

CAOS I

Un pèndol simple però caòtic



El pèndol simple

Com a introducció, recordem un instrument que tots coneixem: el pèndol simple. Es tracta simplement d'un pes penjat d'un cable que pot oscil·lar.

El seu moviment és totalment regular i, per tant, previsible.

Si pintem, per exemple, l'angle que fa el cable amb la vertical en funció del temps trobarem corbes del tipus sinus.

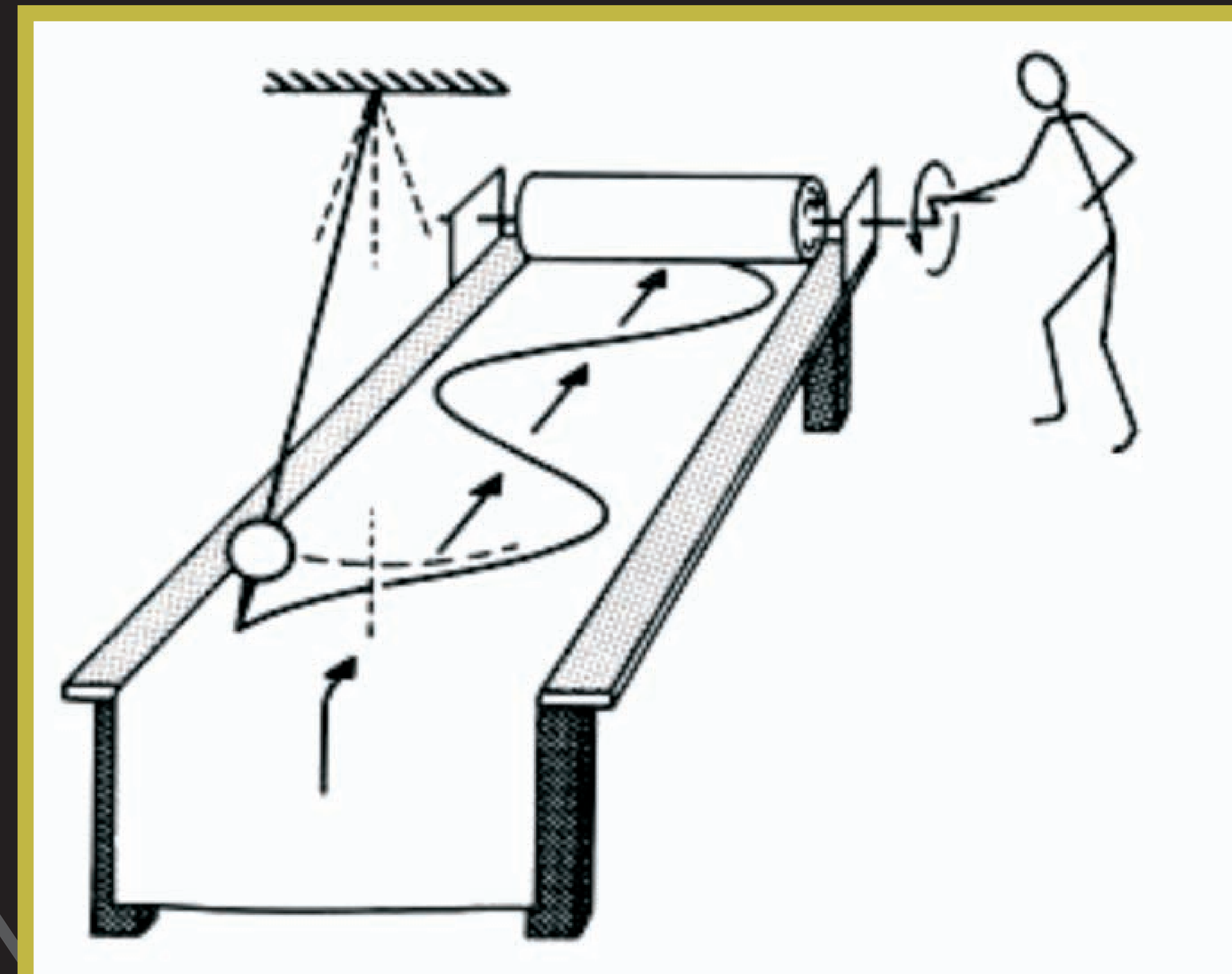
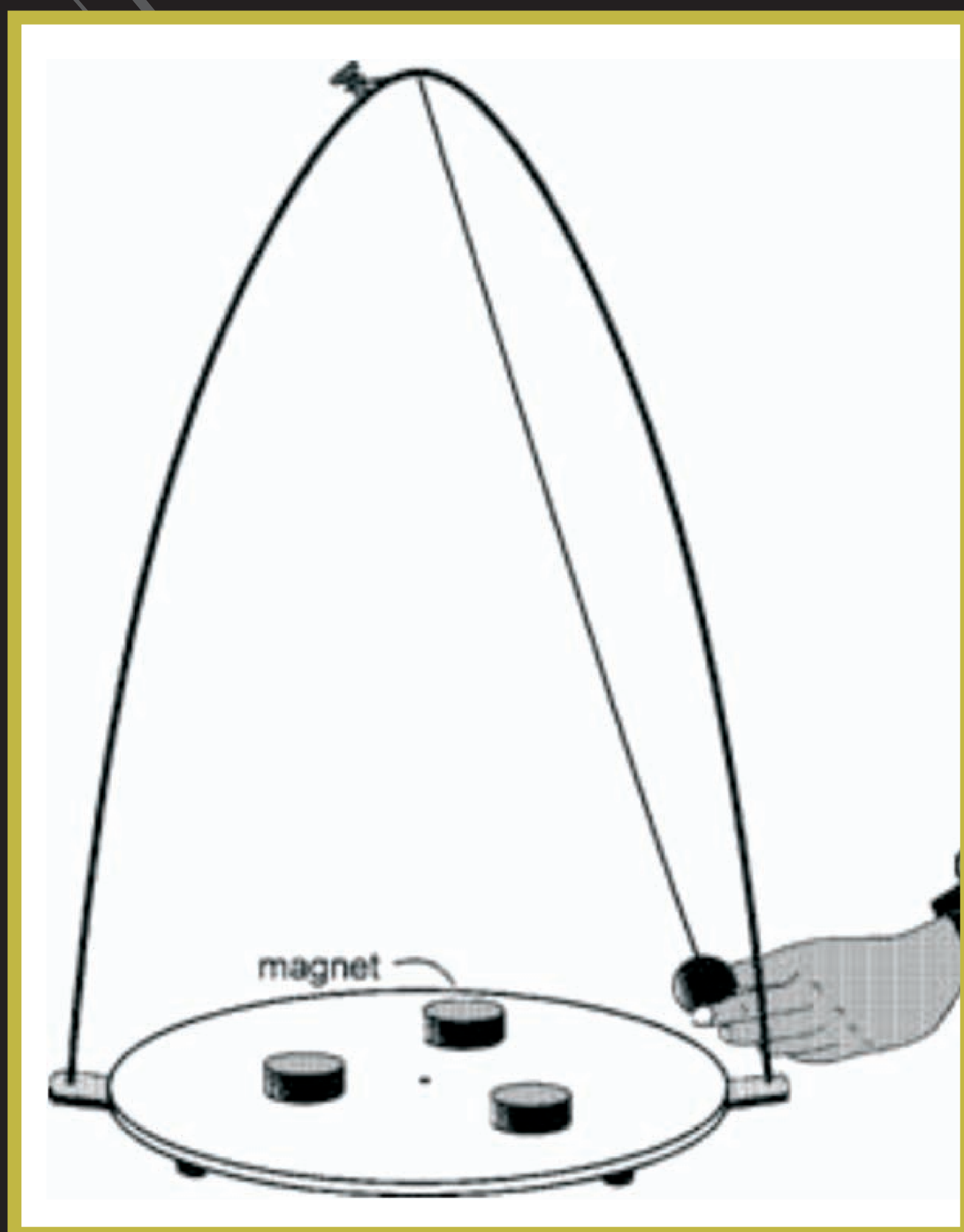


Fig. 2 Esquema de com dibuixar la posició del pèndol simple en funció del temps.



El pèndol magnètic

En aquesta experiència el que tenim és una modificació de l'anterior: un pèndol magnètic. Es tracta d'un pèndol normal amb un pes metàl·lic i tres imants a la base que atreuen el pes.

Les trajectòries d'aquest pèndol no són tan òbvies com en el cas del pèndol simple. Ens fem doncs, la següent pregunta:

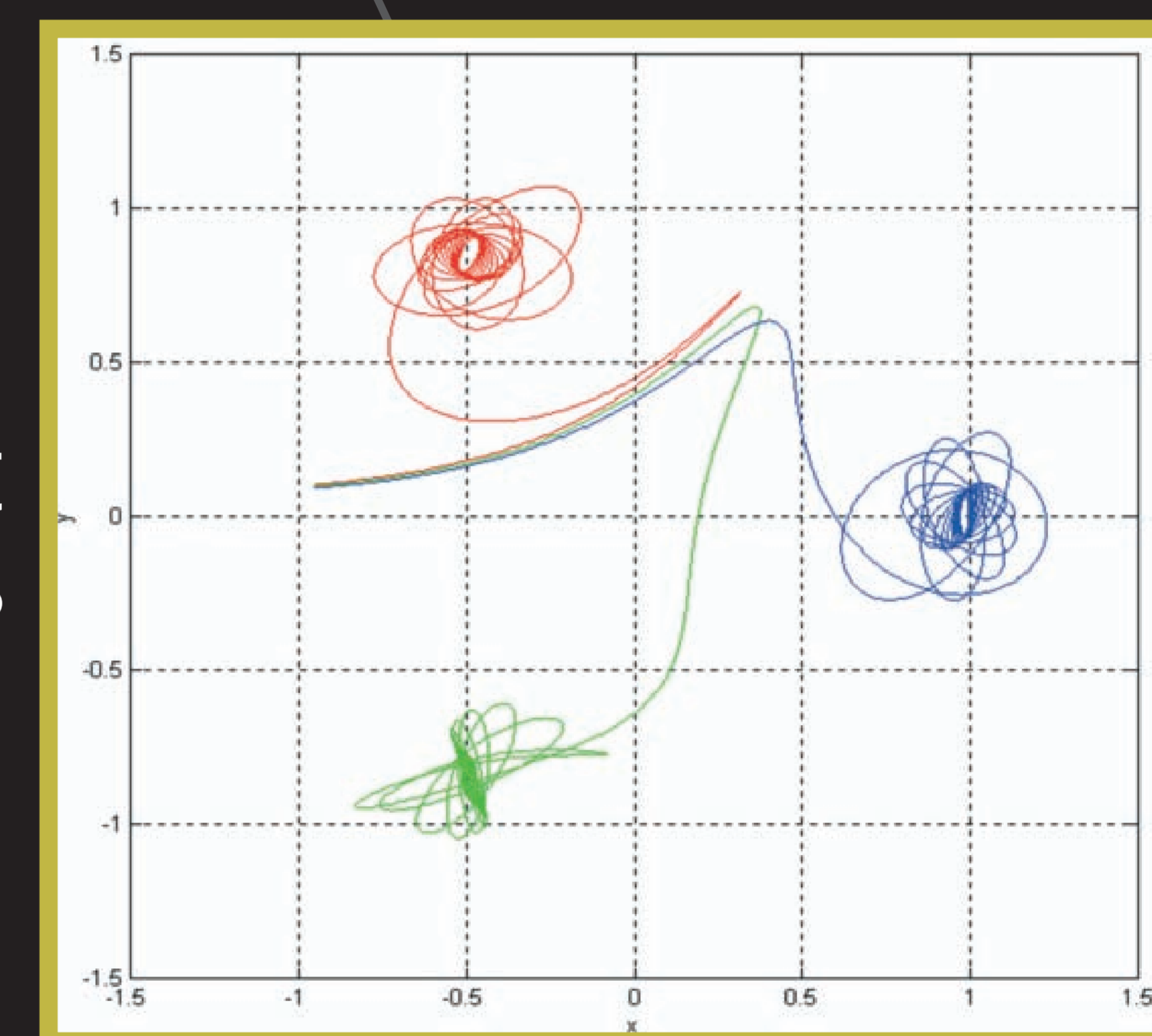


Fig. 4 Tres trajectòries del pèndol magnètic.

