

Gravetat i col.lisions: quins cossos poden xocar amb nosaltres ?

C. Jordi

Departament d'Astronomia i Meteorologia, Universitat de Barcelona

Institut d'Estudis Espacials de Catalunya

Introducció

En el Sistema Solar on ens trobem immersos com a habitants del planeta Terra, no ens hi trobem pas sols. No només hi ha els altres planetes i els satèl.lits, sinó que també hi trobem asteroides, cometes i milions de partícules de pols, cada u seguint el seu camí entorn del Sol. La Terra en la seva trajectòria al voltant del Sol, any rera any, realitza un escombrat constant de material còsmic i col.lisiona amb aquests cossos i material.

Els cometes són força espectaculars amb caps brillants i llargues cues que s'extenen a l'espai sent visibles durant varies setmanes. Sobretot a l'antigor eren considerats signes de mal presagi, basant-se en la creença que al cel es podia llegir el futur. Aquest astres d'aparició esporàdica eren considerats malèfics.

Tant els asteroides com les partícules de pols, sovint es cremen com visibles meteors a la part alta de l'atmosfera, i només els més grans o de composició més compacta poden sobreviure a la fricció atmosfèrica i arribar fins a terra com a meteorits. Els meteors tenen una curta durada i no sent tan espectaculars com els cometes, no han estat objecte d'atracció popular ni han causat pànic o temença a ningú en el mateix grau. Normalment cauen d'un en un, però de vegades ho fan en forma de pluja.

Descriurem aquests components no tan coneguts del Sistema Solar i ens centrarem, bàsicament, en els que poden ocasionar impactes. Presentarem algunes evidències històriques i probabilitats de succés.

Cometes

Els cometes són aglomerats de gasos glaçats i partícules rocoses (pols). La seva mida és relativament petita, el diàmetre típic és d'uns pocs kilòmetres i la seva massa és menor que una deumil.lionèssima de la massa de la Lluna. Les seves òrbites són molt el.líptiques i passen la major part del temps ben allunyats del Sol no sent visibles; periòdicament s'acosten al Sol, recorren ràpidament la part més interna de les seves òrbites, i tornen a submergir-se en les profunditats del Sistema Solar. En aquesta fugaç visita, l'escalfor del Sol comença a desfer-ne el gel i el flux de gas i pols forma un embolcall al voltant del nucli, tornant-los visibles. El *vent solar*, ocasionat pels àtoms que escapen del Sol, expel.len els gasos i ocasionen la típica cua del cometa (de milions de kilòmetres), que sempre va dirigida en direcció contrària al Sol. La majoria de les òrbites dels cometes són fora del pla de les òrbites dels planetes.

Donada la seva petita massa no tenen cap efecte notable sobre les trajectòries dels planetes i satèl.lits, encara que hi passin ben a prop. Ben al contrari, Júpiter i Saturn poden modificar l'òrbita del cometa, fins i tot expulsant-lo del Sistema Solar. Donada la fragilitat del cometa, tant el Sol com Júpiter i Saturn poden disgregar-lo en trossos si el cometa passa prop seu. De fet, les forces de marea ocasionades per aquestes gran masses són

molt més fortes que l'atracció gravitacional mútua del material del cometa i això el trenca en fragments. Això és el cas del cometa Biela i el West que van ser trencats per efecte del Sol l'any 1826 i el 1975, respectivament. També coneixem el cas de fragmentació de cometes per part de Júpiter: el Brooks 2 al 1886, i, més recentment, l'any 1992 el Shoemaker Leavy 9 que es va trencar en uns 28 trossos.



Figura 1. El cometa Hale-Bopp que es va poder observar el 1997. Es veu perfectament el cap del cometa a la part inferior i la cua ocasionada pel vent solar. La cua està dividida en la cua de partícules de pols (blanca) i de ions (blava).

