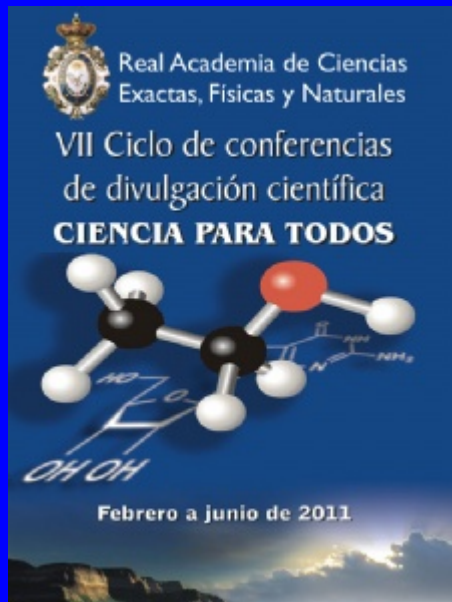


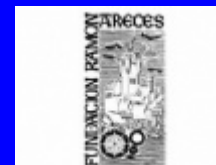
# *Armazones de cables y barras: de la escultura a la célula pasando por las matemáticas.*

**Jesús Idefonso Díaz**

**Madrid, 12 de febrero de 2011**



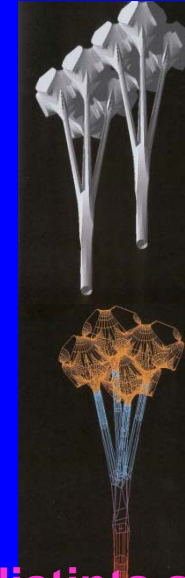
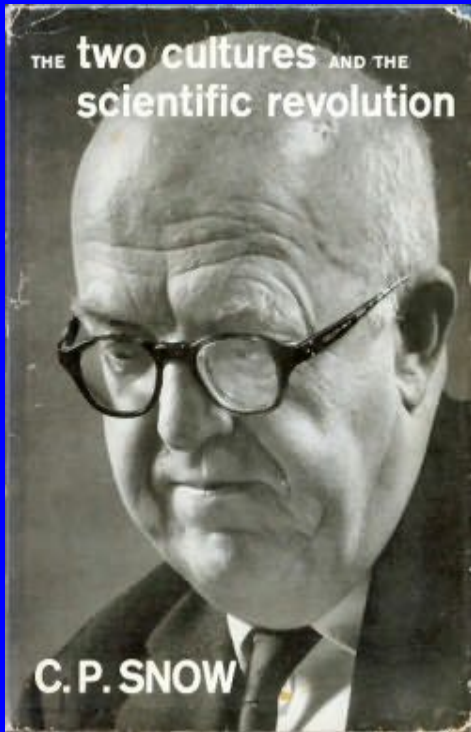
Con el patrocinio de



**<http://racefyn.insde.es/>**

# 1. Introducción.

Si esta conferencia tratase sobre Ciencia en el Arte,... recursos casi infinitos



¡¡ Sería otra conferencia distinta a esta !!

Mensaje (atípico) de esta conferencia:

***Un cierto arte como origen de ciencia y tecnología***

Dos mundos: ¿ dos culturas ?

Charles Percy **Snow** (1905 –1980)

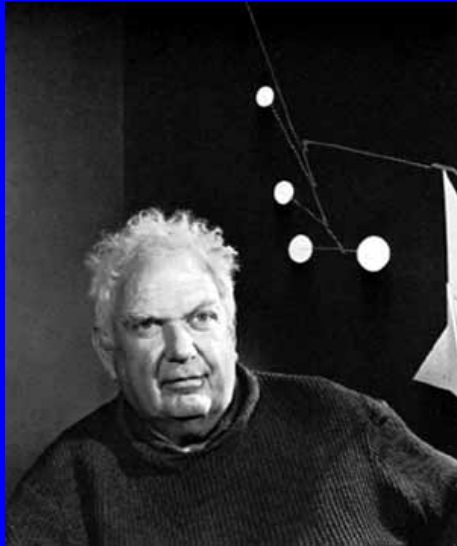
*The Two Cultures and A second Look*, Cambridge University Press. 1962,

*(Las dos culturas y un segundo enfoque, Alianza, Madrid, 1977).*

Plan:

2. Esculturas de Calder como punto de partida
3. Evolución por medio de otros artistas y arquitectos
4. El tema llega a las matemáticas
5. Incursión en la biología
6. Desarrollo simultaneo, y armonizado, en todos los frentes
7. Para saber más

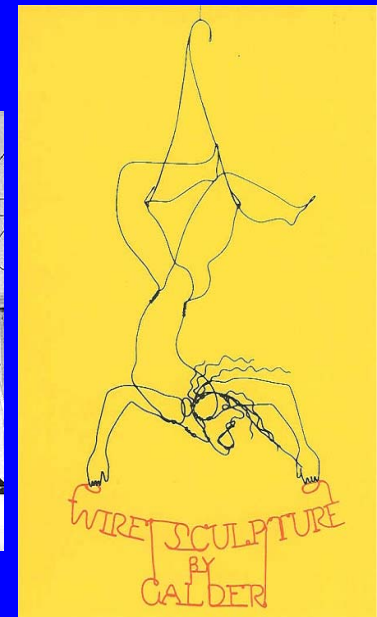
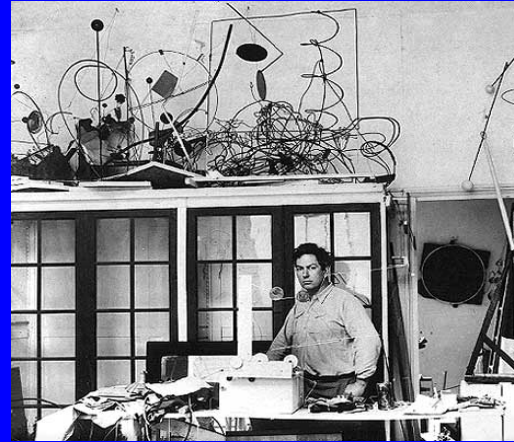
## 2. Esculturas de Calder como punto de partida



Alexander Calder

(1898 –1976)

<http://calder.org>



Wire sculpture, 1928.



Ligereza

Inestabilidad

Movimiento (Arte cinético)

Gravedad y viento (“formas que gravitan”)

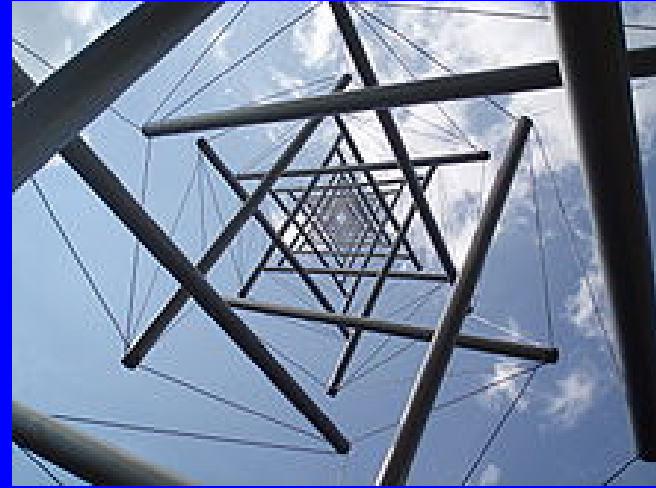
Varillas y cuerpos sólidos

Influencia de Miró, lenguaje abstracto,...

### 3. Evolución de una nueva concepción por otros artistas y arquitectos



Kenneth Snelson (1927-),



Primeras “esculturas” en 1949  
(1999) Lifetime Achievement in  
Contemporary Sculpture Award,  
International Sculpture Center.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Kenneth\\_Snelson](http://en.wikipedia.org/wiki/Kenneth_Snelson)

Ligereza

Varillas y cuerpos sólidos **Armazones de cables y barras**

Estabilidad: **rígidez**



Lenguaje nuevo, muy estricto, creado por el propio artista: aparentemente inexistente en la naturaleza,...

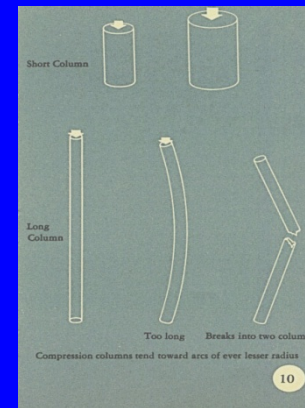
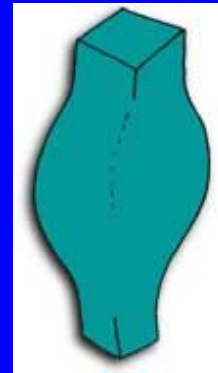
Los únicos elementos son cables y barras flotantes, **no conectadas entre sí,**

**en compresión,**

frente a unos **cables tensados** que sólo entran en contacto con los extremos de las barras en puntos diferentes.

*Compresión:* fuerza contra una parte de una estructura.

Sección limitada con respecto a la longitud (L. Euler 1744)



*Tensión:* “tirar de los extremos” de una parte de una estructura.

Sección ilimitadamente pequeña con respecto a la longitud



Easy Landing (K. Snelson, 1977), Baltimore (Maryland, USA)

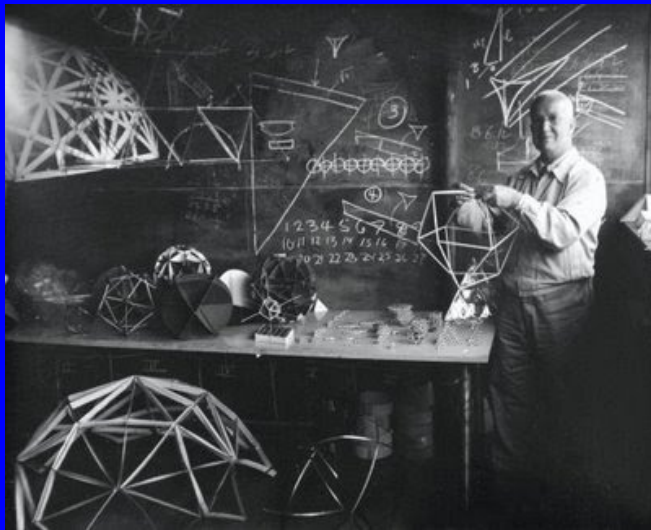
Todo comenzó en un curso de verano:

<http://www.bmcproject.org/Biographies/SNELSON>

1948 Summer Session in the Arts (University of Oregon, Campus de Eugene)

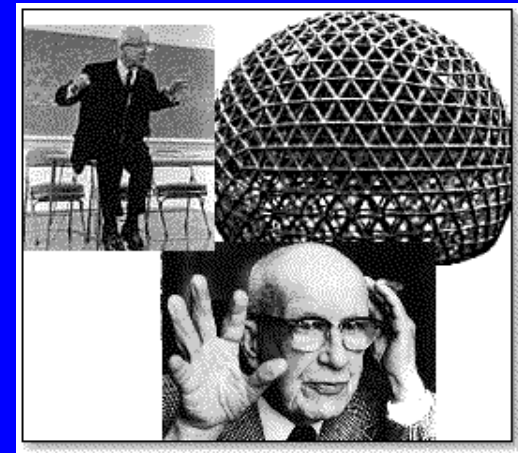
Aquel Summer Course de 1948 fue un punto de encuentro de gran trascendencia

*Two weeks into the session “this strange man Buckminster Fuller arrived.”*



Richard Buckminster Fuller  
“Bucky” (1895-1983)

Recuerdense las fechas:  
Calder (1898 –1976)



Ingeniero polifacético (arquitecto, ecologista, inventor-constructor, matemático, ...)

