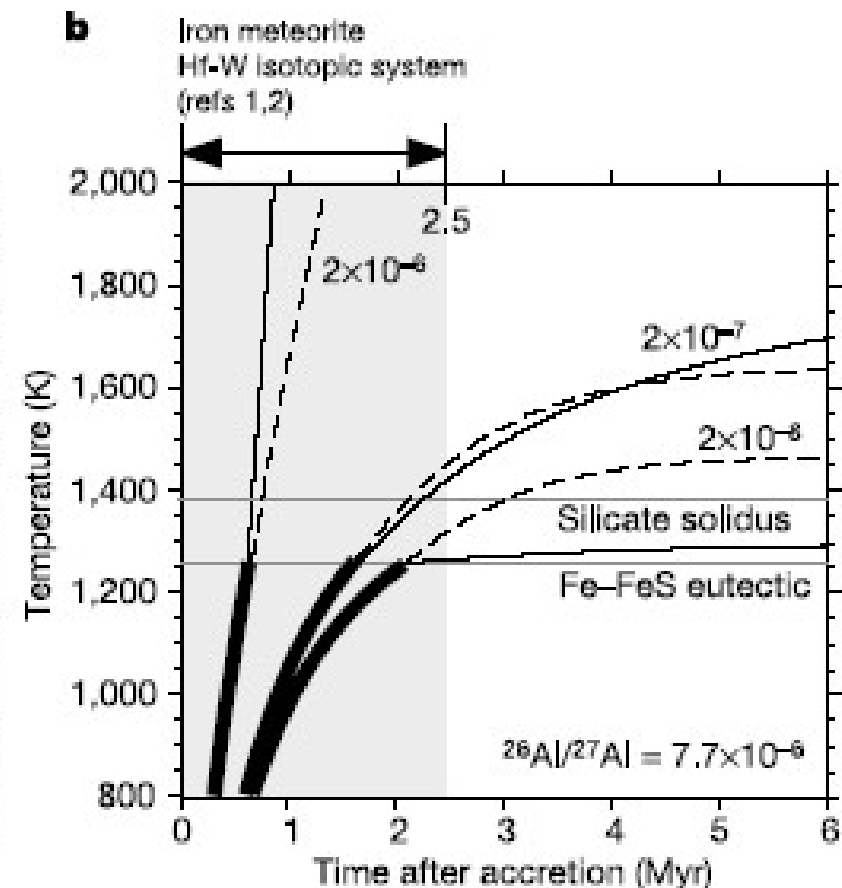
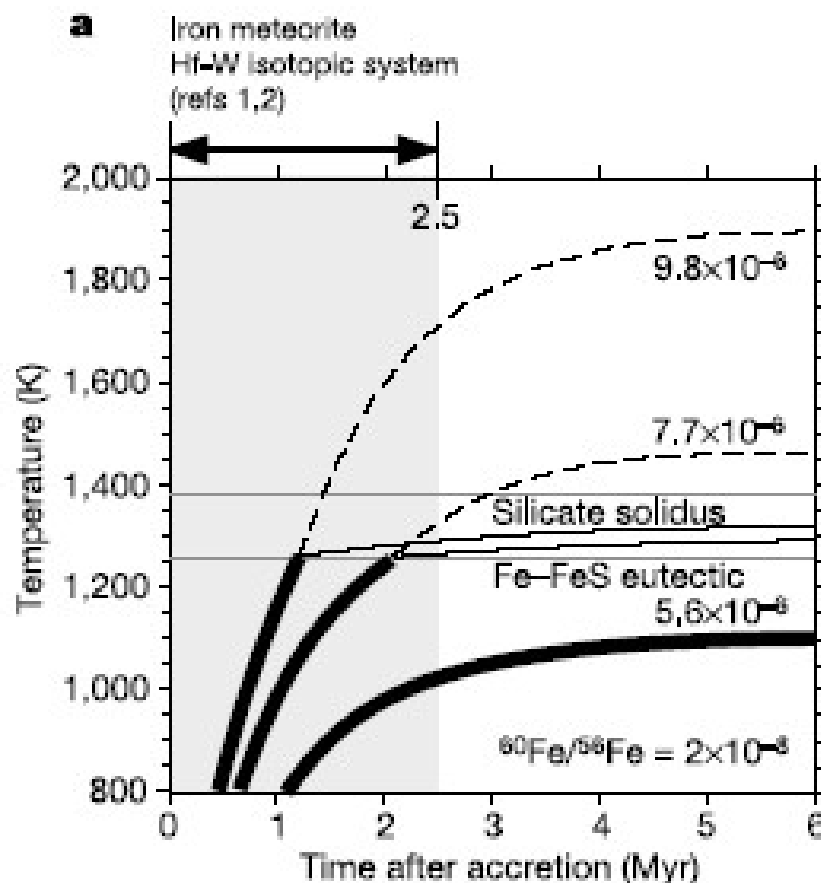
- Descobriments de minerals precipitats sobre la matriu de la condrita carbonàcia Antàrtica MET 01070 (Trigo-Rodríguez & Rubin, LPSC, 2005)
- Lents produïdes per la mobilització de SiO_2 and MgO des de les còndruls i inclusions fins a la matriu, on precipitaren (Trigo-Rodríguez et al., 2006)
- Evidència de flux d'aigua en l'asteroide progenitor