Els cometes brillants i espectaculars són força rars: n'apareix un cada 10 anys en mitjana. Actualment, és improbable que n'aparegui un de sobte. Hi ha observadors que "vigilen" l'aparició de nous cometes, que els segueixen per calcular-ne la trajectòria i predir quan s'acostaran al Sol i a la Terra, de manera que nosaltres l'estarem "esperant".

Es coneix un cert nombre de cometes periòdics, el més famós és el cometa Halley que té un període de 76 anys.

La probabilitat d'impacte d'un cometa amb la Terra no és nul·la i la primera idea va ser llançada per Edmund Halley, l'any 1705. De fet, es pensa que el que va arrasar el bosc en una extensió de més de 1000 km² prop del riu Tunguska (Sibèria) l'any 1908, va ser la punta d'un petit cometa. Al 1994, hem pogut veure la col·lisió del cometa Shoemaker Leavy 9 contra un altre planeta del nostre sistema, Júpiter.

Per una banda la fragmentació i per l'altra el desgast del cometa a cada visita al Sol, fan que siguin cossos força efímers. Quan els gels s'han evaporat completament, només subsisteix un núvol de pols i roques soltes que no són prou compactes per mantenir-se units per atracció gravitacional mútua i es van dispersant gradualment al llarg de l'òrbita del cometa. L'espai interplanetari és ple d'aquestes despulles, algunes en eixams més o menys densos. Invisible a l'espai, aquesta matèria còsmica es fa evident només quan la

Terra en el seu moviment orbital ensopega casualment amb ella. Llavors, el fragment escalfat per la fricció amb l'atmosfera es volatiliza. D'això en resulta un *meteor*.

Meteors i meteorits

En una nit clara sense Lluna es poden veure ratlles lluminoses que travessen el cel. D'aquestes ratlles lluminoses en diem *meteors* i popularment *estrelles que cauen* o *estrelles fugaces* pel seu aspecte semblant a les estrelles. En general, però, són més aviat febles, duren menys d'un segon i tenen una llargada com a molt d'uns 5 graus.

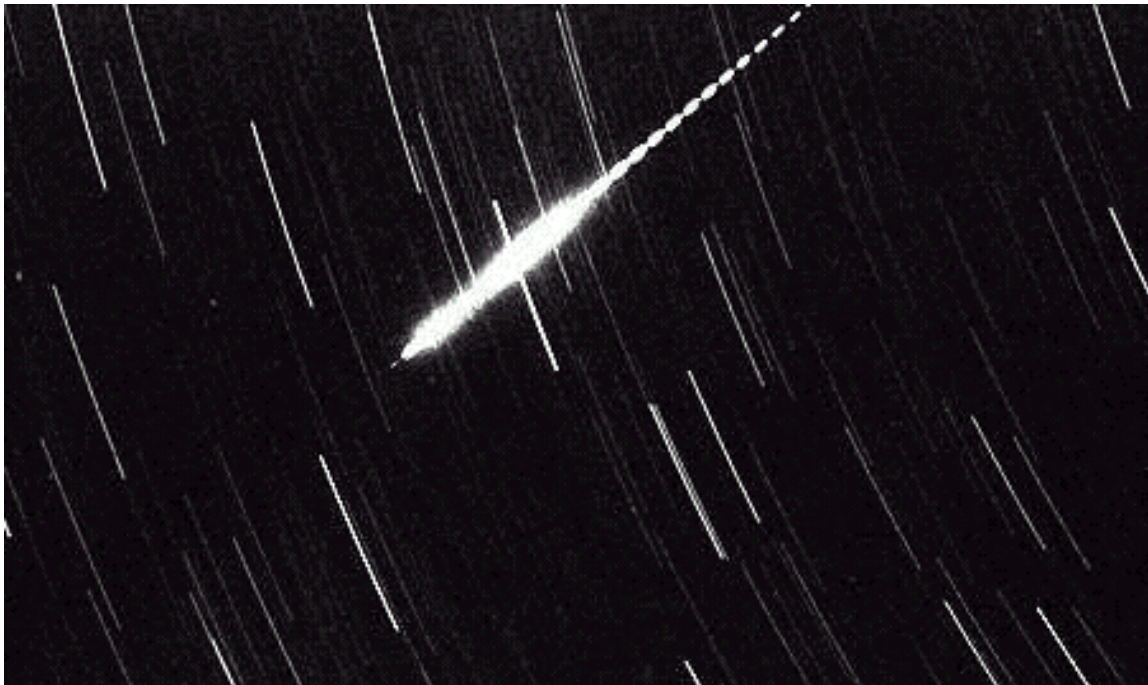


Figura 2. Meteor, estrella que cau o estrella fugaç fotografiada sobre el fons d'estrelles

