NsG-317-63
U. of California

[redacted]

mfs

N64-16215 *

CODE NONE

pp. 121-157

SÄRTRYCK UR

SVENSK NATURVETENSKAP

1963

0522722

California U., La Jolla

t: meteorites [Swedish title]

auth: Kurt Fredriksson and Frans E. Wickman Repr. from Svensk Naturvetenskap, 1963 p 121-157 In Swedish

NASA Grant NsG 317-63
NASA CR-55368

STATENS NATURVETENSKAPLIGA FORSKNINGSRÅD

STOCKHOLM - SWEDEN

Redaktör: Fil. dr Bengt Lundholm

Detta avsnitt innehåller redogörelser för mera begränsade, men betydelsefulla och aktuella forskningsområden samt glimtar från det vetenskapliga arbetet

METEORITER

(Meteorites)

av fil. lic. KURT FREDRIKSSON och professor FRANS E. WICKMAN

INLEDNING

Den gränsvetenskap mellan astronomi, geologi och meteorologi, som alltmer börjar kallas *meteoritik* (ett ord, som knappast klingar vackert för svenska öron) föddes i viss mening klockan ett på eftermiddagen den 26 april 1803. Då föll nämligen flera tusen stenar ner över ett område kring den lilla staden L'Aigle inte så långt från Paris. Den i vetenskapliga kretsar tongivande franska vetenskapsakademien hade dittills intagit en närmast föraktfullt avvisande hållning gentemot tidigare skildringar av liknande händelser, men blev genom de många trovärdiga vittnesmålen övertygad om fenomenets realitet.

För oss 150 år senare kan denna skepticism synas egendomlig, men den blir fullt förklarlig om man vet, att de föremål som även omdömesgilla personer ansåg ha fallit ner från himlen innefattade allsköns egendomliga saker, i Sverige t. ex. med förkärlek stenyxor. Här kan parentetiskt inflikas att det fortfarande knappast finns någon gräns för vad man föreställer sig vara en meteorit. Här finns givande fält för vittnespsykologer.

Man bör emellertid anse E. F. F. Chladni som grundare av den moderna meteoritforskningen genom sin kritiska sammanställning av en mängd gamla uppgifter om meteoriter och meteoritfall i sin 1794 utkomna bok. Den bär den om lapidariskt uttryckssätt knappast vittnande titeln »Über den Ursprung der von Pallas gefundenen und anderer ihr ähnlicher Eisenmassen und über einige damit in Verbindung stehende Naturerscheinungen». Från början av 1800-talet var meteoritforskningen under lång tid ett exklusivt specialområde huvudsakligen förbehållet personalen vid de största mineralogiska museerna. Av svenskar som gjort betydande insatser kan nämnas Berzelius och A. E. Nordenskiöld. Under de senaste två decennierna har intresset för meteoriter ökat enormt och proble-

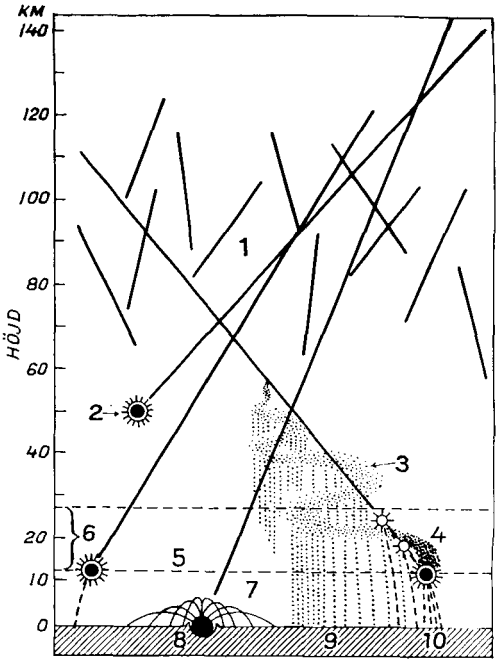


Fig. 1. Schematisk bild av meteoritfall (efter Krinov).

Scheme of meteoritic falls (after Krinov).

1. Meteorer (meteors)
2. Meteoriten förintas (total destruction)
3. Röksvans (dust-trail)
4. Söndersprängning (break-up)
5. Retardationsområdet (region of retardation)
6. Söndersprängningsområdet (break-up zone)
7. Explosion (explosion)
8. Meteoritkrater (meteorite crater)
9. Kosmiskt stoft avsätter sig (settling of meteoric dust)
10. En meteoritskurs spridningsellips (Ellipse of scattering of meteoritic shower).

men börjat att studeras ur helt nya synvinklar. Det är denna forskning och dess problemställningar, som vi skall försöka skildra. Vi börjar vår framställning med en deskriptiv avdelning.

METEORITFALL

De fenomen som uppstår när en meteorit intränger i jordens atmosfär från världsrymden beskrivs enklast med hjälp av fig. 1. Minimihastigheten är då 11,2 km/sek, men om rörelsen är sådan, att meteoriten möter jorden, kan den uppgå till 70 km/sek och mer. En hastighet över 72 km/sek skulle betyda att meteoriten kommit från världsrymden utanför solsystemet. Trots intensivt sökande tycks man ännu ej ha säkert påvisat någon sådan. Det är så vitt man kan bedöma ett mycket sällsynt fenomen. Vid en höjd av omkring 100—120 km över jordytan blir antalet kollisioner med luftens molekyler betydande. Genom kollisionerna upphettas ytlagret till flera tusen grader och ett hölje av glödande gas utbildas kring meteoriten. Framför meteoriten blir luften avsevärt komprimerad. Dessa effekter ökas alltefter som meteoriten tränger ner i atmosfären. Meteoritens massa minskar kontinuerligt under den tid den rör sig med kosmisk hastighet.

Den glödande gasen observeras som en stark ljuseffekt mot himlen, men olika efter meteoritens massa. Om vikten är mycket liten, kanske något milligram, kommer meteoriten helt att förgasas. Klara, mörka nätter kan man observera sådana fall som stjärnskott, meteorer. Om massan är stor ser man en »eldkula» som till och med kan vara synlig mitt på dagen. Gashöljet är mycket stort, mätningar tyder på flera hundra meter. Meteoriten själv är dock praktiskt taget alltid mindre än en meter i diameter. Vid en höjd av 60—80 km bildas på grund av den ökade kompressionen av luften framför meteoriten en chockvåg. Den bildas som bekant kring alla fasta kroppar som rör sig med överljudshastighet genom atmosfären. Chockvågen ger ljudfenomen av åskliknande slag. Meteoriten förlorar gradvis sin kosmiska hastighet genom den ständiga friktionen. Denna ökar hastigt i de lägre och tätare delarna av atmosfären och man får därför något man kunde kalla en häftig inbromsning.

Denna del av banan kallas retardationsområdet. Här upphör upphettningen av meteoriten och »eldkulan» slocknar. Endast en tunn smältskorpa blir kvar bildande liksom ett hölje kring meteoriten. Retardationsområdet sammanfaller i stort med tropopausens medelhöjd, dvs. 12,5 km. Meteoriten kan springa sönder i bitar under sin färd genom atmosfären. Det sker huvudsakligen på höjder mellan 12,5—30 km, och sammanhänger med chockvågen och de hastiga ändringar i meteoritens spänningstillstånd, som blir följden av dess oregelbundna form och rotation. Genom smältning på ytan förstoftas meteoriten hela tiden. Om meteoriten faller på dagen, kan man därför ofta iakttaga en slöja på himlen längs banan. Från den smältande meteoritytan bildas också droppar av nickeljärn som genom oxidation i atmosfären överdras med ett hölje av järnoxid. Dessa kulor med diametrar från några tusendels till någon tiondels mm sprids i atmosfären och faller sakta ned över land och hav. De kan sedan återfinnas i t. ex. djuphavssediment, och åtminstone 10 miljoner år gamla sådana »kosmiska» kulor har påträffats.

En sak som oftast överraskar är hur obetydligt en meteorit förmår tränga ner i marken. En meteorit, som väger tiotals eller hundratals kilo, åstadkommer ofta ett hål, som bara är ungefär lika djupt som brett. Små meteoriter ligger ofta kvar på markytan. Hastigheten måste alltså vara ganska liten. Man har inte några verkliga bestämningar, men man har observerat värden mellan 126 m/sek (vikt 1,6 kg) och 213 m/sek (vikt 10 kg).

Om meteoriten bryts sönder till smärre stycken uppe i atmosfären får man en meteoritskur, som vanligen har en oval form (fig. 2).

Fördelningen av massan belyses av observationer i samband med järnmeteoritskuren vid Sikhote Alin i östligaste Sibirien 1947. Röksvansens massa av fasta partiklar beräknas till 200 ton, medan ca 70 ton järn i form av fragment, från 100-tals kg ned till något mg, hopsamlades i och kring 106 nedslagsgropar.

En nyfallen meteorit är i allmänhet endast ljummen. En järnmeteorit som

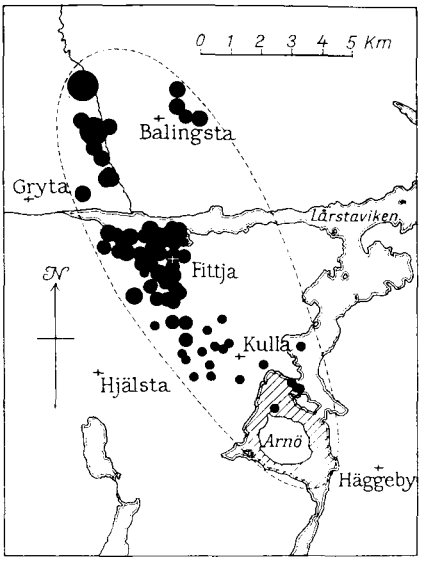


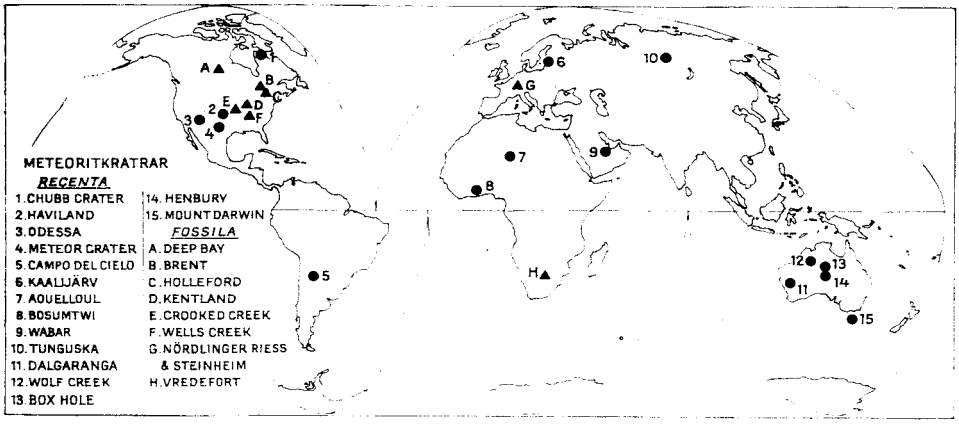
Fig. 2. Meteoritskuren vid Hässle (nära Enköping) den 1 januari 1869. Storleken på en cirkel ungefärligt mått på den tillvaratagna stenens vikt. Endast de större markerade. Streckning = område där svart stoft tillvaratogs på den snötäckta isen. Största stenen vägde ca 1 kg.

The meteoritic shower "Hässle", Jan. 1, 1869. The size of the circle indicates the weight of the fragment; only the largest have been marked. Streaked area shows where black dust was found on the snow-covered ice.

har god värmeledningsförmåga är dock i regel varmare än en sten. Orsaken är att upphettningen i atmosfären är för kortvarig för att mycket påverka det inre av meteoriten samt att en kropp i världsrymden på jordens avstånd från solen har en temperatur av omkring 0°C. I Indien har man t. o. m. observerat, hur en meteorit täcktes med frost efter nedslaget. Största delen av den i atmosfären genererade värmen strålar ut eller försvinner med det redan nämnda smältande ytskiktet.

METEORITKRATRAR

I regel är meteoriternas massa liten men som en utomordentlig sällsynthet förekommer meteoriter med en vikt på tiotusen ton eller mer. Retardationszonen tycks då ligga under jordytan och meteoriten träffar därför jorden med kosmisk hastighet. Den termiska energi, som bildas vid nedslaget, är så stor att den



3. Meteoritkratrar.

Meteorite craters.

räcker att överföra en del av meteoriten och även den närmaste omgivningen till upphettad komprimerad gas. Man får en explosion på nedslagsplatsen.

Om verkligt stora meteoriter slår ner blir förgasningen så fullständig, att endast mindre fragment återstår. Man brukar beteckna det hål, som bildas på nedslagsplatsen, som en meteoritkrater eller ett astroblem. Hittills identifierade recenta astroblem framgår av kartan fig. 3. Den mest kända är Meteor Crater i Arizona (fig. 4), som har en diameter av ca 1 200 m och ett djup av 174 m. Den är omgiven av en 40—50 m hög vall. De närmast oss belägna astroblemen finns på Ösel och utgörs av en serie små cirkelrunda sjöar på den för övrigt sjölösa plana kalkstensberggrunden. Man har vid grävning hittat små fragment av järnmeteoriter.

Den enda jättemeteorit som vetenskapligt registrerats föll kl. 07.16 (lokal tid) den 30 juni 1908 i Tunguska området i Sibirien (60°54′ N, 101°57′ Ö). Det skedde lyckligtvis i ett praktiskt taget obebott område, men därigenom dröjde det också länge innan fallområdet blev närmare undersökt. Ögonvittnen beskrev fallet som en eldkula så bländande ljus att solen föreföll mörk. Vid Varanova 60 km från fallplatsen satt en man vid dörröppningen. Han kastades flera meter av stötvågen och förlorade medvetandet. Dessförinnan hade han känt värme stråla direkt från fallplatsen. Mikrobarografer i England registrerade tydligt luftchockvågen.