• COMPOSICIÓ DE LA LENT

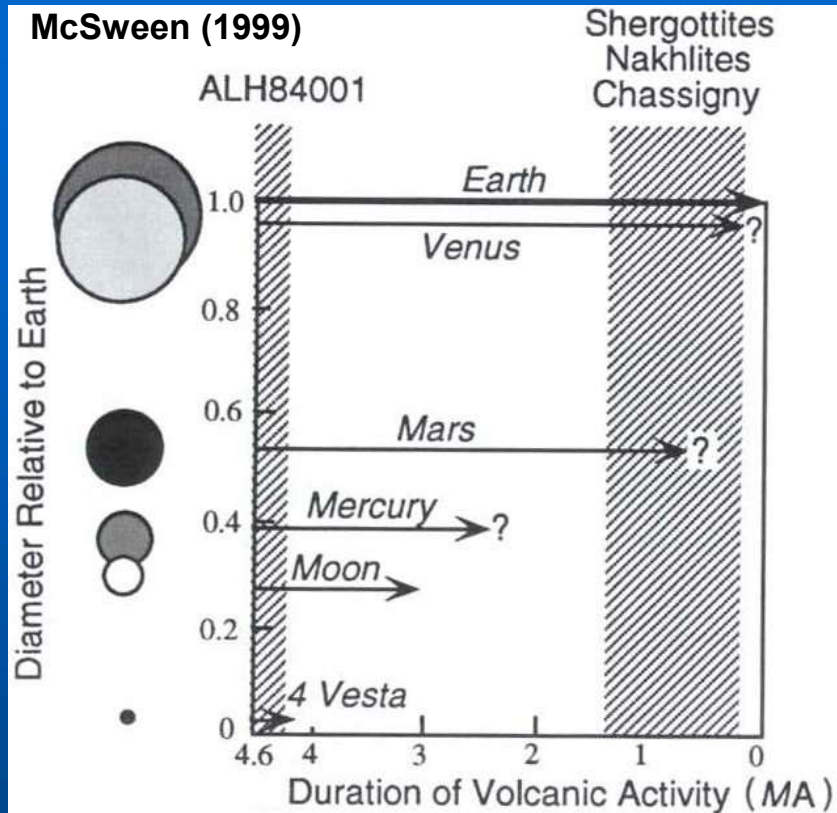
SiO_2	27.0 ± 4.6
TiO_2	0.10 ± 0.06
Al_2O_3	2.5 ± 0.38
FeO	35.8 ± 3.5
Cr_2O_3	0.42 ± 0.18
MnO	0.25 ± 0.04
MgO	16.4 ± 2.2
CaO	0.15 ± 0.19
Na_2O	0.20 ± 0.03
K_2O	$<0.04 \pm 0.01$
P_2O_5	$<0.04 \pm 0.07$
NiO	0.72 ± 0.44
S	1.5 ± 0.97

LA DIFERENCIACIÓ QUÍMICA

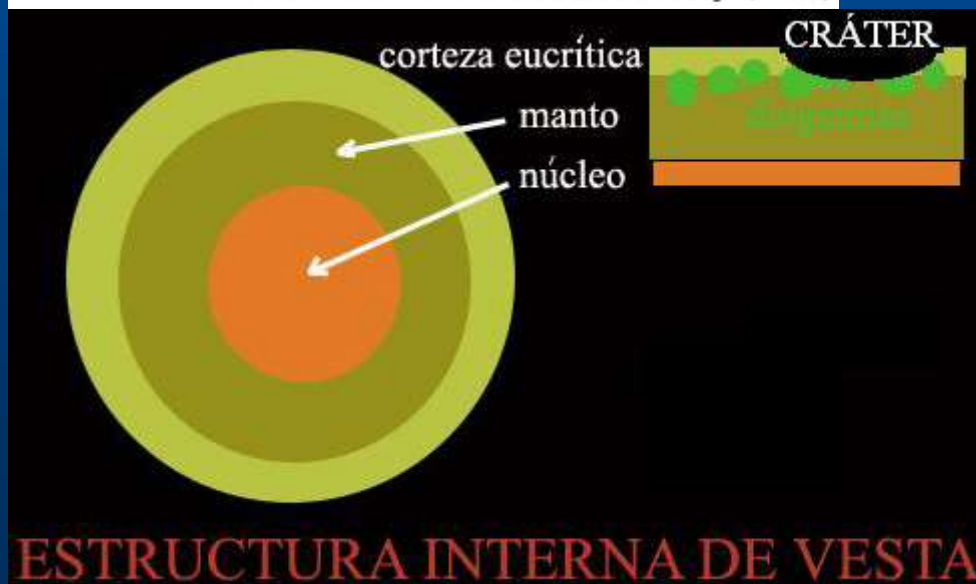
- Els cossos amb un radi major d'uns 30 km experimentaren suficient escalfament per desintegració de ^{26}Al i ^{60}Fe com per a patir diferenciació química (Yoshino et al., Nature, 2003; Mostefaoui et al., ApJ (2005))