El Sistema Solar conté un elevat nombre de partícules, la majoria no més grans que un granet de sorra, movent-se entorn del Sol. Prop de la Terra aquestes partícules tenen velocitats de l'ordre de 65 km/s. La velocitat orbital de la Terra és d'uns 30km/s, i per tant, la velocitat relativa de les partícules és d'entre 35 i 95 km/s. Si una d'aquestes partícules intercepta la Terra i entra a l'atmosfera, la fricció amb l'aire ràpidament l'escalfa fins a la incandescència i es torna visible com una ratlla de llum. Al mateix temps, l'aire al llarg del camí del meteor s'ionitza. La llum del meteor només pot veure's de nit, però el camí del gas ionitzat reflexa les ones ràdio i pot ser detectat per radar tant de dia com de nit.

La paraula *meteor* s'usa de vegades confusament per descriure tant l'efecte visual, el gas ionitzat o la pròpia partícula sòlida responsable d'aquest efecte. És costum d'utilitzar la paraula *meteoroides* quan parlem de la partícula abans d'arribar a l'atmosfera de la Terra i la paraula *meteor* per a la ratlla observable produïda a l'atmosfera. Encara que la majoria de meteors es destrueixen completament durant el seu viatge a través d'aquesta atmosfera, alguns penetren fins a la superfície. Es coneixen llavors com a *meteorits*.

Els meteors típicament comencen a ser visibles uns 100-150 km sobre nostre, ja que més amunt l'atmosfera és massa tènue per produir la incandescència. Els meteors més brillants romanen visibles fins a una alçada de 55 km o menys, mentre que els més dèbils (els més petits) es consumeixen totalment abans d'arribar a uns 80 km del terra.

Encara que un observador pot arribar a veure entre 6 i 8 meteors per hora, de fet només està veient els meteors més brillants sobre una petita part de la superfície de la terra. El nombre total de partícules que entren a l'atmosfera cada dia és enorme; en termes de massa, es calcula que un total d'aproximadament 1000 tones cauen cada dia sobre la Terra, encara que aquest número és molt molt incert. La majoria d'aquesta massa és en forma de micrometeorits.

Els meteors més brillants s'anomenen *bòlids*, són com boles de foc i poden deixar una petja de centenars de kilòmetres que persisteix durant minuts. Poden ser més brillants que Venus i fins i tot veure's de dia, il·luminant el paisatge al seu voltant. Ocasionalment van acompanyats d'un soroll com un tro que és segurament una bomba sònica com l'associada a un avió supersònic. Quan un bòlid es crema deixa anar gasos calents que en escapar, fan que de vegades el bòlid exploti en bocins que cauen per terra. Són poc freqüents. Un, l'any 1896, es va observar durant 5,5 hores. La majoria de meteoroides que ocasionen bòlids han de ser de material molt fràgil, possiblement d'origen cometari que es destrueix a l'atmosfera terrestre. Els pocs que sobreviuen i donen meteorits són probablement de naturalesa diferent i quasi segur són petits asteroides.

