



Instituto de
Física
Teórica
UAM-CSIC

El discreto encanto del color

Margarita García Pérez

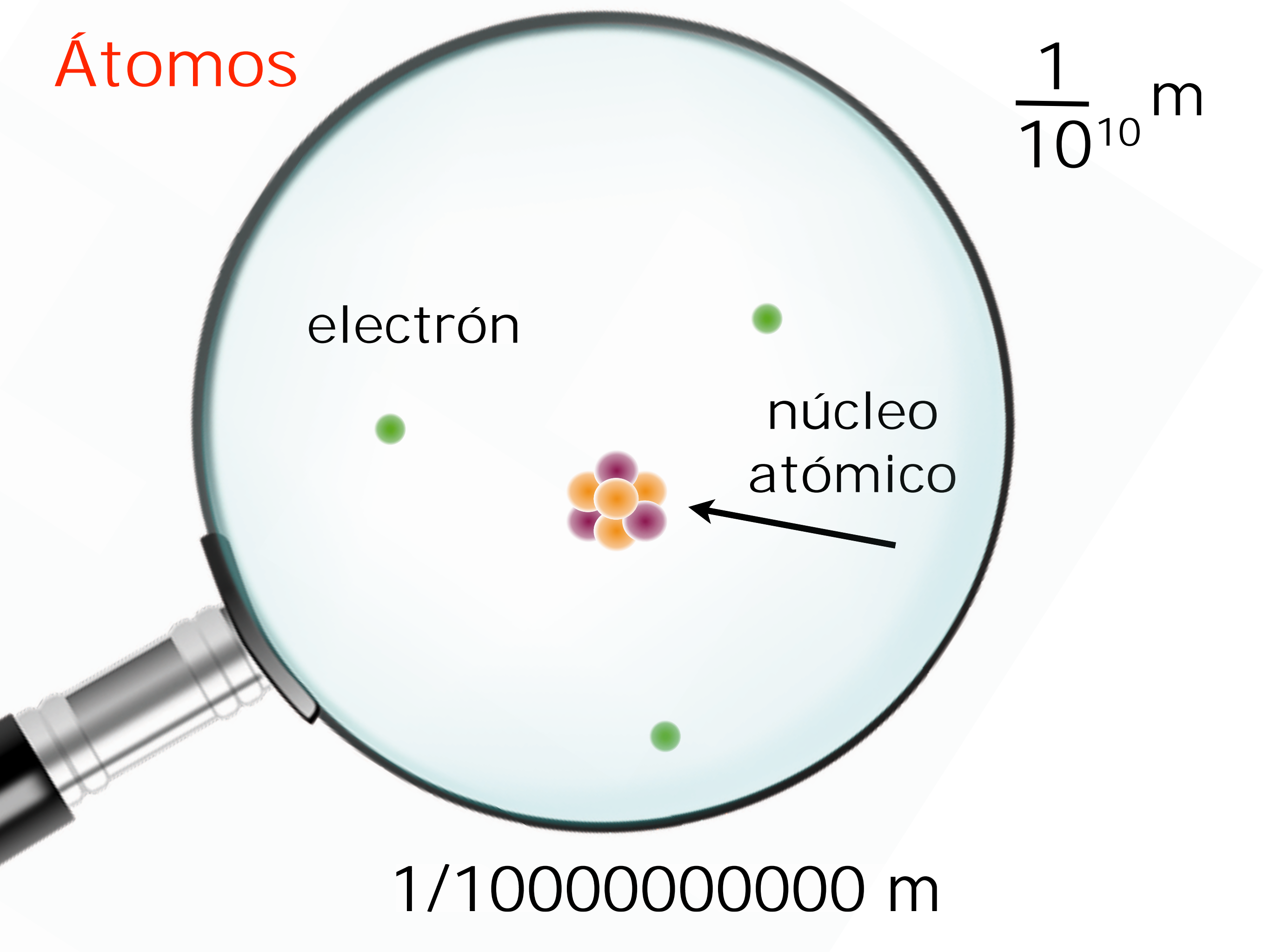
Átomos

$$\frac{1}{10^{10}} \text{ m}$$

electrón

núcleo atómico

$$1/1000000000000 \text{ m}$$




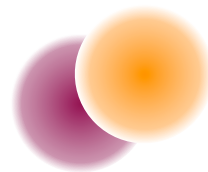