LA DIVERSITAT D'ACONDRITES



- Van formar-se per processos ignis en cossos planetaris de centenars de km de diàmetre
 - Molts son roques ígnies generalment de natura basàltica
 - L'activitat ígnea va tenir una extensió i durada diferent depenent de l'objecte pare
- A banda de la mineralogia i petrologia peculiar de cada grup, els quocients diferenciats als isòtops d' O permeten associar-los a diversos progenitors
 - Principals acondrites asteroidals:
 - Primitives: Acapulcoïdes, Lodranites, Brachinites, Winonaites i Ureilites
 - HED: Presumiblement de l'asteroide 4 Vesta
 - D'altres progenitors: Angrites i Aubrites



Eucrita Puerto Lápice (Vesta)

LES ACONDRITES

- Així doncs, van formar-se per processos de **fusió i recristalització** als asteroides i planetes progenitors
- N'hi han de molts diversos tipus



Bilanga (diogenita)

Dhofar 125



EXEMPLE D'AUBRITA



Peña Blanca Springs (CSIC-IEEC)

ACONDRITES LUNARS



LAP 02205 (NASA)



Lunar mare basalt 15555 (Johnson Space Center)

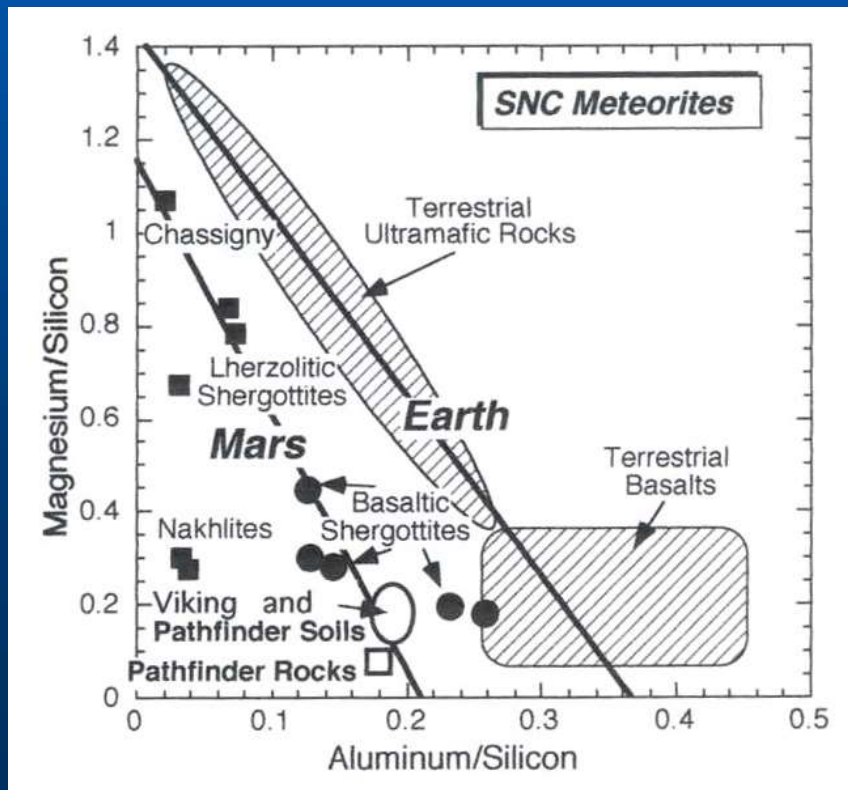
- La *Meteoritical Society* ha catalogat fins ara uns 130 meteorits lunars
 - Mostres de diversos terrenys: terres altes, i baixes (basalts), bretxes d'impacte, etc...
 - Datadas entre 3.200 y 4.500 M.A.
- La majoria s'han recuperat a les regions polars i desèrtiques (>99%)
 - Certa versemblança amb roques terrestres
- Principales tips:
 - Basàltics: Representatius dels mars lunars
 - Anortosítics: Terres altes (~90% plagioclasa + piroxè i olivina)
 - Altres tipus: gabbros y bretxes
- Roques lunars:
 - Missions Apol·lo de NASA (382 kg) i Lluna de la Agència URSS (0.3 kg)
 - RL 15555: Permeté datar el flux de llava que va formar el Mare Imbrium fa uns 3.310 ± 30 MA (Podosek et al., 1972)