El nombre de meteors que podem veure no és constant i varia durant la nit i al llarg de l'any. Sempre és més gran després de mitjanit que abans, i a les latituds nostres és més gran a la tardor i l'hivern. Algunes nits es pot veure un nombre molt més gran de meteors, cosa que es coneix com una *pluja de meteors* o *pluja d'estrelles*. Moltes de les pluges de meteors estan associades a cometes. Com hem dit, el material cometari està dispers al llarg de la seva òrbita i quan la Terra l'intercepta un cop l'any (excepcionalment dos), es produeix la pluja de meteors. En molts casos, el material està repartit no uniformement al llarg de l'òrbita i per tant la intensitat de la pluja variarà d'un any a l'altre. Se'n coneixen diverses i reben el nom de la constel·lació on es troba el punt radiant. Degut a la perspectiva, tots els meteors que provenen de la mateixa direcció semblen radiar des del mateix punt. La majoria duren uns quants dies, però d'altres, com les ben conegudes Perseides duren quasi tot el mes d'agost.

La caiguda dels meteorits més grans ocasiona cràters d'impacte, més grans que la pròpia mida del meteorit pels gasos calents que porta associat. Un dels cràters més famosos que es coneixen és el de Barringer a Arizona. Els meteorits més petits, en canvi, es frenen i cauen com simples pedres o pols o es consumeixen totalment a l'atmosfera superior i no arriben a la superfície.

Aproximadament, cada any sobre de la Terra cauen uns 500 meteorits. Com que només un 30% de la superfície és terra, només se'n poden recollir uns 150, però d'aquests només uns 10 es recullen realment. De meteorits se n'han trobat mil.lers. Un dels millors llocs per a trobar-los és a l'Antàrtida ja que són arrossegats pel gel cap al límit del continent. Els més grans que s'han recollit a Huba (Namíbia) i Tucuman (Amèrica del Sud) tenen una massa de 60 i 15 tones, respectivament.

Asteroides

Entre les òrbites de Mart i Júpiter hi ha un cinturó de petits planetes que anomenem *asteroides*. No es coneix del cert com ha estat la formació d'aquest cinturó. Una de les hipòtesis existents és que són les restes d'un planeta que es va trencar. El que ens interessa més de remarcar aquí és que n'hi ha mil.lers i de moltes mides diferents. Des dels més grans que poden arribar a ser visibles a ull nu, com a punts lluminosos al cel, fins els de la mida d'un granet de sorra. De fet, establir on és el límit entre un asteroide i un meteoroides és una qüestió difícil.

La seva composició, forma, densitat i característiques de la superfície és força variada, d'uns a altres. La majoria tenen formes irregulars (ben pocs se'n coneixen de pràcticament esfèrics). La seva composició és més semblant a qualsevol planeta interior del Sistema Solar, ben diferent de l'aglomerat de pols i gel dels cometes

El primer asteroide que es va trobar en una òrbita que intersecciona la de la Terra (i per tant, que potencialment pot produir una col.lisió) és l'asteroide 1862 Apollo, l'any 1932. Des de llavors se n'han descobert més, la majoria amb diàmetres menors d'1 km, però els més grans són d'uns 10 km de diàmetre. L'efecte que pot produir un d'aquest cossos en una col.lisió amb el nostre planeta és com la d'un meteoroides. Els més grans poden donar lloc a meteors, els més petits seran invisibles a ull nu, i només els més grans o de naturalesa més compacta arribaran a la superfície en forma de meteorits.

Al 1947, una caiguda de meteorits va crear aproximadament 100 cràters d'1 m a Sikhote-Alin (Sibèria) i va fer reviure els estudis sobre el fenomen de Tunguska arribant a la conclusió que podia haver estat causat per l'impacte d'un cometa o un asteroide.

Evidències

Es pensa que la gran pluja de projectils còsmics durant la formació del Sistema Solar (i probablement responsable dels molts cràters que observem a la Lluna, Mercuri, alguns de Mart, Calisto, Ganímedes, etc, i potser com diuen algunes hipòtesis responsable del trencament de la Terra en el sistema Terra-Lluna) va acabar fa uns $3.8 \cdot 10^9$ anys. Tanmateix els impactes han continuat regularment, encara que amb menys intensitat, des de llavors.