Excéntrico, mesiánico, provocador,...

Objeto de numerosos libros, artículos, exposiciones, distinciones, ...

**¡¡ Otra (densa) conferencia distinta a esta !!**



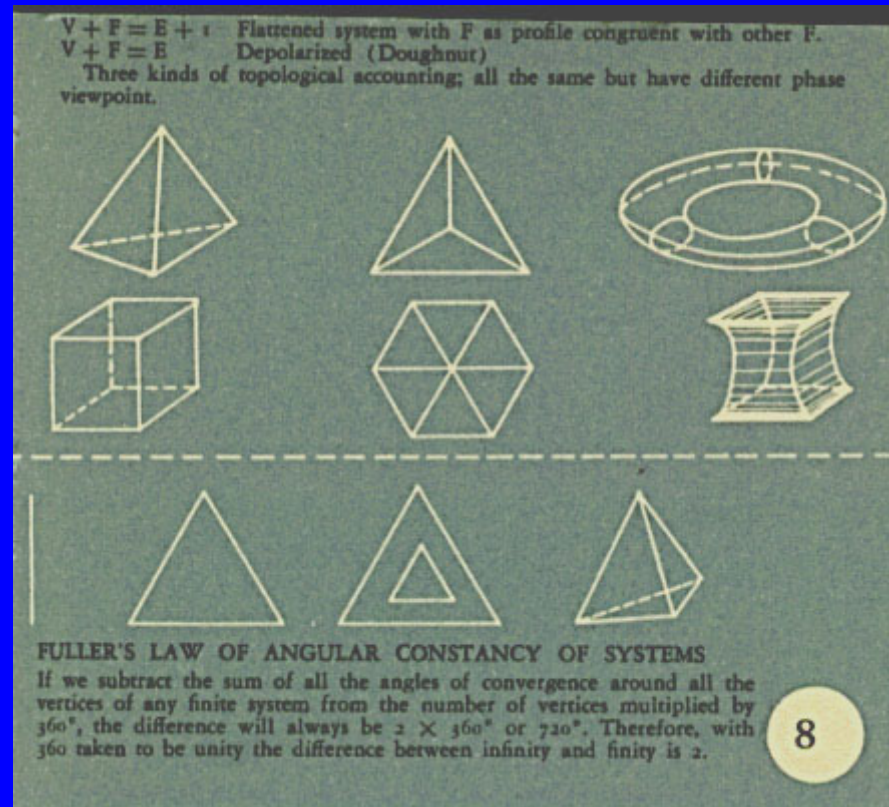
# Abundante información en



<http://www.bfi.org/>

## Ley de invarianza de ángulos de Fuller:

si restamos a la suma de los ángulos convergentes en torno a todos los vértices de cualquier sistema, el número de vértices multiplicado por 360 grados, la diferencia siempre es 720 grados



## Relación con las esculturas de varillas y cables de K. Snelson

### Bucky's Big Ideas

Buckminster Fuller spent his life working across multiple fields, such as architecture, design, geometry, engineering, science, cartography and education, in his pursuit to make the world work for 100% of humanity. Fuller insisted on resisting monikers of specialization to describe his work, preferring instead to describe his output as that of a 'comprehensive anticipatory design scientist' - 'an emerging synthesis of artist, inventor, mechanic, objective economist and evolutionary strategist.' This approach resulted in the creation of numerous artifacts that cross boundaries and defy normal categorization. For the purposes of conveying Fuller's work to the uninitiated, we have organized an overview of the major themes and resulting project ideas that occupied Fuller's imaginative space:



### Geodesic Domes

R. Buckminster Fuller spent much of the early 20th Century looking for ways to improve human shelter by applying modern technological know-how to shelter construction, making shelter more comfortable and efficient, and making shelter available to a greater number of people. [Read more](#)



### Dymaxion World

At the heart of Buckminster Fuller's Dymaxion concept is the idea that rational action in a rational world demands the most efficient overall performance per unit of input. His Dymaxion structures, then, are those that yield the greatest possible efficiency in terms of available technology. [Read more](#)



### World Game

In the 1960's Buckminster Fuller proposed a "great logistics game" and "world peace game" (later shortened to simply, the "World Game") that was intended to be a tool that would facilitate a comprehensive, anticipatory, design science approach to the problems of the world. [Read more](#)



### Synergetics

Synergetics is the system of holistic thinking which R. Buckminster Fuller introduced and began to formulate. Synergetics is multi-faceted: it involves geometric modeling, exploring inter-relationships in the facts of experience and the process of thinking. [Read more](#)

<http://synergeticists.org/>

Creador de nuevos términos: **sinergia** (del griego  $\sigma \upsilon \nu \epsilon \rho \gamma \acute{\iota} \alpha$ , «cooperación»): resultado de la acción conjunta de dos o más causas.

“**synergetics**”: sistema de pensamiento holístico que R. Buckminster Fuller presentó y comenzó a formular. Tiene múltiples facetas: se trata de modelización geométrica, exploración de las interrelaciones en los hechos de la experiencia y el proceso de pensar. Esfuerzos para identificar y comprender los métodos que la naturaleza utiliza en la coordinación de Universo (tanto física como metafísica). Proporciona un método y una filosofía para la solución de problemas y el diseño, por lo que tiene aplicaciones en todas las áreas del quehacer humano.

*Synergetics*. Exhibition Catalog, Cooper Hewitt Museum of Design. 1976.

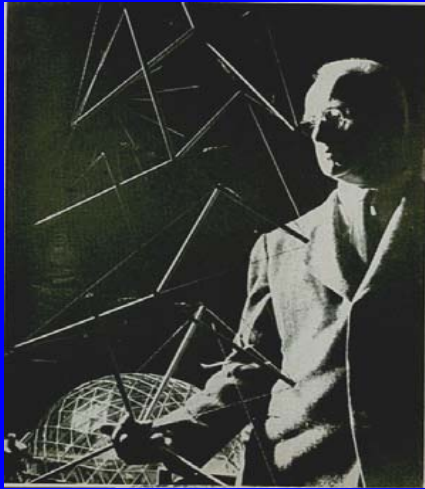
**Tensegrity** = *Tension* + *Integrity* (Portfolio and Art News Annual, No.4, 1961).

tensión de los cables + integridad de la estructura (o armazón resultante, en equilibrio estable).

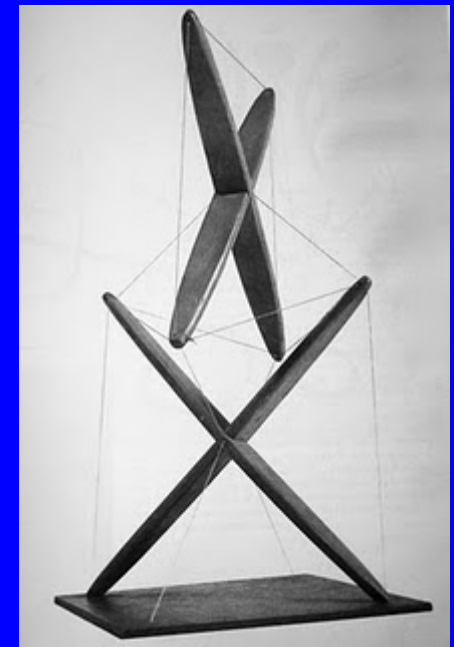
**Tensegridad**: estructura que obedece al “lenguaje de Snelson”.

El término ha alcanzado ya un cierto renombre (especialmente a la sombra de Buckminster Fuller) pero, a mi juicio, es muy restrictivo: **Armazones de cables y barras**

La definición (rigurosa) es muy restrictiva.

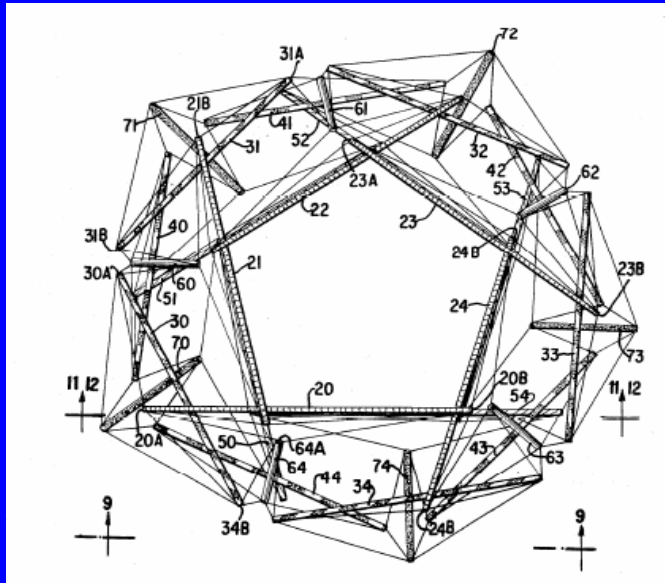


X-piece, 1948-49.

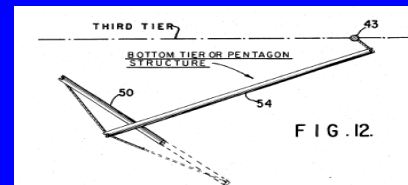


Esta escultura de Fuller NO es una tensegridad.

Esta escultura de Snelson NO es una tensegridad.