Núcleo Atómico

99,9% de la masa

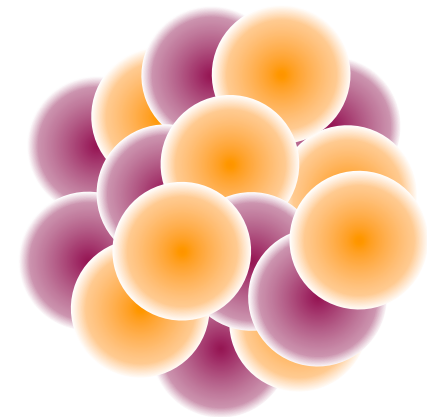


Hidrógeno
1 protón
electrón

 /2000

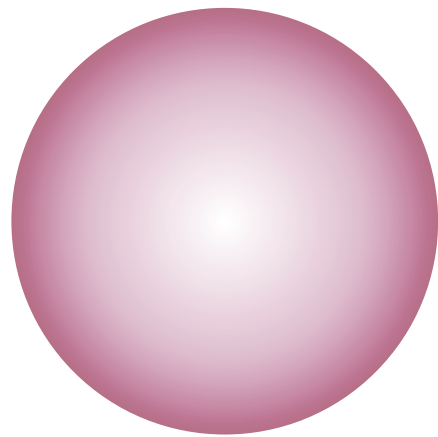


Deuterio
1 protón
1 neutrón

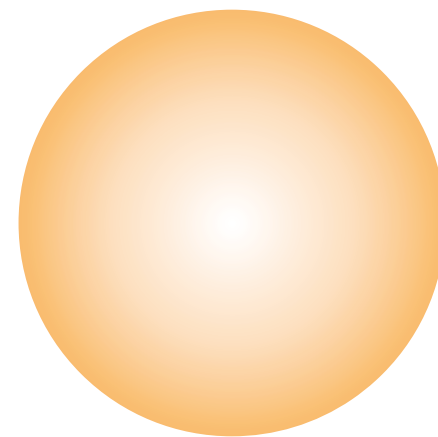


Oxígeno
8 protones
8 neutrones

masa neutrón = 1.001 