Tot i la ràpida erosió i el tectonisme de la Terra, s'han identificat uns 140 cràters d'impacte d'asteroides i cometes. Els més grans són el de Vredefort a Sud Àfrica amb 300 km, el de Sudbury (Ontario, Canadà) amb 250 i el de Chicxulub a Mèxic amb 170 km de diàmetre. El primer que es va reconèixer com a cràter d'impacte és el de Barringer a Arizona (EE.UU.) amb 1,2 km de diàmetre. Es calcula que l'impacte es va produir fa 20000-50000 anys i que el meteorit havia de ser d'un diàmetre d'uns 150 m i caure a una velocitat entre 15 i 20 km/s. A la història escrita no hi ha cap constància d'una caiguda d'un meteorit tan enorme com els que van formar aquests cràters.

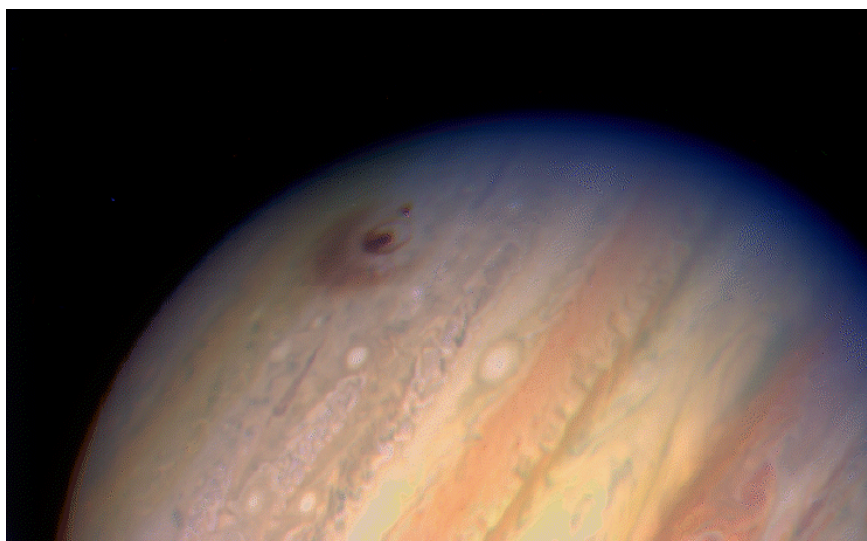
Com hem dit, la caiguda de meteorits del 1947, a Sikhote-Alin (Sibèria) es pensa que podia provenir de fragments per l'impacte d'un petit asteroide. Una mica més antigament, al 1908, el que es pensa era la punta d'un cometa va caure a la regió de Tunguska, també a Sibèria, ocasionant una zona devastada de més de 1000 km².



Figura 3. El cràter d'impacte a Barringer (Arizona, EE.UU) és el primer cràter reconegut com a ocasionat per un impacte d'un objecte extraterrestre. Això va ser al 1920. Té 1,2 km de diàmetre, 200 m de fondària i s'estima que es va produir fa uns 20.000-50.000 anys.

L'efecte dels impactes en la història geològica de la Terra i l'evolució de la vida ha estat objecte d'estudi interdisciplinari des que va sorgir la idea que l'extinció en el Cretaci/Terciari podia haver estat causat per l'impacte d'un cometa o asteroide d'uns 10 km de diàmetre. Aquesta hipòtesi ha estat acceptada des de la identificació d'un probable lloc d'impacte al Yucatan (Chicxulub) i una concentració intensa d'elements nobles en la capa de sediments corresponents a la frontera entre el Cretaci i el Terciari.

Figura 4. Impacte d'un fragment del cometa Soemaker Leavy-9 amb Júpiter, l'any 1994



Actualment, hi ha reconeguts 140 cràters aproximadament. A les taules 1 i 2 hi ha la llista dels més grans i dels més recents, respectivament.