Podem trobar regularitats també en el moviment del pèndol magnètic?

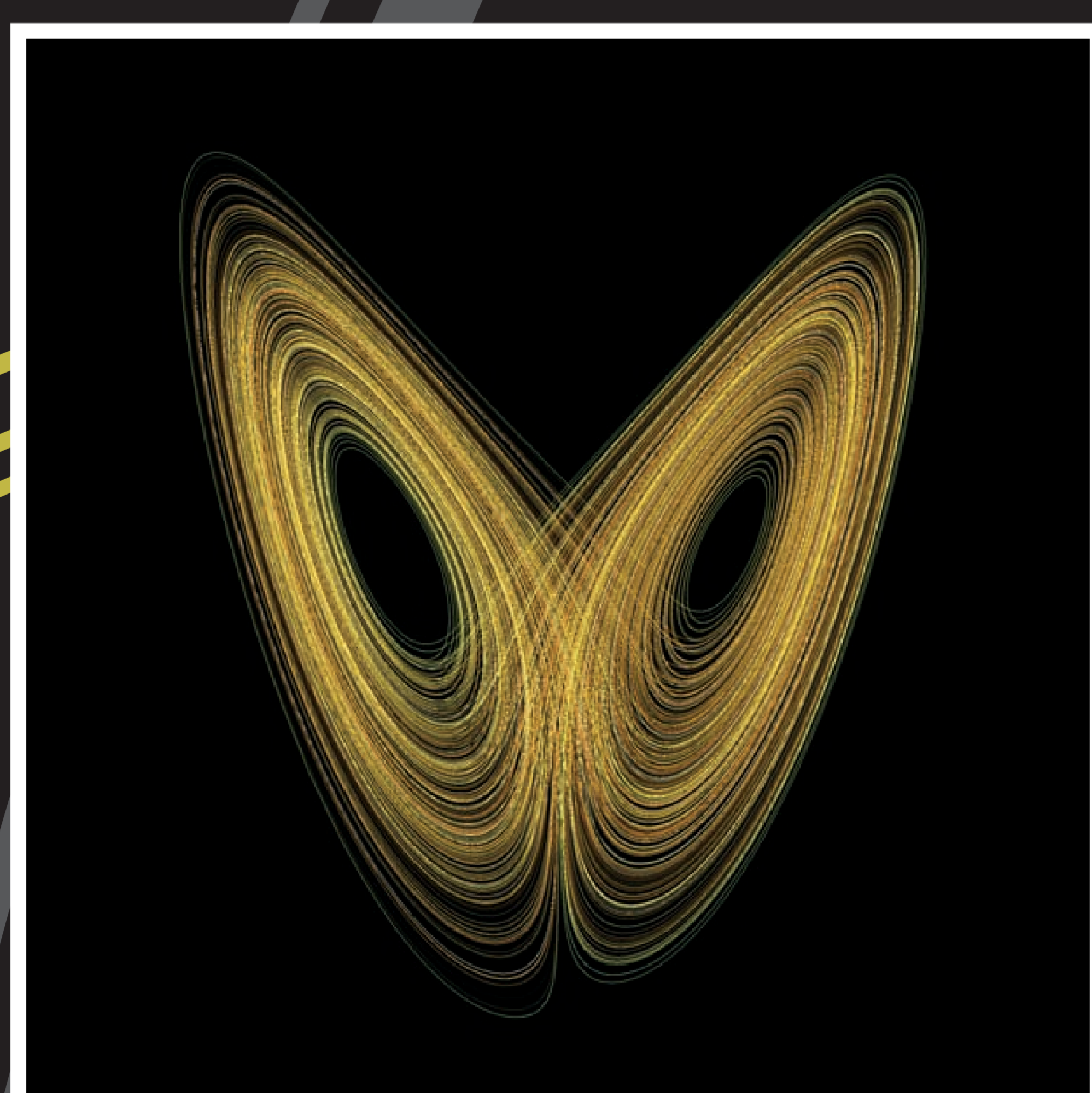


Fig. 4 Atractor de Lorenz (pioner en la recerca del caos).

Caos

El pèndol magnètic és un exemple de sistema caòtic. Aquests sistemes mostren un comportament erràtic i són extremadament sensibles a les condicions inicials (vegeu figures 4. i 6. i següent experiència).

Aperiodicitat

Una de les característiques dels sistemes caòtics és la aperiodicitat en les trajectòries. El seu moviment, en contraposició al del pèndol simple, mai no es repeteix de forma

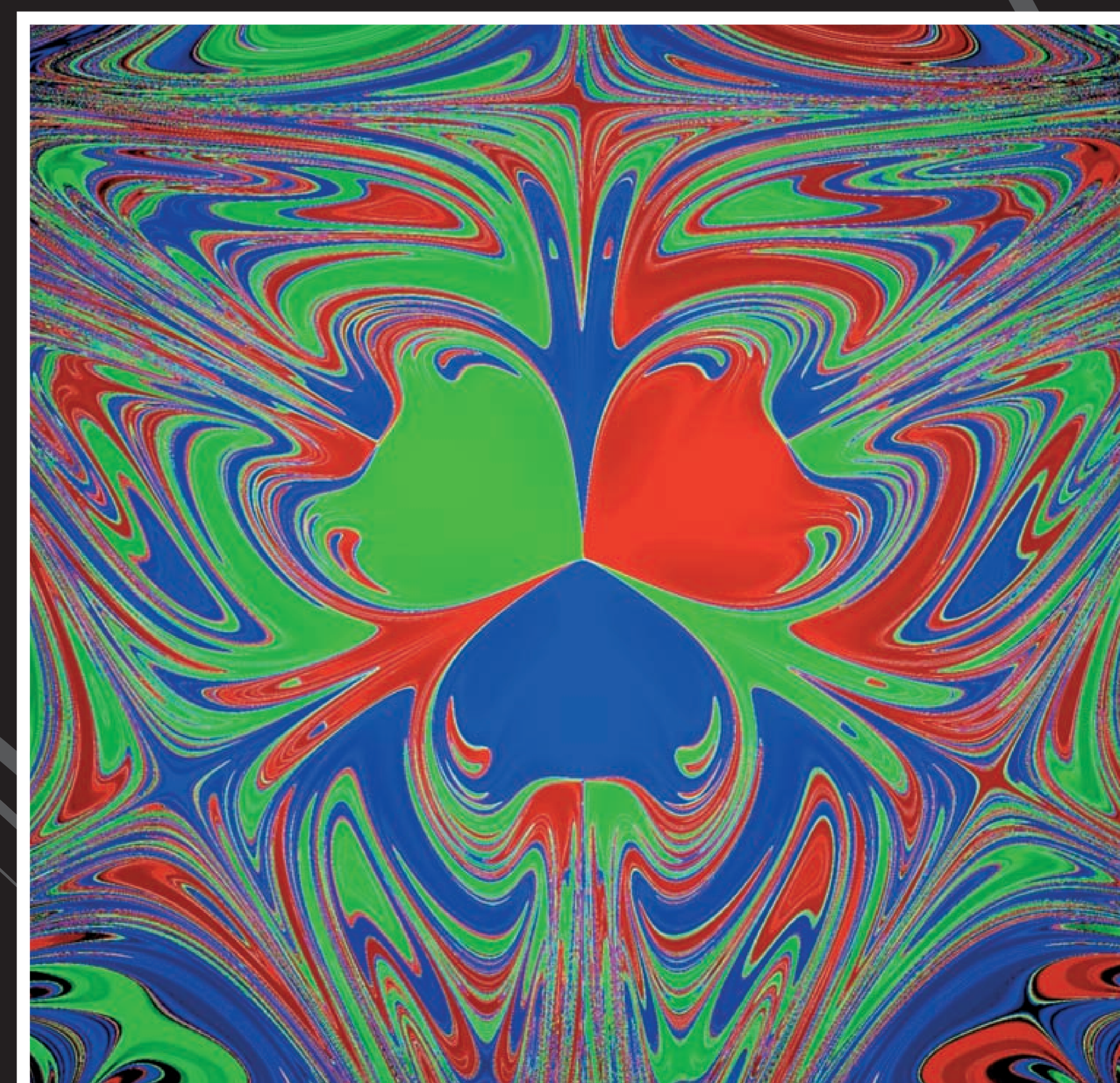


Fig. 5 Posicions finals del pèndol magnètic (cada color simbolitza un dels imants de la base), en funció de les condicions inicials.

CAOS II

Un pèndol doble amb moviment molt complex

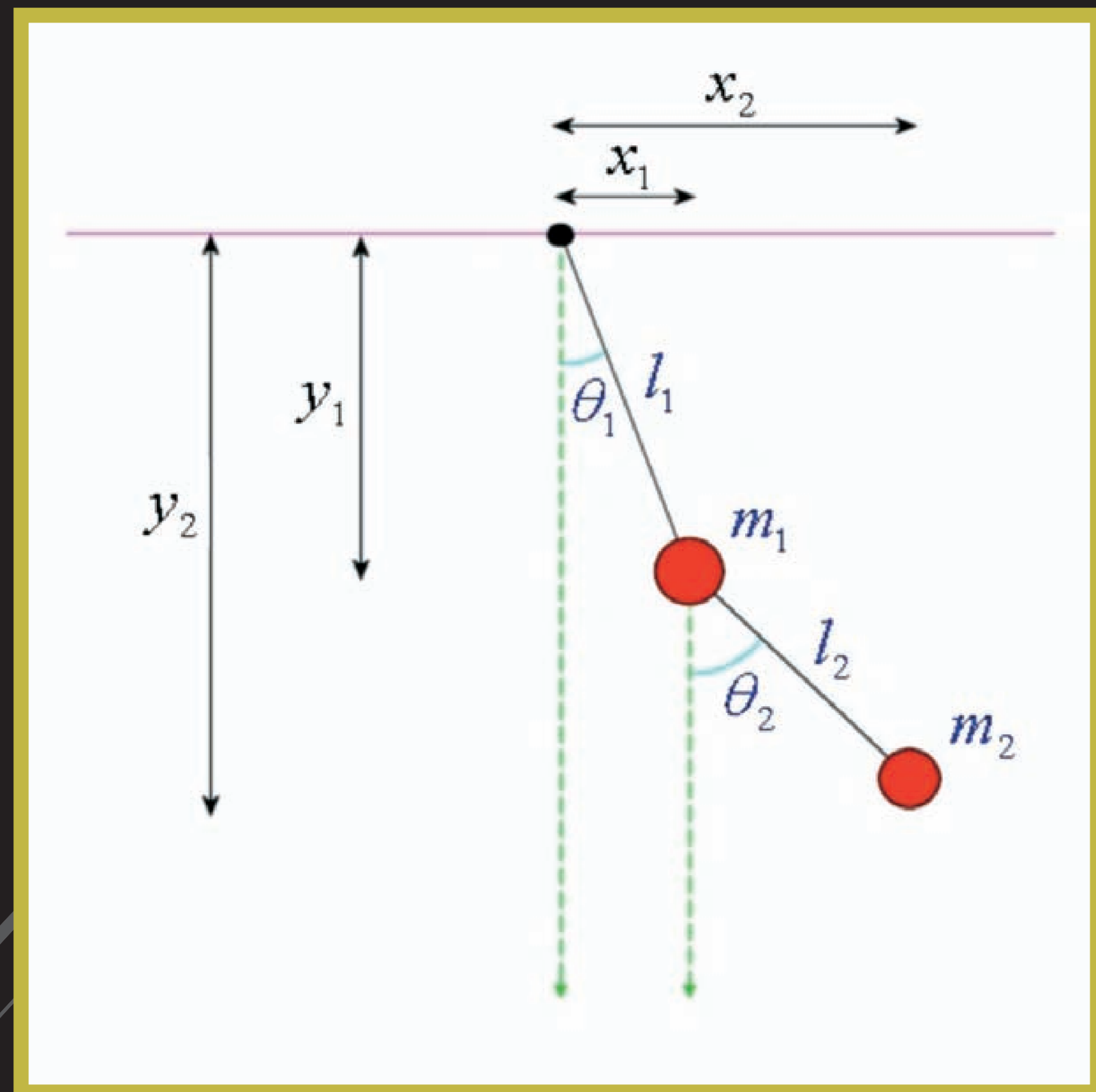


Fig. 1. Esquema d'un pèndol doble.