Protón

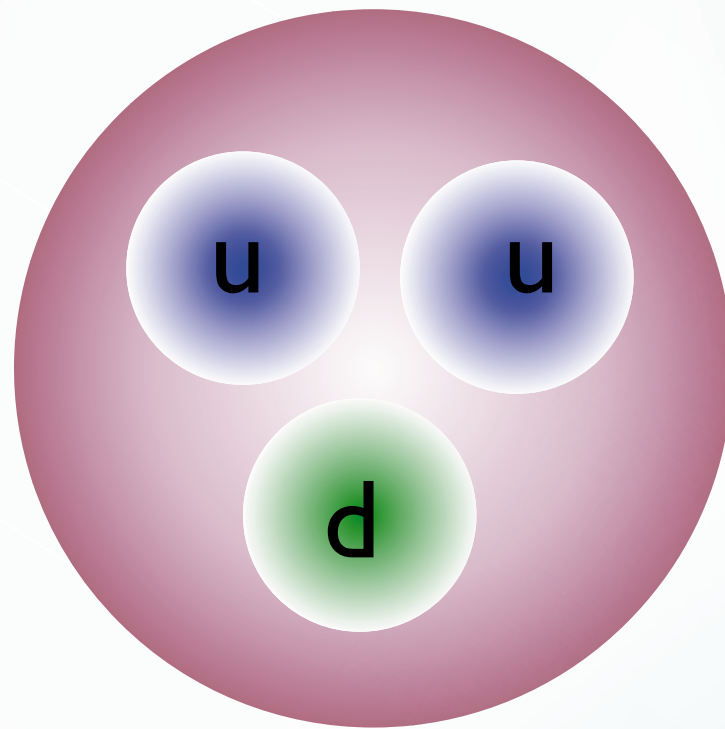


Neutrón

$$\frac{1}{10^{15}} \text{ m}$$

$$10^{27} \text{  = 1 \text{ Kg}$$

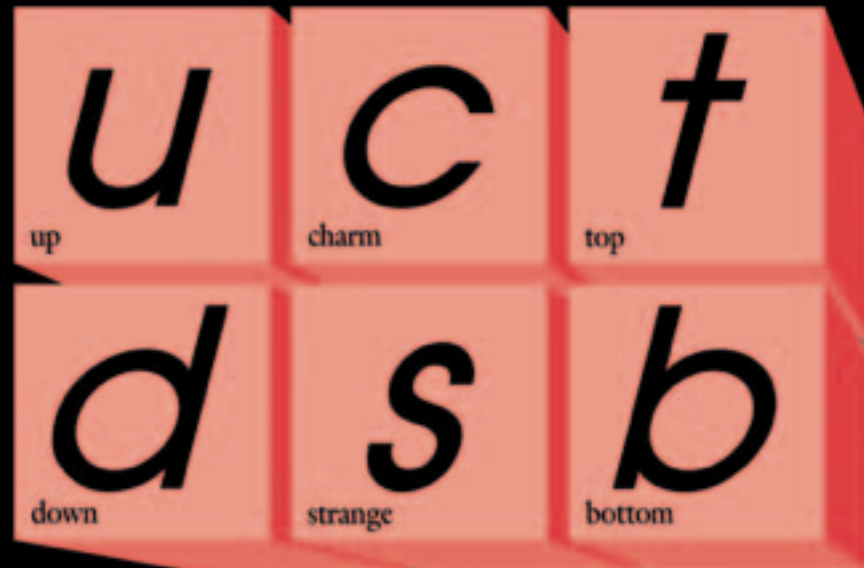
Quarks



Protón

MODELO ESTÁNDAR

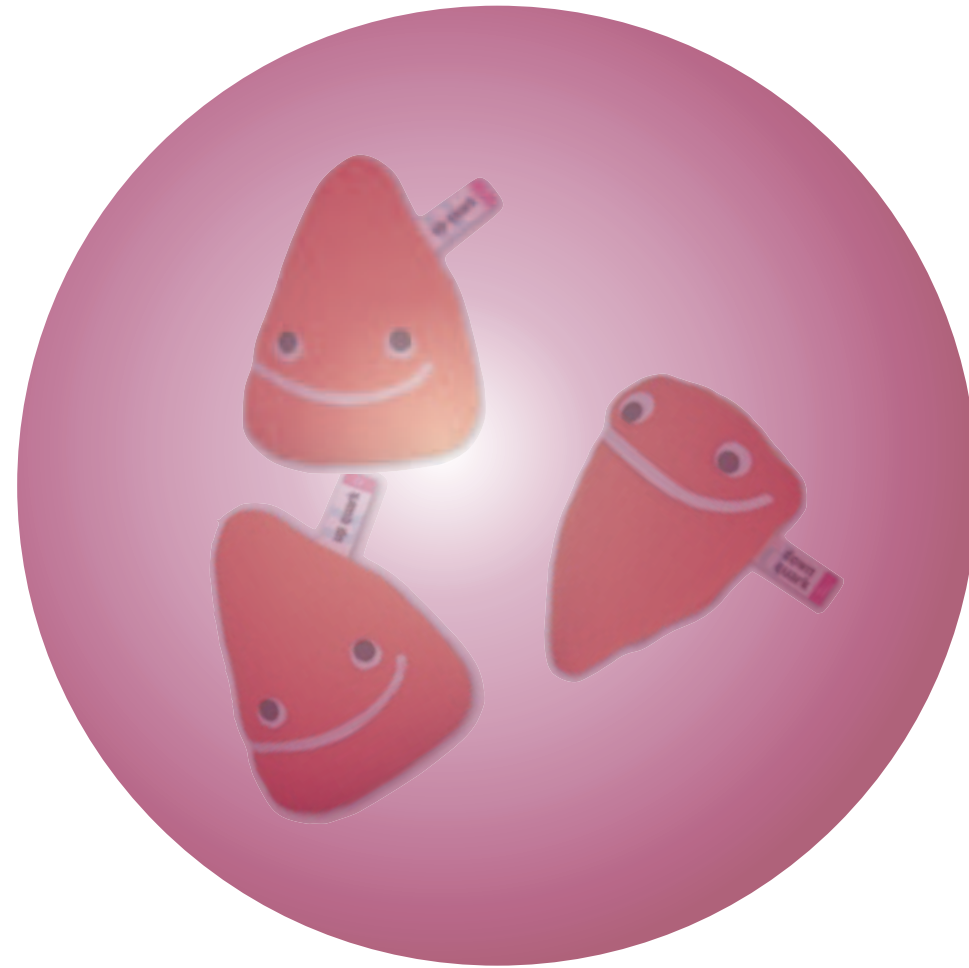
QUARKS



FUERZAS