ACONDRITES MARCIANES

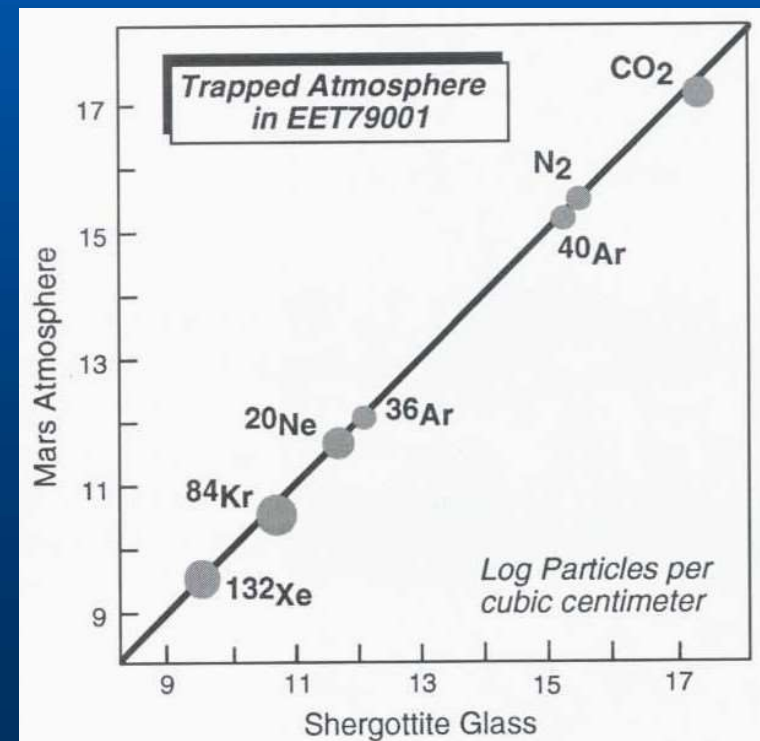
- S'han catalogat uns noranta meteorits procedents de Mart
- Composició distingible pels quocients Al/Si i Mg/Si, diferents entre les roques terrestres i marcianes (resultats de les sondes Viking)
- També s'anomenen genèricament a la literatura: SNCs
 - Acrònim dels meteorits-tipus dels 3 principals grupo: Shergotty (India, 1865), Nakhla (Egipto, 1911) i Chassigny (França, 1915)
- El seu origen marcià va ser corroborat a partir de l'estudi dels gasos atrapats durant la cristallització de la shergotita EET 79001



EET 79001



McSween (1999)

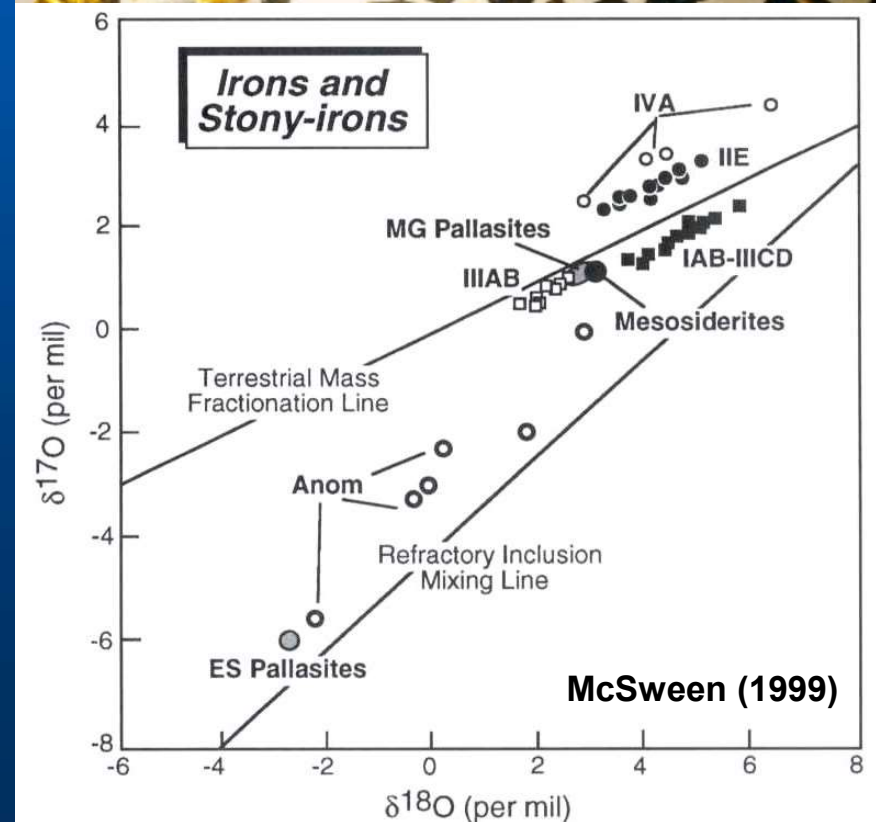
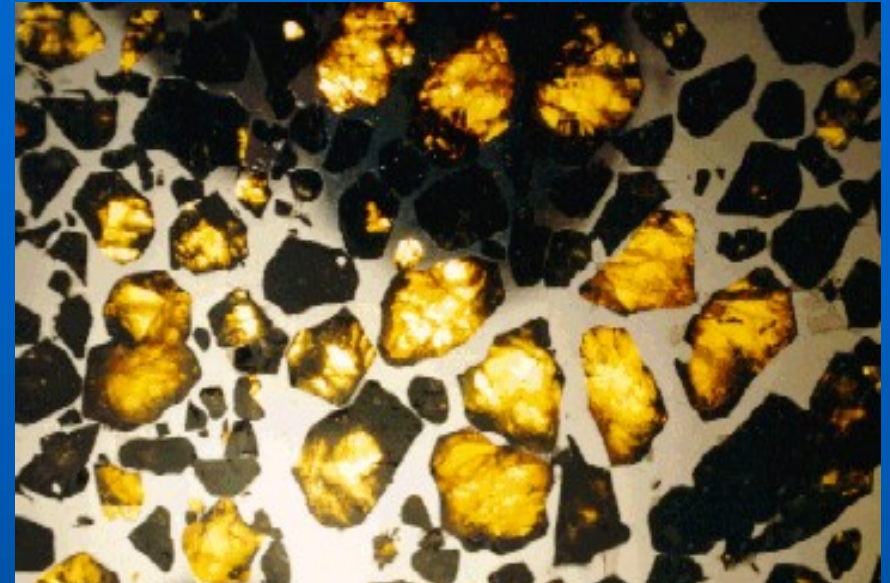