En aquesta experiència el que tenim són dos pèndols dobles. Un pèndol doble és un pèndol simple al final del qual s'hi ha afegit un altre pèndol simple. Es tracta d'un sistema mecànic per al qual podem determinar les seves equacions del moviment, és a dir, les lleis que regeixen el seu moviment.

A la dreta veiem un parell de trajectòries d'un pèndol doble generades per ordinador. Som capaços de fer això gràcies a conèixer les equacions que ens diuen com és el moviment.

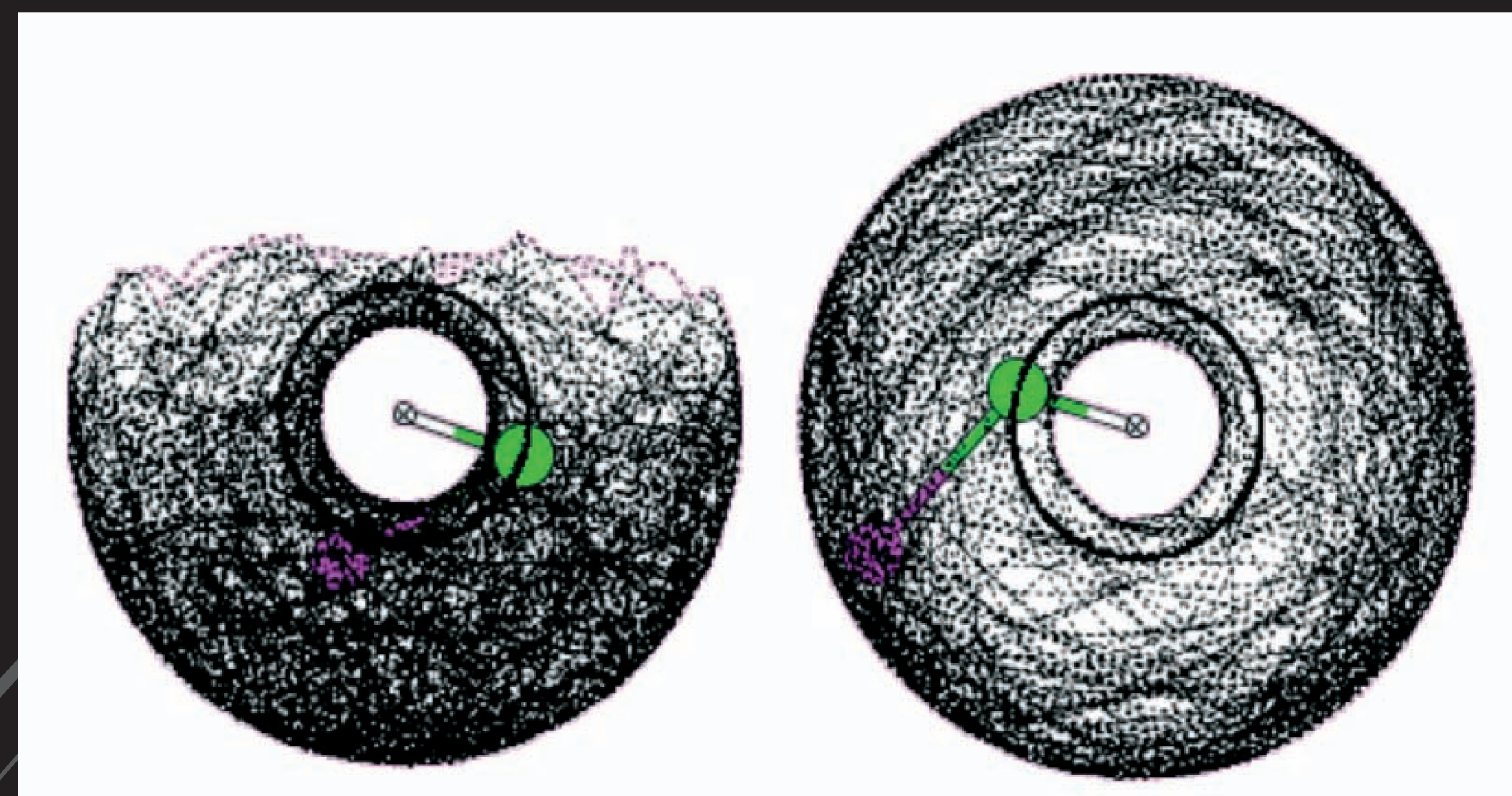


Fig. 2. Exemple de trajectòries del pèndol doble.

**Que passarà si fem començar el moviment d'ambdós pèndols de condicions molt similars?
Es mouran conjuntament tot el temps?**

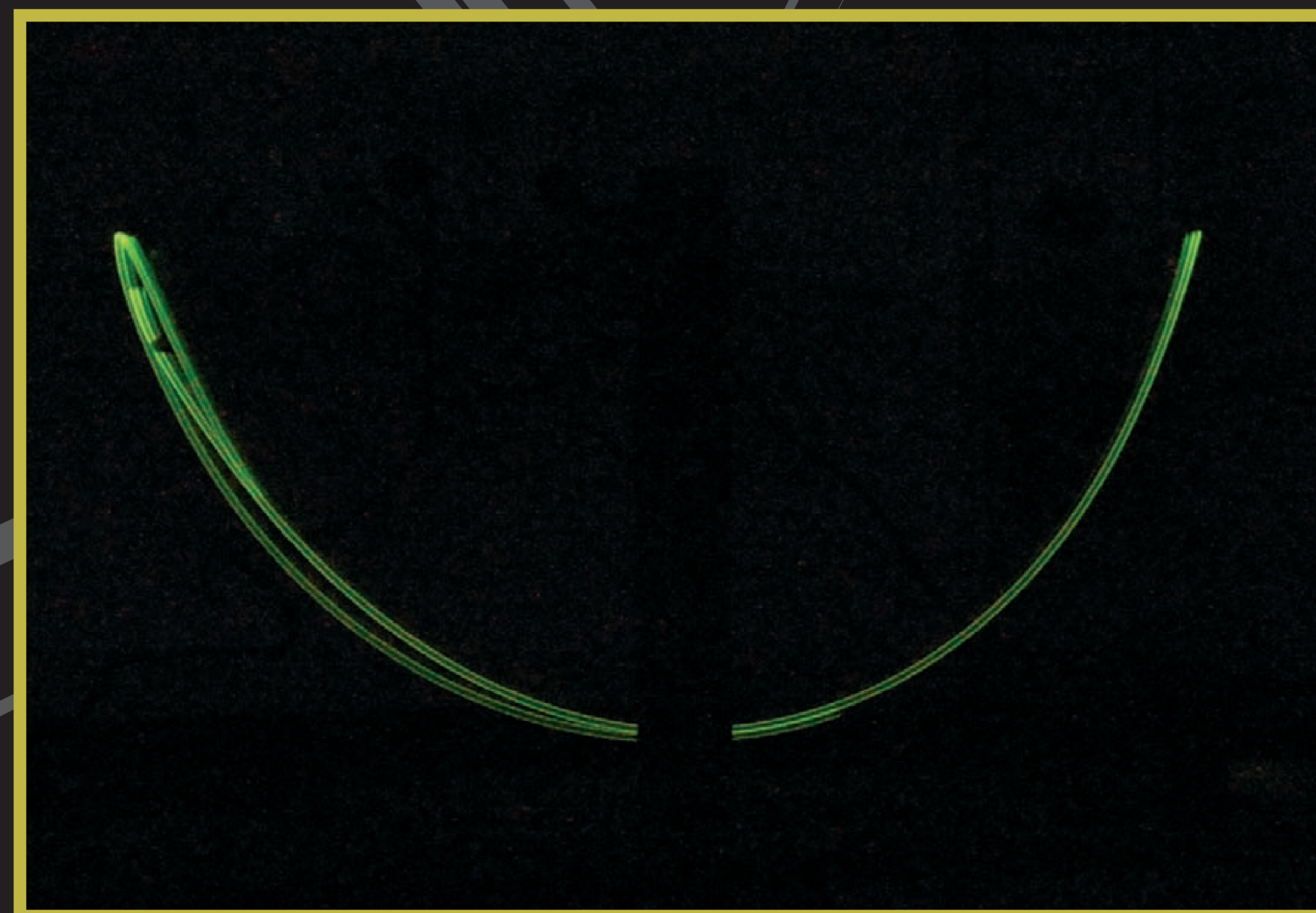


Fig. 3 Trajectòries dels pèndols (totes dues en verd) poc temps després de començar en les mateixes condicions.

Doncs bé, una característica general dels sistemes caòtics és el que matemàticament es diu sensibilitat a les condicions inicials. Això vol dir que per 2 sistemes iguals que ténen condicions inicials similars, les seves trajectòries en un principi seran iguals i després se separaran.

Caos determinista

Aquest sistema és un exemple típic de sistema caòtic determinista. Determinista perquè les lleis que determinen el seu moviment ho són, però, perquè caòtic?

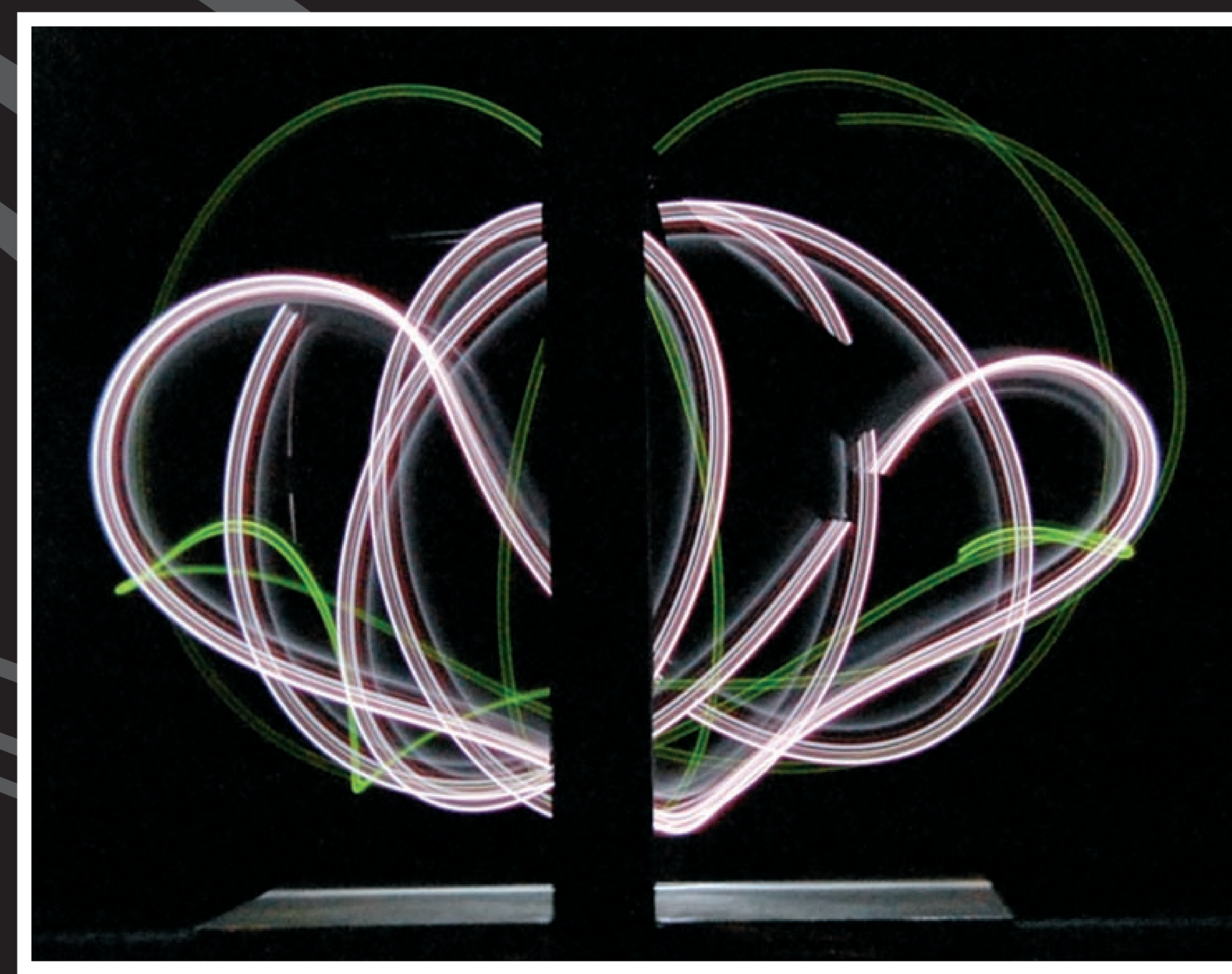


Fig. 4. Trajectòries dels dos pèndols, una en verd i l'altra en blanc. Per a temps llargs es veu com les trajectòries són totalment diferents.