LEPTONES



Protón

2



Up

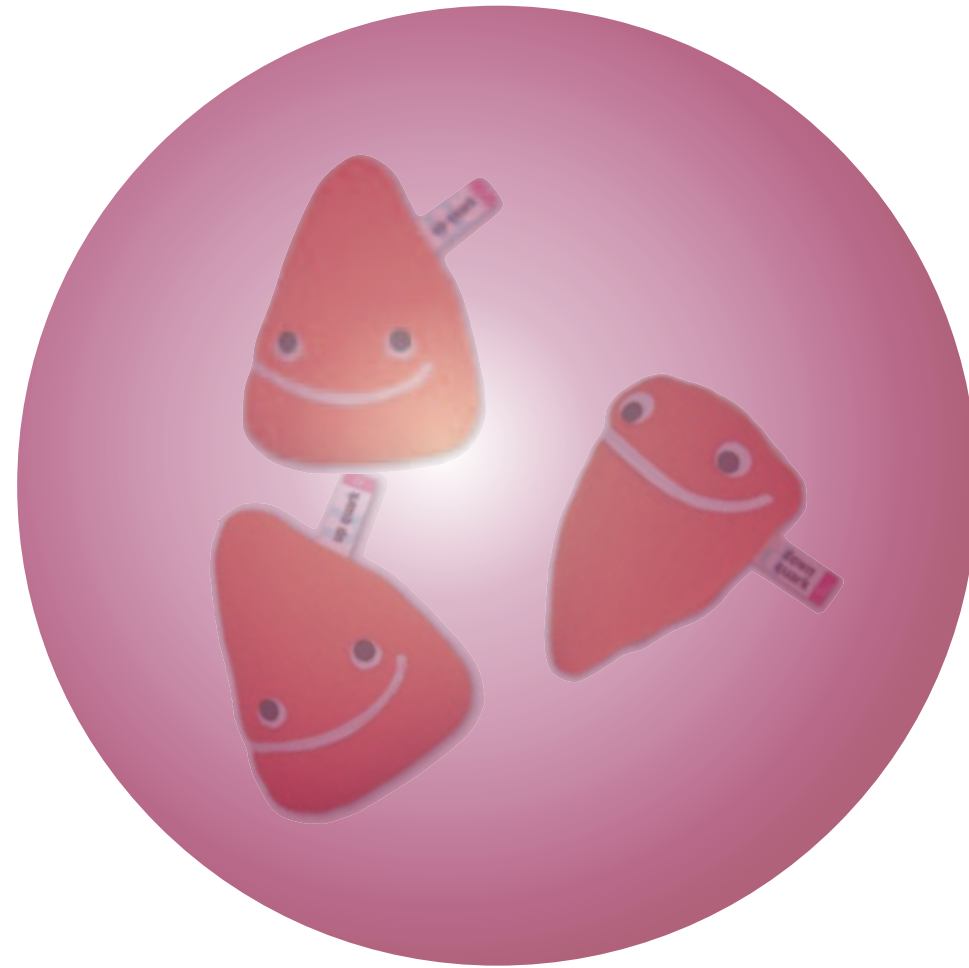
P /500

1



Down

P /200



Protón

2



Up

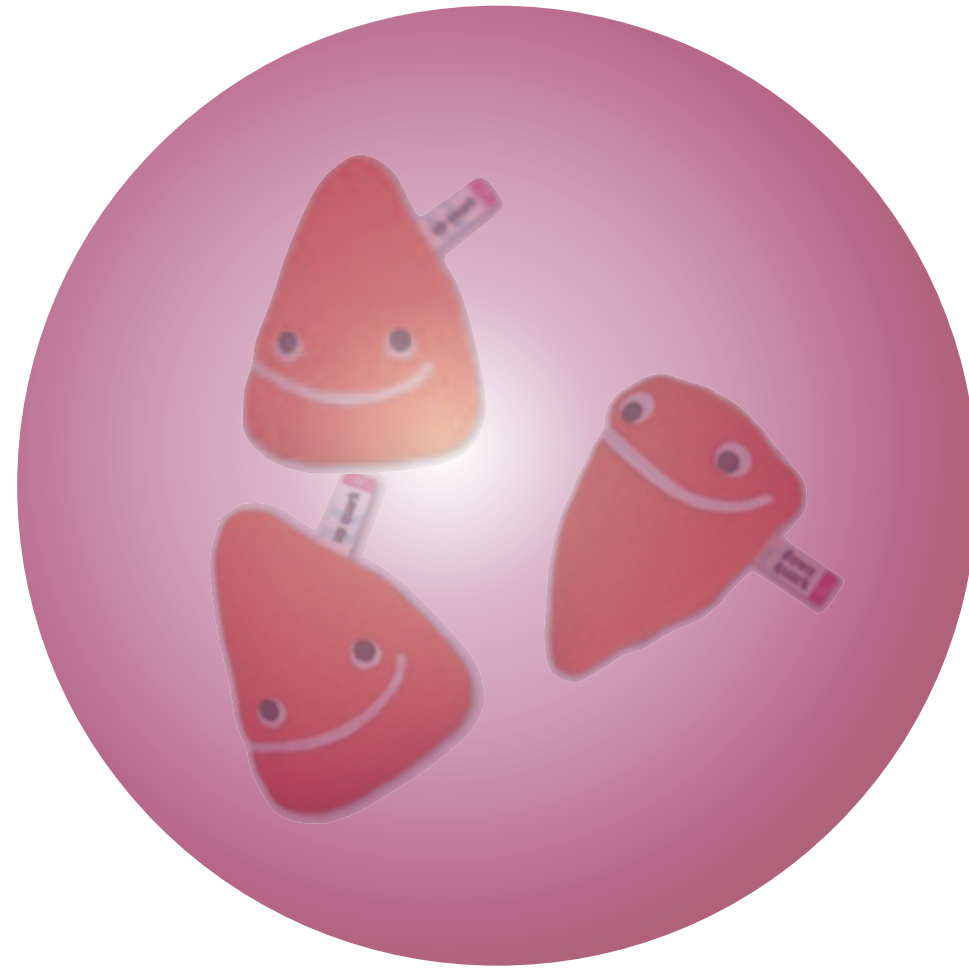
P /500

1



Down

P /200



Protón

2



+

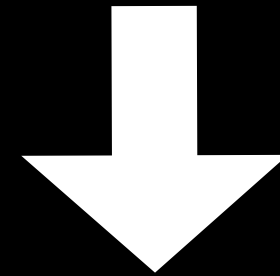
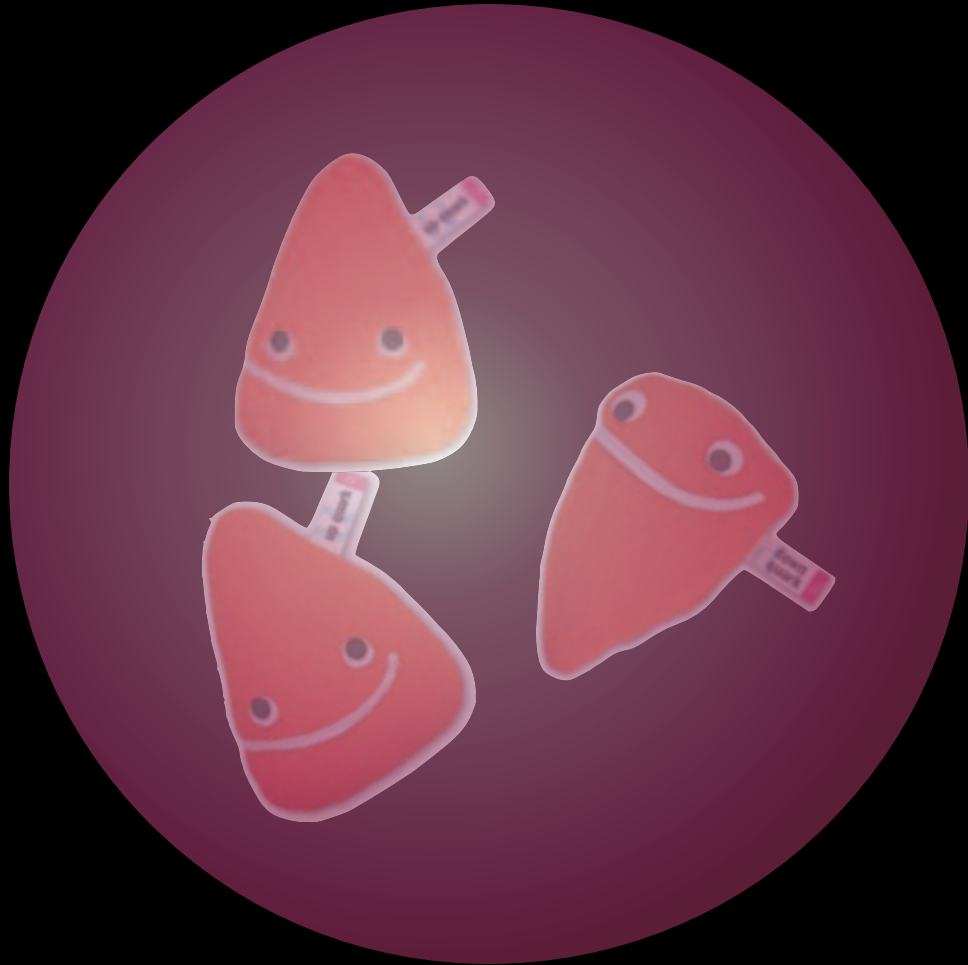