Adaptado de Bogard y Johnson (1983)

MESOSIDERITES I PAL·LASITES

Imilac (MetSoc)

- Son meteorits metal·lorocosos
 - Procedeixen d'asteroides diferenciats
 - Constitueixen ~ 1% de les caigudes (Grady, 2000)
 - Regions internes de cossos diferenciats
 - Interfase entre el nucli metàl·lic i el mantell rocós
- Mesosiderits: Bretxes compostes de proporcions semblants de silicats i ferro natiu (Fe-Ni) més troilita (FeS)
- Pal·lasites: formades per aliatges de Fe-Ni i cristalls d'olivina (35-85% en vol.)
 - Depenent del contingut d'olivina i els seus quocients isotòpics de O es distingeixen dos grups principals:
 - Pal·lasites con olivina rica en Mg
 - Associades amb el grup IIIAb de meteorits metàl·lics
 - Pal·lasites ES (Eagle Station) amb cristalls d'olivina rics en Fe



LES FASCINANTS PAL·LASITES

- Son una classe de meteorits metal·lorocosos.
- Composició intermitja entre els rocosos i els metàl·lics
- Procedeixen de la interfase entre el nucli metàl·lic i el mantell rocós de asteroides diferenciats
- Formats per Fe-Ni i cristalls d'olivina entre el metall.



Tall gruixut de la Pal·lasita Esquel (CSIC-IEEC)

METEORITS METÀL·LICS

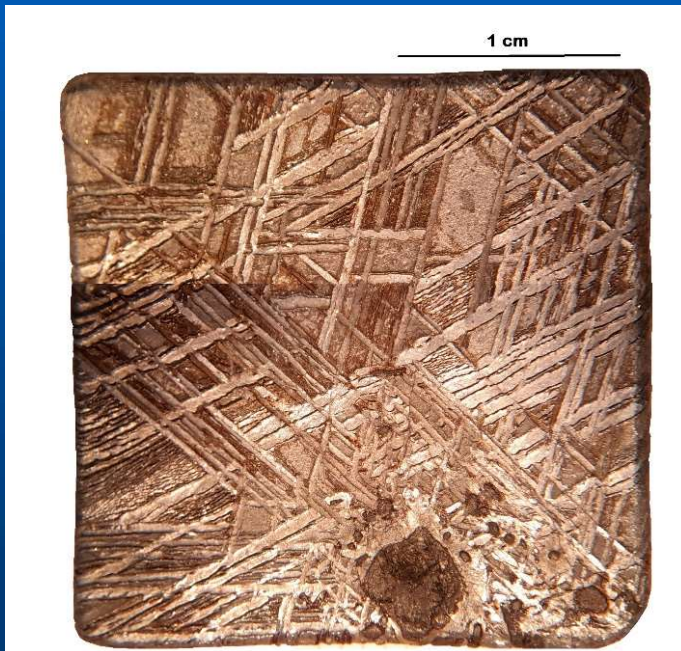


- Son meteorits diferenciats
- Procedeixen de la diferenciació extrema ocorreguda a les regions internes d'asteroides.
- Composats per aliatges de Fe i Ni amb petites quantitats de sulfur de Fe (troilita), grafit, silicats i d'altres minerals minoritaris
- Presenten bordes ondulats degut a l'ablació del material com a conseqüència de la seva entrada a l'atmosfera: regmaglifs.
- Les estructures cristal·lines diferenciades de la taenita i camacita s'entrecreuen per fer les línies de Widmanstätten
- Depenent de la concentració de Ni (i Ga, Ge i Ir) es classifiquen en 13 grups emparentats amb diferents asteroides