Trots ivrigt letande sedan 1928 har man inte lyckats exakt lokalisera nedslagsplatsen. Med en radie av 12—15 km (250 km^2) har träden ryckts upp och kastats så att stammarna ligger i radiell riktning från nedslagsplatsen. Någon krater finns ej och skälet antas vara, att man har s. k. flytlera i området, varför

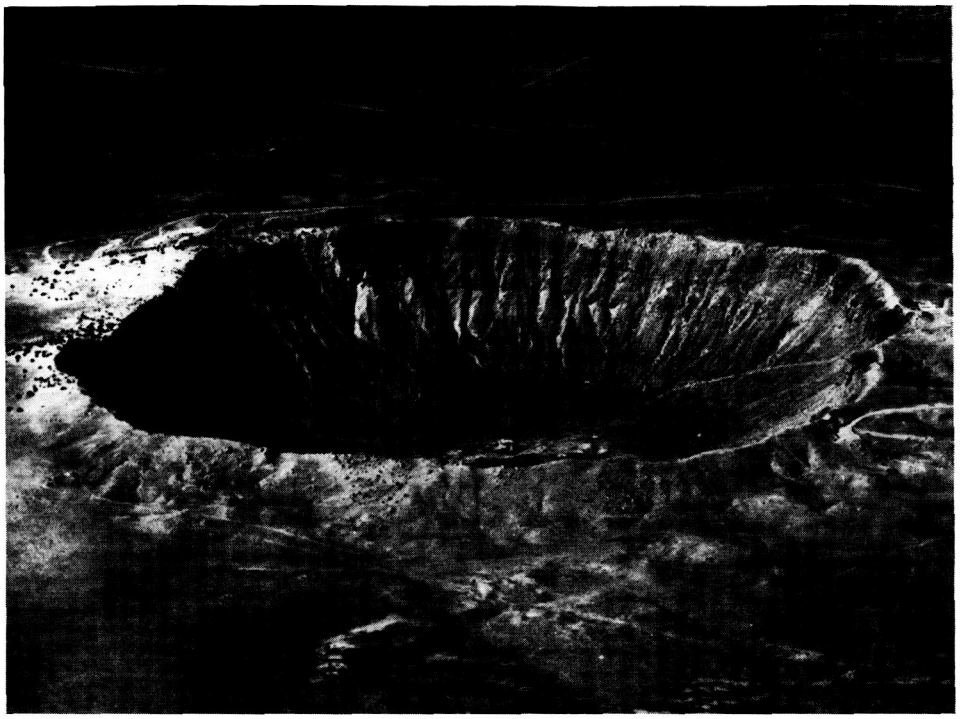


Fig. 4. Flygbild av Meteor Crater i Arizona. Bilden erhållen genom tillmötesgående av dr H. H. Nininger.

Bird's-eye view of Meteor Crater, Arizona.

kratern utplånats på några år. Den första expeditionen kom till platsen först efter 19 år.

De meteoritkratrar, som vi hittills talat om, har alla varit recenta dvs. bildats under kanske de sista 100 000 åren. På grund av de nedbrytande krafterna förstörs meteoritkratrarna snabbt, och det är karakteristiskt, att de man känner ligger nästan alla i öknar och halvöknar. Hur skall man då kunna känna igen en »fossil» krater? Denna fråga har till allra senaste tiden varit obesvarad, men genom nya rön har man fått två kriterier.

Den första metoden bygger på två upptäckter vid Meteor Crater. Alla meteoritkratrar karakteriseras av ett slags järnhaltigt glas, vars sammansättning beror på de omgivande bergarternas. Vid en undersökning av dylikt glas från randen av Arizonakratern fann man för några år sedan att det förutom kvarts (SiO_2) också innehöll små mängder av coesit, en högtrycksmodifikation av SiO_2. Denna förening hade tidigare förgäves sökts i jordiska bergarter alltsedan den först

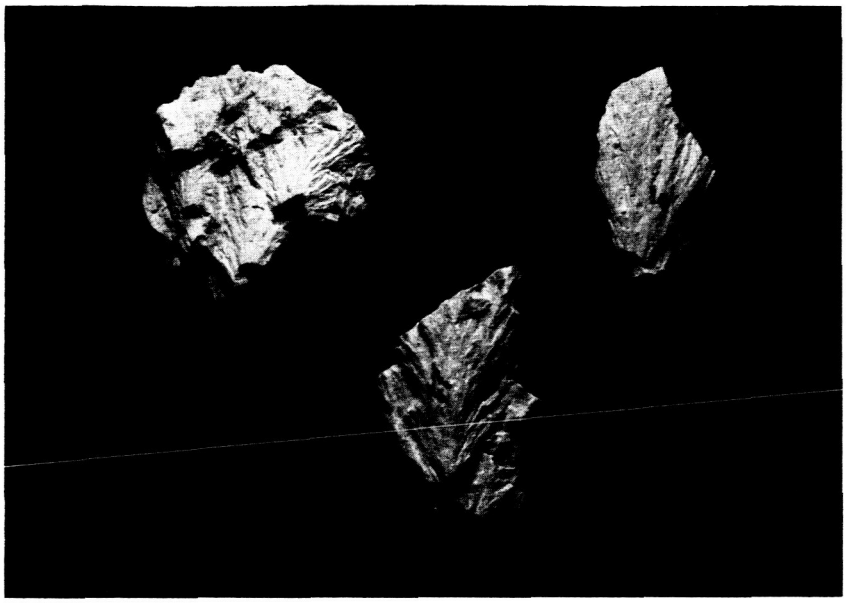


Fig. 5. Slagkäglor i ordovicisk dolomit från Wells Creek Basin, Tennessee. Proven erhållna genom tillmötesgående av dr R. Dietz. × 0,4

Shatter cones in dolomite from the Wells Creek Basin structure of Tennessee.

syntetiserades för ca 10 år sedan. Mineralet bildas först vid tryck över ca 20 000 atmosfärer. Nyligen har man i samma glas som spår funnit stishovit, en 1961 först i Ryssland syntetiserad högtrycksmodifikation av SiO_2, som anses bildas först vid tryck över 75 000 atmosfärer och ca 800°C temperatur.

Under de förhållanden det här gäller kan sådant tryck endast uppstå i samband med chockvågen från nedslaget. Det bör dock framhållas, att man hittills ej lyckats framställa coesit med chockvågor, varvid man haft tryck på 200—600 kilobar. Kvarts har i stället överförts till glas vid 300—600 kilobar, vars täthet *efter* experimentet varit låg. Vulkaniska explosioner, även de mest våldsamma, utvecklar endast ett tryck på några hundra atmosfärer. Man har också påvisat coesit i glas från Wabar i Arabien.

Det intressanta är nu att coesit har kunnat påvisas i små mängder i bergarter från förmodade fossila astroblem, bl. a. från den s. k. Ries Kessel nära Nördlingen i Sydtyskland. Denna är som namnet antyder en jättelik fördjupning, 27 km i diameter. Genom fossilfynd i avlagringar från bottnen har man kunnat datera den till tertiärtiden. Denna bildning har i hundra år diskuterats intensivt av tyska geologer, och alla slags hypoteser rörande dess genes har framförts men

i allmänhet tolkades den som en vulkanisk bildning. Förekomsten av coesit i en glasig bergart från randen av bildningen betyder att man nu påvisat en meteoritkrater av oerhört mycket större dimensioner än dem man tidigare känt. Den andra metoden bygger på vad man på svenska skulle kunna kalla slagkäglor (fig. 5). Storleken på konerna varierar från någon centimeter till över metern. De peka med konspetsarna mot centrum för explosionen. De få undantag man funnit mot denna regel kan förklaras som reflexer av chockvågen. De tryck som bildas vid nedslaget kan uppgå till många miljoner atmosfärer. Både coesit och slagkäglor har hittills observerats vid Meteor Crater och Lake Busumtwi (Ashanti).

Det mest fascinerande fyndet är emellertid förekomsten av slagkäglor i Vredefortdomen i Sydafrika. Denna märkliga bildning som förbryllat geologerna alltsedan dess upptäckt består av en central dom av granit med en diameter av över 4 mil. Kring denna finns en deformationszon som har en diameter av inte mindre än 21 mil. Det har beräknats att energin för att åstadkomma detta skulle motsvara en atombomb på minst 1,5 miljoner megaton, en nästan ofattbart stor siffra (atombomber kan tillverkas upp till ca 100 megaton). De sediment som avlagrats över området visar att det hänt för minst 250 miljoner år sedan.

Några forskare undersöker för närvarande ett eventuellt samband mellan astroblem och tektiter, t. ex. mellan nyss nämnda Ries Kessel och moldaviterna i Böhmen (se sid. 150).

Antalet påvisade astroblem kommer säkerligen nu snabbt att öka. Risken för nedslag av en jättemeteorit är inte så stor. Av vad man vet torde det knappast ske i genomsnitt mer än en gång på kanske tiotusen år.

Man kan fråga sig om möjligheterna att hitta fossila astroblem i Sverige. Det finns bildningar som i några fall kanske är gamla meteoritkratrar. Då ytligt sett helt likartade bildningar kan uppkomma på flera olika sätt kan man inte avgöra deras rätta natur utan ingående undersökningar. Sådana har nu emellertid startats. Det kritiska området ligger i samtliga fall åtminstone delvis under vatten (fig. 6).

Mien är en sjö på gränsen mellan Blekinge och Småland, som man vanligen uppfattat som resterna av en gammal vulkan. De vukaniska bergarterna därifrån har emellertid en mycket egendomlig och onormal karaktär, och därför jämförde A. G. Högbom Mien redan för femtio år sedan med Meteor Crater. Om den är ett astroblem måste man av allmänna geologiska skäl anse att nedslaget skett i tertiär tid, alltså sannolikt ungefärligen under de sista 50 miljoner åren.

Humeln vid Kristdala i Småland är i allmänhet en ganska grund sjö, men utanför Humlenäs i dess södra del finns ett område med ca 1 km diameter där djupet uppgår till 60 m, eller ifall man mäter från områdets peneplanhöjd,

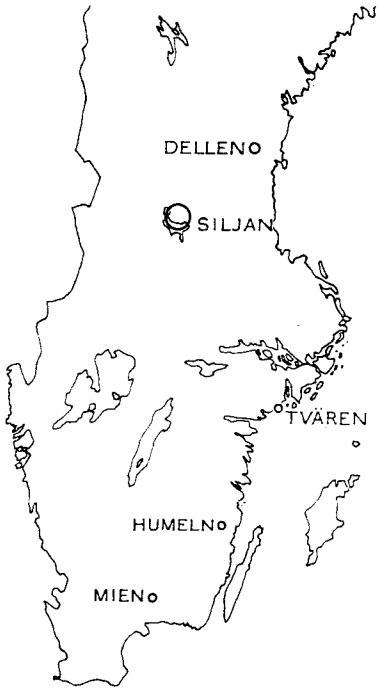


Fig. 6. Geologiska strukturer i Sverige, som möjligen kan vara astroblem.
Possible fossil astroblemes in Sweden.

80—90 m. Om man utgår från astroblemhypotesen skulle de av inlandsisen ur djuphålan uppskjutna kambrosilurbergarterna visa att man här haft ett meteoritnedslag i tidig kambrisk eller sen prekambrisk tid, dvs. för ungefär 600—700 miljoner år sedan.

Tvären heter fjärden utanför atomreaktoranläggningen vid Studsvik. Ungefär mitt i fjärden finns en rund depression på knappt 2 km diameter med djup på bortåt 80 m mot ca 30—35 normalt i fjärden. I isrörelseriktningen har man anträffat block av ordoviciska bergarter. Man kan därför säga att om man har ett astroblem så bildades meteoritkratern antingen i yngsta delen av undre ordovicium eller i äldsta delen av mellersta ordovicium, dvs. för kanske 450 miljoner år sedan.

Den s. k. Siljanringen utgör kanske vårt lands egendomligaste geologiska struktur. Runt en kärna bestående av prekambriska bergarter, huvudsakligen granit, har man en ganska regelbunden ring av kambrosilurbergarter. Totaldiametern av hela området är ca 35 km. De paleozoiska bergarterna är starkt förkastade och ostörd horisontell lagring förekommer inte. Denna bildning har jämförts med

Vredefort. Geologiska undersökningar av området försvåras starkt av att delar av ringen upptas av sjöar som Siljan, Orsasjön, Skattungen och Oresjön samt att övriga delar är starkt jordtäckta. Om denna bildning skulle vara ett astroblem måste dess ålder vara yngsta silur eller yngre, dvs. högst ca 400 miljoner år.

Norra Dellen och näset mellan de båda sjöarna anses vanligen vara resterna av en gammal vulkan. De bergarter som anstår är emellertid så pass avvikande från vad man vanligen finner vid vulkaner att man inte helt kan utesluta astroblemhypotesen. Äldern är sannolikt högst några hundra miljoner år, kanske bara 50 miljoner.

Det är sannolikt att den fortsatta geologiska utforskningen av vårt land kommer att resultera i nya fynd av bildningar som eventuellt kan vara astroblem.

METEORITSTATISTIK

Trots att det måste falla tusentals meteoriter varje år så tillvaratas i medeltal inte mer än ca 5 stycken. Det beror givetvis på att största delen av jordens yta täcks av hav och att stora delar av kontinenterna är obebodda eller mycket glest befolkade. En meteorit som tillvaratas i samband med nedslaget brukar kallas ett *fall*, om den påträffas av en tillfällighet, t. ex. vid plöjning, ett *fynd*.