Patente de Fuller en EE.UU. 1973; *Non-symmetrical tension-integrity structure Patent.*

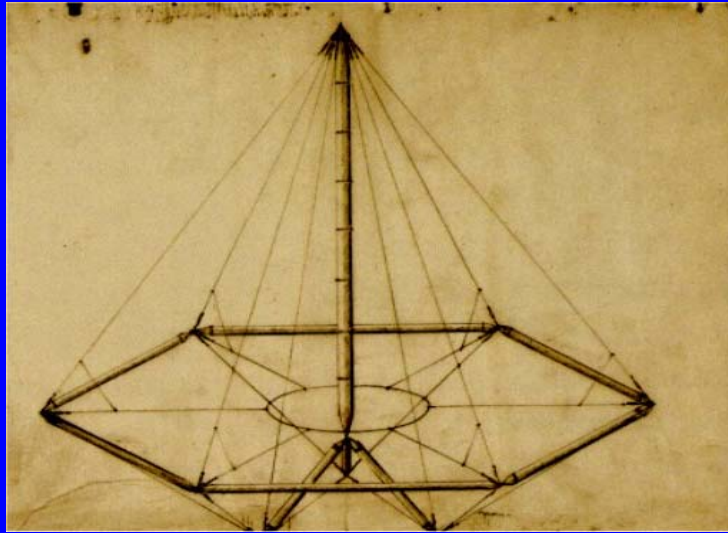


Varillas aisladas

Compresión discontinua, tensión-continua (*islas de compresión en lagos de tensión*: K. Snelson).

Controversia con K. Snelson

Mástil de la 4D/ Dymaxion House Patent 1927



¿Influencia de Calder?

¿Influencia de Fuller sobre Calder?



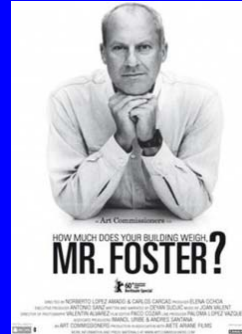
Fuller llevó sus ideas a la arquitectura originando bellas estructuras inspiradas en las tensegridades tales como, por ejemplo, su famosa *Biosphere* instalada en la Expo de Montreal de 1976.



# Fuller tuvo una notable Influencia sobre Norman Foster (1935 -)



## How Much Does Your Building Weigh, Mr Foster?



Documental, 78 minutos

Directores: Norberto López Amado y Carlos Carcas,  
Estrenado el 8 de Octubre de 2010



*Hacer más con menos* (Fuller)

*Menos es más,*  
Ludwig Mies van der Rohe (1886–1969),

Sainsbury Centre for Visual Arts,  
University of East Anglia in Norwich,  
Norfolk, UK. 1974-1978

5.328 Toneladas

Hearst Tower,  
New York,  
2007.



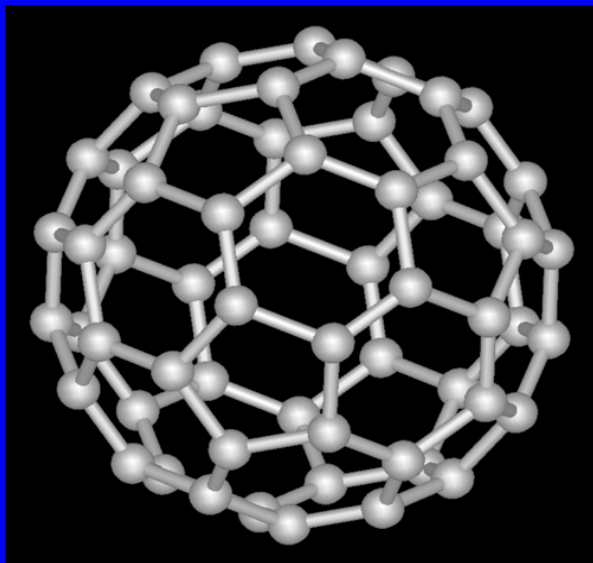
El impacto de Fuller (en particular de su **cúpula geodésica**) alcanzó incluso a un ámbito tan aparentemente lejano como el de la Química.



Los **fulerenos** (fullerenes) son la tercera forma más estable del carbono, tras el diamante y el grafito.

El primer fullereno se descubrió en 1985 y se han vuelto populares entre los químicos, tanto por su belleza estructural como por su versatilidad para la síntesis de nuevos compuestos, ya que se presentan en forma de esferas, elipsoides o cilindros.

Los fulerenos esféricos reciben a menudo el nombre de *buckyesferas* y los cilíndricos el de *buckytubos*.



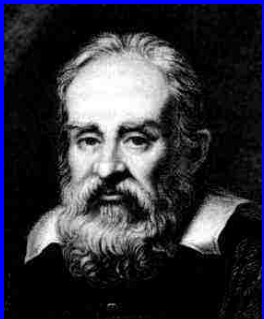
El más conocido es el **buckminsterfullereno**: formado por 60 átomos de carbono ( $C_{60}$ ), en el que ninguno de los pentágonos que lo componen comparten un borde; se asemeja a un balón de fútbol (domo geodésico), constituido por 20 hexágonos y 12 pentágonos, con un átomo de carbono en cada una de las esquinas de los hexágonos y un enlace a lo largo de cada arista.

## 4. El tema llega a las matemáticas

El lenguaje de lo “casi intangible”



*El libro de la naturaleza está escrito en lenguaje matemático*



Galileo Galilei (1564-1642)

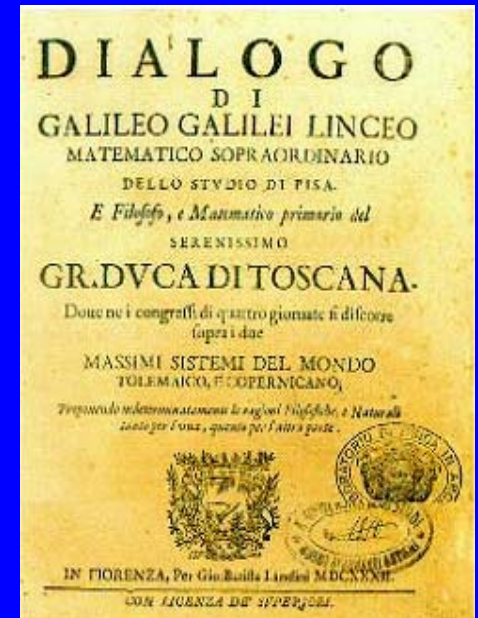
Crab Canon on a Möbius Strip.

<http://www.youtube.com/watch?v=xUHQ2ybTejU>

Canon Cangrejo [*Quaerendo invenietis*], de Ofrenda Musical,

J. S. Bach (1747).

D. Hofstadter: *Gödel, Escher, Bach* (1979)





Man Ray (1890 - 1976) (e.d. Emmanuel Rudzitsky)

Quedó impresionado por la materialización de las ecuaciones matemáticas tras una visita al *Institut Henri Poincaré* de París, en 1935.



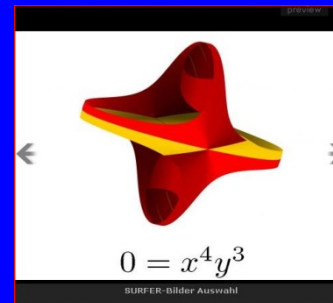
*Shakespearian Equation: objets mathématiques* (1935-1948): colección de fotos y pinturas



*Mathematical Object: Ruled Surface, 1936*



Shakespearean Equation: Twelfth Night, 1948



Imaginary 2011

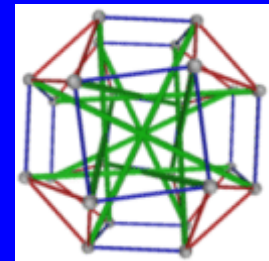
Real Academia de Ciencias:

19 de octubre a 15 de noviembre 2011

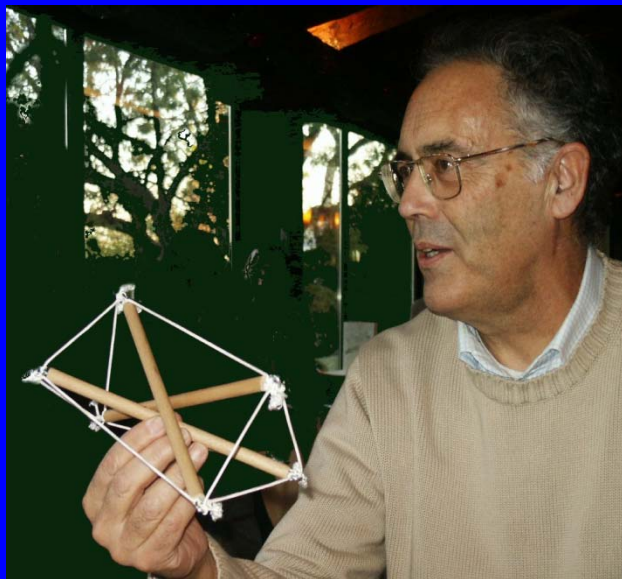
(Centenario de la RSME)

La posibilidad de experimentar fácilmente con esas estructuras, atrajo tempranamente a numerosos matemáticos (Robert Connelly (1947-), ...).