=

1%



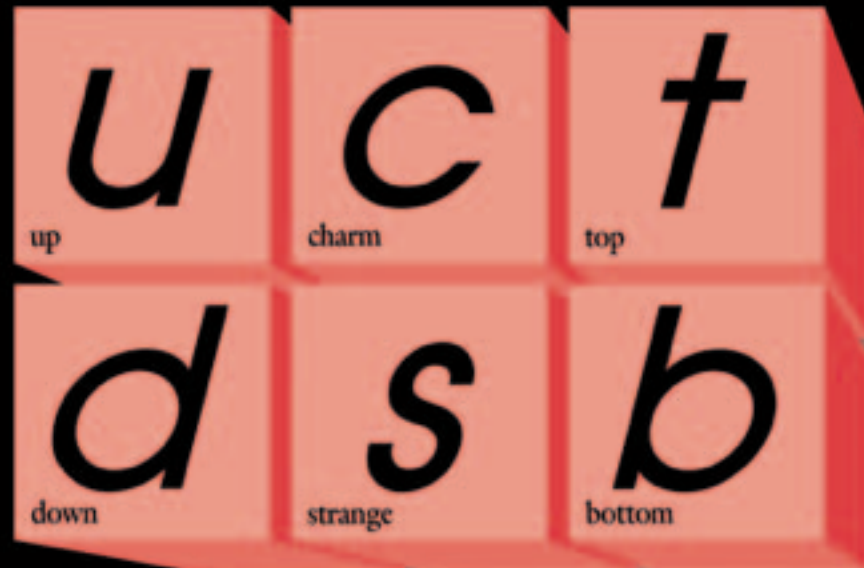
¿De dónde viene la
masa del protón?