Man brukar indela meteoriterna grovt i järn och stenar samt en mellangrupp som betecknas som järnstenar. Fram till 1961 kände man till 1 647 meteoriter. De fördelade sig på följande sätt (efter Keil 1962):

	Fynd		Fall	
	Antal	%	Antal	%
Järn	533	57,5	44	6,1
Järnstenar	57	6,2	13	1,8
Stenar	336	36,3	664	92,1
Summa	926	56,0[1]	721	44,0[1]

Fynden är alltså talrikare än fallen.

Bland fynden dominerar järnen starkt, medan bland fallen de utgör endast ca 6 %. Denna olikhet beror på järnmeteoriternas större motståndskraft mot förvittring.

Om den tillvaratagna massan tas till grund för indelningen i stället för antalet, så fördelar sig fallen enligt följande:

	Totalvikt, kg	%
Järn	24 000	64,6
Järnstenar	621	1,7
Stenar	12 506	33,7

Av alla kända meteoriter.

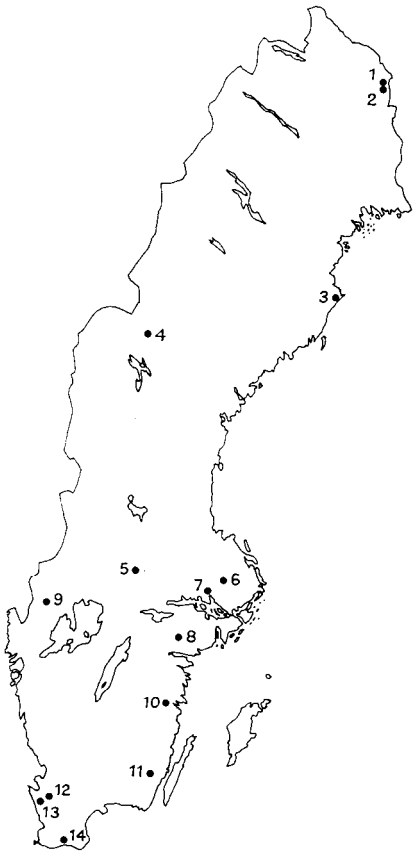
I järnsiffran ingår »Sikhote Alin» med 23 000 kg. Utan denna meteorit, som föll i östligaste Sibirien 1947, blir stenmeteoriterna återigen dominerande. Om även fynden tas med vid massberäkningen, speciellt meteoritjärnet från Meteor Crater, så överväger järnmeteoriterna helt.

Senare års fall tycks antyda att de mekaniskt sköra akondriterna och de kolhaltiga kondriterna (se sid. 136) är vanligare än man tidigare antagit. Detta beror troligen på att chansen att hitta dem har ökat genom det starkt stegrade intresset för meteoritik, trots att dessa stenmeteoriter är svåra att känna igen och lättförstörda. Relativt litet är också känt om hur stor del av en meteorit som verkligen når jordytan (10—90 %). Största försiktighet måste därför iakttas när man försöker tyda ovanstående statistik.

Man bör ha klart för sig att de tre klasserna endast är en praktisk indelningsgrund. Man har kontinuerliga övergångar mellan de olika huvudgrupperna, men huvudmassan av meteoriterna låter sig klassificeras utan svårighet i någon av dem.

Listan över svenska meteoriter är inte särskilt lång (fig. 7). Det dröjde ända till nyårsdagen 1869 innan det första tillvaratagna fallet inträffade. En skur av meteoriter föll då vid »Hässle» (fig. 2) just när kyrkfolket kom ut från högmässan. Ett stort antal stenar togs tillvara emedan de var lätta att iaktta mot den nyfallna snön. »Ultuna», som hittades vid en grundgrävning 1944, hör möjligen till Hässleskuren. Den 28 juni 1876 föll 11 stenar i närheten av Ställdalens järnvägsstation. Med en totalvikt på 34 kg är »Ställdalen» det största meteoritfallet hittills i Sverige. Enstaka stenar har fallit ner och tillvaratagits med rätt långa mellanrum: »Lundsgård» (11 kg) den 3 april 1889, »Hedeskoga» invid Ystad (3,5 kg) den 20 april 1922, »Lillaverke» vid Nybro (7 kg) den 11 maj 1930, »Ekeby» i Skåne (3,3 kg) den 5 april 1939, »Hallingeberg», några mil från Västervik (1,5 kg) den 1 februari 1944, på isen av sjön »Långhalsen» (2,3 kg) den 6 februari 1947. Det sista meteoritfallet skedde vid »Hökmark» i Lövånger den 9 juni 1954 då två stenar på sammanlagt 3 hg tillvaratogs. Vid »Vårvik» hittades 1907 en meteorit vägande knappt 4 hg.

De tre järnmeteoriter man känner från Sverige har alla tre hittats i Norrland. Att man inte har några dylika fynd i södra och mellersta Sverige kan tänkas bero på att dessa senare områden är gamla åkerbruksområden, vilket gjort att man tillvaratagit de lättfunna järnen före år 1800. »Föllinge» är ett nickelrikt järn på 4 hg som hittades i september 1932. De två meteoriterna från »Muonionalusta» hittades vid Kitkiöjärvi (1906, 7,5 kg) och Kitkiöjoki (1946, 15 kg). Avståndet mellan platserna är ca 8 km. Den första fanns av en vallpojke medan den andra kom fram vid en grundgrävning. De har samma kemiska sammansättning och struktur, varför de sannolikt tillhöra en skur. Med hänsyn till den låga befolkningstätheten i dessa områden måste man anta att ett stort antal järn fallit vid detta tillfälle.



Järnmeteoriter:

1. Muonionalusta I, 1906, fynd.
2. Muonionalusta II, 1946, fynd.
4. Föllinge, 1932, fynd.

Stenmeteoriter:

3. Hökmark, 1954, fall.
5. Ställdalen, 1876, fall.
6. Ultuna, 1944, fynd.
7. Hässle, 1869, fall.
8. Långhalsen, 1947, fall.
9. Vårvik, 1907, fynd.
10. Hallingeberg, 1944, fall.
11. Lillaverke, 1930, fall.
12. Lundsgård, 1889, fall.
13. Ekeby, 1939, fall.
14. Hedeskoga, 1922, fall.

Fig. 7. Svenska meteoriter.

Swedish meteorites.

JÄRNMETEORITERNAS BESTÅNDSDELAR OCH SAMMANSÄTTNING

Järnmeteoriterna består av nickelhaltigt järn. Andra mineral förekommer bara som små inneslutningar. Om mängden inneslutningar är betydande hänförs meteoriten till järnstenmeteoriterna.

Ifall man etsar en polerad yta av en järnmeteorit framträder oftast ett nätverk av band som bildar ett trekantigt mönster. Det brukar kallas widmanstättenstruktur (fig. 8). Då banden är anordnade längs oktaederytor brukar

meteoriter som visar denna struktur kallas *oktaedriter*. Orsaken till denna struktur är att meteoriten är uppbyggd av två faser av vilka den nickelfattiga etsas lättare. Den brukar kallas *kamacit* och består av α-järn med omkring 6 % nickel. Banden omges av ränder av en nickelrik (i medeltal omkring 30 % nickel) fas av γ-järn kallad *taenit*. Någon gång kan nickelhalten uppgå ända till 70 %. Områdena mellan banden består av en finkornig blandning av kamacit och taenit som kallas *plessit*. Bandens tjocklek varierar från ca 0,05 mm till bortåt en centimeter och vanligen gäller regeln att ju större nickelhalt ju tunnare band. Nickelhalten i oktaedriter varierar mellan 6—13 %. Ett individuellt band kan ha en betydande utsträckning, så att det ibland kan gå genom hela meteoriten. Om en oktaedrit går sönder vid passagen genom atmosfären sker det därför ofta längs ett band. Oktaedriterna är de vanligaste järnmeteoriterna.

Hexaedriterna består helt av kamacit och håller högst 6 % nickel. Namnet beror på det märkliga förhållandet att en normal hexaedrit utgörs av en enda stor enkristall, som visar kubisk klyvbarhet. Vid etsning får man ett system av linjer som kallas Neumannlinjer. De är orienterade på ett enkelt sätt i förhållande till kubkanterna och anses vara uppkomna vid stöten mot marken. Hexaedriterna är de mekaniskt svagaste av järnmeteoriterna och faller därför gärna i form av skurar. Hexaedriterna utgör ca 8 % av järnmeteoriterna. Om man efter etsning inte kan iakttaga någon speciell struktur hos en meteorit brukar den kallas en *ataxit*. Man känner både nickelrika och nickelfattiga sådana. De sistnämnda håller ca 6 % nickel och utgör ungefär 5 % av järnmeteoriterna, medan de nickelrika vanligen håller 9—20 % nickel, men kan hålla upp till 30—60 %. De utgör ca 7 % av de kända järnmeteoriterna. Under mikroskopet finner man, att ataxiter består av kamacit i vilken taenitpartiklar är utströdda, tätare ju högre nickelhalten är.

Inneslutningarna i järnmeteoriterna har varierande sammansättning. De vanligaste är troilit och schreibersit.

Troilit är FeS med den teoretiska sammansättningen. I jordiska bergarter förekommer föreningen i form av mineralet magnetkis, men har då alltid ett järndeficit i förhållande till den stoikiometriska sammansättningen. Troilit förekommer oftast i form av rundade korn av mycket varierande storlek. Schreibersit, som aldrig anträffats i terrestra bergarter, är en nickeljärnfosfid. Denna fosfid utgör som regel omkring 1 % av en järnmeteorit. Man har hittat många andra mineral som inneslutningar i järnmeteoriter, exempelvis diamant, grafit, cohenit (en nickelhaltig järnkarbid), daubreelit (en järnkromsulfid), moissonit (kiselkarbid), osbornit (titannitrid), nickelsilicid och lawrencit (järn/II/klorid), av vilka endast de två första anträffats som naturliga mineral på jorden. Vidare förekommer oxider och silikat av samma slag som i stenmeteoriterna.

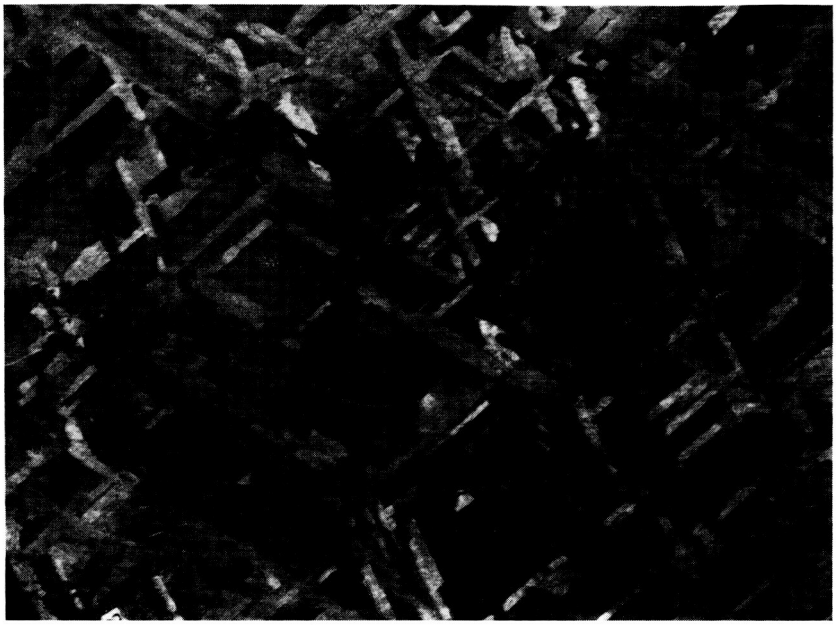


Fig. 8. Polerad och etsad yta med widmanstättenstruktur hos oktaedriten »Kap York», Grönland. Skala ca 1: 1. Svarta fläcken till vänster i bilden troilit.

Widmanstätten texture on polished and etched surface of the octahedrite "Cape York". Black dot at left end troilite.

Det framgår att järnmeteoriterna till sin uppbyggnad utgör en ganska homogen grupp, huvudsakligen bestående av järn och nickel. Vill man studera sammansättningen närmare möter man emellertid vissa problem, som är utmärkande för all kemisk meteoritforskning. Man måste väga i viss mån oförenliga faktorer mot varandra. Å ena sidan måste en god analys, om man söker genomsnittet, utgå från så stor mängd att man får ett gott genomsnitt även av de ojämnt fördelade inneslutningarna. Å andra sidan är materialet mycket sällsynt och dess återväxt genom fall och fynd obetydlig. Genom kemiska undersökningar förintas vanligen meteoritmaterialet, varför en dåligt planerad eller genomförd undersökning inte bara är förarglig för de inblandade forskarna utan också medför minskade utsikter för andra att göra om undersökningen. Museerna har därför fört en mycket restriktiv politik när det gällt att lämna ut undersökningsmaterial och tyvärr ibland varit oklokt sparsamma. Den tendens man haft att dela en meteorit i många små bitar och fördela dem på museer över hela världen har tyvärr också medfört att många meteoriter i varje enskilt museum förekommer i så liten mängd att de knappast kan utnyttjas för forskningen.