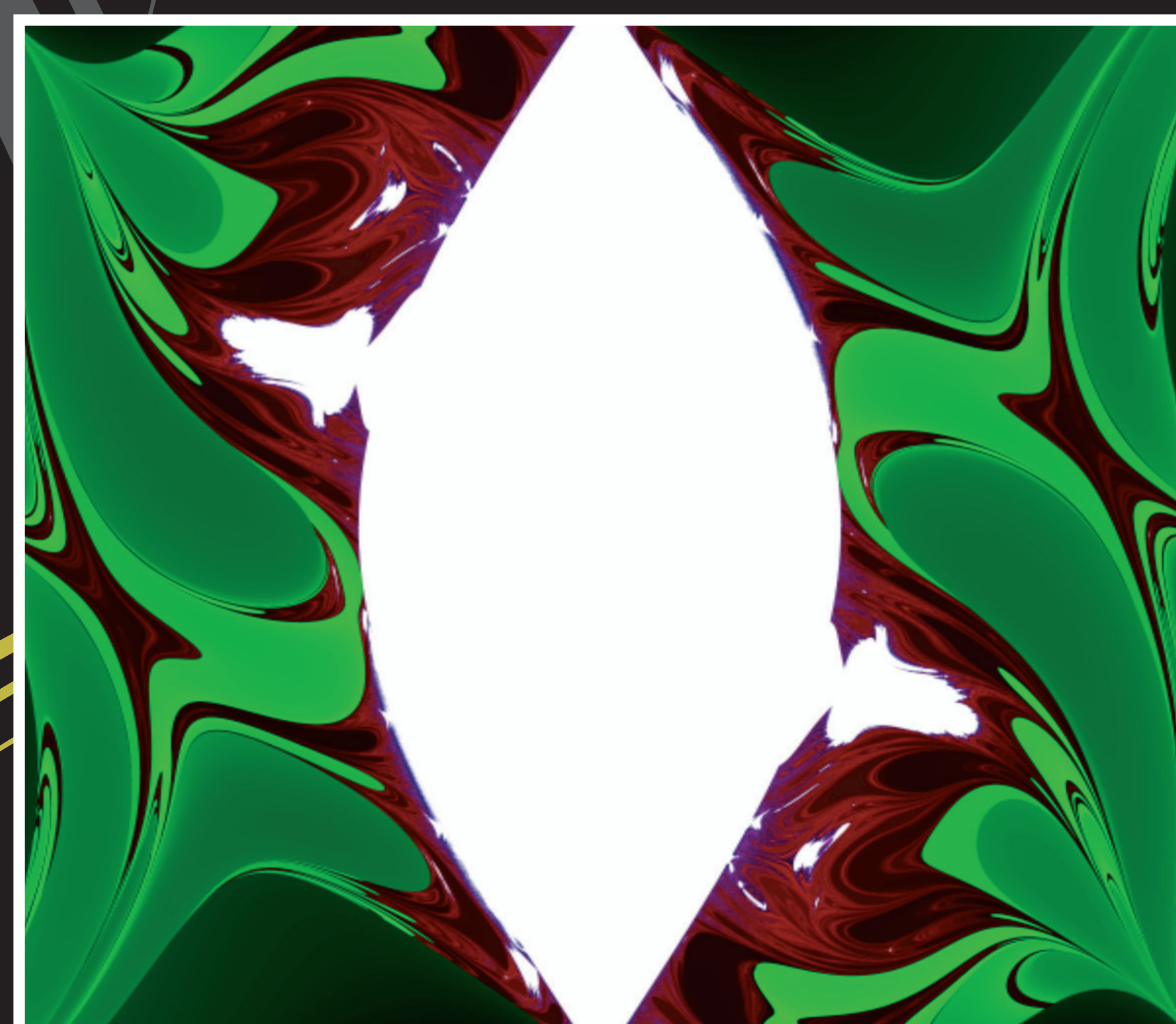


Fig. 5 Temps que triga el pèndol inferior en donar una volta (color) en funció de les condicions inicials en funció de les posicions inicials. Verd (temps curts), marró (temps llargs) blanc (temps infinit).

Com que som incapaços de conèixer les condicions inicials del sistema, ens serà impossible determinar quina és la trajectòria d'un sistema caòtic a temps llargs.



PATRONS I

Jugant amb les formes: Els ferrofluids

En aquest experiment veurem el fascinant comportament d'un tipus de líquid amb propietats molt particulars: ELS FERROFLUIDS.

Aquests líquids s'obtenen barrejant nanopartícules ferromagnètiques amb un solvent (aigua o oli). Els ferrofluids es veuen enormement afectats per camps magnètics externs, però tornen al seu estat normal quan aquests camps desapareixen. Aquests líquids s'empren, per exemple, en altaveus per esmorteir el moviment del con.

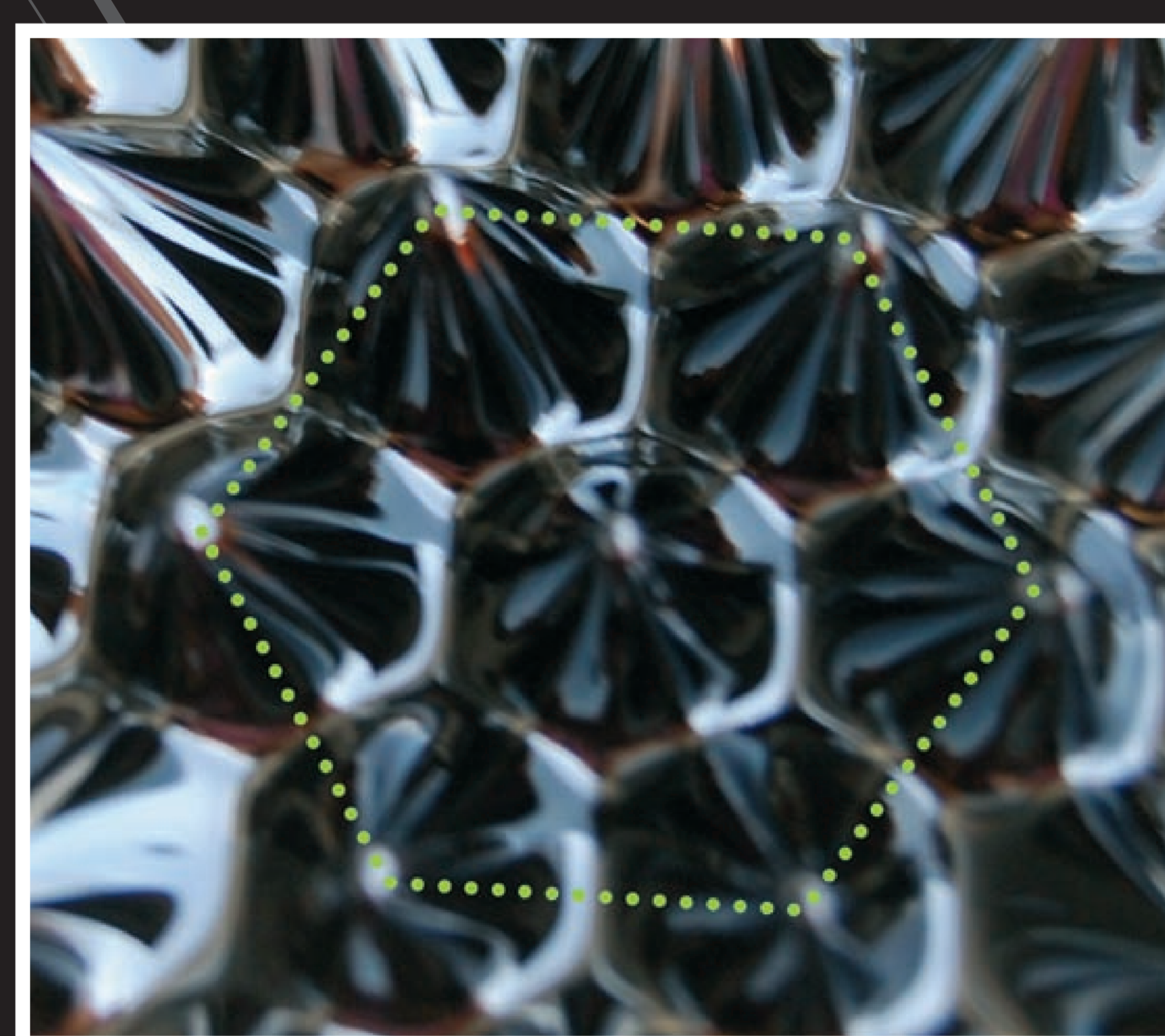
Estructures 3D



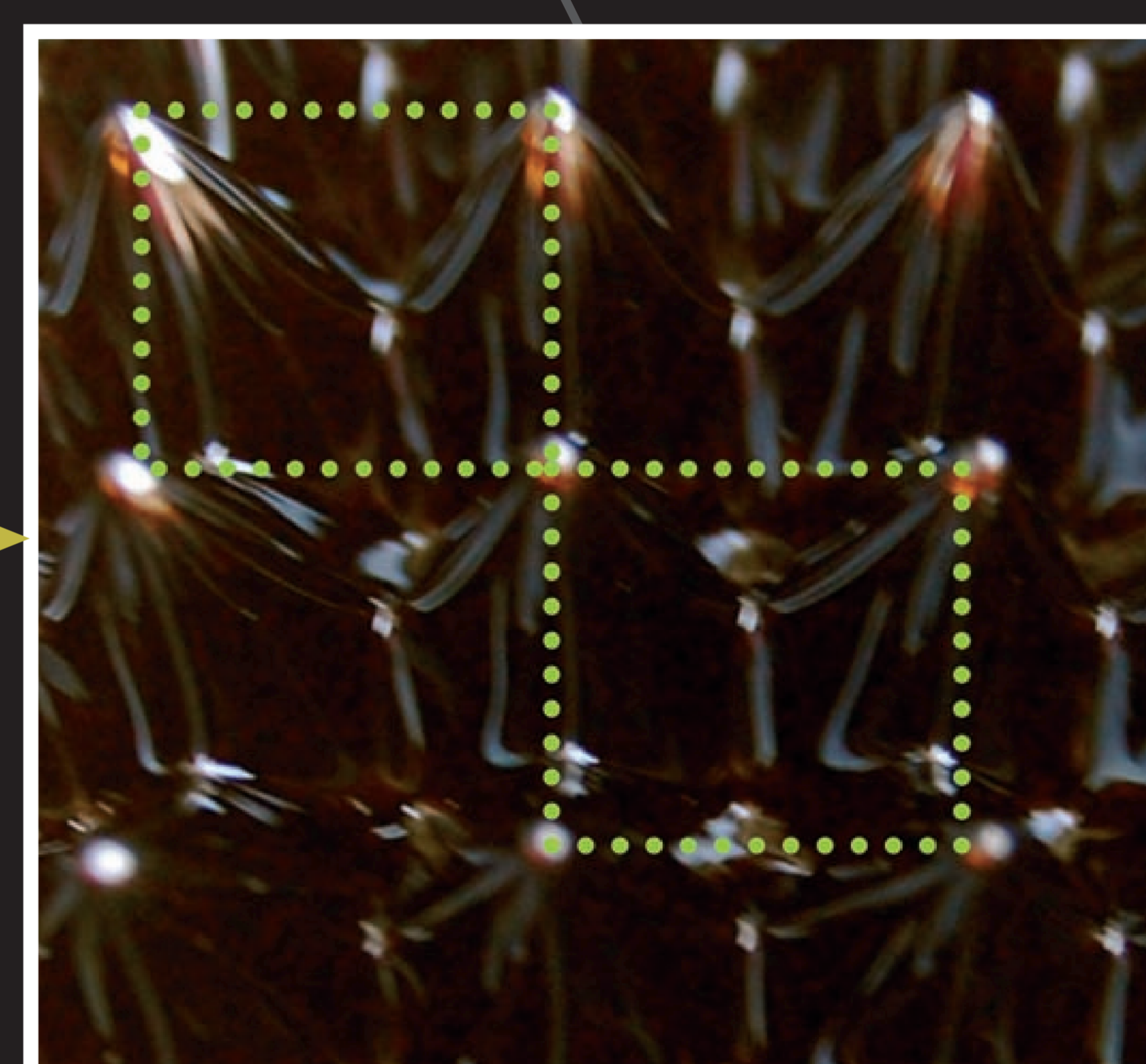
Ferrofluid amb camp magnètic vertical: en la seva superfície es forma espontàniament un patró de cons.