<http://www.math.cornell.edu/~connelly/>



El primero de los matemáticos españoles: Miguel de Guzmán Ozamiz (1936-2004),



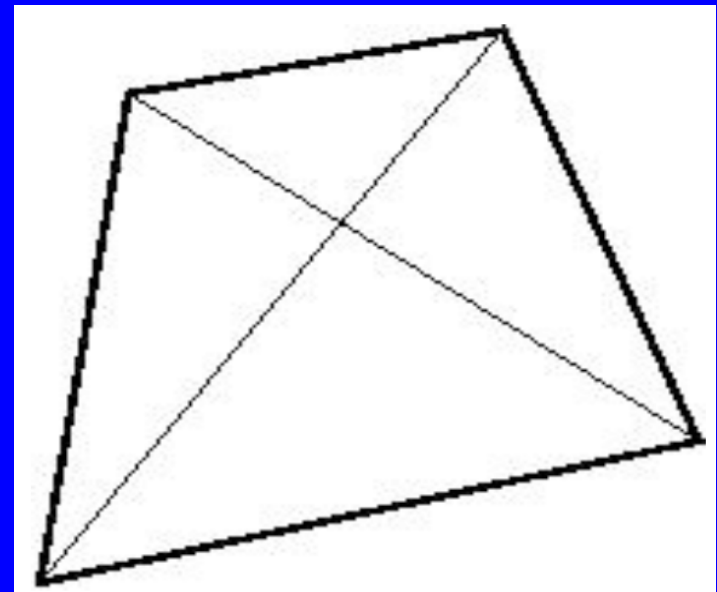
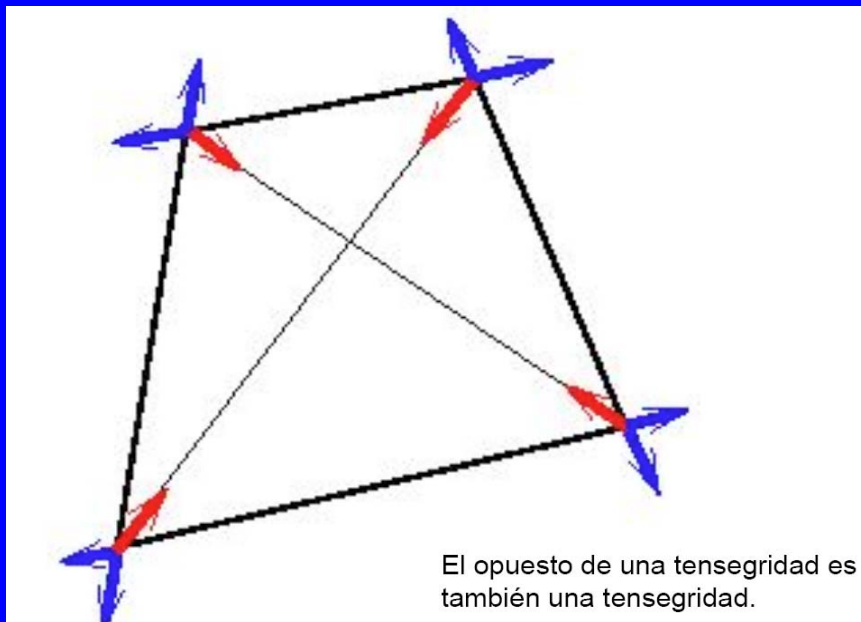
Tenía muy avanzado un proyecto de libro sobre *Tensegridades*, habiendo construido una cantidad importante de esas *estructuras* con las que experimentaba, disfrutaba y hacía disfrutar a numerosas personas.

Miguel de Guzmán introdujo su propia definición de tensegridad (un poco más general que la de Sneldon y Fuller):

“Consideremos una configuración geométrica constituida por un número finito de puntos y por unos cuantos segmentos que unen esos puntos.

Una **estructura de tensegridad** consiste en asignar vectores a los puntos, en las direcciones de los segmentos que concurren en ellos de forma que:

- (a) la resultante en cada punto es nula,
- (b) para cada segmento, la suma de los vectores asignados a sus extremos es cero”



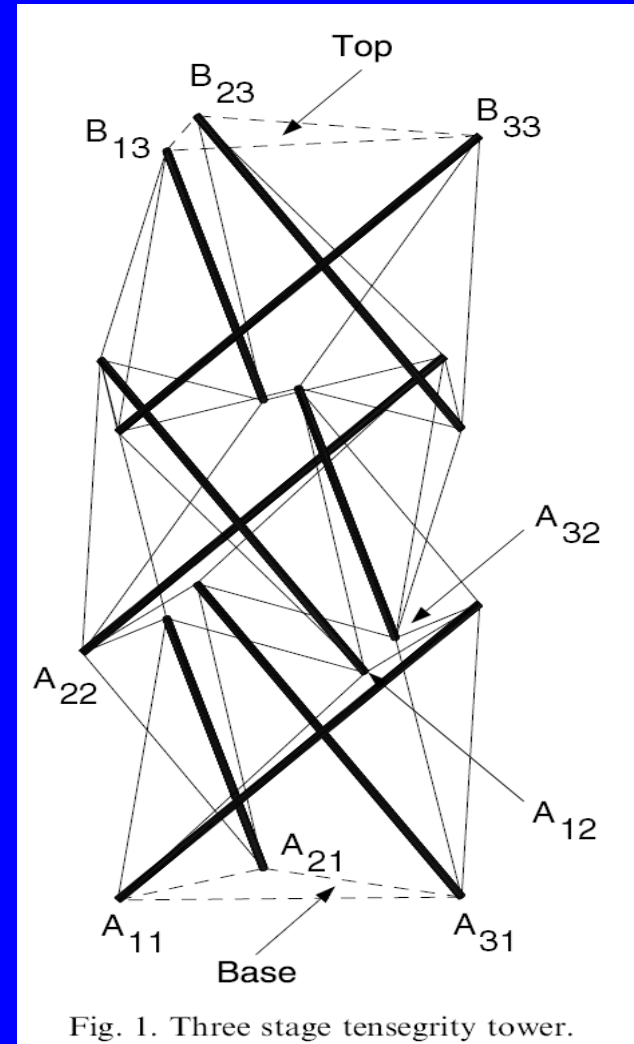
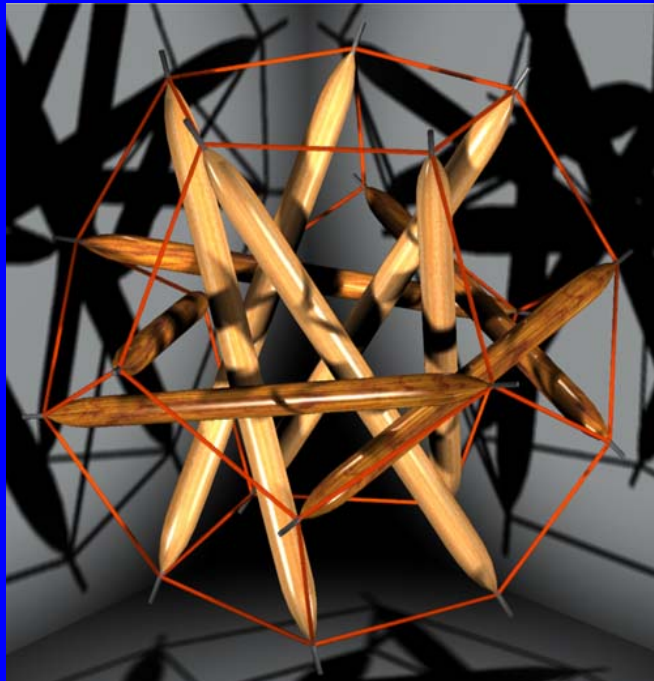
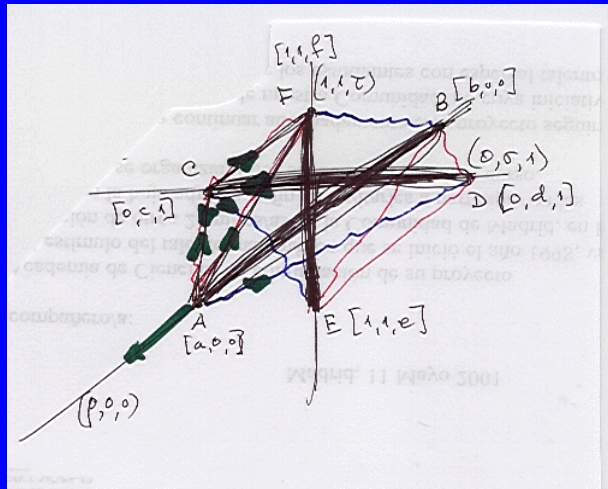
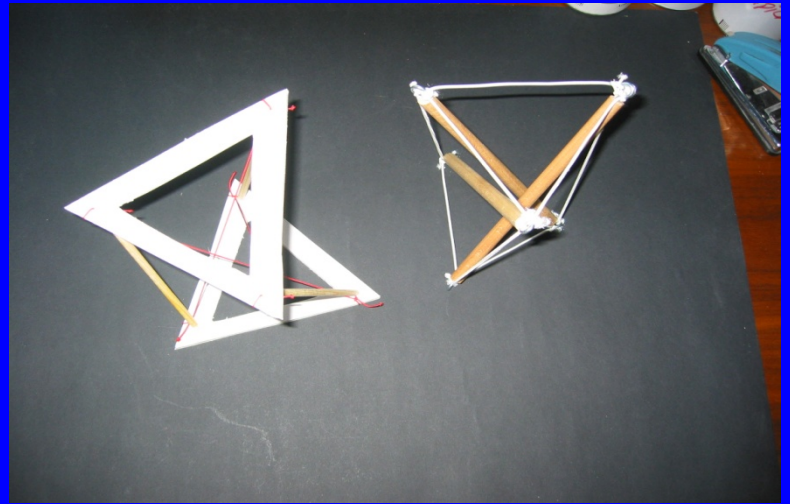
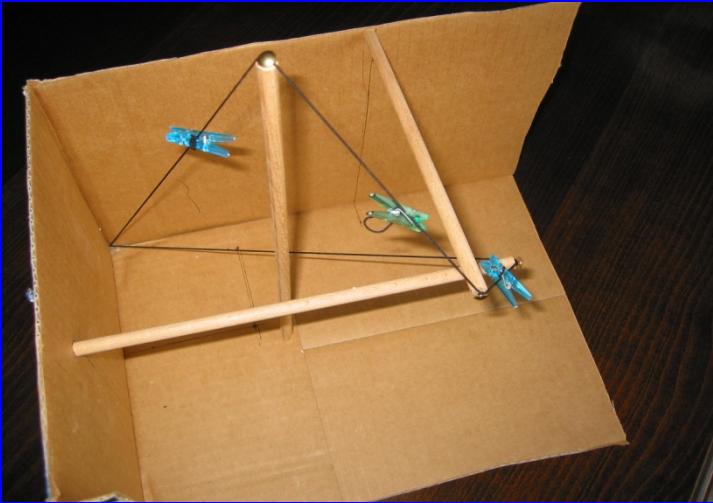
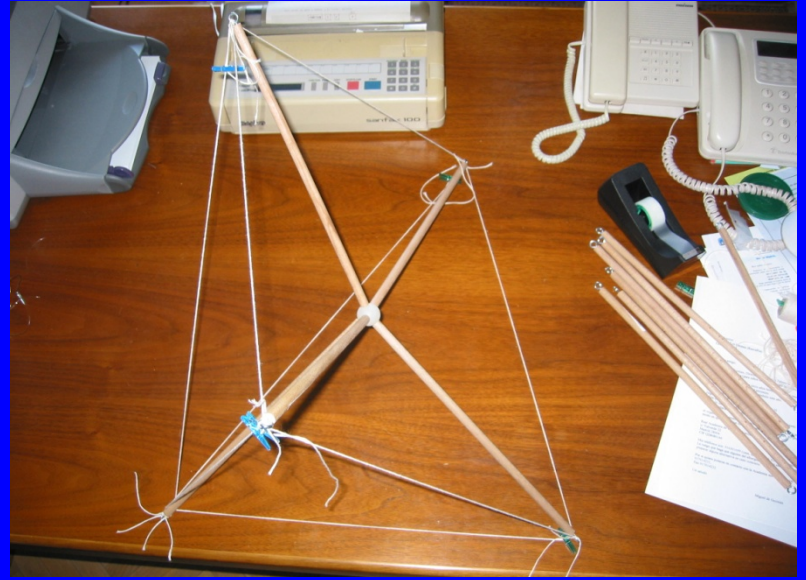


Fig. 1. Three stage tensegrity tower.