Taula 1. Els cràters d'impacte més grans ocasionats per la col.lisió d'un objecte extraterrestre

<i>Situació</i>	<i>diàmetre (km)</i>	<i>antiguitat (milions anys)</i>
Kara-Kul Tajikistan	52	< 5 milions anys
Siljan Suècia	52	361.0 ± 1.1
Charlevoix Quebec, Canadà	54	342 ± 15
Tookoonooka Queensland, Aust.	55	128 ± 5
Beaverhead Montana, EE.UU.	60	~ 600
Kara Rússia	65	70.3 ± 2.2
Morokweng Sud Africa	70	145.0 ± 0.8
Puchezh-Katunki Rússia	80	167 ± 3
Chesapeake Bay Virginia, EE.UU.	90	35.5 ± 0.3
Acraman South Australia, Austràlia	55	~ 590
Manicouagan Quebec, Canadà	100	214 ± 1
Popigai Rússia	100	35.7 ± 0.2
Chicxulub Yucatan, Mèxic	170	64.98 ± 0.05
Sudbury Ontario, Canadà	250	1850 ± 3
Vredefort Sud Africa	300	2023 ± 4

Taula 2. Els cràters d'impacte ocasionats per la col.lisió d'un objecte extraterrestre el darrer milió d'anys

<i>Situació</i>	<i>diàmetre (km)</i>	<i>antiguitat (milions anys)</i>
CAMPO DEL CIELO	0.050	0.00
Haviland	0.015	0.00
Illumetsa	0.080	0.00
Sikhote Alin	0.027	0.00
Sobolev	0.053	0.00
Tvaren	2.000	0.00
Kaakijavri	0.110	0.00
Henbury	0.157	0.01
Macha	0.300	0.01
Morasko	0.100	0.01
Wabar	0.097	0.01
Boxhole	0.170	0.03
Dalgaranga	0.021	0.03
Odessa	0.168	0.05
Barringer	1.186	0.05
Lonar	1.830	0.05
Amguid	0.450	0.10
Rio Cuarto	4.500	0.10
Pretoria Salt Pan	1.130	0.20
Wolfe Creek	0.875	0.30
Zhamanshin	13.50	0.90

Probabilitat i conseqüències dels impactes

Hi ha un risc extremament baix associat amb la caiguda de meteorits i no hi ha una autèntica fatalitat per a la humanitat (encara que algun automòbil ha sofert algun impacte alguna vegada), donada la poca secció eficaç d'una persona humana. Tanmateix, els grans projectils, com poden ser els cometes o asteroides, poden produir danys. Evidentment, les conseqüències i les probabilitats són funció de la mida i de la velocitat de l'impacte, així com de la composició del cos que col·lisiona.

Anem a veure diferents riscos i les seves possibles conseqüències.

1. Efectes individuals

Els comportaments que afecten la salut i seguretat personals, com fumar o conduir cotxes són desvastadorament més importants per a l'esperança de vida que les catàstrofes de qualsevol mena que afecten un col·lectiu de gent d'un sol cop. La majoria de riscos que afrontem a la nostra vida ocorren, de fet, a algú que coneixem o llegim als diaris que han ocorregut. En contrast, poca gent, o potser ningú, s'ha mort als temps moderns per l'impacte d'un objecte extraterrestre, i la probabilitat que ocorri a algú en el proper segle és realment molt petita.

L'atmosfera terrestre actua d'autèntica barrera per als meteoroides. Fins i tot per a energies del megató ($1\text{MT}=10^6$ tones de TNT = $4.2 \cdot 10^{15}$ J) la majoria de meteoroides es trenquen i es consumeixen abans d'arribar a la part més interna de l'atmosfera. La figura 5 mostra la freqüència dels impactes en funció de l'energia associada i de les tones equivalents de TNT, assumint una velocitat d'impacte de 20 km/s i una densitat de 3 gr/cm^3 . La incertesa d'aquestes freqüències pot ser d'un factor 10 prop dels 0.01 MT i d'un factor 3 per a energies superiors als 100 MT.

D'acord amb aquest càlcul, anualment es produeix l'impacte d'un bòlid amb l'energia de la bomba d'Hiroshima (0.015 MT), i cada segle hi ha impactes d'un megató. En general, però, no ens preocupem d'aquests fets perquè la majoria tenen lloc a grans altituds i l'ona de xoc no arriba a la superfície terrestre.