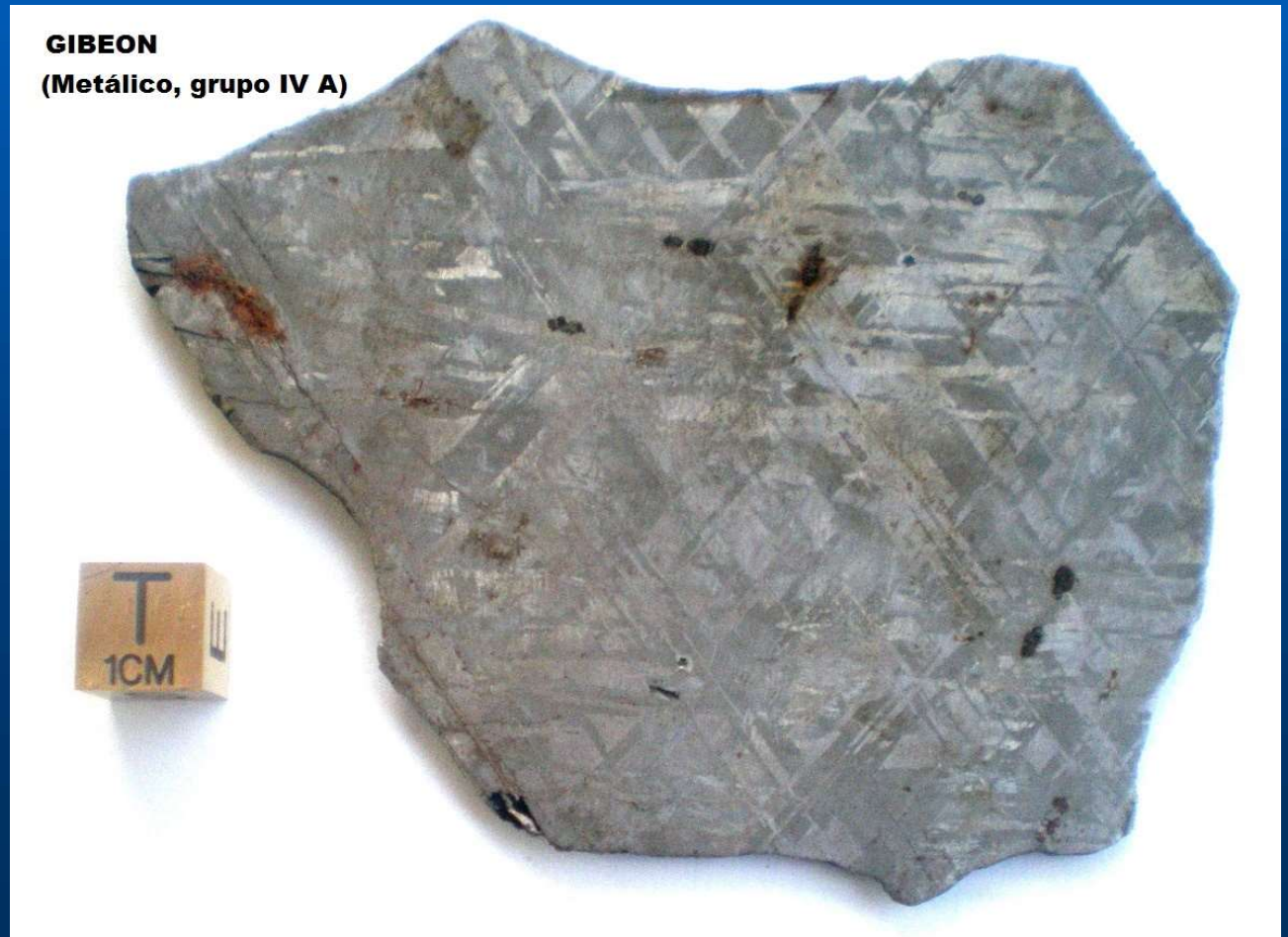


PATRÓ DE WIDMANSTÄTTEN

- Dos meteorits tallats en làmines i pol·lits, tractats amb àcid nítric
- Típicament fem servir una solució al 10% d'àcid nítric en metanol, que escampem sobre la superfície del meteorit, prèviament pol·lit. Els patrons comencen a aparèixer ràpidament, essent visibles en un minut. Després neutralitzem ràpidament l'àcid amb una solució feble d'hidroxid sòdic i finalment es renta amb molt de metanol.