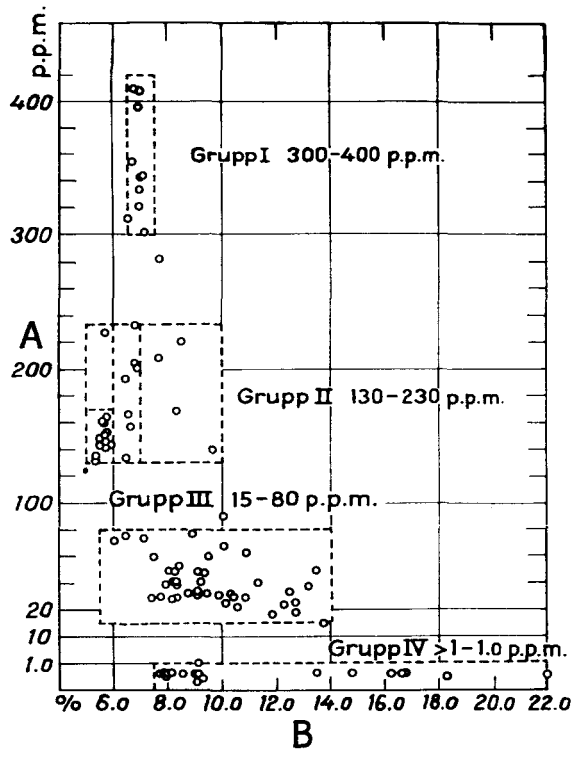


Fig. 9. Sambandet mellan germaniumhalt (A) och nickelhalt (B) hos järnmeteoriter (efter Lovering, Nichiporuk, Chodos och Brown 1957).

The relation between germanium content (A) of iron meteorites and nickel content (B).

Meteoriternas sammansättning är så ovanlig att de inte kan undersökas med standardmetodik. För järnmeteoriterna gäller att analyser utförda tidigare än 1930 endast i undantagsfall är tillförlitliga. Under de sista decennierna har man studerat inte bara huvudelementen utan också de grundämnen, som förekommer i mycket små mängder i ett stort antal meteoriter. Dessa undersökningar har klarlagt att nickelhalten är praktiskt taget konstant i varje enskild järnmeteorit trots att den kan variera så starkt från meteorit till meteorit. En del spårelement varierar däremot endast obetydligt från meteorit till meteorit, medan andra varierar starkt. Hit hör exempelvis gallium och germanium. I fig. 9 visas sambandet mellan germaniumhalt och nickelhalt. Som synes finns en sorts gruppindelning, men den är inte identisk med den som grundas på nickelhalten.

STENMETEORITERNA

Stenmeteoriterna indelas traditionellt i två huvudgrupper, *kondriter* och *akondriter*. Kondriterna är den helt dominerande gruppen (ca 90 %). Namnet hänsyftar på att de är helt eller delvis uppbyggda av s. k. *kondrer*, ett slags kulformiga bildningar, vars storlek varierar från mikroskopiska dimensioner upp till en hasselnöts. Vanligen är de 0,5—1 mm stora. Mekaniskt förhåller sig *kondriterna* mycket olika. Man kan inordna dem i en serie från sådana som är så lösa att de nästan faller sönder till sådana som är så hårda och sega att man har svårt att slå sönder dem med en stenhammare. De lösaste består av löst hopfogade kondrer, medan de hårdaste ger intryck av att vara mer eller mindre hopsintrade eller hopsmälta genom uppvärmning, så att kondrerna blir alltmer otydliga.

Kondriternas mineralkombinationer är ganska invecklade och vi skall därför nöja oss med att ge huvuddragen. Man kan ställa upp en serie typer där oxidationsgraden successivt sjunker. De kolhaltiga kondriterna är den högst oxiderade gruppen. De är utomordentligt sällsynta (bara ca 20—30 fall kända) och mekaniskt mycket sköra. I sin typiska form består de av serpentin eller vattenhaltiga magnesiumsilikat av klorittyp samt magnetit (Fe_3O_4). Ingen fri metall finns med. De kan däremot innehålla upp till 20 % vatten, 6 % svavel och 4 % kol liksom litet klor, kväve och väte. I denna typ kan man också ha sulfat (magnesiumsulfat) och karbonat (magnesiumjärnkarbonat) närvarande, vilka annars är helt okända bland meteoritmineralen. Det mest anmärkningsvärda med

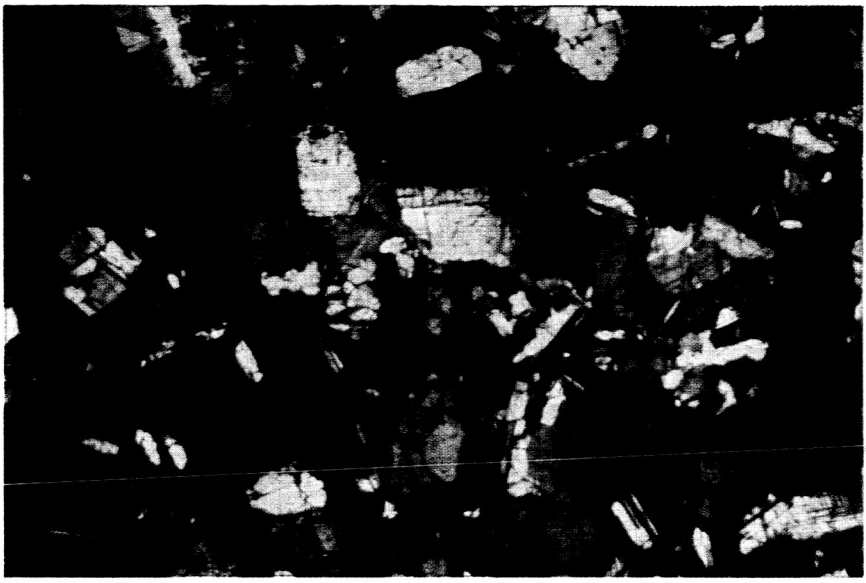
---

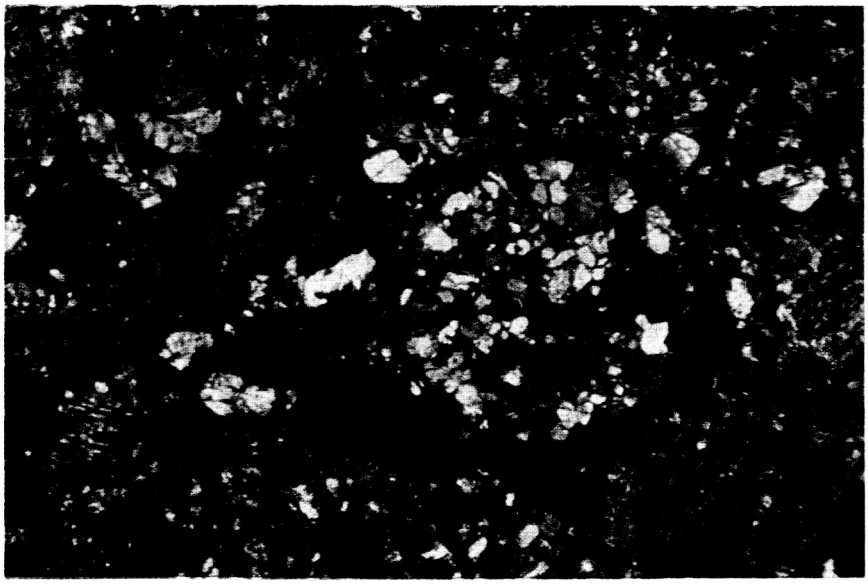
Mikrofotografi av slipprov av mesosideriten »Clover Springs». Bilden tagen i polariserat ljus med korsade nicoller, 20 ×. De grå-vit-gula kornen med tvillinglameller = kalciumrik plagioklas. Stora, röda och blå kristaller = pyroxen. Små röda kristaller till höger och det gula kornet nedanför centrum = olivin. Till vänster den metalliska delen, svart (Foto: K. Fredriksson).

Photomicrograph of thin section of the mesosiderite "Clover Springs". Crossed nicols, 20 ×. Grey-white-yellow grains with twin lamellae = Ca-rich plagioclase. Large red and blue grains = pyroxene. Small red crystals to the right and yellow grain below center = olivine. The black area to the left = metal rich region.

Mikrofotografi av slipprov av kulkondriten »Bjurböle». Polariserat ljus, korsade nicoller, 35 ×. Till höger om centrum olivinkonder med plagioklas och troilit-nickeljärn (svart). Till höger därom fragment av två kondrer med olivinlameller (röda till rödvioletta) och finkornig plagioklas (svart). De mörkt grå kornen med spaltning i andra kondrer = bronzit (Foto: K. Fredriksson).

Photomicrograph of thin section of the spherulitic chondrite "Bjurböle". Crossed nicols, 35 ×. To the right of center olivine chondrule with interstitial plagioclase, troilite and nickel-iron. Further to the right fragments of two barred olivine chondrules with fine-grained black plagioclase. Bronzite occurs as dark grey grains with cleavage in other chondrules.





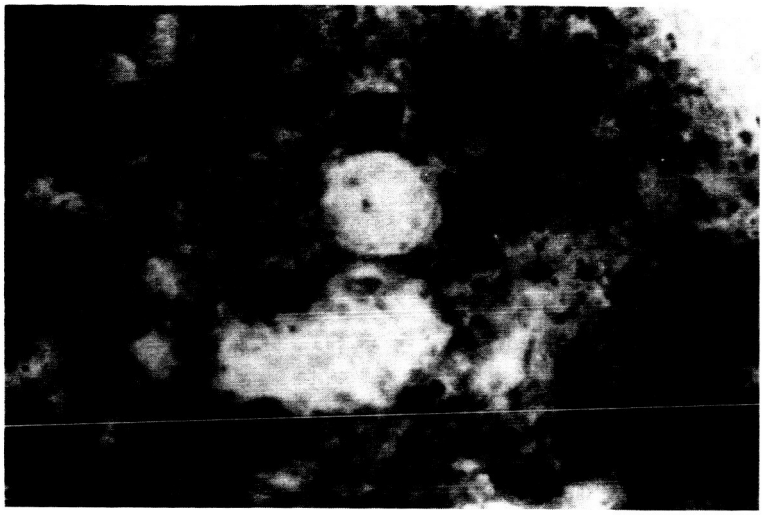
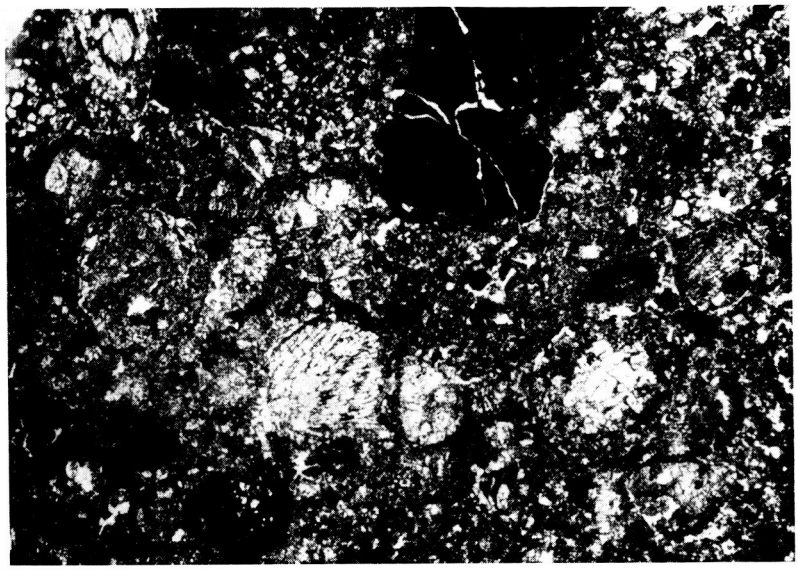


Fig. 10. Mikrofoto av slipprov av den kolhaltiga kondriten »Orgueil», 1 500 ×. Den runda vita partikeln, ca 14 μ i diameter, hör till de objekt, som misstänkts vara av organiskt ursprung. Analys med elektronmikrosond av detta korn visade emellertid ungefär samma magnesium- och kiselhalt som i omgivande grundmassa av kloritliknande mineral. Järnhalten i partikelns inre är något lägre än i omgivande mineral. De svarta runda kornen består av magnetit med något nickel. (Foto: K. Fredriksson).

Photomicrograph of thin section of "Orgueil", 1 500 ×. Particles like the white round one in the centre have been described as organic remains. Electron-microprobe analysis of this particle revealed, however, that it has approximately the same composition as the surrounding minerals. The round black particles are magnetite.

denna grupp är annars att organiska föreningar förekommer. Vilka föreningar som uppträder är ännu ej helt utrett i detalj. Det verkar som om många olika typer av dem skulle vara närvarande, särskilt en mängd polymeriserade produkter. Man har emellertid inte konstaterat någon optisk aktivitet hos den organiska fraktionen, varför den preferens som åtminstone det jordiska livet visar för vissa optiska isomerer ej har någon motsvarighet här. Den kondritiska strukturen är dåligt utvecklad hos denna typ. I förhållande till andra kondriter innehåller dessa meteoriter avsevärt mer av spårelementen bly, tallium och vismut.

Redan på 1880-talet beskrev en forskare något, som han ansåg vara rester av organismer i en kolhaltig kondrit. Under de sista åren har en grupp amerikanska forskare tagit upp problemet och beskrivit flera olika typer av s. k. »organiserade element». Huvudsakligen på morfologiska grunder anser de att dessa partiklar är av organiskt ursprung. De flesta av kropparna är mycket små, några tusendels millimeter, varför storleken på deras detaljstrukturer ligger på



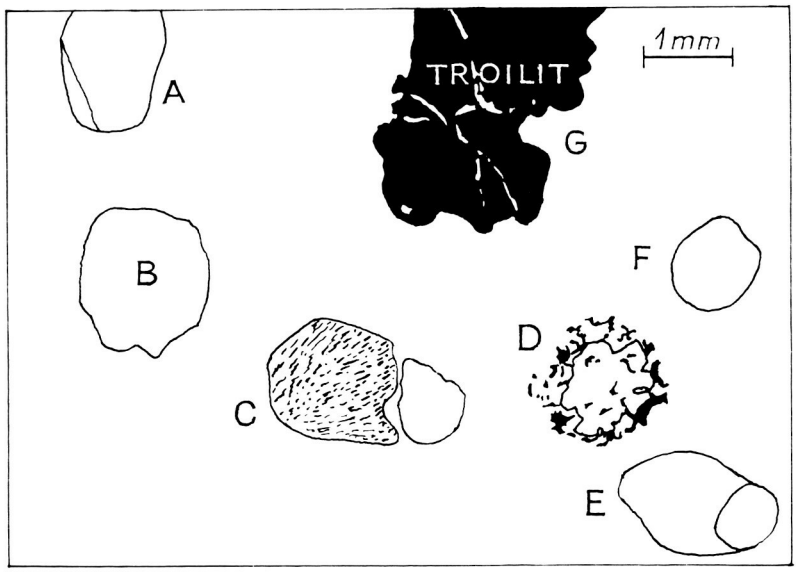


Fig. 11. Slipprov av »Bjurböle» fotograferat med korsade nicoller. Skissen visar läget på några detaljer. A: Konder med skelett av olivin. B: Stor konder. C: radialstrålig konder av pyroxen (bronzit). D: Olivinkonder med metall och troilit anordnade i ring kring kärnan. E: Bronzitkonder, där de två delarna ha olika orientering. F: Skelett av bronzit i kondern. G: troilit (svart). (Foto: K. Fredriksson.)

gränsen till det optiska mikroskopets upplösningsförmåga. Observationer av de fina detaljerna blir därför lätt subjektiva.