D'altra banda les forces aerodinàmiques també aixafen, fragmenten i dispersen els meteoroides més grans. El nivell de fragmentació depèn de la constitució del meteoroides. Només els de ferro poden arribar a terra d'una sola peça. Per als que no són de ferro, la mínima energia equivalent per a penetrar fins a la superfície és d'uns 10 MT o, equivalentment, uns 50 m de diàmetre.

2. Efectes locals

Si el meteor és capaç de penetrar fins a 25 km de la superfície a velocitats de desenes de km/s, l'explosió resultant pot causar danys similars als d'una bomba nuclear d'energia similar, però sense radiació gamma ni de neutrons.

Un exemple de devastació local seria un projectil rocós o metàl·lic d'uns 250 m de diàmetre (1000 MT d'energia) que podria penetrar fàcilment fins a la superfície; si arribés a xocar, produiria un cràter d'uns 5 km de diàmetre. Un cometa de dimensions similars es

fragmentaria abans d'arribar a la superfície i tindria efectes devastadors al terra. Una col.lisió d'aquesta mena es produeix cada 10000 anys, això vol dir que la probabilitat que passi durant la vida d'una persona és de l'1%. L'àrea afectada seria d'uns 10000 km², és a dir un 0.002% de l'àrea de la Terra. L'efecte seria doncs essencialment local (o al llarg de la costa en cas d'un impacte oceànic).

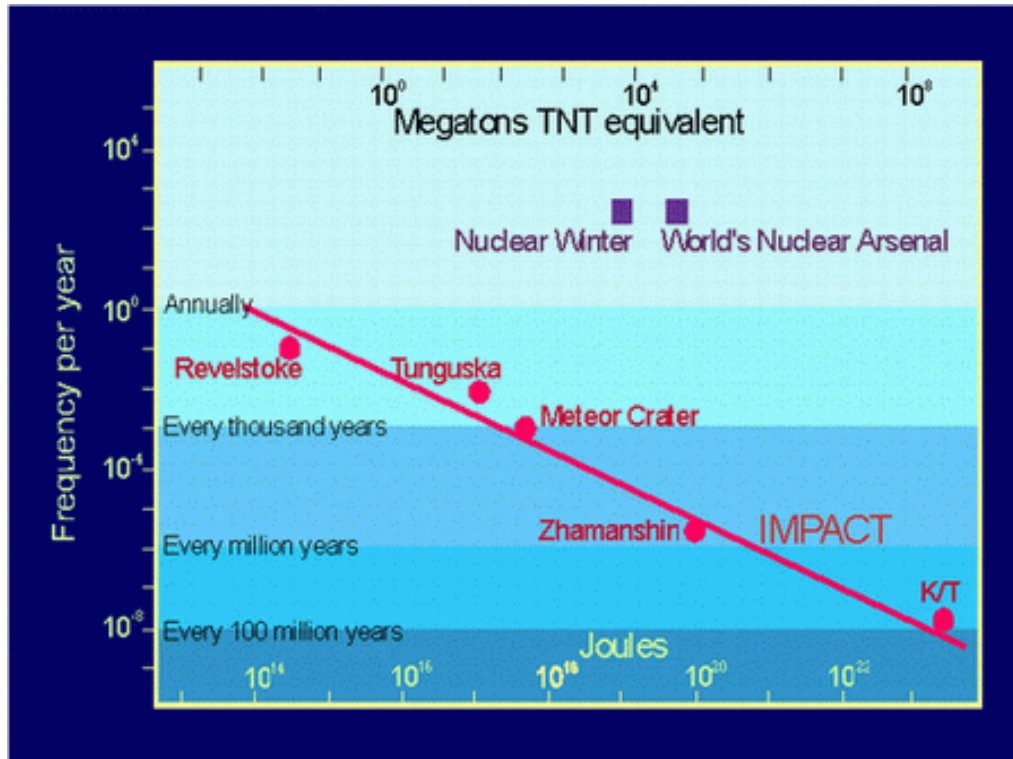


Figura 5. Freqüència d'impacte per any en funció de l'energia del cos que impacta i/o dels milions de tones equivalents de TNT

Al cas de Tunguska, amb una ona de xoc suficient per devastar una àrea de més de 1000 km², s'estima que va ser equivalent a uns 10-20 MT.