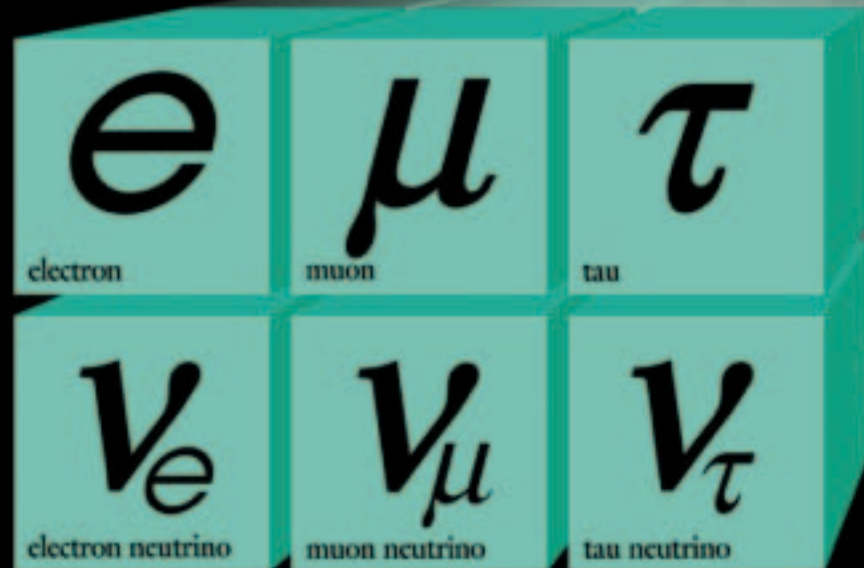
Interacción
FUERTE

MODELO ESTÁNDAR

QUARKS



FUERZAS



LEPTONES

QUARKS



GLUONES



QUARKS



GLUONES



QUARKS



GLUONES



QUARKS



GLUONES



Interacción
FUERTE

QUARKS



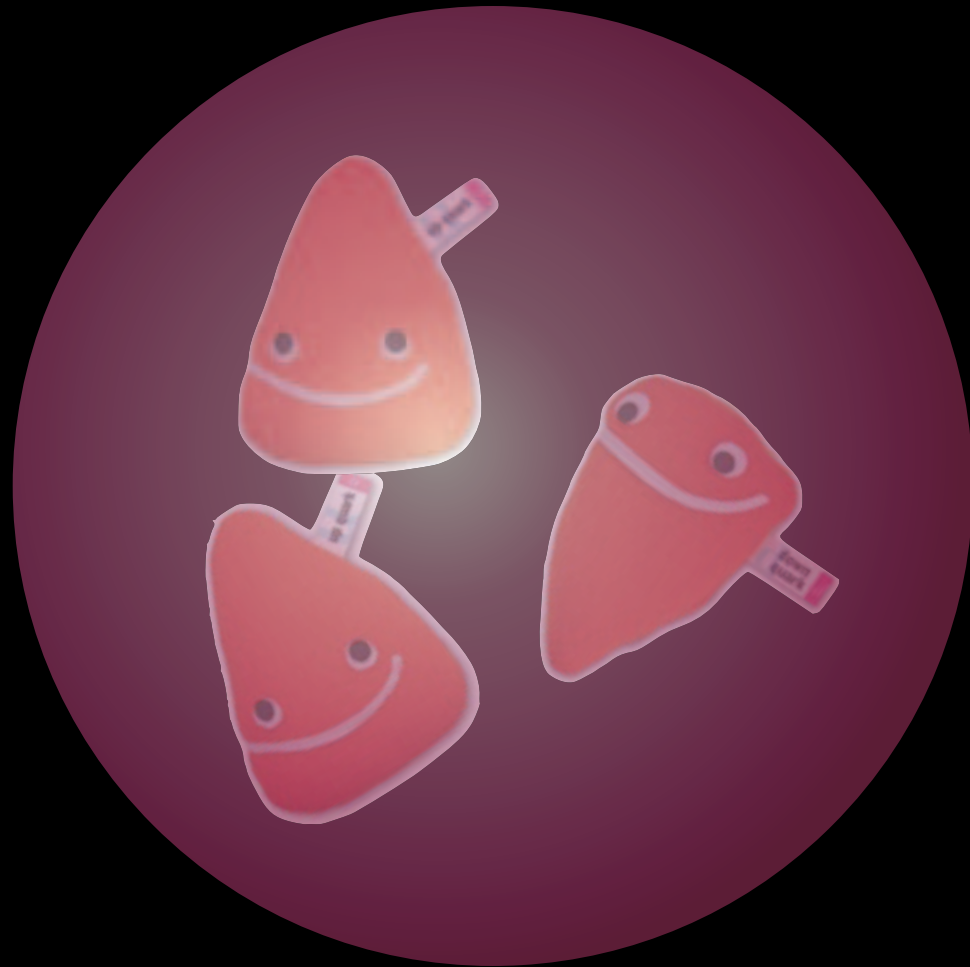
GLUONES



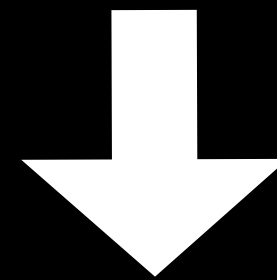
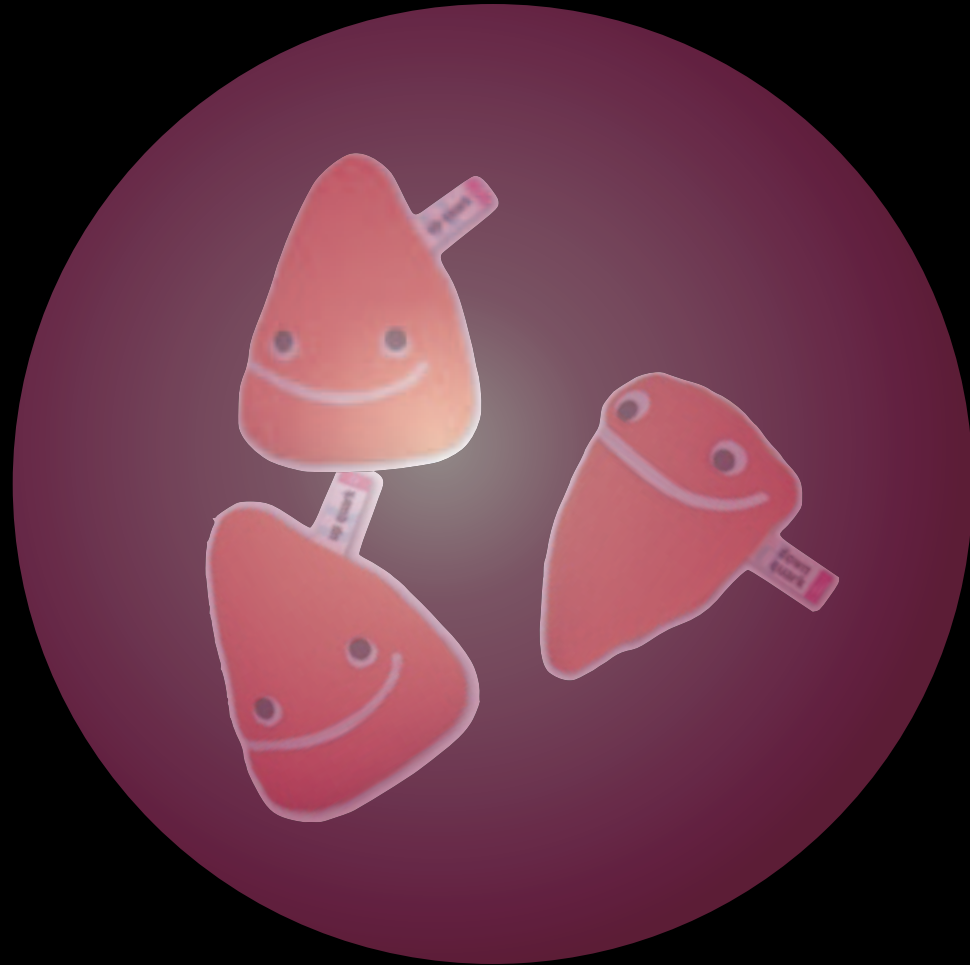
Interacción
FUERTE

Cromodinámica cuántica - QCD

¿De dónde viene la
masa del protón?