En del av de observerade partiklarna är sannolikt av jordiskt ursprung, t. ex. pollenkorn, som kommit att häfta vid antingen innan meteoriten plockades upp från marken eller under den nästan hundraåriga förvaringen på museer. Det är emellertid nu klart att vissa runda eller sexkantiga korn, som är ganska sällsynta, i verklig mening hör till meteoriten »Orgueil». Det har dock av andra forskare visats att åtskilliga av dessa partiklar består av magnetit (Fe_3O_4) med något nickel, medan andra åter kemiskt sett skiljer sig litet från den omgivande grundmassan (fig. 10).

För närvarande pågår på flera håll ett intensivt arbete för att utreda ursprunget till dessa märkliga strukturer. Problemet har givetvis hopkopplats med frågan om livets uppkomst och härigenom rönt stort intresse från många håll. Tyvärr har dock åtskilliga mer populära beskrivningar och diskussioner varit tämligen orealistiska. Det är ännu långt ifrån bevisat att liv verkligen existerat i meteoriterna eller på de kroppar som eventuellt givit upphov till dem.

Nästa grupp innehåller meteoriter med betydligt mindre kol (mellan 0—1/2 %), huvudmineral är olivin (magnesiumjärnortosilikat) samt magnetit och något järnrik pyroxen (motsvarande metasilikat). Metall saknas och den kondritiska strukturen är dåligt utvecklad.

I följande grupp uppträder *nickelrikt* metalliskt järn (upp till 6 % metall). Huvudmassan utgörs av olivin samt något järnrik pyroxen. Meteoriterna kan vara litet kolhaltiga och har dåligt utvecklade kondrer.

I de två sista grupperna tycks det vara så att om kol är närvarande är järnmagnesiumförhållandet i silikatmineralen variabelt från konder till konder. Om kol saknas har alla kondrer samma sammansättning.

Till någon av de två följande grupperna hör majoriteten av meteoriterna. Den första innehåller mellan 6—15 % metall. Magnetit och kol saknas, olivinmängden är större eller lika med pyroxenmängden. Mineralen har ensartad sammansättning och kondrerna är väl utvecklade. Den andra gruppen har mellan 15—23 % nickelfattig metall och här är mängden pyroxen större eller lika med olivinmängden. Sammansättningen hos mineralen är enhetlig. Kalcium, kisel och krom förekommer i oxidisk form medan en del fosfor förekommer i form av fosfid (schreibersit).

Nästa grupp, som är sällsyntare igen, innehåller mellan 15—30 % nickel-

---

Thin section of "Bjurböle" photographed with crossed nicols. The diagram shows the positions of some details. A: Chondrule with skeletal olivine. B: Large chondrule. C: Chondrule with radial pyroxene (bronzite). D: Chondrule of olivine with an "envelope" of metal and troilite around it. E. Chondrule of bronzite in which two parts have different orientation. F. Skeletal bronzite in the chondrule. G: Troilite (black).

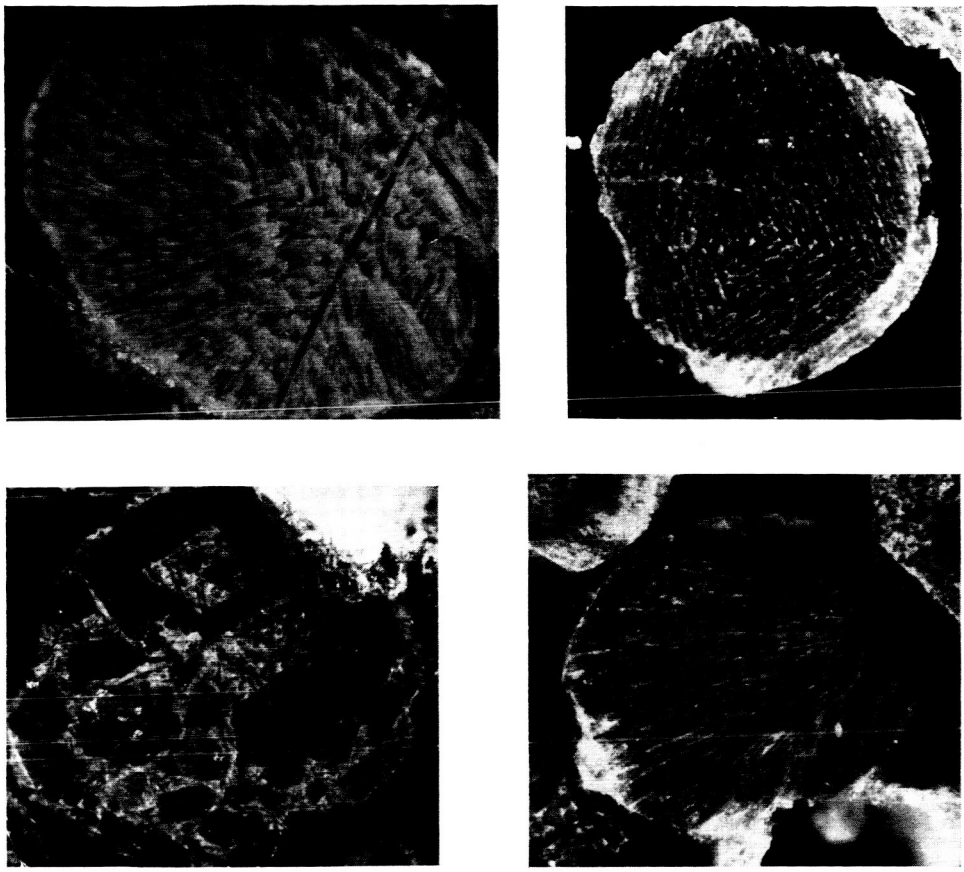


Fig. 12. Några typiska mikrobilder av kondrer från Bjurbölemeteoriten. Foto: K. Fredriksson. Förstoring: × 25

Typical pictures of chondrules from the Bjurböle meteorite. × 25

fattigt metalliskt järn. En magnesiumrik pyroxen (enstatit) dominerar starkt över olivin bland silikatmineralen och gruppen kallas därför enstatitkondriter. Kol kan förekomma i små mängder, upp till $^1/_2$ %. Mineralen har en enhetlig sammansättning. Dessa meteoriter är ofta metamorfoserade så att kondrerna är dåligt synliga. En del kalcium och krom förekommer som sulfid (CaS och Fe_2CrS_4), fosfor som fosfid, medan kamaciten i dessa meteoriter kan hålla flera procent kisel i fast lösning. Detta är i motsats till järnmeteoriterna bland vilka man hittills endast anträffat en meteorit med nämnvärd halt av kisel i fast lösning nämligen »Horse Creek» (2 %). Denna hexadrit är för övrigt anmärkningsvärd genom att den är den nickelfattigaste järnmeteorit man känner

Fig. 13. Detalj i konder från Bjurböle meteoriten, påfallande ljus. A: rent vitt = metall med 35—50 % nickel. B: vitt med relief = troilit. C: ljust grått = olivin och bronzit. D: grått = plagioklas i mellanrum mellan C-korn. E: mörkgrå korn med relief = kromit. I denna konder kunde också lawrencit påvisas (Foto: K. Fredriksson).

Detail in a chondrule from the Bjurböle meteorite, reflected light. A: white = metal with 35—50 % Ni. B: white, high relief = troilite. C: light grey = olivine and bronzite. D: grey = plagioclase in the interstices between grains of C. E: dark-grey, high relief = chromite. In this chondrule lawrencite was also found.

(3,5—4 % Ni). Man har också funnit fri SiO_2 (tridymit?) och en metallfas med ca 75 % nickel, 15 % kisel och ett par procent fosfor och järn.[1]

Förutom dessa huvudmineral förekommer i alla grupperna också andra i mindre mängd, framförallt plagioklas som är natriumkalciumfältspat. En del andra mineral kommer att nämnas i olika sammanhang.

Kondrerna har en yttre form som verkar enkel men deras inre byggnad visar sig vid en mikroskopisk undersökning komplicerad (fig. 11, 12). Man har därför urskilt ett stort antal typer av kondrer. Deras viktigaste mineral är olivin, pyroxen, metalliskt nickeljärn och troilit. Både kamacit och taenit förekommer, och taeniten har vanligen högre nickelhalt, omkring 50 %, än i järnmeteoriter (fig. 13). I små mängder förekommer i kondrerna de flesta övriga meteoritmineralen, t. ex. schreibersit, kromit, ilmenit, diopsid (kalciummagnesiumsilikat), lawrencit, merrillit (kalciumnatriumfosfat) och plagioklas, vanligen relativt rik

[1] Helt nyligen har en komplex magnesium-järn-mangansulfid [ung. $(Mg_{0,7}\,Fe_{0,2}\,Mn_{0,1})\,S$] påvisats i enstatitkondriten »St. Marks».

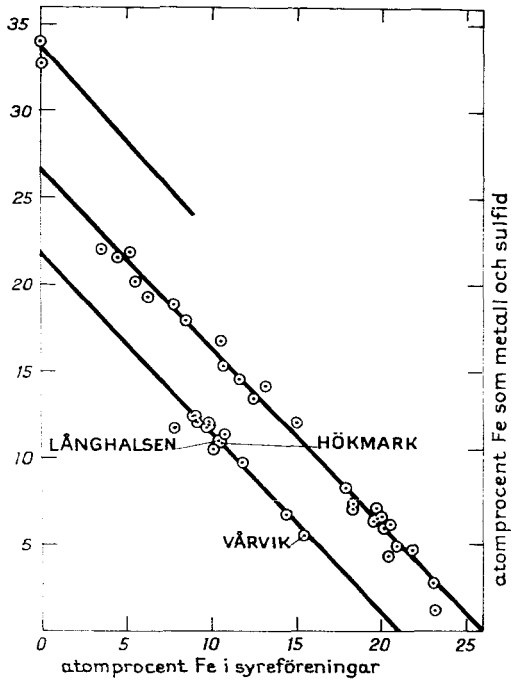
på natrium. I de lösaste meteoriterna är plagioklasen inuti kondrerna opak och mycket finkristallin, nästan glasig, medan de hårdaste kondriterna har bättre kristalliserad fältspat. I s. k. vita kondriter kan t. o. m. tvillingbildning hos fältspaten påträffas.

I mikroskopet studerar man tvådimensionella snitt och det är mycket svårt att omtolka dessa bilder i tre dimensioner. Genom att göra systematiska slipserier genom en konder kan man emellertid rekonstruera den tredimensionella bilden. Det visar sig att många av de egendomliga strukturer som iakttagits låter härleda sig ur speciella snittlägen från samma kondertyp. En av de ofta debatterade frågorna har varit varför strålarna i en konder ser ut att konvergera mot en punkt utanför kondern. Det är en synvilla och beror på snittläget, i själva verket torde alltid den punkt från vilken stråliga kondrer radierar ligga inom densamma. En annan sak är att man ibland har små kondrer inuti en större konder, vilket möjligen också kan vara en synvilla orsakad genom speciella snittlägen.

En kondrit är på sätt och vis motsatsen till en hexaedrit. Medan hexaedriten är en enkristall måste kondriten närmast beskrivas som en tuff eller breccia, dvs. den är en anhopning av olikstora fragment. I många stenmeteoriter observerar man fina ådror av svart glasartat material, som verkar vara uppsmält. I många fall är det en plagioklas, i andra mycket finkornig, till synes nedkrossad olivin. Sådana ådror kan övertvära varandra. Bland stenmeteoriterna finner man sällsynt sådana som är uppbyggda av större brottstycken. Dessa brottstycken kan vara av samma slag eller också representera helt olika meteorittyper, kondriter likaväl som akondriter. Brottstyckenas mineralsammansättning överensstämmer med modermeteoritens och inte nödvändigtvis med den, som råder i den meteorit där de anträffas. Så kan ett fragment vara nästan glasigt, medan huvuddelen av meteoriten är uppbyggd av löst hopfogade partiklar.

Akondriterna är som nämnts sällsynta; totalt kände man 55 fall omkring 1950. De brukar indelas i två huvudgrupper, de kalciumfattiga och de kalciumrika. Den kalciumfattiga gruppen är mineralogiskt identisk med kondriterna, det är enbart kondrerna som saknas. Den kalciumrika gruppen består huvudsakligen av pyroxener och mer kalciumrika plagioklaser än de som hittas i kondriterna. Denna grupp är rätt lik den vanliga vulkaniska bergarten basalt. Av de 55 fallen utgjordes 24 stycken av den kalciumfattiga typen, 31 stycken av den basaltiska typen.