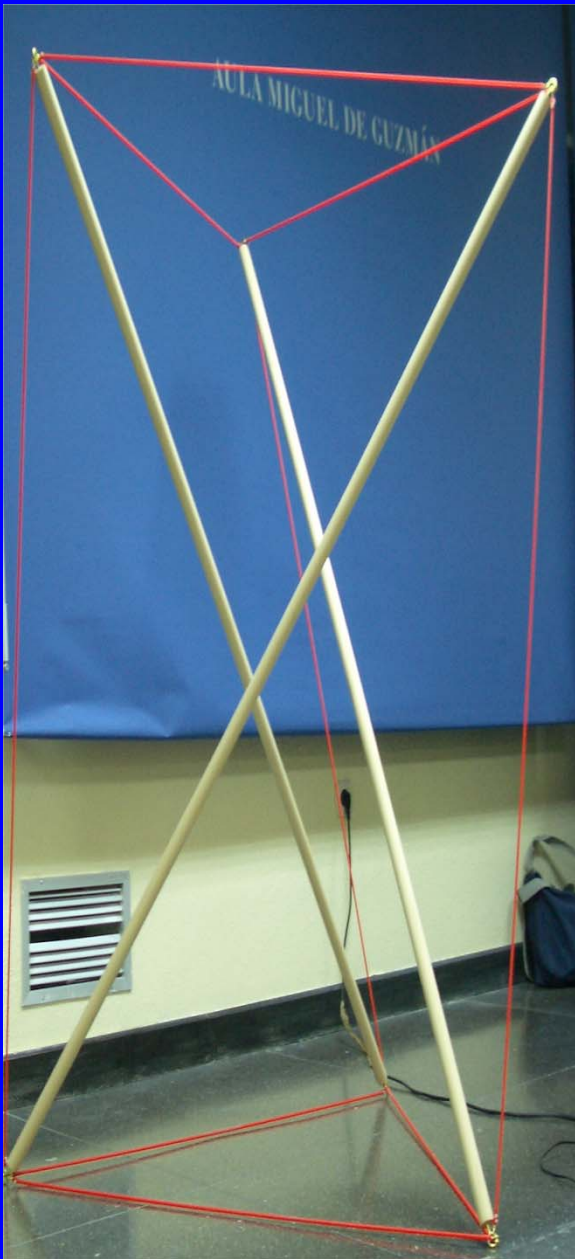
Desde el punto de vista matemático son numerosas las cuestiones relacionadas con las *tensegridades*

razones de la rigidez de esas livianas estructuras

propiedades de optimización en la conexión de sus aristas

*problema inverso*: dados unos puntos del plano, o del espacio, hallar las condiciones que aseguran que esos puntos puedan ser las aristas de una cierta tensegridad.

Además del propio interés geométrico, las respuestas a tales cuestiones tienen relevantes consecuencias en muchos otros dominios, entre ellos el arquitectónico.



Una de las tensegridades inicialmente consideradas por K. Snelson: **el prisma oblicuo de base triangular.**

Tres barras de igual longitud separadas en el espacio, tres cables de igual longitud por cada extremo, cada cable uniendo (y separando) en el espacio los extremos de las barras en una estructura rígida autotensionada.

**Simetría rotacional alrededor de un eje.**

La simetría hace muy sencilla la determinación de fuerzas (vectores).

**Configuración de seis puntos en el espacio:**

- Sean los puntos 1, 2, 3, 4, 5, 6.
- No hay cuatro en un mismo plano. A cada punto llegan cuatro segmentos.
- Esto implica que la única configuración posible de segmentos es: 12, 13, 23, 45, 46, 56, 14, 15, 25, 26, 36, 34.
- Es decir dos triángulos 123, 456 (en la base y la cima) y tres cuadriláteros (laterales) 1264, 2365, 1362.

Es posible explorar la situación geométrica, p.e. con Derive, Maple, Mathematica, Matlab, ...

# Sobre su proyecto de libro de sobre tensegridades:

- *Tal vez, tal vez,..*
- *¿Puede tener un interés para la gente?*
- *Tal vez desde el punto de vista de la exploración de la marcha del pensamiento. Pero si es que pretendo exponer todo lo que he registrado y explicarlo puede ser extraordinariamente pesado.*
- *Pienso que podría ser una buena idea hacer un libro diferente después de asegurarme de que en todo lo que he ido encontrando hay realmente cosas que pueden ser interesantes para otros.*
- *He ido acumulando muchas experiencias alrededor de mi ocupación con la tensegridad que las tengo bastante bien registradas a medida que se han ido dando.*
- *Y algunas de estas experiencias podrían ser útiles a modo de protocolos de ocupación con un problema.*
- *Mis comienzos con la página famosa...Compression and Tension are good; Torque's a Killer*
- *Mis primeros modelos*
- **Mi asombro.**
- *Mi certeza de que había allí un problema interesante*
- *Mis propuestas a diversos estudiantes...*
- *Lo que entendía y lo que no entendía.*
- *Cómo en febrero pasado (Sevilla 2002) ya tenía ideas que escribir en torno al prisma triangular oblicuo...*
- *Mis primeros ensayos experimentales bidimensionales, tridimensionales,...*



- *El primer borrador para empezar a pensar y cómo comencé con Paco Roca...*
- *Mis primeras inmersiones en la literatura a través de Internet, que era lo más importante de lo que disponía.*
- *Muchos de los artículos aparecían en revistas que no estaban a mi alcance.*
- *Mi laboratorio experimental de tensegridad, con cartones, con el Geometer's Sketchpad, con DERIVE.*
- *Las experiencias recogidas...*
- *Sobre estabilidad e inestabilidad de ciertos equilibrios...*
- *Mis cuadernos sobre tensegridad que recogen las experiencias desde febrero.*
- *En principio escritos para ayudarme a perfilar mi pensamiento y para ayudar la memoria y para evitar andar dando vueltas demasiadas veces alrededor de lo mismo.*
- *Se podrían exponer con realismo, en su carácter tentativo, como de torso, señalando los engaños, las vías que condujeron a nada, las vías que sí condujeron a algunas cosas interesantes.*
- *Las muchas cosas que aún no entiendo y que quedan ahí como problemas abiertos para que otros los resuelvan...*

## ¿Cómo reconstruir su boceto de libro?



En eso estamos ...

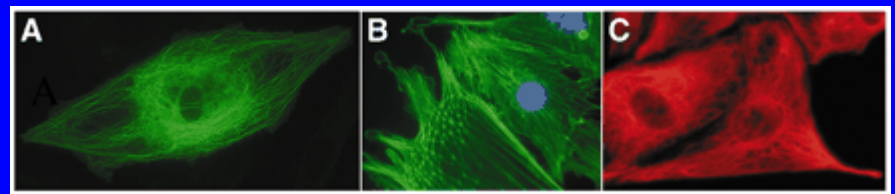
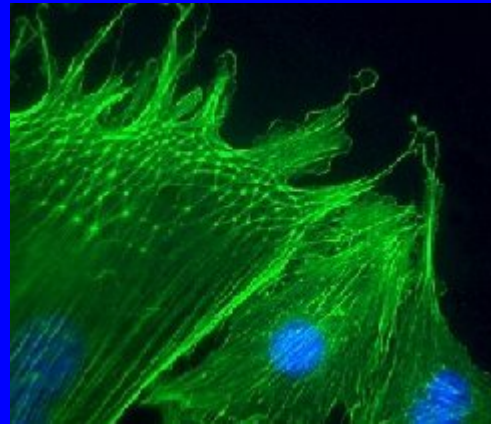
## 5. Incursión en la biología

Un punto de vista insospechado en el estudio de estas estructuras apareció con la obra de Donald Ingber, a mediados de los años 70, al reconocer estructuras muy semejantes en el esqueleto de las células .

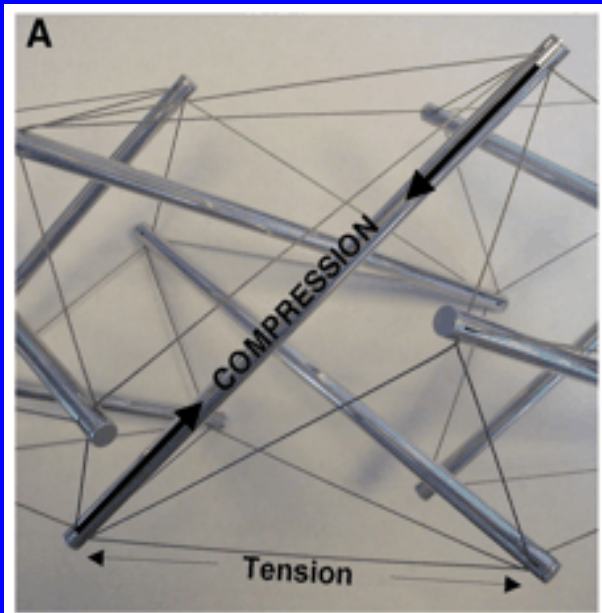
En el citoesqueleto, las cadenas de proteínas - finas, gruesas o huecas - cumplen el rol de los cables y las varillas. Todas las proteínas conectadas entre si forman una estructura estable, pero flexible.



Donald Ingber  
(1940-)



Arquitectura de la célula:  
microfilamentos, microtubos,..



El citoesqueleto percibe la gravedad - o cualquier tipo de fuerza - a través de proteínas especiales llamadas *integrinas*, las cuales se proyectan a través de la superficie de la membrana celular“

Dentro de la célula, las integrinas están conectadas al citoesqueleto. Por fuera, están unidas a un armazón conocido como matriz ECM extracelular --una estructura fibrosa a la cual se conectan las células de nuestro cuerpo.