3. Efectes globals

Els impactes amb energia més elevada tindrien conseqüències globals a més de les produïdes al lloc de l'impacte en sí. Un exemple obvi, però extrem, seria el cas de l'impacte al Cretaci/Terciari de fa uns 65 milions d'anys, que va trencar l'ecosistema i que és força acceptat que va causar l'extinció de més de la meitat de les espècies a la Terra. L'impacte d'un objecte de 10 km (aproximadament 10⁸ MT) va excavar un cràter de 180 km a Chicxulub, va ocasionar canvis químics a l'atmosfera i l'oceà i canvis al clima produïts per alguns milions de kg de pols submicromètrica injectada cap a l'estratosfera.

Hi ha moltes incerteses a l'hora de calcular quina és l'energia mínima per a produir una catàstrofe global. Que es tracti d'un asteroide o d'un cometa, si és un impacte a l'hemisferi nord o al sud, l'angle d'incidència, etc, són incerteses a l'hora de valorar les conseqüències

sobre el medi i més sobre la humanitat. Un projectil de centenars de metres de diàmetre que caigui a l'oceà afectarà indirectament les zones costaneres. Els efectes climàtics poden arribar a ser importants.

La causa dominant de morts catastròfiques durant la història recent han estat per desastres naturals (terratrèmols, inundacions, sequeres, ciclons, ...), guerres i especialment fam i epidèmies, sense oblidar alguns accidents tecnològics com el desastre de Bopal o accidents d'avions. Els impactes tipus Tunguska en àrees urbanes són, com a mínim 100 cops menys freqüents.

Es pot comparar el risc estadístic d'un impacte amb el d'altres riscos actuals. La taula 3 dóna les probabilitats del risc per a un habitant dels Estats Units, amb incerteses de l'ordre del 30%.

Taula 3. Probabilitat de mort entre diferents causes als EE.UU.

assassinat	200 en 1 milió
accidents de cotxe	160 en 1 milió
incendis	10 en 1 milió
electrocució	5 en 1 milió
accident d'avió	1 en 1 milió
impacte meteorit (global)	0,5 en 1 milió
inundació	0,3 en 1 milió
impacte meteorit (local)	0,1 en 1 milió
terratrèmol	0,1 en 1 milió
impacte meteorit (Tung.)	0,05 en 1 milió

Projectes de vigilància

Conscients de la probabilitat no nul·la d'una col·lisió de la Terra amb algun cos extraterrestre, des que el 1932 es va descobrir l'asteroide 1862 Apollo, s'ha realitzat un gran esforç per descobrir i catalogar tots els asteroides potencials "impactadors" amb la Terra. Aquests asteroides, un cop descoberts, s'observen regularment per actualitzar els elements de les seves òrbites i predir-ne les posicions futures. Tant l'agència espacial europea (E.S.A.) com l'americana (N.A.S.A.) en col·laboració amb la Unió Astronòmica Internacional mantenen equips de recerca en aquest camp per tal de preveure possibles impactes. Es mantenen bases de dades amb els objectes descoberts. Per a consultes: <http://impact.arc.nasa.gov>, <http://neo.jpl.nasa.gov> i [http://www.unb.ca/passc/Impact Database/](http://www.unb.ca/passc/ImpactDatabase/) entre d'altres.

De tots els objectes catalogats fins ara, no n'hi ha cap que representi un perill per a la Terra (<http://cfa-www.harvard.edu/iau/lists/CloseApp.html>). En els propers 33 anys, el que passarà més a prop és el 2000 SB45 i ho farà l'octubre de 2037 a una distància d'uns 210.000 km, unes dues terceres parts de la distància de la Terra a la Lluna.