Man skulle kanske tro av ovanstående skildring att stenmeteoriterna skulle ha en mycket skiftande sammansättning. Om man bortser från akondriterna är detta inte fallet. Tvärtom har det visat sig att kondriternas genomsnittliga kemiska sammansättning är överraskande konstant. Detta faktum påpekades redan 1878 av A. E. Nordenskiöld och man har sedan funnit att ju bättre analyserna blev ju mera lika blev de. Detta gäller särskilt om man räknar bort de »flyktiga» beståndsdelarna syre, kol, väte (vatten) och svavel. Med hjälp av



'ig. 14. Sambandet mellan järn bundet i syreföreningar och järn i form av metall eller ›undet i sulfider (bilden erhållen genom tillmötesgående av dr B. Wiik, Helsingfors).

'he relation between iron in oxygen compounds and iron as metal and sulfide.

ıya tillförlitliga analyser har man funnit att kondriterna tycks dela upp sig på ·tt par grupper. Inom de olika grupperna är den totala järnhalten konstant. 'ärnet förekommer däremot bundet på olika sätt i olika meteoriter i samma ;rupp. Detta är grafiskt framställt i fig. 14, där man ser hur värdena grupperar ig kring vissa 45° linjer. Det bör påpekas, att i detta material ingår alla typer ıv kondriter, även de kolhaltiga, som alla tycks höra till den med högre järnıalt. Inom varje grupp är halten av de flesta grundämnen konstant inom felıränserna. Några varierar med en faktor 100 mellan de kolhaltiga och övriga åsom bly, tallium och vismut. Även en del andra grundämnen varierar tydligt nom grupperna exempelvis kalium.

Fördelningen av grundämnena på de olika mineralfaserna i kondriterna är ej ıelt slumpartad. En regel, som varit mycket omdiskuterad men som verkar att ›ftast vara riktig, är känd under namnet Priors regel och lyder: Ju mindre nic:eljärn i kondriten desto rikare är det på nickel och desto rikare på järn är nagnesiumsilikaten (fig. 15).

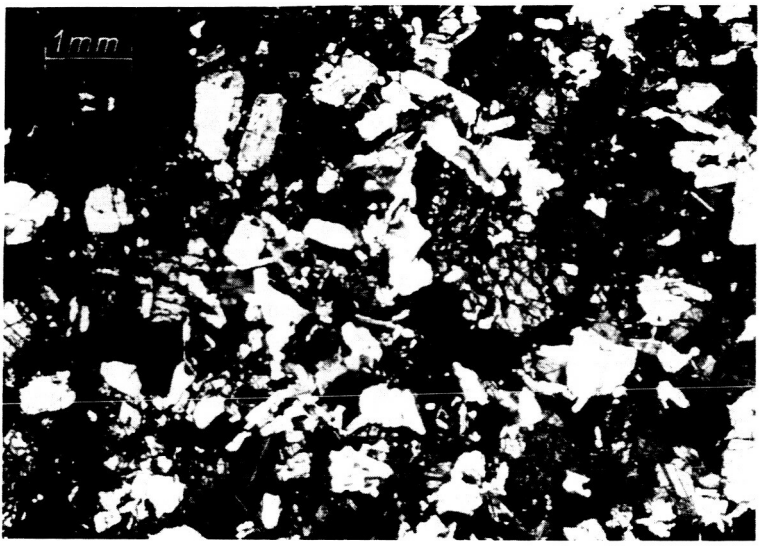


Fig. 15. Mesosideriten »Clover Springs». Vänstra fjärdedelen av bilden metallrik mesosiderit (det svarta) det övriga akondritiskt. De stora tavlorna = anortit, i övrigt en järnrik pyroxen (hypersten) samt olivin. I den metallrika delen håller olivinen 70 % järnolivin medan den i den metallfattiga håller 60 % järnolivin, alltså ej i överensstämmelse med Priors regel i detta fall. (Foto: K. Fredriksson.)

The mesosiderite Clover Springs. Left fourth of the picture a metal-rich mesosiderite, the rest of it achondritic.

JÄRNSTENMETEORITER

Detta är sällsynta meteoriter och man har totalt endast ca 10 fall och 50 fynd. De brukar indelas i två grupper, pallasiter och mesosideriter.

Pallasiterna består i stort sett av järn med ca 10 % nickel samt olivin. Mängden nickeljärn varierar mellan 10—60 % och vanligen bildar järnet en tvättsvampliknande massa där olivinen fyller porerna. Järnet visar widmanstättenstruktur vid etsning. Då nästan bara olivin förekommer av silikatmineral saknas praktiskt taget kalcium och aluminium.

Mesosideriterna däremot, som betraktas som ett slags mellanting mellan pallasiterna och den basaltiska typen av akondriterna, består av en järnrik pyroxen och en mycket kalciumrik plagioklas (anortit) samt nickeljärn och olivin (fig. 15). Nickeljärnet är mycket ojämnt fördelat, medan noduler av olivin är sparsamt inströdda i massan.

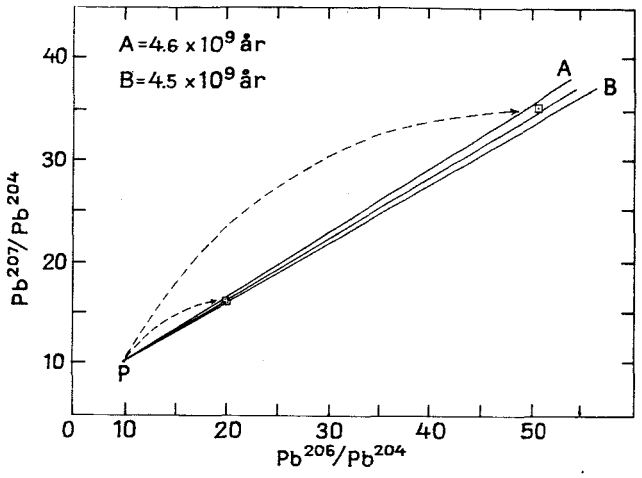


Fig. 16. Beräkning av meteoriternas ålder. De prickade linjerna visar hur blysammansättningen hos stenmeteoriterna ändrats med tiden från utgångspunkten P (järnmeteoriterna). Rutornas storlek antyder mätfelen (efter C. Patterson, 1956).

The lead isochron for meteorites and its estimated limits. The square around each point indicates measurement error. The dotted lines indicate how stone meteorite leads have evolved.

METEORITERNAS ÅLDER SAMT DEN KOSMISKA STRÅLNINGENS INVERKAN PÅ DEM

En diskussion av dessa frågor förutsätter noggranna definitioner då man annars lätt tänker på olika saker. Vad skall man mena med åldern på vårt solsystem? Svaret beror delvis på vad man antar för bildningsmekanism. Om man exempelvis utgår från att solsystemet bildats »plötsligt», så avser man tiden från den sista nukleära händelse som bidragit med materia till vårt solsystem. Om man däremot utgår från en kontinuerlig syntes så avses den tidpunkt vid vilken solsystemet isolerades från ett i radioaktiv jämvikt befintligt interstellärt medium.

Vid en senare tidpunkt måste temperaturen i denna materia ha sjunkit så mycket att flytande eller fasta faser utskiljts och i samband härmed borde meteoriterna eller de kroppar, som gett upphov till meteoriterna, ha bildats. Det viktiga härvid är att från denna tidpunkt blir de kemiska separationsprocesserna mycket betydelsefulla. Sedan kan följa en hel rad händelser i meteoriternas historia som eventuellt kan dateras.

Vad kan man säga om meteoriternas ålder? Svaret ges kanske bäst genom en redogörelse för undersökningar av blyisotopernas proportioner i järn- och

Tabell 1. Radioaktivitet inducerad av kosmisk strålning i järnmeteoriten »Aroos» (falldatum 24 november 1959, undersökning startad 24 februari 1960) enligt Honda & Arnold (1961) och stenmeteoriten »Bruderheim» (falldatum 4 mars 1960, undersökning startad 9 maj 1960) enligt Honda, Umemoto & Arnold (1961).

Nuklid	Halveringstid	Sönderfall/min. per kg vid falltiden	
		Aroos	Bruderheim
Be^{7}	53 dagar	—	$\leqslant 100$
Be^{10}	$2{,}5 \times 10^{6}$ år	$4{,}1 \pm 0{,}4$	16 ± 16
Na^{22}	2,58 år	$2{,}1 \pm 0{,}3$	90 ± 10
Al^{26}	$7{,}4 \times 10^{5}$ år	$3{,}6 \pm 0{,}4$	60 ± 6
Si^{32}	~700 år	$0{,}8 \pm 0{,}3$	—
Cl^{36}	$3{,}1 \times 10^{5}$ år	$14 \pm 1{,}4$	$7{,}5 \pm 0{,}8$
K^{40}	$1{,}25 \times 10^{9}$ år	$2{,}3 \pm 0{,}4$	—
Ca^{45}	164 dagar	5 ± 1	—
Sc^{46}	84 dagar	30 ± 3	$6{,}2 \pm 0{,}6$
Ti^{44}	~200 år	$4{,}4 \pm 0{,}4$	$2{,}0 \pm 0{,}2$
V^{48}	16,0 dagar	90 ± 45	34 ± 7
V^{49}	330 dagar	164 ± 16	34 ± 5
Cr^{51}	27,8 dagar	260 ± 120	110 ± 27
Mn^{53}	$\geqslant 2 \times 10^{6}$ år	515 ± 52	85 ± 17
Mn^{54}	308 dagar	470 ± 47	100 ± 13
Co^{56+58}	~74 dagar	120 ± 34	14 ± 4
Co^{57}	240 dagar	89 ± 9	11 ± 1
Co^{60}	5,26 år	17 ± 2	9 ± 1
Ni^{59}	8×10^{4} år	60 ± 15	12 ± 3

stenmeteoriter. Man antar att meteoriterna bildades vid samma tidpunkt (vilket endast behöver betyda att eventuella åldersskillnader kan försummas i förhållande till deras totala ålder) samt att de sedan de bildades varit isolerade, dvs. i kemisk mening slutna system. Vidare har de ursprungligen innehållit bly av samma isotopsammansättning. Växlande mängder uran kan ha ingått men med samma isotopsammansättning som terrestriskt. Man kan då lätt beräkna åldern om man känner isotopsammansättningen hos bly från några meteoriter, urans isotopsammansättning och sönderfallskonstanterna. Man har omsorgsfullt studerat tre stenmeteoriter samt troilit från två järnmeteoriter. Resultaten framställs grafiskt i fig. 16. Som synes ligger punkterna på en rak linje som representerar en ålder av 4 500 miljoner år. Stenmeteoriternas ålder kan också bestämmas med hjälp av andra sönderfall, exempelvis K^{40} — Ar^{40}. Med hjälp av dessa metoder har man kommit fram till liknande siffror. I en del fall får man fram

Tabell 2. Halten av skandium, helium och neon i några järnmeteoriter enligt Wänke (1960).

Meteorit	Massa	Helium[1]	Neon[1]	Skandium[1]
Savik	66 ton	0,0002	—	0,21
Muonionalusta	?	0,002	—	0,19
Gibeon	15 ton	0,36	—	0,18
Gibeon (annat prov)	15 ton	3,51	1,98	0,43
Odessa	stor	1,51	1,22	0,33
Carbo (yttre del)	450 kg	20,9	23,3	1,9
Carbo (inuti)	450 kg	19,8	11,2	1,6
Tamarugal	320 kg	23,1	14,7	2,3
Treysa	63 kg	24,1	21,1	2,0
Thunda	62 kg	27,1	18,7	2,6
Mt Ayliff	13,5 kg	36,2	26,7	3,6
Clar County	11,3 kg	47,8	37,8	4,6

[1] Helium: 10^{-6} cm^3/g; neon: 10^{-8} cm^3/g: skandium: 10^{-9} g/g.

lägre ålder, vilket man vanligen tolkar så att exceptionella händelser inträffat i meteoritens historia, exempelvis upphettning. Meteoriterna har följaktligen under mycket lång tid rört sig i vårt solsystem. De har härvid varit utsatta för den kosmiska strålningen utan att ha en skyddande atmosfär som jorden. Den energirika kosmiska strålningen, huvudsakligen protoner med energier i Gev-området, framkallar kärnreaktioner av alla slag, varför praktiskt taget samtliga nuklider med masstal mindre än meteoritmaterialets bildas. Själva processen är mycket komplex då de träffade atomkärnorna emitterar nukleoner med både hög och låg energi liksom mesoner. Dessa sekundära partiklar växelverkar i sin tur med andra kärnor.

En kvantitativ teori för denna komplicerade process skulle kunna belysa en hel del frågor om meteoriterna, såsom den totala strålningsdos en meteorit fått och vilken storlek den haft innan den kom in i jordens atmosfär. Man skulle också få fram resultat om den primära kosmiska strålningens energispektrum och bidraga till frågan om den kosmiska strålningens intensitetskonstans i tid och rum.