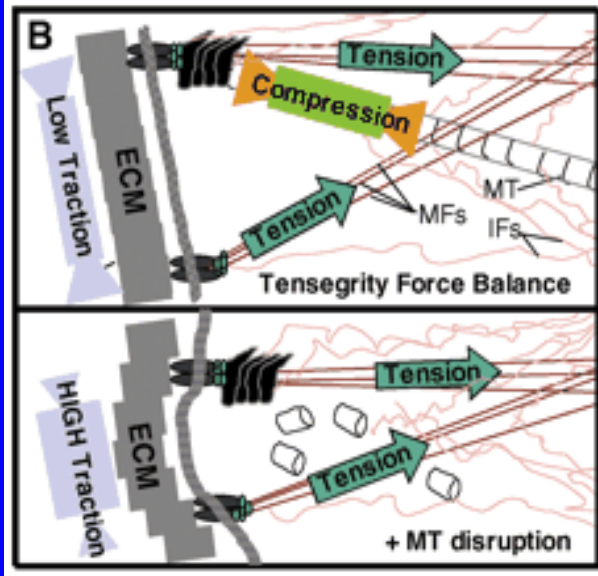
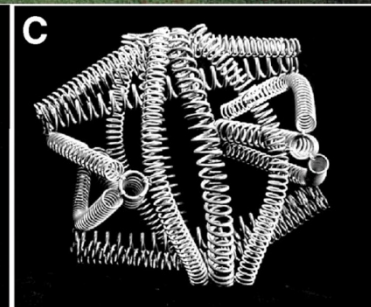
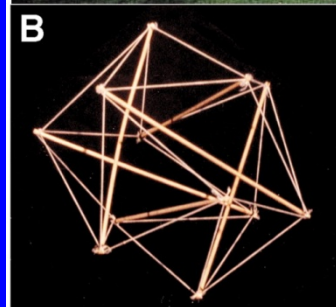
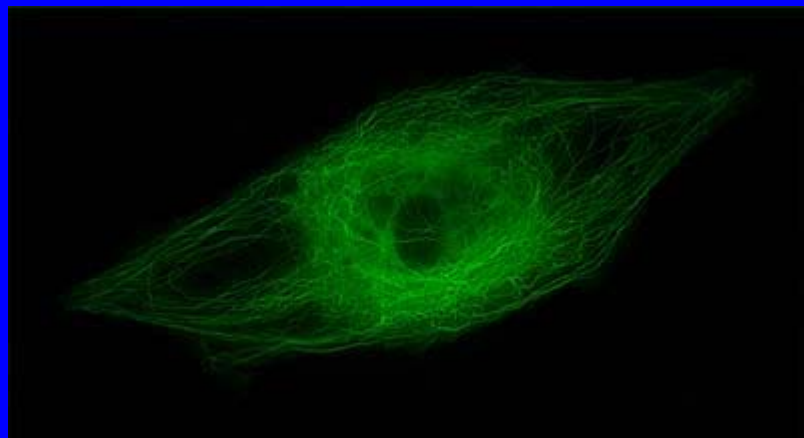
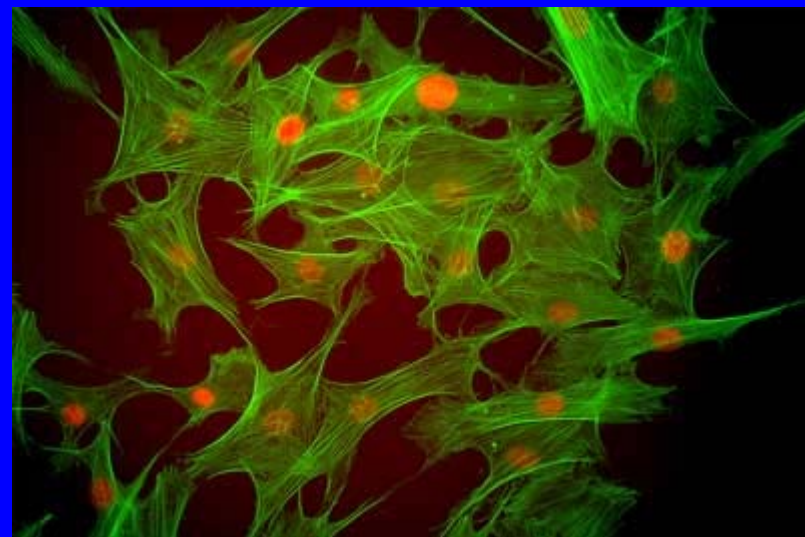
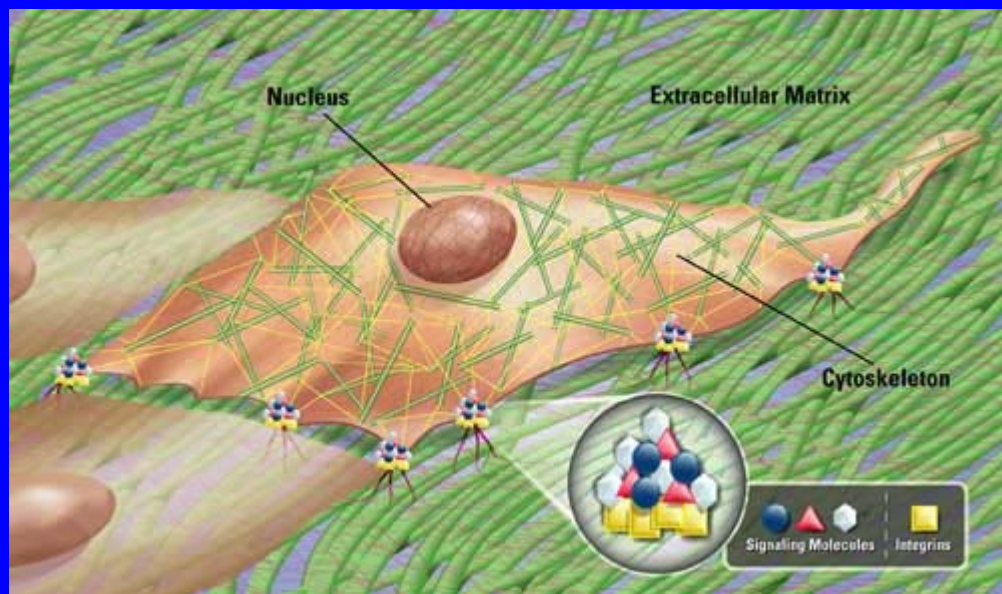


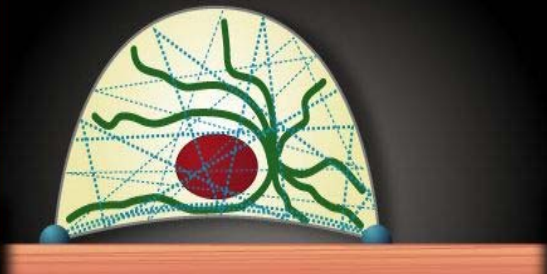
Diagrama esquemático del balance de fuerzas entre los microfilamentos tensionados (FMs), filamentos intermedios (FI), microtúbulos comprimidos (MTs) y la ECM en una región de una matriz de tensegridad celular.

Las fuerzas de compresión soportados por microtúbulos (arriba) se transfieren a las adherencias ECM cuando se interrumpen los microtúbulos (abajo), lo que aumenta la tracción sustrato.

<http://jcs.biologists.org/content/116/7/1157.full>



Children's Hospital Boston
Tensegrity in a Cell



**MICROFILAMENTS**

Microfilaments form a crisscrossing network of thin fibers that extends throughout the cytoplasm of the cell. Behaving like tensed molecular rubber bands, the filaments pull the cell's membrane, microtubules and everything within the cytoplasm towards the cell's center, while tugging the cell's nucleus outward.

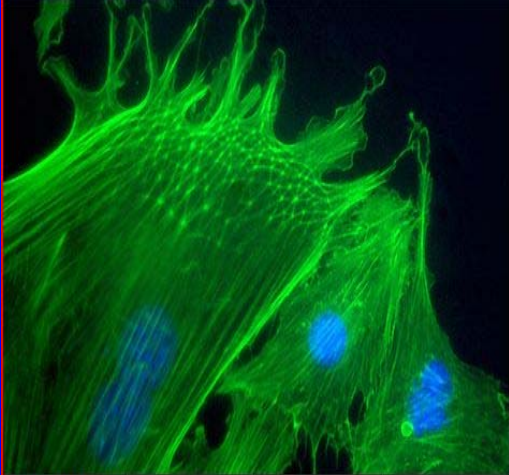
Other filaments found in the cell, called intermediate filaments (not shown), interweave with the microfilaments and microtubules, connecting them to each other and to the cell's outer membrane and nucleus.

<b>MICROFILAMENTS</b>	<b>MICROTUBULES</b>	<b>EXTRACELLULAR MATRIX</b>	<b>INTEGRIN RECEPTORS</b>
Tension <input type="checkbox"/>	Length <input type="checkbox"/>	Rigidity <input type="checkbox"/>	Pull <input type="checkbox"/>
	Group <input type="checkbox"/>		

[SEE PHOTO](#)

Copyright © 2005 Children's Hospital Boston
INTRODUCTION | ABOUT | CREDITS

Children's Hospital Boston
Tensegrity in a Cell



**MICROFILAMENTS: PHOTO**

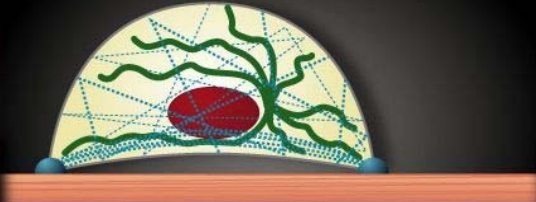
Microfilaments containing actin and myosin appear in linear "stress fiber" bundles and form triangulated "geodesic domes" that stretch from the nucleus to the cell's outer membrane. These actomyosin filaments generate tension by shortening, just as they do in muscle cells, and pull on the adhesions to the extracellular matrix.

<b>MICROFILAMENTS</b>	<b>MICROTUBULES</b>	<b>EXTRACELLULAR MATRIX</b>	<b>INTEGRIN RECEPTORS</b>
Tension <input type="checkbox"/>	Length <input type="checkbox"/>	Rigidity <input type="checkbox"/>	Pull <input type="checkbox"/>
	Group <input type="checkbox"/>		

[HIDE PHOTO](#)

Copyright © 2005 Children's Hospital Boston
INTRODUCTION | ABOUT | CREDITS

Children's Hospital Boston
Tensegrity in a Cell



**CHANGING TENSION**

As you increase the tension in the microfilaments, they align into bundles at the cell base, the cell flattens, and the microtubules start to buckle. At very high levels of tension (not shown), the extracellular matrix substrate buckles and the cell becomes rounder in shape.


When you decrease tension, the cells become rounder and the microtubules, with less force pulling in, begin to straighten out. Less tension also causes the cell nucleus to retract and take on a more spherical shape.

<b>MICROFILAMENTS</b>	<b>MICROTUBULES</b>	<b>EXTRACELLULAR MATRIX</b>	<b>INTEGRIN RECEPTORS</b>
Tension <input type="checkbox"/>	Length <input type="checkbox"/>	Rigidity <input type="checkbox"/>	Pull <input type="checkbox"/>
	Group <input type="checkbox"/>		

[SEE PHOTO](#)

Copyright © 2005 Children's Hospital Boston
INTRODUCTION | ABOUT | CREDITS

Children's Hospital Boston
Tensegrity in a Cell



**CHANGING TENSION**

As you increase the tension in the microfilaments, they align into bundles at the cell base, the cell flattens, and the microtubules start to buckle. At very high levels of tension (not shown), the extracellular matrix substrate buckles and the cell becomes rounder in shape.