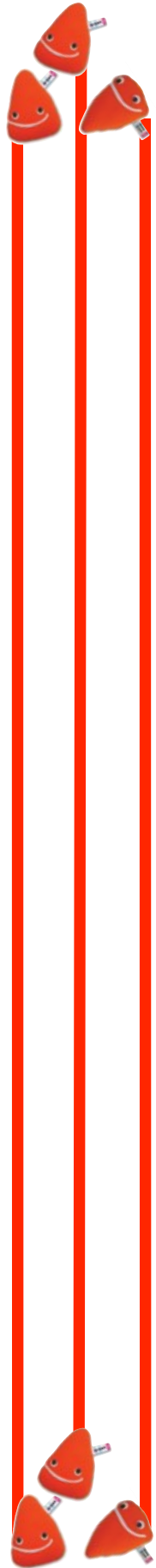


¿De dónde viene la
masa del protón?



¿Cómo calculamos la
masa del protón?

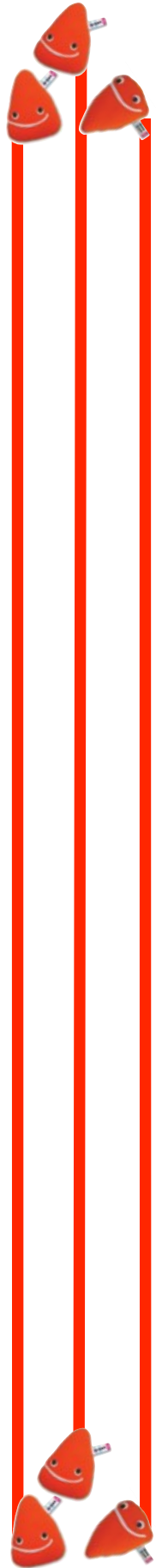
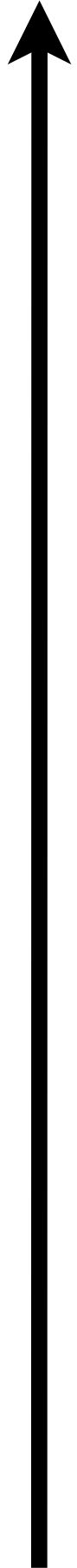
t



Quarks libres
masivos

$$M = 2 \text{ (quark icon)} + \text{(quark icon)}$$

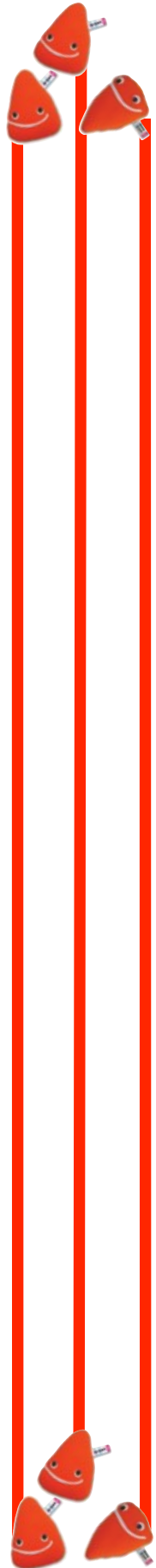
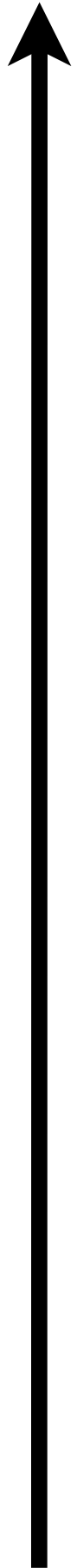
t



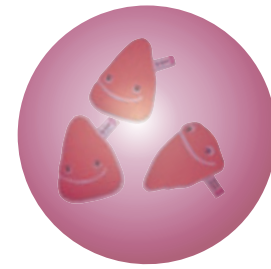
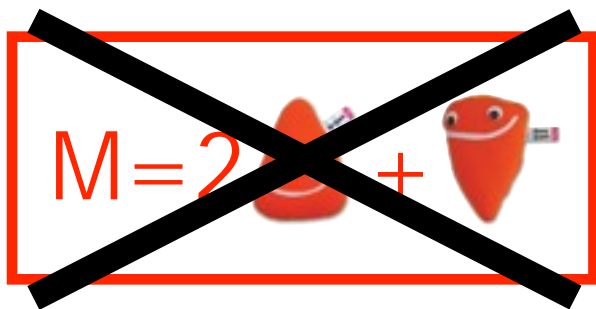
Quarks libres
masivos