Els ferrofluids posseeixen la propietat de formar patrons en forma de cons al llarg de la direcció del camp magnètic quan els acostem un imant (camp magnètic).

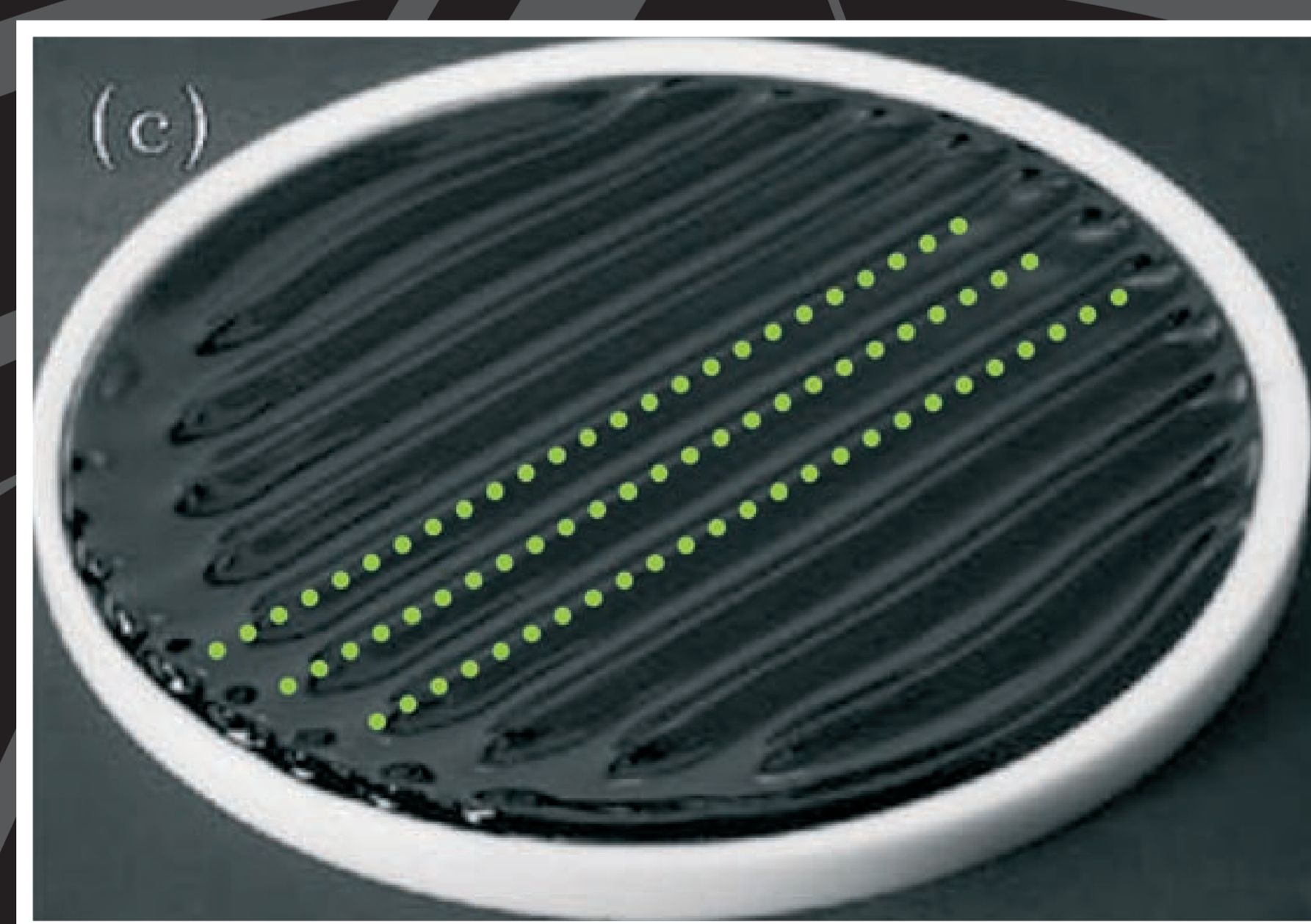
Els cons s'organitzen en patrons hexagonals o quadrats que resulten de la competició entre l'energia gravitatòria, la magnètica i la tensió superficial del líquid. Variant les condicions experimentals també es poden formar rotllos o fins i tot solitons (estructures localitzades).