When you decrease tension, the cells become rounder and the microtubules, with less force pulling in, begin to straighten out. Less tension also causes the cell nucleus to retract and take on a more spherical shape.

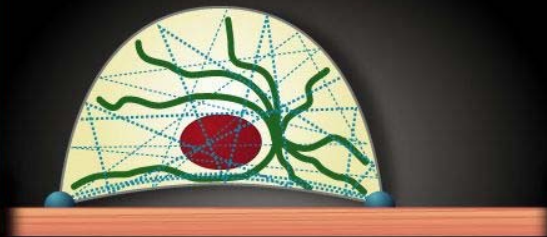
<b>MICROFILAMENTS</b>	<b>MICROTUBULES</b>	<b>EXTRACELLULAR MATRIX</b>	<b>INTEGRIN RECEPTORS</b>
Tension <input type="checkbox"/>	Length <input type="checkbox"/>	Rigidity <input type="checkbox"/>	Pull <input type="checkbox"/>
	Group <input type="checkbox"/>		

[SEE PHOTO](#)

Copyright © 2005 Children's Hospital Boston
INTRODUCTION | ABOUT | CREDITS

Children's Hospital Boston

## Tensegrity in a Cell



**MICROTUBULES**  
Mechanical engineers have long realized the structural benefits of hollow tubes. Not surprisingly, cells have evolved to take advantage of these benefits as well.

Microtubules -- long, tube-shaped fibers -- work as struts within the cell, opposing the inward pull of microfilaments. Like the poles of a pup tent, microtubules push outward from their points of origin, giving support to the cell's shape. But only to a point. The inward pull can also cause them to buckle, giving them a curvy shape.

MICROFILAMENTS **MICROTUBULES** EXTRACELLULAR MATRIX INTEGRIN RECEPTORS  
 Tension    Length    Rigidity    Pull

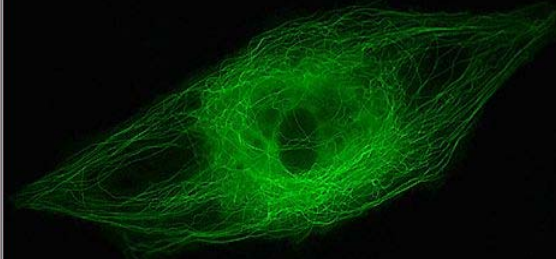
SEE PHOTO

Copyright © 2005 Children's Hospital Boston

INTRODUCTION | ABOUT | CREDITS

Children's Hospital Boston

## Tensegrity in a Cell



**MICROTUBULES: PHOTO**  
Microtubules, which typically extend throughout a cell's cytoplasm in the form of curved filaments, help to support the cell's shape.

In this photograph, only the cell's microtubules are visible.

MICROFILAMENTS **MICROTUBULES** EXTRACELLULAR MATRIX INTEGRIN RECEPTORS  
 Tension    Length    Rigidity    Pull

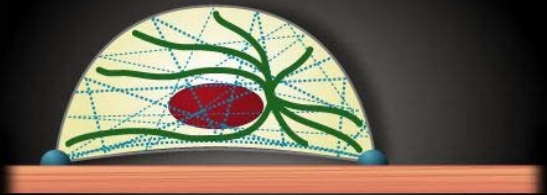
HIDE PHOTO

Copyright © 2005 Children's Hospital Boston

INTRODUCTION | ABOUT | CREDITS

Children's Hospital Boston

## Tensegrity in a Cell



**CHANGING LENGTH**  
As you lengthen the microtubules, they push against the cell's outer membrane. Depending on the microtubules' stiffness and whether or not they are cross-linked together within a group, they either buckle, stabilize local cell shape, or push outward on the cell membrane to form extensions to the cell. (Select "grouped" to see how extensions form.)

When you decrease the length of the microtubules, there's less opposition to the contractile microfilaments, and so the cell flattens and the nucleus elongates.

MICROFILAMENTS **MICROTUBULES** EXTRACELLULAR MATRIX INTEGRIN RECEPTORS  
 Tension    Length    Rigidity    Pull

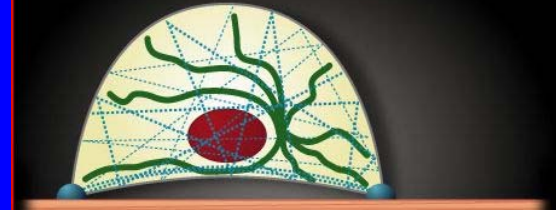
SEE PHOTO

Copyright © 2005 Children's Hospital Boston

INTRODUCTION | ABOUT | CREDITS

Children's Hospital Boston

## Tensegrity in a Cell



**MICROTUBULES GROUPED**  
When grouped together in cross-linked bundles, microtubules become much stiffer and push outward against the opposing microfilaments and the tensed surface membrane to create long, thin membrane extensions. The long thin arms of nerve cells (dendrites and axons) form in this way.

MICROFILAMENTS **MICROTUBULES** EXTRACELLULAR MATRIX INTEGRIN RECEPTORS  
 Tension    Length    Rigidity    Pull

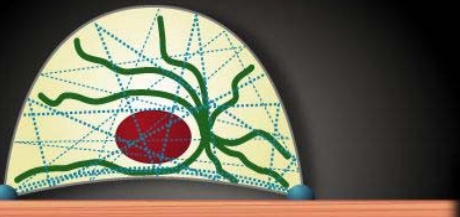
SEE PHOTO

Copyright © 2005 Children's Hospital Boston

INTRODUCTION | ABOUT | CREDITS

Children's Hospital Boston

## Tensegrity in a Cell



**EXTRACELLULAR MATRIX**  
The inward pull of the contractile microfilaments is resisted by microtubules and by the extracellular matrix. This matrix is a semiflexible meshwork of large protein filaments that cells anchor to inside our bodies.

The cell is anchored to the matrix at "focal adhesion" sites that contain transmembrane "integrin" receptors. Using a "pup tent" analogy, these integrin receptors are the tent pegs that anchor the tent to the ground.

**MICROFILAMENTS** Tension

**MICROTUBULES** Length      
Group

**EXTRACELLULAR MATRIX** Rigidity

**INTEGRIN RECEPTORS** Pull

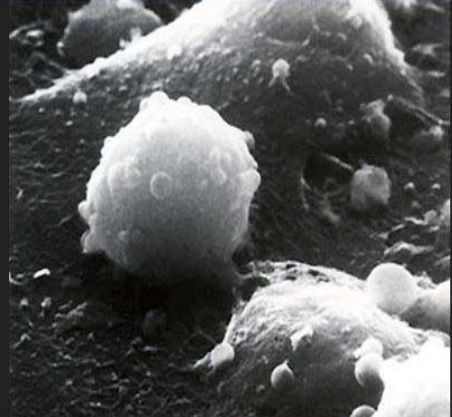
SEE PHOTO

Copyright © 2005 Children's Hospital Boston

INTRODUCTION | ABOUT | CREDITS

Children's Hospital Boston

## Tensegrity in a Cell



**EXTRACELLULAR MATRIX: PHOTO**  
Cells attach and spread on the extracellular matrix by applying traction forces to their adhesions to the matrix.

**MICROFILAMENTS** Tension

**MICROTUBULES** Length      
Group

**EXTRACELLULAR MATRIX** Rigidity

**INTEGRIN RECEPTORS** Pull

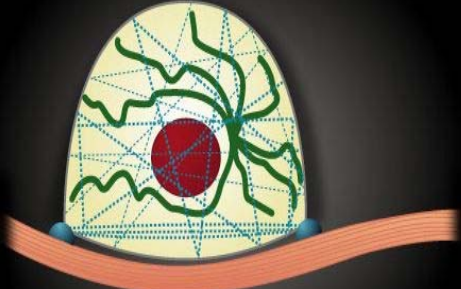
HIDE PHOTO

Copyright © 2005 Children's Hospital Boston

INTRODUCTION | ABOUT | CREDITS

Children's Hospital Boston

## Tensegrity in a Cell



**CHANGING RIGIDITY**  
Making the extracellular matrix less rigid decreases one of the forces that balances the tension in the microfilaments. The matrix buckles and the whole cell contracts to take on a more spherical shape.

Because the internal microtubules are unable to bear the forces previously borne by the matrix, they first buckle and then bend around the nucleus as the entire cell membrane retracts and rounds.

**MICROFILAMENTS** Tension

**MICROTUBULES** Length      
Group

**EXTRACELLULAR MATRIX** Rigidity

**INTEGRIN RECEPTORS** Pull

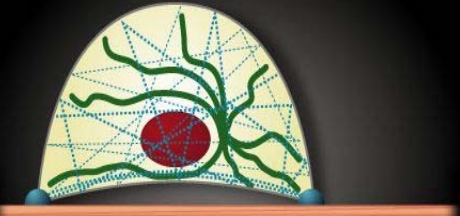
SEE PHOTO

Copyright © 2005 Children's Hospital Boston

INTRODUCTION | ABOUT | CREDITS

Children's Hospital Boston

## Tensegrity in a Cell



**CHANGING RIGIDITY**  
Making the extracellular matrix less rigid decreases one of the forces that balances the tension in the microfilaments. The matrix buckles and the whole cell contracts to take on a more spherical shape.

Because the internal microtubules are unable to bear the forces previously borne by the matrix, they first buckle and then bend around the nucleus as the entire cell membrane retracts and rounds.

**MICROFILAMENTS** Tension

**MICROTUBULES** Length      
Group

**EXTRACELLULAR MATRIX** Rigidity

**INTEGRIN RECEPTORS** Pull

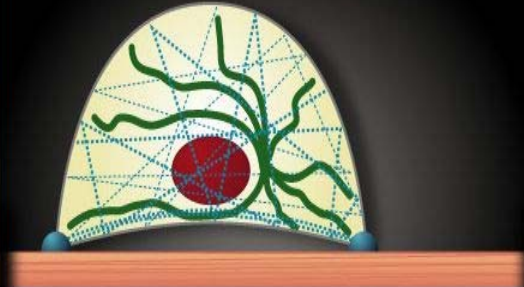
SEE PHOTO

Copyright © 2005 Children's Hospital Boston

INTRODUCTION | ABOUT | CREDITS



## Tensegrity in a Cell



**INTEGRIN RECEPTORS**  
 At focal adhesion points (locations where the cell is attached to the extracellular matrix), receptor proteins called integrins pass through the cell's surface membrane and physically link the microfilaments inside the cell to the matrix.