För närvarande vet man ganska litet om dessa förhållanden, men i många välutrustade institutioner är experimentella undersökningar av denna typ på modet. Man kan skilja på två arbetsriktningar. Den ena försöker studera så »färska» meteoriter som möjligt och analyserar deras radioaktiva strålning. Resultatet av dylika undersökningar gjorda på en järnmeteorit och en stenmeteorit visas i tabell 1. Ett närmare studium av dessa och andra resultat tyder

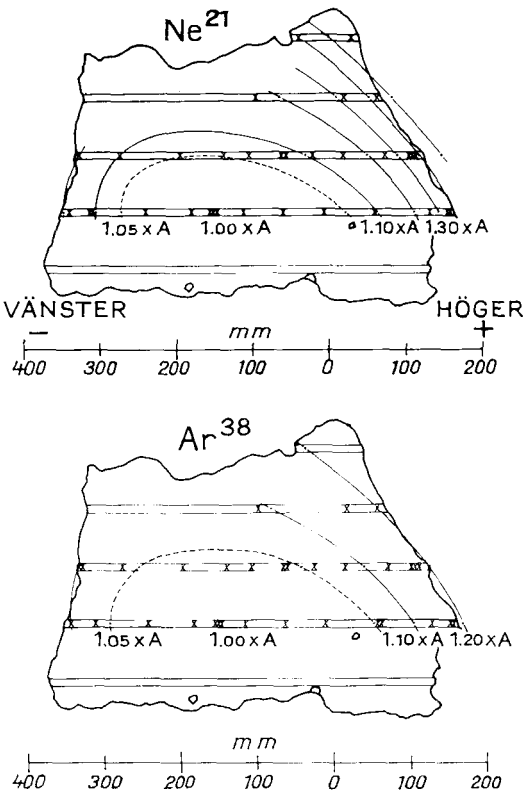


Fig. 17. Konturer för lika halter av Ne^{21} av Ar^{38} hos järnmeteoriten »Grant». Kryss mätpunkter. För Ne^{21} $A = 5{,}10 \times 10^{-8}$ cm^3/g vid NPT, för Ar^{38} $A = 27{,}4 \times 10^{-8}$ cm^3/g vid NPT (efter Signer & Nier, 1960).

Contours of equal concentration for Ne^{21} and Ar^{38}. Crosses indicate points where analyses were made. For Ne^{21} $A = 5.10 \times 10^{-8}$ cc STP/g and for Ar^{38} $A = 27.4 \times 10^{-8}$ cc STP/g.

på att den kosmiska strålningens intensitet under miljontals år varierat högst med en faktor 2—3. Den andra riktningen studerar de inaktiva nuklider som bildats. Härvid är urvalet i viss mån begränsat då den bildade mängden i allmänhet är mycket liten. En förutsättning är därför att grundämnet ifråga primärt skall finnas i mycket liten mängd i meteoriten. Man kan också förmoda att större meteoriter skall visa skillnader i halterna med djupet under ytan, då den kosmiska strålningen absorberas. Framför allt har man studerat gasformiga produkter såsom vissa ädelgasisotoper, då de är lätta att anrika och mäta, men i järnmeteoriter har man också sökt efter några grundämnen, som ur kemisk synpunkt skall vara praktiskt taget helt koncentrerade i oxidiska mineral, t. ex. skandium. Några resultat framgår av tabell 2 och fig. 17.

Nuklidernas fördelning i meteoriterna är emellertid ännu mer komplicerad. Vi har tidigare nämnt den skillnad man gör mellan meteoriternas ålder och solsystemets ålder. När solsystemet bildades fanns en mängd radioaktiva ämnen närvarande med ytterst olika halveringstider, från mycket korta till de långa på mer än miljarder år, t. ex. torium. När meteoriterna bildades kunde eventuellt en del mer kortlivade radioaktiva ämnen ännu ha funnits kvar. Vid de kemiska separationer, som åtföljer uppkomsten av flytande och fasta faser, kan moderelement och dotterelement anrikas i olika faser. I allmänhet har säkerligen olika processer homogeniserat all materia efter det kortlivade radioaktiva ämnets utslocknande så att man nu inte kan upptäcka skillnader i isotopsammansättningen. Men om man hade produkter bevarade från solsystemets allra första tid borde man finna fall där isotopsammansättningen avvek från den vi nu finner på jorden. Exempel på sådana sönderfall där man kunde få kemisk separation är Pb^{205}—Tl^{205}, Pd^{107}—Ag^{107}, J^{129}—Xe^{129} och Pu^{244}—Xe^{136} där det radioaktiva ämnet är nämnt först. Sådana observationer skulle också ge möjlighet till beräkningar av längden på intervallet mellan solsystemets och meteoriternas bildning. Tyvärr är inte hittills vunna resultat entydiga. Det fall som framför allt studerats är J^{129}—Xe^{129}. Man har funnit »överskott» av Xe^{129} i vissa meteoriter. Några har tolkat detta så att man haft en viss jodhalt i meteoriten när den bildades och isotopen J^{129} sönderfallit till Xe^{129}. Med vissa antaganden kan man då beräkna det ovannämnda intervallets storlek och kommer fram till storleksordningen 100 miljoner år. Andra har påpekat att andra xenonisotoper alltid är närvarande samt följande intressanta omständighet. Argon finns också närvarande varvid Ar^{40} är radiogent (K^{40}) medan Ar^{36} måste vara ursprungligt. Dessa två isotoper förhåller sig mycket olika om meteoriten upphettas. Ar^{40} lossnar lätt vid låga temperaturer medan Ar^{36} ger sig i väg vid lägst 1 000°C. Xe^{129} liknar i detta avseende Ar^{36}, vilket skulle vara ett kriterium på att det inte är radiogent bildat av jod. Då detta är ett forskningsfält som öppnades först 1960 har man när detta skrivs ingen klar bild av förhållandena. Kanske kommer man att lyckas finna meteoriter med fullt klara fall av »fossil» radioaktivitet. Ett annat problem av principiellt intresse är följande. När meteoriten faller ner på jordytan har den en viss storlek. Är detta den storlek den haft sedan meteoriterna bildades för ca 4,5 miljarder år sedan? Man har två delproblem. Dels kan ursprungskroppen genom en kollision eller någon annan händelse av liknande art ha delats upp i flera, dels kan man kanske räkna med en viss erosion i rymden genom bombardemang med mycket små partiklar liknande förgasningen vid passagen genom atmosfären. Man har många data som tyder på processer efter meteoriternas bildning. Man har som visats i fig. 16 funnit att bly i troilit i järnmeteoriter har en mycket ursprunglig sammansättning beroende på den försvinnande låga radioaktiviteten. Men man har nu mätt isotopsammansättningen hos bly av troilit från en järnmeteorit som har ungefär samma

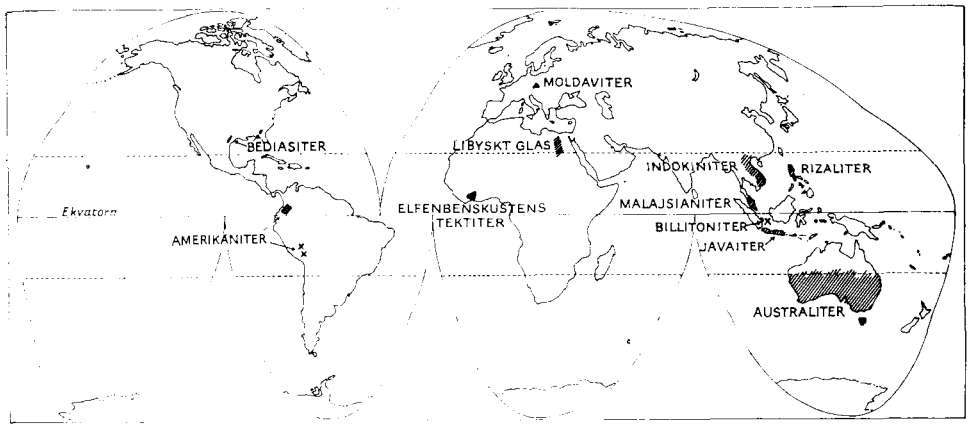


Fig. 18. Tektiternas utbredning.

The distribution of tektites.

sammansättning som det bly vi anser typiskt för jordskorpans medelsammansättning för närvarande, dvs. det håller avsevärda mängder radiogent bly. För att förstå detta liksom många data om halten av Ar^{40} i meteoriter måste man anta en existenstid för meteoriten som är kortare än $4{,}5 \cdot 10^9$ år. Man finner tider ända ner till några 100 miljoner år. Vad beträffar rymd- och atmosfärserosionen finner man siffror som pekar på värden ända upp till 30—90 % erosion genom att studera nuklider bildade av den kosmiska strålningen.

TEKTITER

Den vulkaniska bergarten obsidian är det vanliga förekomstsättet för glas i naturen. Mycket sällsynt förekommer också glas som bildats genom den upphettning blixten framkallar när den slår ner (blixtrör) liksom också glas som uppstått genom hettan vid gräsbränder. De vulkaniska glasen har en typisk utbredning och de andra är lätta att känna igen då de alltid innehåller halvsmälta eller osmälta korn av ursprungsmaterialet.

När dessa lättförklarliga glasfynd eliminerats återstår emellertid en rad sådana som tillhör de till bildningssätt och ursprung mest gåtfulla föremålen i den oorganiska naturen. Dessa glas sammanfattas under namnet tektiter, men vanligen betecknas de med namn som härletts från fyndorten. Var de anträffats framgår av fig. 18. Inom varje område förekommer de i en viss geologisk avlagring, vars ålder växlar från område till område.

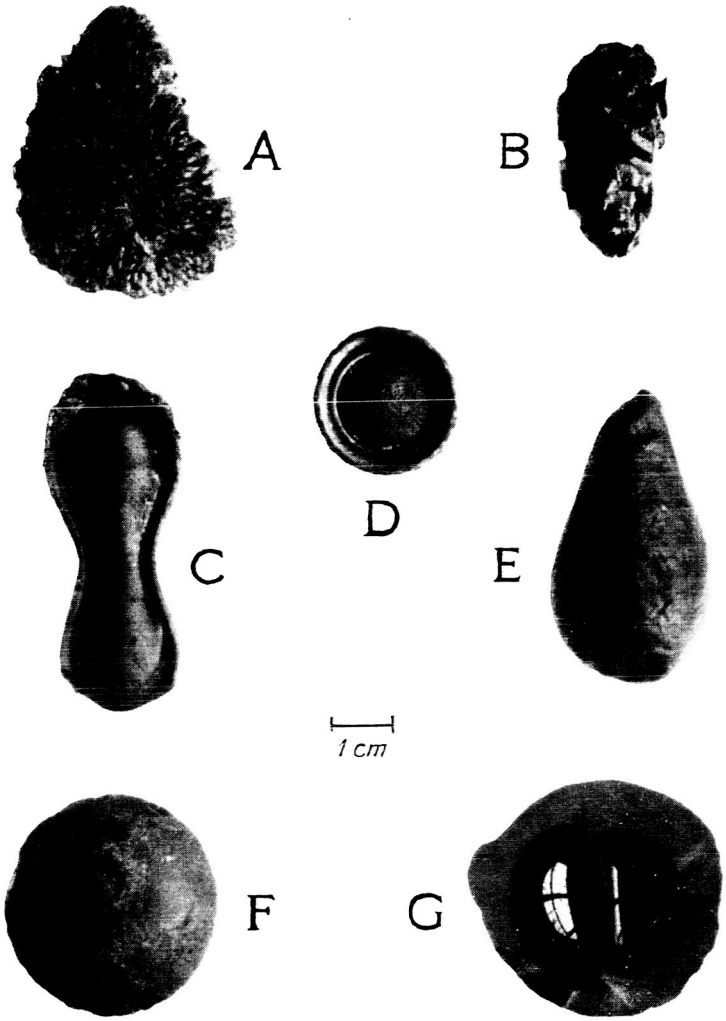


Fig. 19. Tektiter. A: Moldavit. B: Billitonit. C—G: Australiter. Bilden erhållen genom tillmötesgående av British Museum (Natural History).

Tektites.

De yngsta kända tektiterna är australiterna, som är helt recenta. De är fördelade över 2/3 av den australiska kontinenten och givetvis kan de också vara spridda över ännu större områden av de omkringliggande oceanerna.

Till tektiterna kring Sydkinesiska sjön kan man också hänföra områdena i Ostindien. De uppvisar inbördes många likheter och kan därför möjligen ha

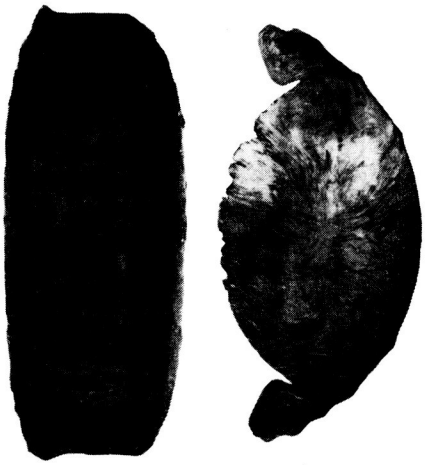


Fig. 20. Genomskärning av knappformad australit med komplexa inre flytstrukturer (efter Baker 1944). × 1,4

Section through button-shaped australite, showing complex internal flow structure. × 1.4

gemensamt ursprung. De anträffas i lager från mellersta pleistocen. Inom parentes kan nämnas att de anträffats på Java i samband med grävningar efter Javamänniskan.