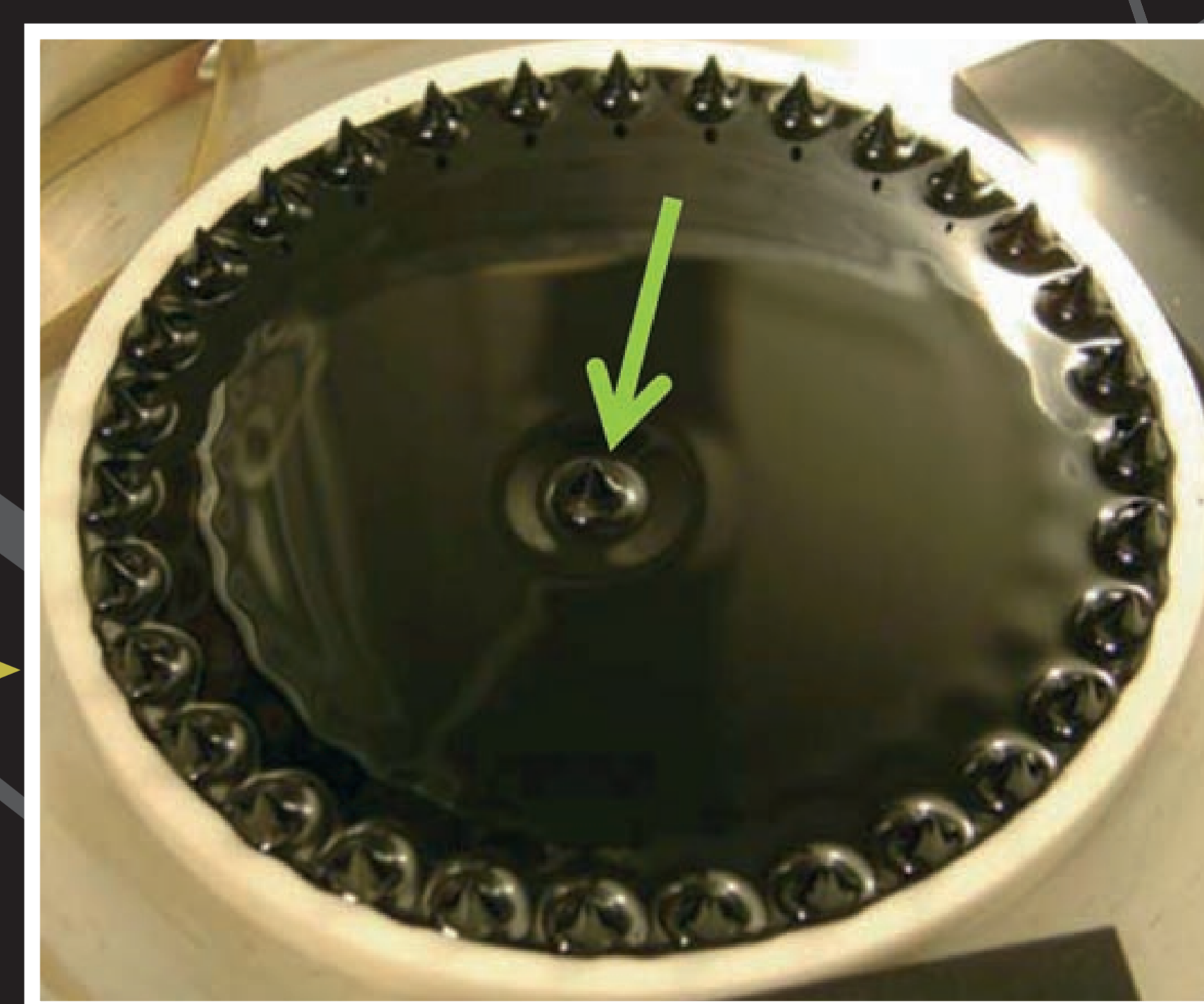
Hexàgons



Quadrats



Rotllos



Solitons

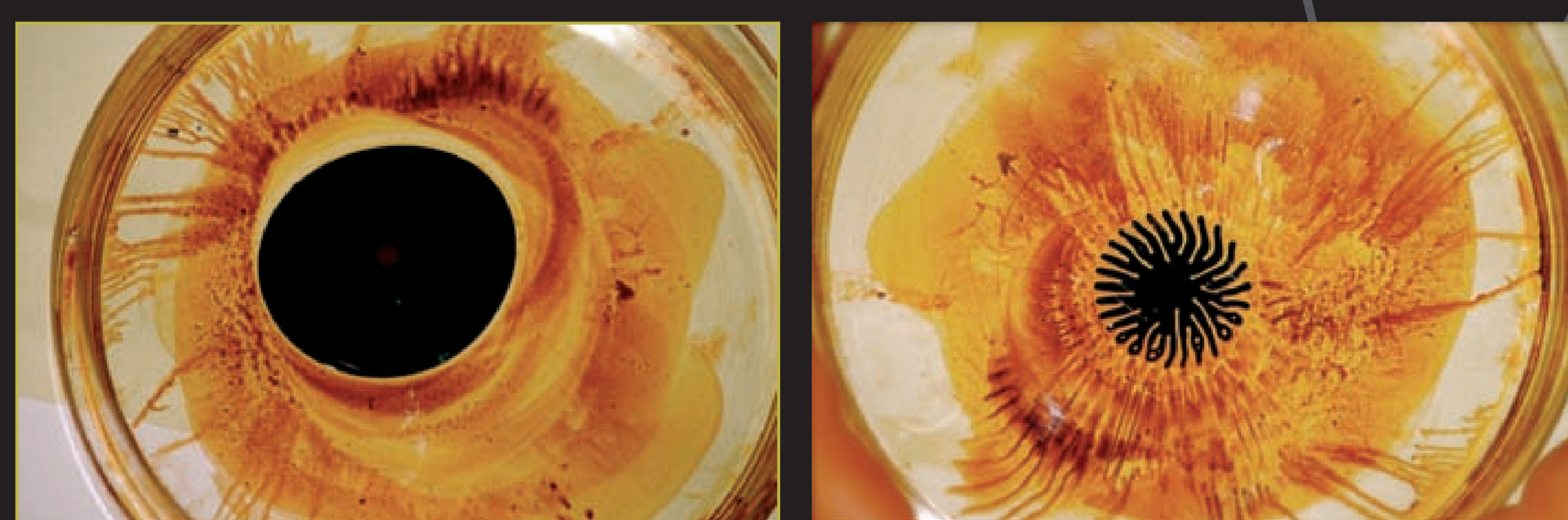
augmentant el camp

variant localment

inclinant el camp magnètic

Estructures planes

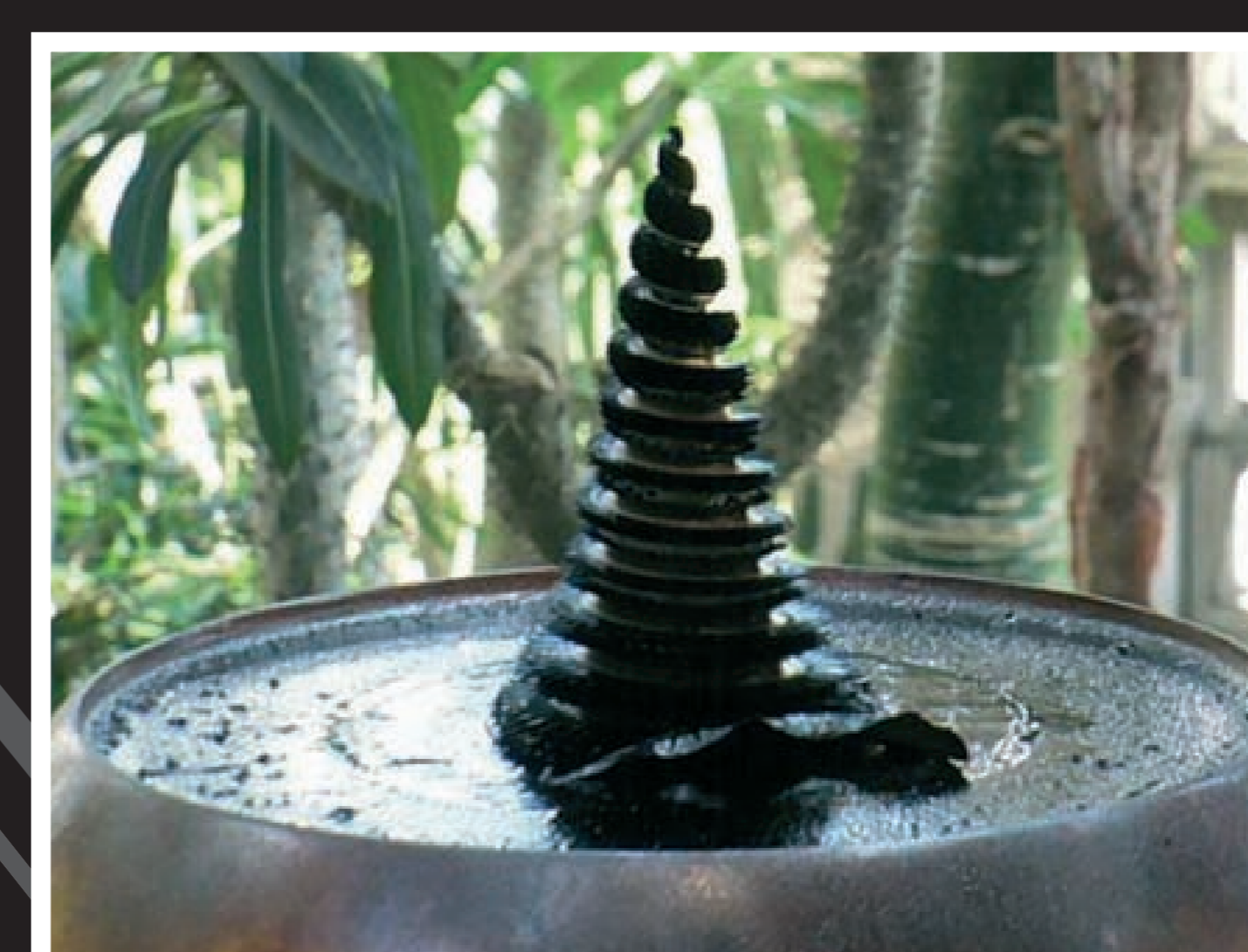
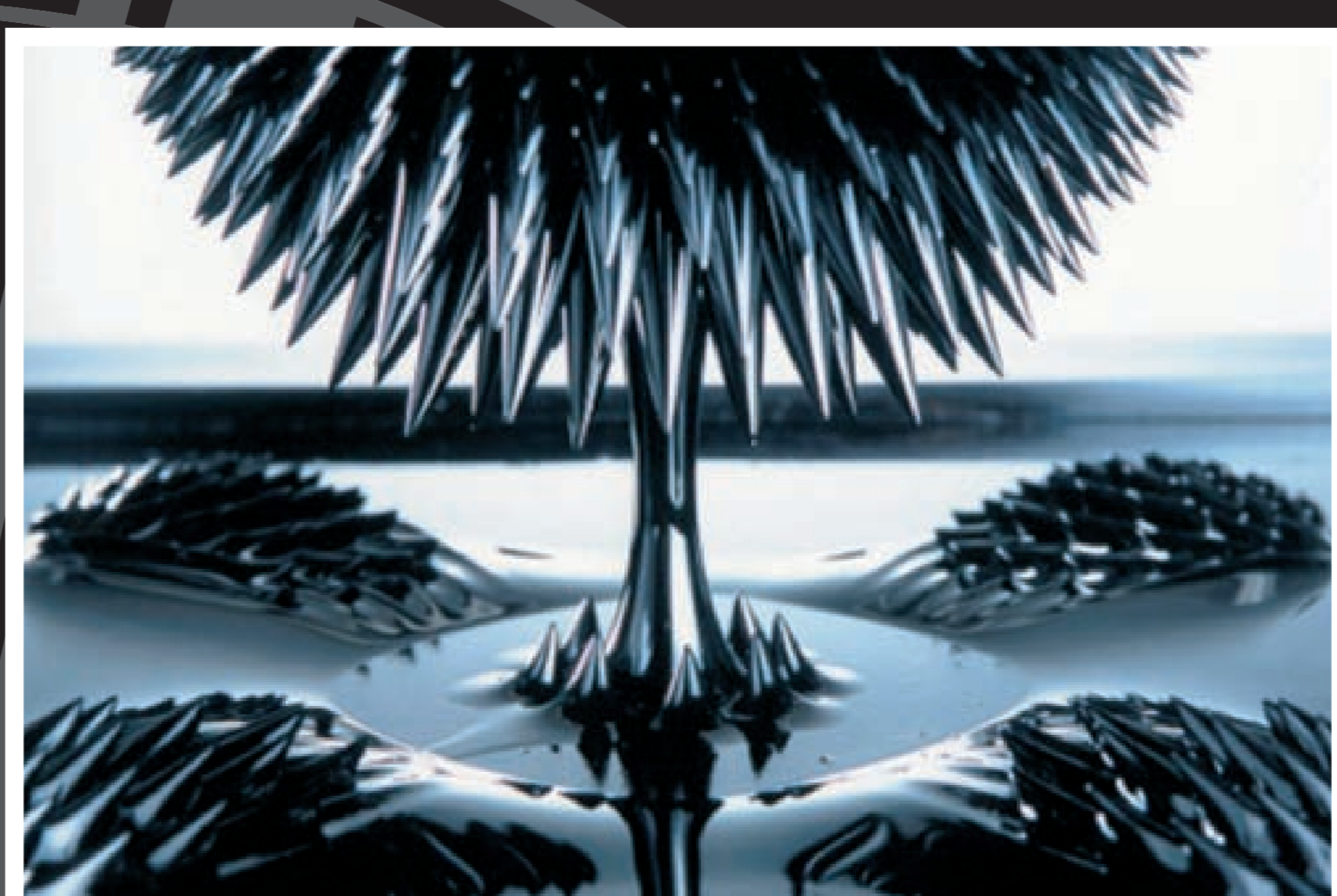
Atrapant una gota de ferrofluid entre dues làmines, podem observar patrons en 2D.



Augmentant el camp magnètic, la gota es transforma en un patró tipus "laberint".



Escultures amb patrons



PATRONS II

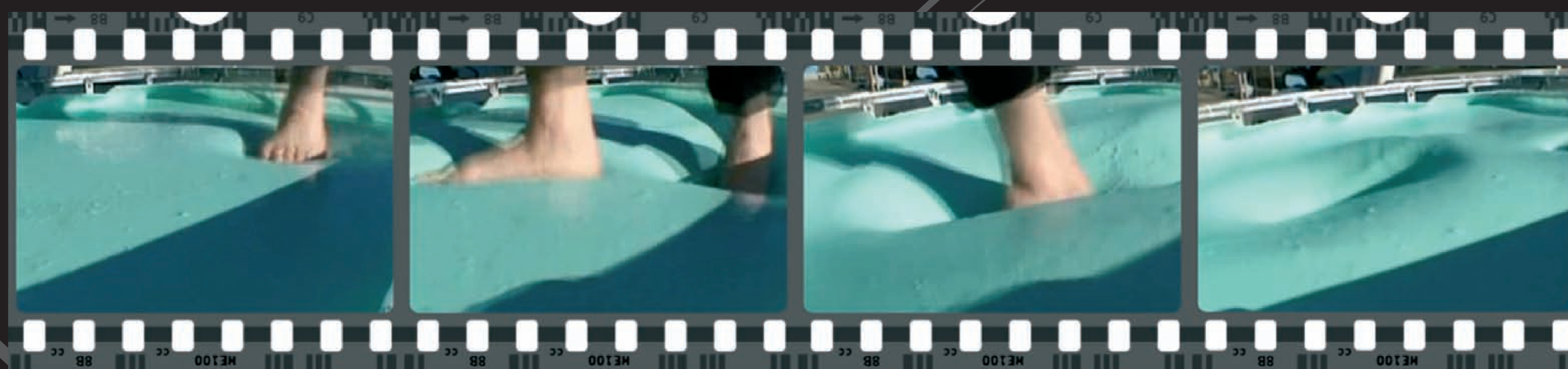
Jugant amb les formes: Els fluids no newtonians

Què és un fluid no Newtonià?

En l'aigua, i altres fluids comuns (oli, refrescs, llet, etc.) la viscositat depèn de la temperatura. La peculiaritat d'un fluid no newtonià, és que la viscositat depèn de la força aplicada.



Com a conseqüència d'això, en alguns casos, el fluid no newtonià es comporta com un sòlid: proveu copejar-lo! En altres casos és com un líquid, si introduïm la mà lentament en el fluid hi penetrarà fàcilment (i es mullarà).