Muonionalusta IV A



LA LLUNA



**Orbita la Terra
sincronitzadament a
uns 384.400 km**

**Contínuament
impacten asteroides
contra el nostre
satèl·lit, excavant
cràters i llençant
roques envers l'espai**

**És l'astre del que ens
arriben més
meteorits però són
difícils d'identificar:
756 coneguts a hores
d'ara**

METEORITS LUNARS I MARCIANS

- Òbviament també són acondrites
- Gairebé indistingibles de roques terrestres per la qual cosa són difícils de trobar
- Els meteorits lunars solen procedir de:
 - Terres altes: bretxes d'impacte
 - Mars llunars (basàltics).



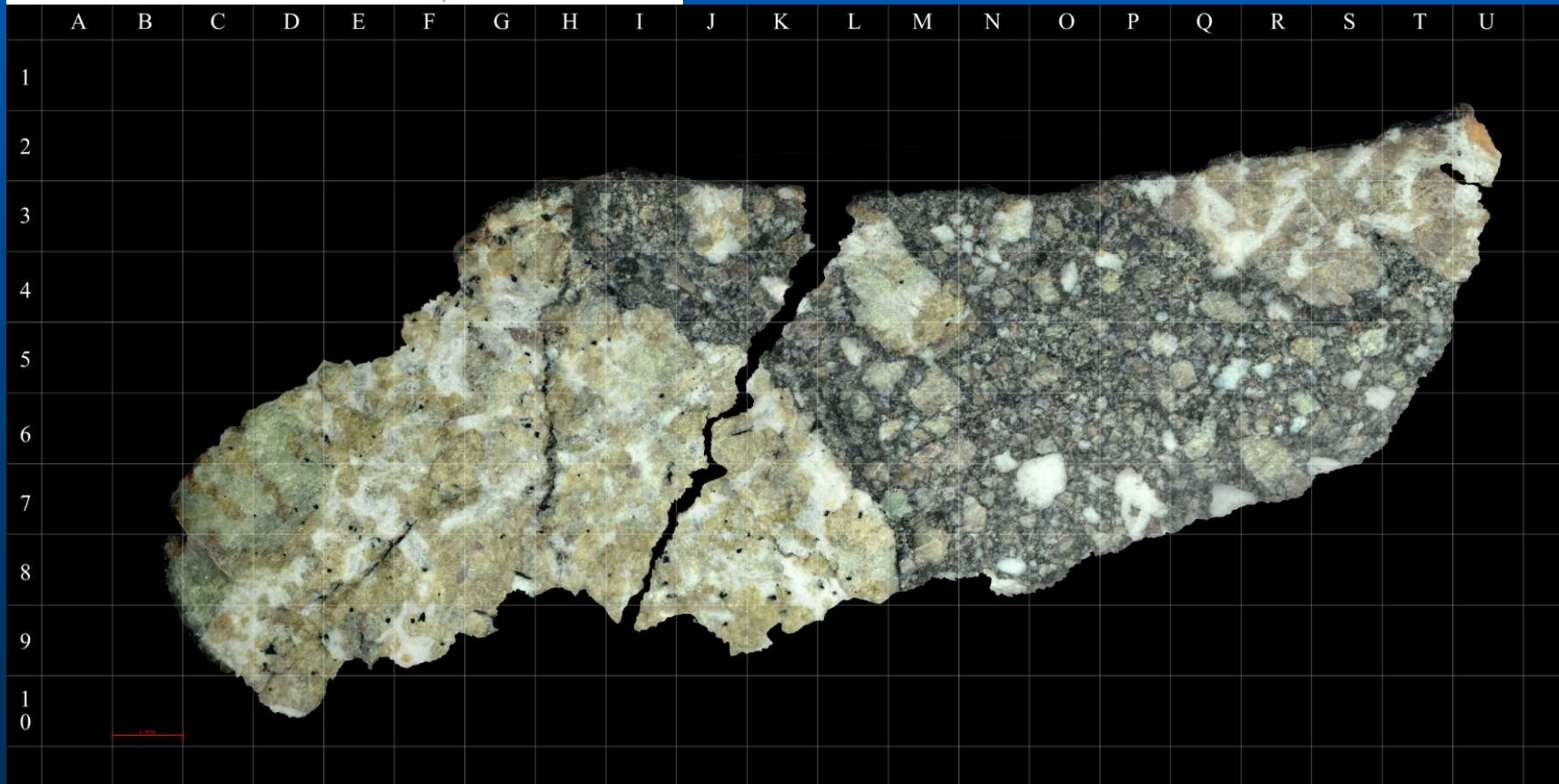
Meteorit lunar



Meteorit marcià EETA 79001

- Els meteorits marcians també són mostres diferenciades
- Normalment s'anomenen a partir de l'acrònim SNCs.
 - Shergotty (Índia, 1865)
 - Nakhla (Egipte, 1911)
 - Chassigny (França, 1915)
 - Però també d'altres com ALHA84001