Integrins that have not yet bound to the extracellular matrix are located at various points in the membrane. Researchers can bind and "pull" on integrins found at the top of a cell to see how the force alters the shape of the cell and its cytoskeleton. You can do the same by clicking the "+" button.

SEE PHOTO

MICROFILAMENTS	MICROTUBULES	EXTRACELLULAR MATRIX	INTEGRIN RECEPTORS
Tension <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Length <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Group <input type="checkbox"/>	Rigidity <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Pull <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

## Tensegrity in a Cell

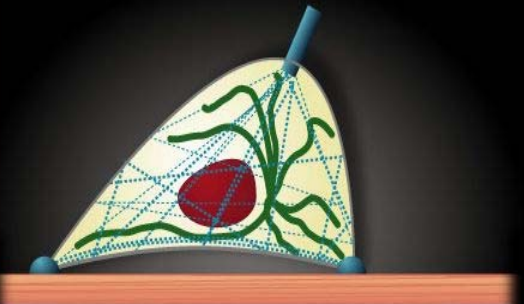


**INTEGRIN RECEPTORS: MOVIE**  
 This movie shows a living cell viewed, from the side, that is bound to a magnetic bead through integrin receptors. When magnetic force is applied, the bead pulls on the integrins, as well as the linked cytoskeletal filaments and the central nucleus, due to structural connections.

HIDE PHOTO

MICROFILAMENTS	MICROTUBULES	EXTRACELLULAR MATRIX	INTEGRIN RECEPTORS
Tension <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Length <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Group <input type="checkbox"/>	Rigidity <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Pull <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

## Tensegrity in a Cell



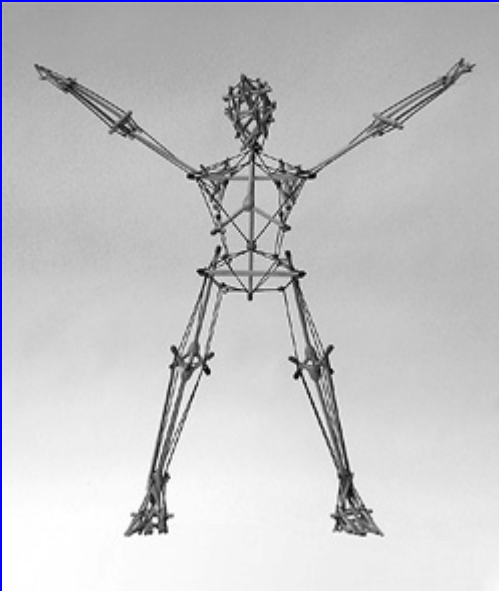
**PULLING RECEPTORS**  
 Pulling on a cell's outer membrane produces different effects depending on whether or not you pull at a location where integrins poke through.

If you pull at the site where integrins poke through, it affects the shape of the entire cell, as well as the cytoskeleton and nucleus. If you pulled on the membrane where integrins didn't poke through, on the other hand, it would affect only a localized area of the membrane.

SEE PHOTO

MICROFILAMENTS	MICROTUBULES	EXTRACELLULAR MATRIX	INTEGRIN RECEPTORS
Tension <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Length <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Group <input type="checkbox"/>	Rigidity <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Pull <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

# El esqueleto humano como tensegridad



Stephen M. Levin (Oregon, USA)



Single Tensioned Pelvis  
model #05-STP-3.1



Tensegrity Spine

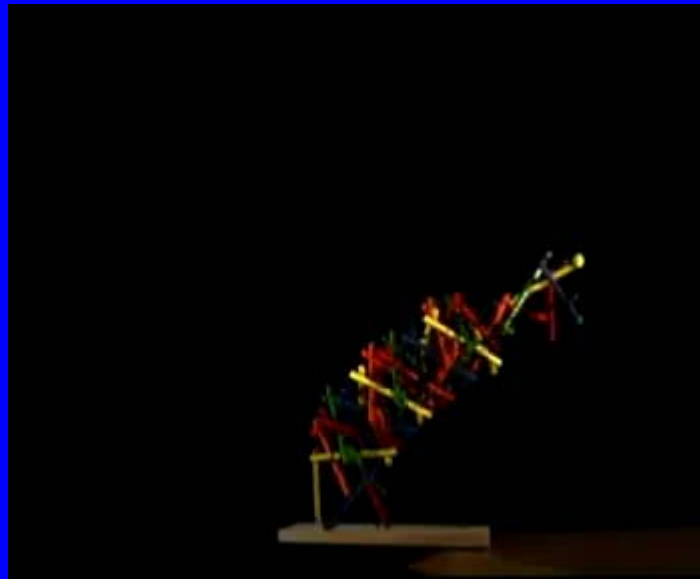
Regreso a la idea dinámica (cinética) de Calder

Tom Flemons (colaboró con Stephen M. Levin)

Simulaciones dinámicas del tensegridad célula

<http://tensegrity.wikispaces.com/Flemons%2C+Tom>

Animated Spiral Tensegrity Mast



## 6. Desarrollo simultáneo, y armonizado, en todos los frentes

Estructuras desplegables: S. Pellegrino, Cambridge U.K.

Es lo que Chillida llamaba la “arquitectura invisible”.

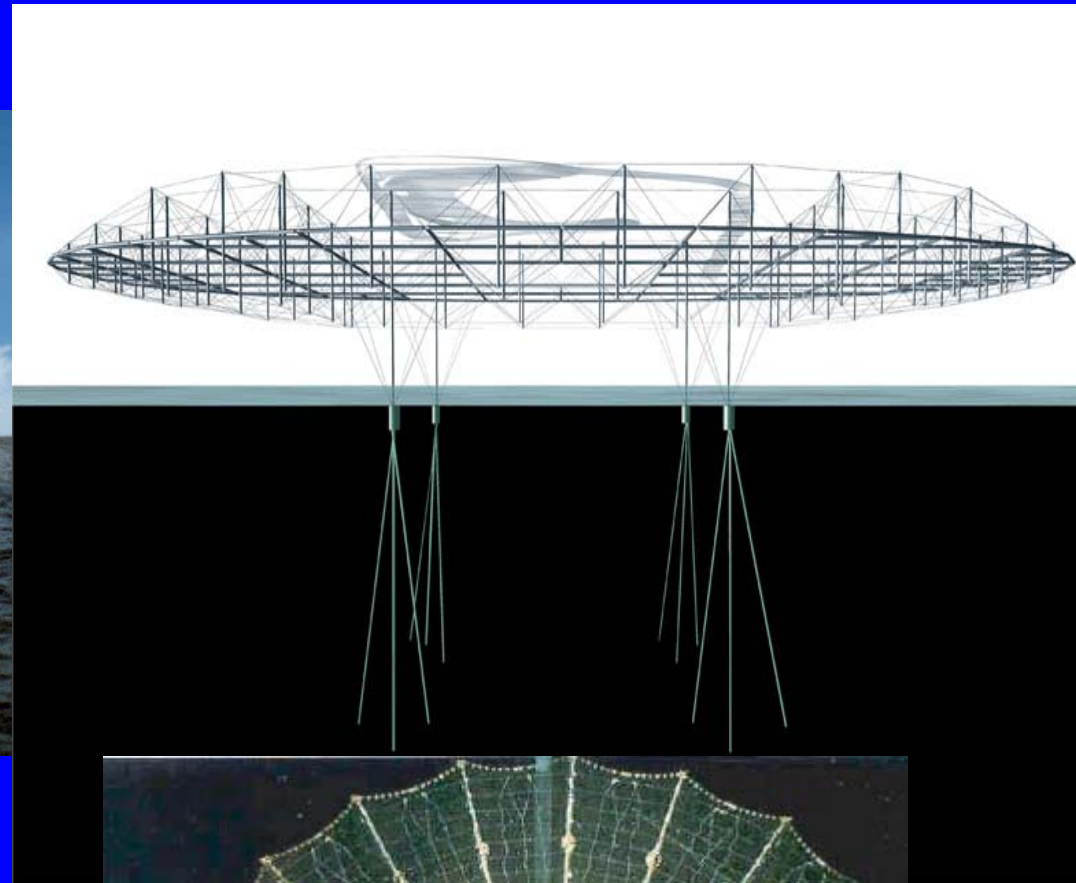
Obras inspiradas en tensegridades



**La nube: Neuchatel Suiza EXPO.02**

**Ingenieros: Passera & Pedretti**

**Arquitectos: Diller & Scofidio Architecture New York**



Misión Galileo (ESA) 1991

## 7. Para saber más

<http://synergeticists.org/>

<http://www.tensegridad.es/>

R. Motro, Tensegrity. Structural Systems for the Future, Kogan Page Science, Londres, 2003.



Valentin Gómez Jáuregui: *Tensegridad : estructuras tensegríticas en ciencia y arte*, Univ. Cantabria, 2007

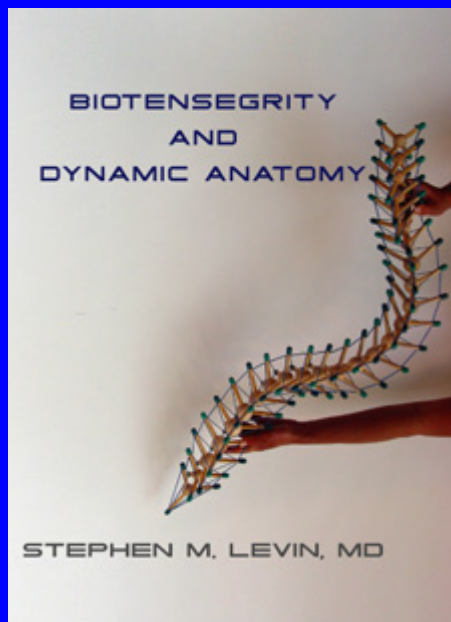
José Antonio Bustelo: *Equilibrio de tensiones*, Equipo Sirius, Madrid, 2007.



M. de Guzmán y D. Orden: Finding tensegrity structures: Geometric and symbolic approaches. Proceedings of EACA-2004. pp. 167–172.

D.E. Ingber (1998) “The Architecture of Life”. *Scientific American Magazine*. Enero, 1998.

D.E. Ingber(2003) “Tensegrity I. Cell structure and hierarchical systems biology”. *Journal of Cell Science*, No.116, pp.1157-1173.



S. M. Levin, Biotensegrity and Dynamic Anatomy,

(DVD: conferencia & conversaciones con Tom Flemons)

<http://www.biotensegrity.com/>

*De Calder a la NASA*



Gracias por su  
atención