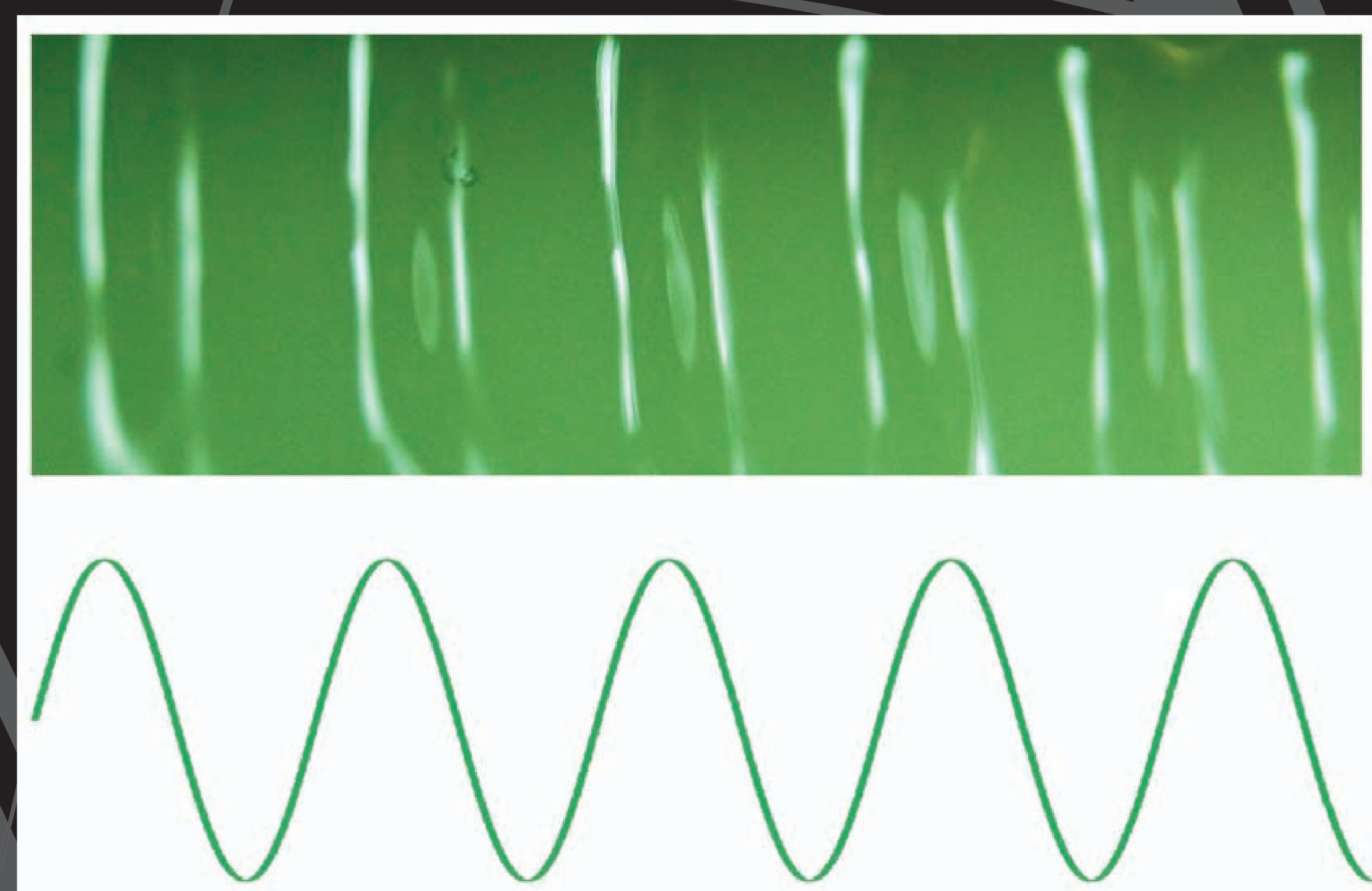
Com es fa un fluid no Newtonià?

La forma més fàcil de fer un fluid no newtonià a casa és barrejant dues parts de midó de blat de moro amb una part d'aigua.

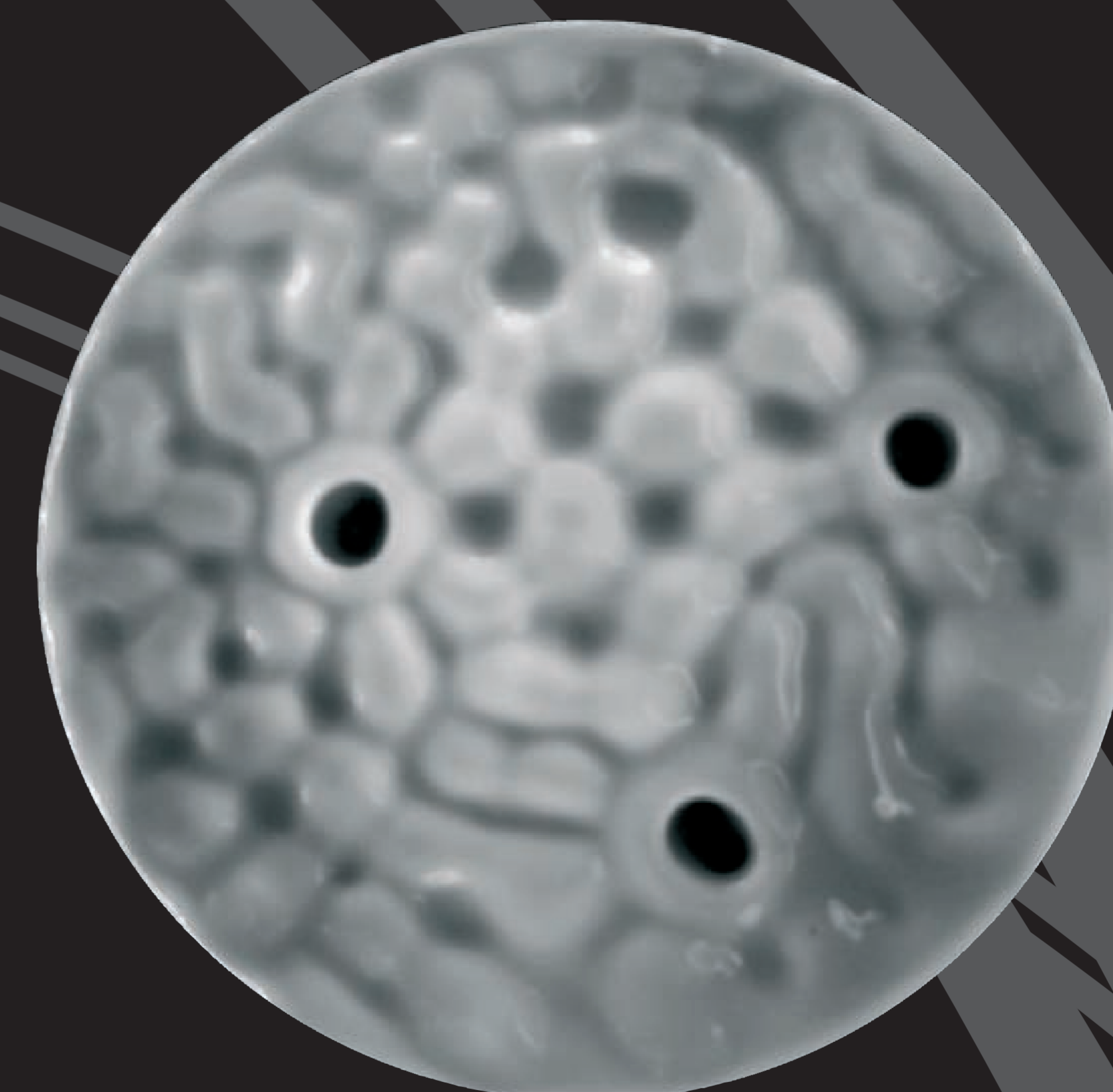


Altres exemples de fluids no newtonians són les arenes move-disses i el ketchup. A diferència de l'aigua amb farina de blat de moro, el ketchup es torna menys viscos si s'hi aplica una força.

Diferents estructures fent vibrar fluids no newtonians



Vibracions poc intenses: ones de Faraday



Augmentant la intensitat: solitons



Vibracions molt intenses: estructures deslocalitzades com dits.

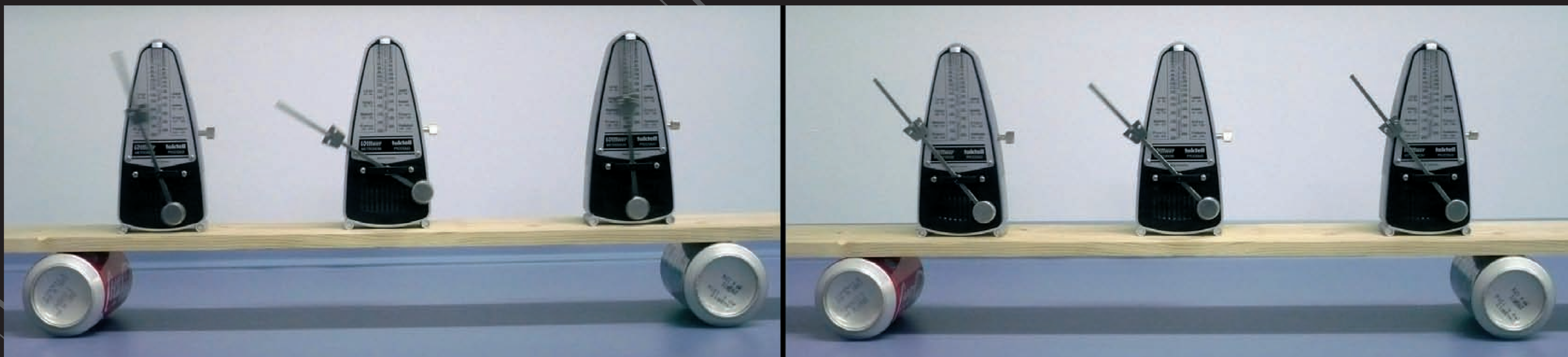
SINCRONITZACIÓ I

Metrònoms que adapten el seus ritmes



En l'experiment observam metrònoms oscil·lant, cadascun al seu ritme. Quan els col·loquem sobre la taula mòbil, comencen a moure's a l'uníson.

Aquest fenomen és conegut com a sincronització.