Moldaviterna anses komma fram genom vittring av miocena (tertiära) avlagringar, medan bediasiterna anträffas i eocena bildningar. Elfenbenskustens tektiter vet man mycket litet om, liksom amerikaniterna, vars tektitnatur är omstridd. Formen, storleken, färgen och andra yttre kännetecken skiftar från område till område. Moldaviterna är brungröna till buteljgröna, medan de flesta andra är brunsvarta till becksvarta. Storleken växlar starkt, men man har aldrig anträffat någon tektit som vägt mer än ett par kilogram. För australiter t. ex. är rekordet 218 g trots att man i samlingar har mer än 30 000 exemplar. Rekordet torde vara en indochinit på 3,2 kg. Formen växlar från helt oregelbunden till närmast nöt-, ägg- eller droppliknande (fig. 19). Det största intresset har emellertid varit knutet till australiternas ofta utomordentligt symmetriska uppbyggnad. De liknar ibland knappar (fig. 19 C, D). Om man skär itu en australit, eller annan tektit, kan man iaktta komplicerade flytstrukturer (fig. 20). Enklast förklaras denna som uppkommen genom *två* smältperioder. Vid den första har glaset bildats och australiten fått en kulliknande form. Den andra smältningen skulle skett när tektiten rört sig snabbt genom atmosfären. Upphettningen blir starkast på framsidan och de första smältprodukterna rivs loss. När hastigheten minskas kommer glaset att flyta mot läsidan och och bilda en fläns. Att inte alla tektiter har denna form förklaras av att de inte varit kulsymmetriska. De

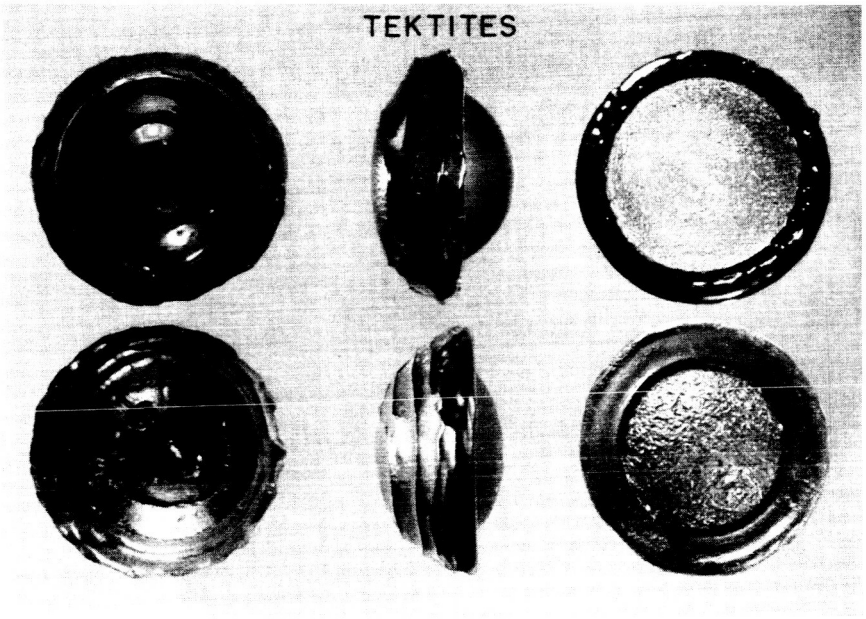


Fig. 21. I övre raden knapplika australiter, i undre tektitmodeller av glas framställda genom aerodynamisk upphettning i vindtunnel. Bilden erhållen genom tillmötesgående av National Aeronautics and Space Administration, Ames Research Center, Kalifornien.

Australian tektite buttons (upper row) compared with tektite glass models ablated by aerodynamic heating.

snurrar därför runt under rörelsen genom atmosfären och blir på så sätt mer eller mindre jämnt upphettade.

En bekräftelse härpå har man nyligen erhållit genom experiment med glaskulor av tektitliknande sammansättning i en vindtunnel för supersoniska hastigheter. Vid höga vindhastigheter kunde man efterlikna australiternas typiska utbildning (fig. 21).

Även om den första smältningen kan man dra vissa slutsatser. Man har nämligen i tektiterna identifierat upp till sandkornsstora glaspartiklar som rent kvartsglas (sådant anträffas också i de redan nämnda blixtrören). Man har värmebehandlat en tektit, som var ovanligt rik på sådana partiklar, vid 1 600°C i 4 timmar. Genom denna behandling försvann partiklarna praktiskt taget fullständigt. Den sekundära flytstrukturen försvinner också lätt genom värmebehandling. Konklusionen är att den primära glasbildningsprocessen måste ha varit en snabb process, då man i annat fall skulle haft en homogenisering av materialet.

Tektiternas kemi ger inte många hållpunkter. Sammansättningen varierar något från grupp till grupp men ej särskilt mycket. Man har försökt jämföra sammansättningen med jordiska bergarters. I vissa fall har man ansett att den liknar en lerrik sedimentsbergarts medan i andra den snarast svarar mot en kiselsyrerik eruptivbergarts. Nyligen har man genom undersökningar av polerprov kunnat påvisa förekomsten av mikroskopiska droppar av nickeljärn i tektiterna. Nickelhalten i metallen är emellertid endast 1—2 % medan svavel- och särskilt fosforhalten är högre än i meteoritjärn. Så återigen har man en ny intressant observation som likväl inte ger något definitivt svar på frågan om deras bildningshistoria och ursprung. Man har också studerat förekomsten av radioaktiva isotoper och deras sönderfallsprodukter i tektiterna. Mätningar av isotopsammansättningen hos bly och strontium ger ingen skillnad mot typiska »moderna» bergarter.

Som nämnts i samband med astroblemen (sid. 128) kan eventuellt tektiterna vara anknytna till dessa. Några forskare har sökt korrelera nickelhalten i tektiterna med avståndet från en antagen nedslagsplats, som alltså skulle kunna lokaliseras med ledning av nickelhalten och genom studier av spridningsområdena för olika typer av tektiter. Enligt dessa arbeten synes nickelhalten avta med ökat avstånd från nedslagsplatsen. Emellertid tycks inte heller dessa resultat vara invändningsfria.

METEORITERNAS URSPRUNG OCH BILDNING

I det föregående har vi sökt sammanfatta några grundläggande fakta om meteoriterna. Alltsedan deras rätta natur klarlades har man spekulerat över meteoriternas ursprung och bildningssätt. Forskarna befinner sig emellertid rent allmänt sett i ett dåligt läge. Iakttagelsematerialet är litet, många meteorittyper är bara kända i kanske 10—20 exemplar. Följaktligen är det möjligt att tillfälligheter i fallstatistiken ger en skev bild av det verkliga förhållandet. Vår kunskap är också helt grundad på meteoriter som är så stora att de kan tillvaratas, de små brinner upp i atmosfären, och hur dessa senare sett ut dessförinnan har man ännu ganska vaga föreställningar om.

En ytterligare svårighet är, att en teori för meteoriterna kräver data från så skiftande områden som astronomi, fysik, kemi och geologi. En enda person kan inte behärska alla dessa discipliner, och erfarenheten visar, här som på andra områden, att en fackman inom ett område gärna övervärderar argument från den egna forskningsriktningen och underskattar betydelsen av fakta från andra områden. Tyvärr är också ett verkligt fruktbart samarbete mellan forskare från helt olika områden inte lätt i denna typ av arbete. Följden av dessa förhållan-

den är att uppställda teorier eller snarare hypoteser redan vid publiceringen stridit mot fundamentala fakta från annan vetenskapsgren, eller hastigt avlidit genom motsägelser mot det snabbt växande iakttagelsematerialet.

Ett par fasta utgångspunkter anser man sig nog numera ha, och man har också alltmer lyckats formulera problemställningar som kan diskuteras på basis av fakta. De fundamentala utgångspunkterna är att åtminstone huvuddelen av meteoriterna tillhör och har tillhört solsystemet samt att deras ålder är av storleksordningen 4,5 miljarder år, vilket är en siffra ungefär lika med den antagna åldern på solsystemet självt.

Det är givet att det bälte av asteroider som finns huvudsakligen mellan Mars och Jupiter tilldragit sig meteoritforskarnas uppmärksamhet. Man har där ett mycket stort antal objekt av mycket varierande storlek. Det har också visats från astronomiskt håll att kollisionsfrekvensen är stor mellan sådana kroppar om man mäter med geologiska tidmått. Man kan därför vänta sig en successiv »nedkrossning» med åtföljande starkt störda eller helt nya banor för dessa kroppar. Är det under dessa förhållanden tillåtet att extrapolera bakåt i tiden och anta att man ursprungligen haft ett eller ett par större astronomiska objekt? Detta problem, om meteoriterna i stort sett alltid haft den storlek de nu har eller om de kan återföras på ett litet antal större kroppar, har varit och är föremål för intensiv debatt och ofta häftig polemik. Svårigheten är att finna entydiga argument i iakttagelsematerialet. Man har få självklara sammanhang att utgå från och man kan ofta genom att ordna materialet på visst speciellt sätt finna stöd för den egna uppfattningen. Situationen påminner om den som skall finnas i en god detektivroman, indiciematerialet är sådant att alla inblandade kan misstänkas.

En central fråga är temperaturens variation med tiden. Uppbyggnaden av de kolhaltiga kondriterna visar att de i sin nuvarande gestaltning inte kan ha varit varmare än kanske 100—200°C. Deras innehåll av ädelgaser tyder på att de varit i det nuvarande tillståndet mycket länge, sannolikt alltsedan den tidrymd, då meteoriterna bildades. Många meteoriter visar emellertid utpräglade smältfenomen, och många är starkt omvandlade genom värme. Några systematiska undersökningar över när dessa värmeomvandlingar skett finns ännu ej. En del smältfenomen som man observerat hos meteoriter verkar att ha uppkommit vid kollisioner och man har också kunnat efterlikna de observerade fenomenen genom chockvågsförsök vid tryck upp till 800 kilobar. Det är därför troligt att man allmänt sett skulle ha att räkna med hög temperatur endast under en mycket tidig del av meteoriternas existenstid.

Kondrerna utgör meteoriternas viktigaste byggnadselement. Varje meteoritteori måste därför kunna besvara frågan om deras bildningssätt.

De flesta kondrer, i synnerhet ur lösa, oomvandlade kondriter, ser ut som om de varit smälta. Förekomsten av skelettkristalliter och devitrifierat fält-

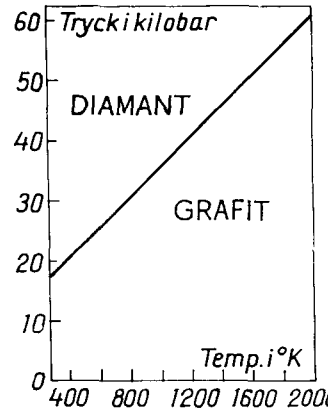


Fig. 22. Tillståndsdiagram för kol (efter Simon 1955).
Phase diagram for carbon.

spatglas tyder på en snabb första avkylning och kristallisation. Kondrerna i en och samma meteorit tycks ha en likartad kemisk genomsnittssammansättning med undantag för halten metalliskt järn. Att de trots detta uppvisar så vitt skilda strukturer och varierande proportioner mellan de olika ingående mineralen tyder på att varje enskild konder haft sin egen första avkylningshistoria.

Å andra sidan har de enskilda mineralen trots den olika utformningen i regel konstant sammansättning. Ett metallkorn i en konder kan vidare bestå av både kamacit och taenit. Dessa förhållanden tyder på att någon slags jämvikt uppnåtts efter det kondrerna och hela kondriten bildats och vilken borde erfordra en långsam avkylning.

Trycket är intressant då man genom det skulle få en indikation på storleken av de kroppar som meteoriterna bildats av. Som vanligt när det gäller meteoriter är det svårt att finna argument som ej är diskutabla. Det mest entydiga indiciet är förekomsten av diamanter i en sällsynt typ av stenmeteoriter (ureiliter). Det är inte alltid de innehåller diamanter, men man har ett fall, där halten uppgår till inte mindre än en viktsprocent. Man vet numera att det är osannolikt att diamanter bildas metastabilt eller att de skulle bildas vid en temperatur av exempelvis 700—750°C även om man hade mycket långa tider till sitt förfogande. Det betyder (fig. 22) att man haft ett tryck av minst 35 000 atmosfärer när dessa diamanter bildades. Om man haft ett gravitativt hydrostatiskt tryck måste ursprungskroppen haft en avsevärd storlek. Alternativet är att diamanterna bildats vid den hastiga tryckförhöjning, som uppstår av chockvågen vid en kollision. Ett sådant uppkomstsätt anses mycket troligt för diamanter man funnit i meteorjärn från astroblem, t. ex. Meteor Crater.

Den kemiska sammansättningen är givetvis en mycket viktig informationskälla, men också mycket svår att tolka. Redan sådana frågor som det genetiska sambandet mellan järnmeteoriter och stenmeteoriter kan ge upphov till många helt olika tolkningar. Få torde för närvarande hylla hypotesen att man ursprungligen haft en enda planet som sprängts sönder vid en kosmisk katastrof, men i övrigt går meningarna starkt isär. Man vet för närvarande inte om t. ex. den i fig. 14 antydda uppdelningen av stenmeteoriterna är reell eller inte och ifall den är reell, vad den betyder. Lika litet vet man varför nickelhalten ger en indelningsgrund för järnmeteoriterna och gallium—germanium en helt annan.

En mycket debatterad fråga är de kolhaltiga kondriternas ställning. Enligt några forskare är de de mest ursprungliga av alla meteoriter och alla andra meteoriter härstammar från dem genom en serie kemiska processer i huvudsak innebärande en reduktion av de ingående ämnena. Enligt andra utgör de endast en intressant fraktion av gruppen med »hög» järnhalt, som råkade mycket tidigt i sin historia bli impregnerade med de för dem karakteristiska elementen. Tektiternas ställning i förhållande till meteoriterna har varit mycket omdiskuterad och ett otal hypoteser har framförts. En central fråga är, om de skall anses utgöra terrestriskt eller kosmiskt material. I förra fallet skulle de utgöra »stänk» från jättelika astroblem, men då uppstår frågan, varför man aldrig observerat glas med ordentliga osmälta korn av ursprungsmaterialet. Om det senare alternativet är riktigt, varvid man särskilt tänkt på månen, är det svårt att förstå, varför sammansättningen i både stort som smått skulle vara så lik vad man finner på jordytan nu, vilken fått sin prägel av de exogena processer, som äger rum med vatten och luft som särskilt verksamma agentier.

Situationen i dag förändras snabbt genom den intensiva forskning som äger rum. Om man kunde börja en mera omfattande insamling av material med hjälp av rymdfarkoster skulle säkert många av de nu gåtfulla punkterna finna enkla svar. Det är dock säkert att meteoriterna är resultatet av mycket komplicerade processer. Kanske de t. o. m. uppkommit på flera olika sätt. Kunde man förklara meteoriternas uppkomst skulle man dock vara betydligt närmare svaret på frågan om vårt solsystems uppkomst och utveckling.