EXEMPLE DE BRETXA LUNAR

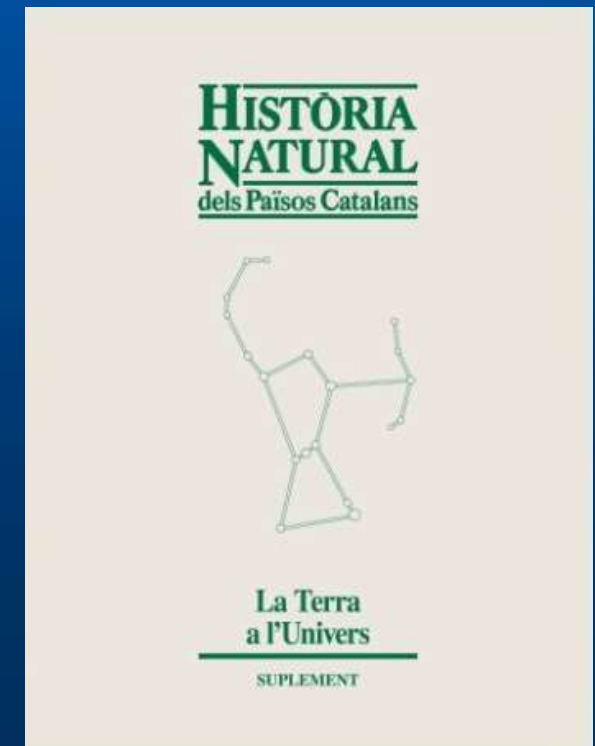
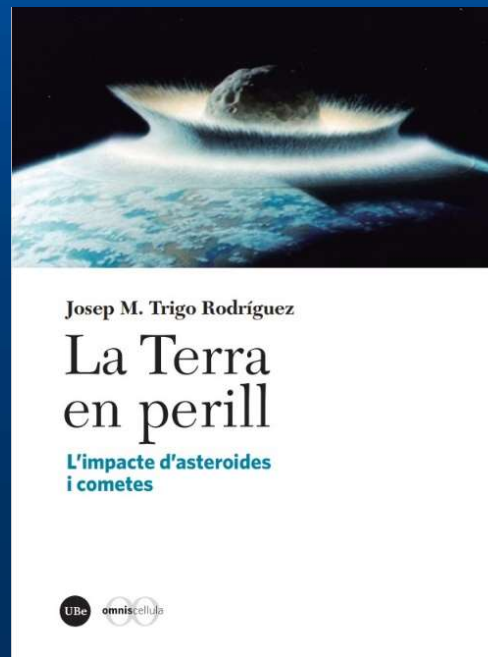
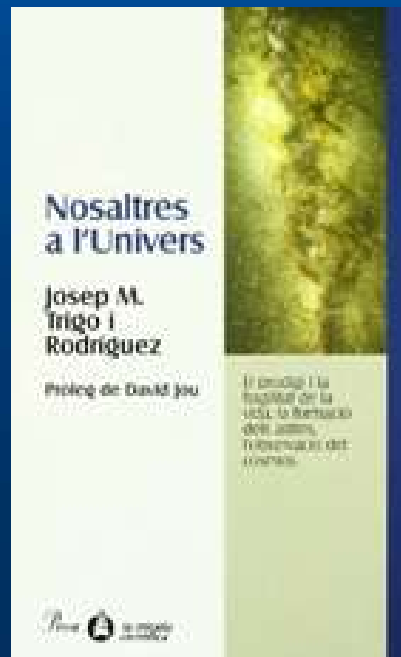
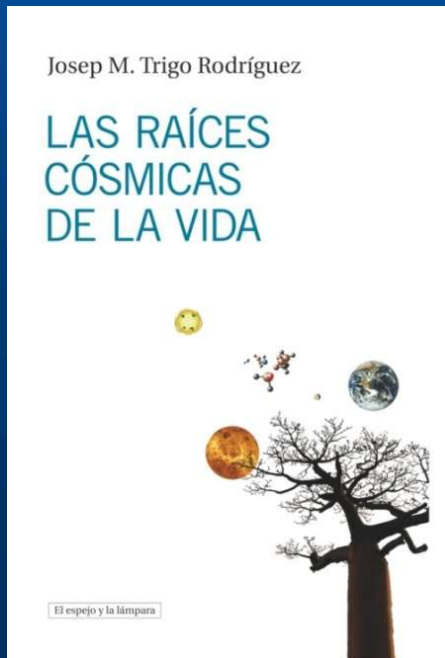


NWA 2700
(CSIC-IEEC)



CAL DIVULGAR LA CIÈNCIA

- - Astronomia a l'abast de tothom!
- - A nivell personal hem creat un grup d'amics que organitzem observacions astronòmiques i tallers a les comarques centrals: @AstroMontseny



També podeu llegir la
nostra divulgació
accessible als nostres
blogs/webs/iniciatives:

- DivulCat
- Conversation.es
- Red SPMN

Moltes gràcies!