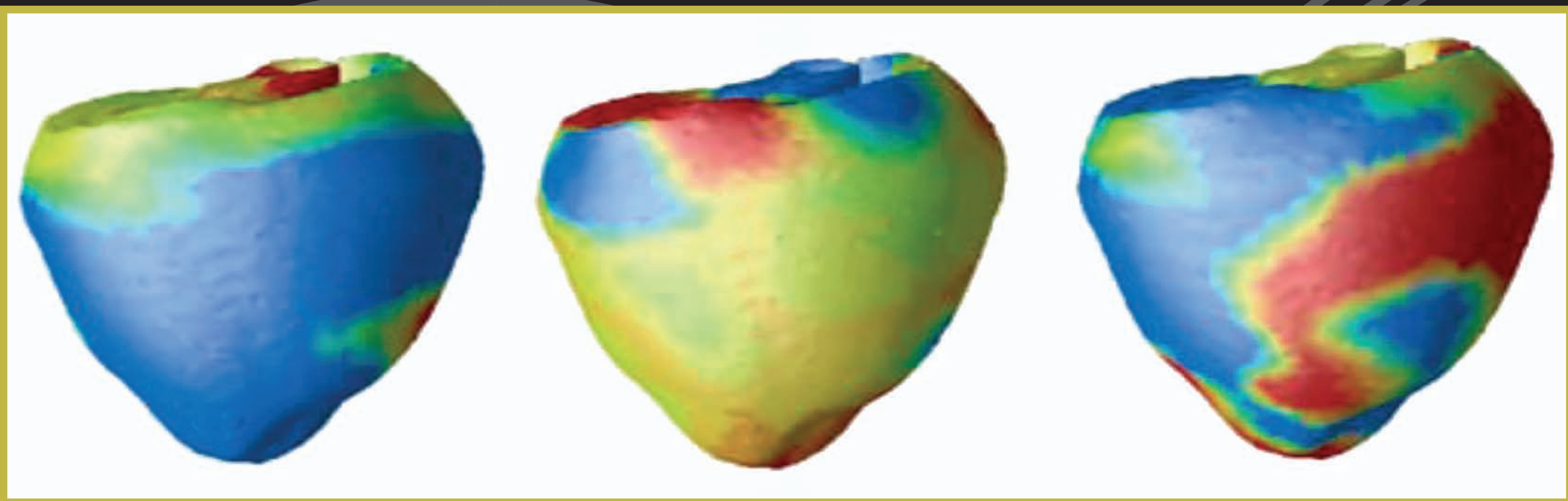


Metrònoms sincronitzant el seus ritmes

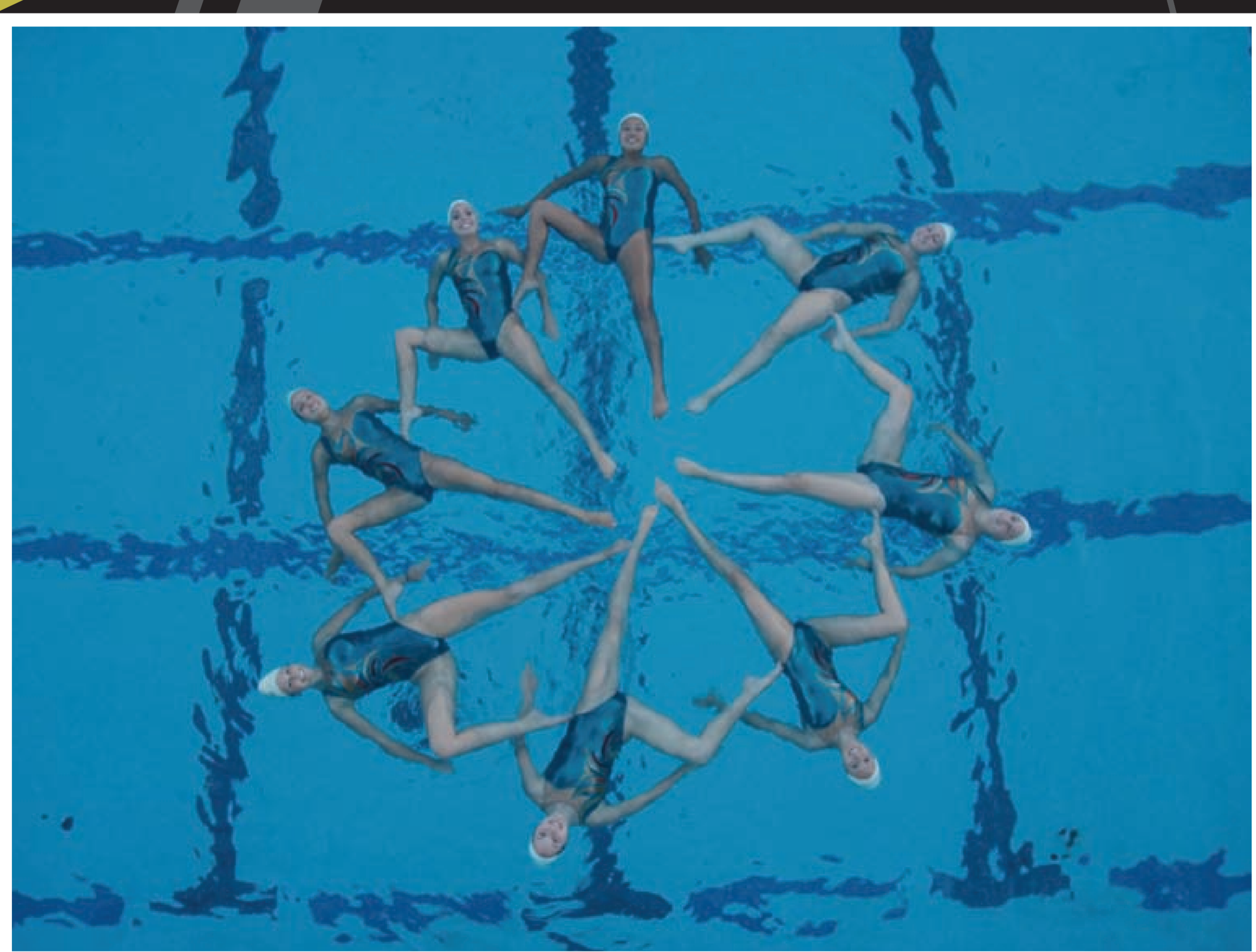
Per què se sincronitzen?

Generalment sincronitzar és fer que coincideixin en el temps dos o més fenòmens. La sincronització requereix la coordinació d'esdeveniments per operar un sistema a l'uníson. A un director d'orquestra li serveix per a mantenir a l'orquestra en el temps. Però alguns sistemes poden auto organitzar-se i donar lloc a un comportament sincronitzat.

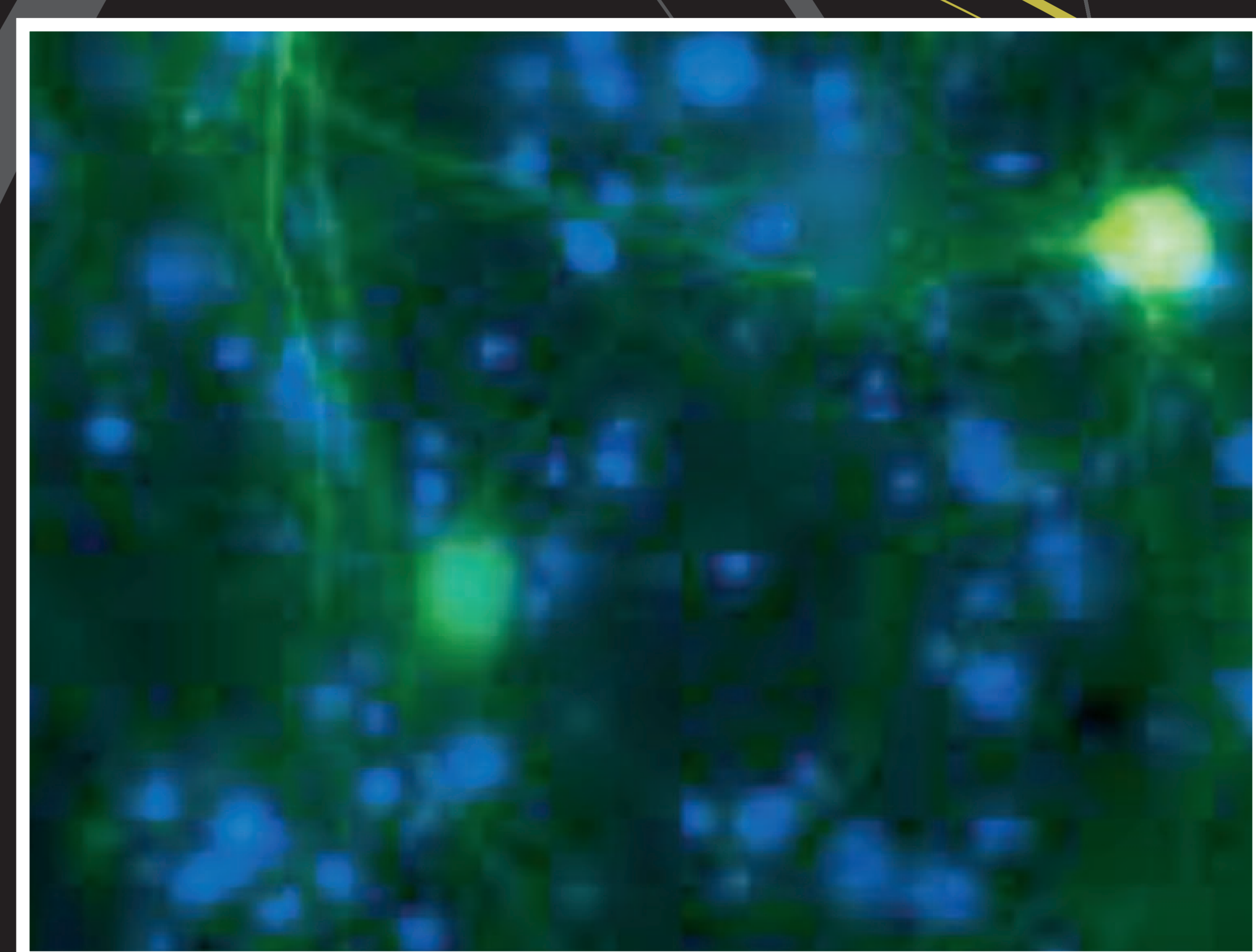
En la natura existeixen molts exemples de sistemes que se sincronitzen al transmetre informació: els grills en cantar, les cuques de llum quan brillen, les cèl·lules del cor, les neurones en el sistema nerviós en transmetre informació.



Ones elèctriques en el cor durant un batec. Les parts del mateix color estan sincronitzades.



Natació sincronitzada. Malgrat ser individus diferents, les nedadores se sincronitzen i es mouen totes de la mateixa manera.



Dues neurones activades simultàniament al cervell.

La interacció o acoblament entre els components del sistema és essencial perquè la sincronització ocorri: els metrònoms oscil·len alhora quan interaccionen entre si a través de la base mòbil comuna. La sincronització es deu a la penetració entre ells i no a una força externa. Això representa un exemple de fenomen emergent.

SINCRONITZACIÓ II

Imatges d'imatges

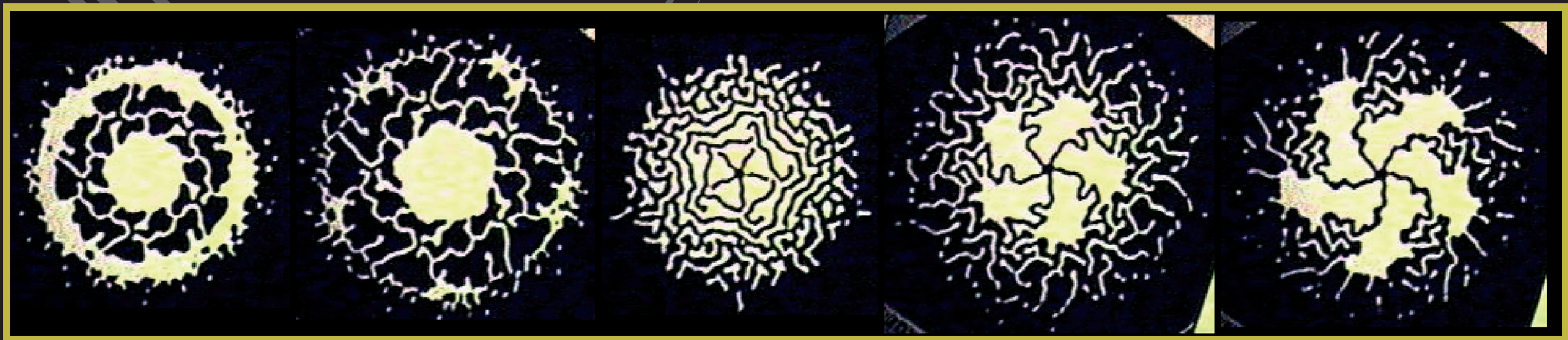


Has vist alguna vegada la teva pròpia imatge reflectida entre dos miralls o has vist la imatge d'una càmera gravant el seu propi monitor? Llavors ja coneixes l'efecte del mirall dintre del mirall.

Quan una persona o un sistema es veuen a si mateixos, estan sota l'efecte de la retroalimentació. Ara imagina que pots girar un poc una càmera que està apuntant a una pantalla que mostra la pròpia imatge de la càmera. En aquest cas en la pantalla apareixen figures que recorden a un caleidoscopi. En fer un zoom amb càmera és possible acostar-se a la imatge o també allunyar-se'n d'ella.

La combinació d'aquests efectes és suficient per a crear imatges que mostren patrons amb propietats especials. Es pot arribar a veure formes que semblen iguals sense importar amb quina magnificació les mirem. Les formes amb aquestes propietats es diuen fractals.

Aquí, hem estès l'experiment de tal manera que tenim dues càmeres, i cadascuna d'elles grava la imatge del monitor al qual està connectada l'altra



càmera. Els patrons que es creen són més complexos que en el cas d'una sola càmera i fins i tot varien caòticament en el temps, encara que poden ser molt similars.

Aquest és un altre exemple de sincronització entre dos sistemes, i il·lustra que la sincronització pot aparèixer no només amb simples pèndols o metrònoms, sinó que també apareix en sistemes que mostren un comportament molt complex.

De vegades aquests sistemes acoblats no veuen el comportament de l'altre de forma immediata, sinó que hi pot haver un temps de retard en el mitjà. Aquests temps de retard intermedis poden afectar intensament al resultat de la interacció entre els sistemes, i en resultat en fenòmens fascinants que



augmenten encara més la complexitat de les formes i els patrons que es creen en el sistema.



És possible sincronitzar a pesar d'aquests retards temporals? La sorprenent resposta és "sí", com es pot veure en aquest experiment, en el qual el temps de retard s'introdueix amb la funció "estafi-shift" de la gravadora d'alta definició. Aquest comportament s'utilitza avui dia en nous mètodes de comunicacions privades per protegir la comunicació de mirades indiscretes.

L'IFISC està a l'avantguarda mundial d'aquest camp d'investigació.