~~$M = 2 + 1$~~

t

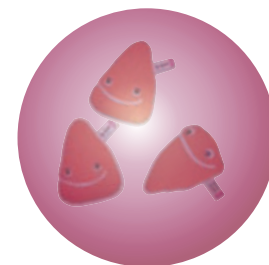


Quarks libres
masivos



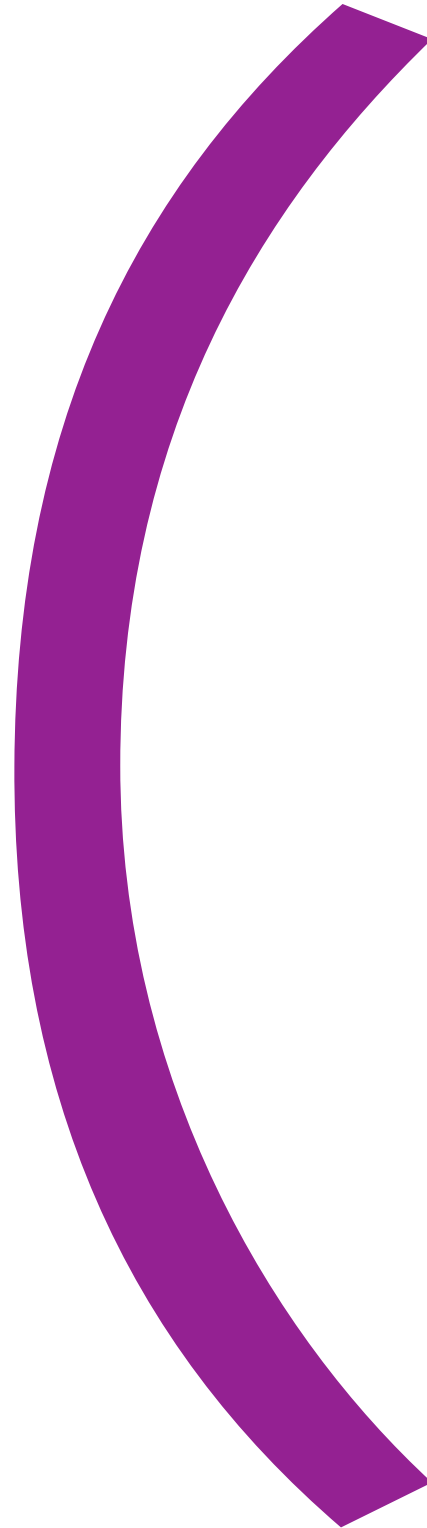
¿?

ligeros
con
interacción



¿Cómo evaluamos la historia del protón?

Efectos Cuánticos



Mecánica Cuántica

Suma de historias

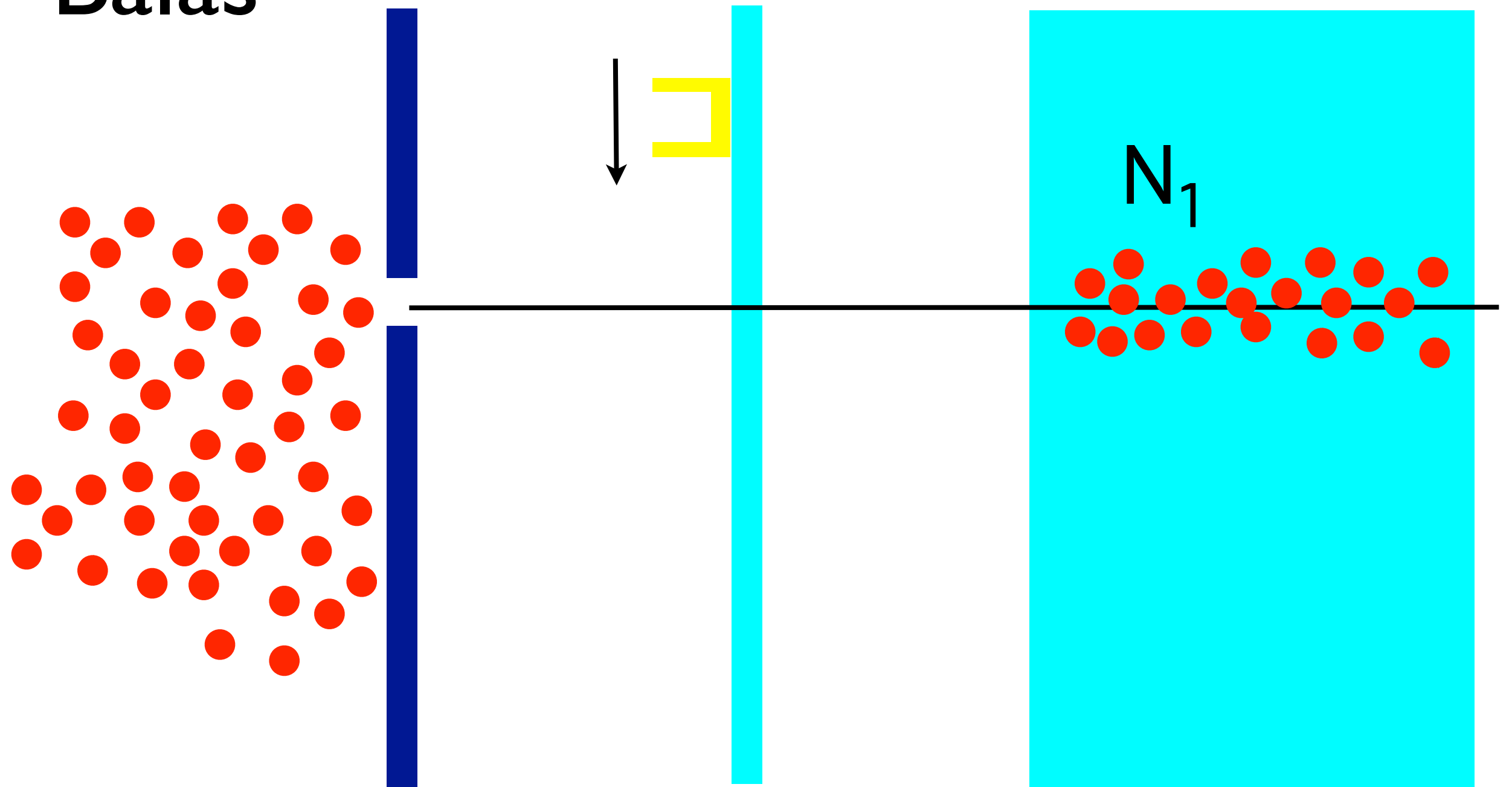
Richard
Feynman



<https://www.youtube.com/watch?v=2mlk3wBJDgE>

Experimento de la doble rendija

Balas

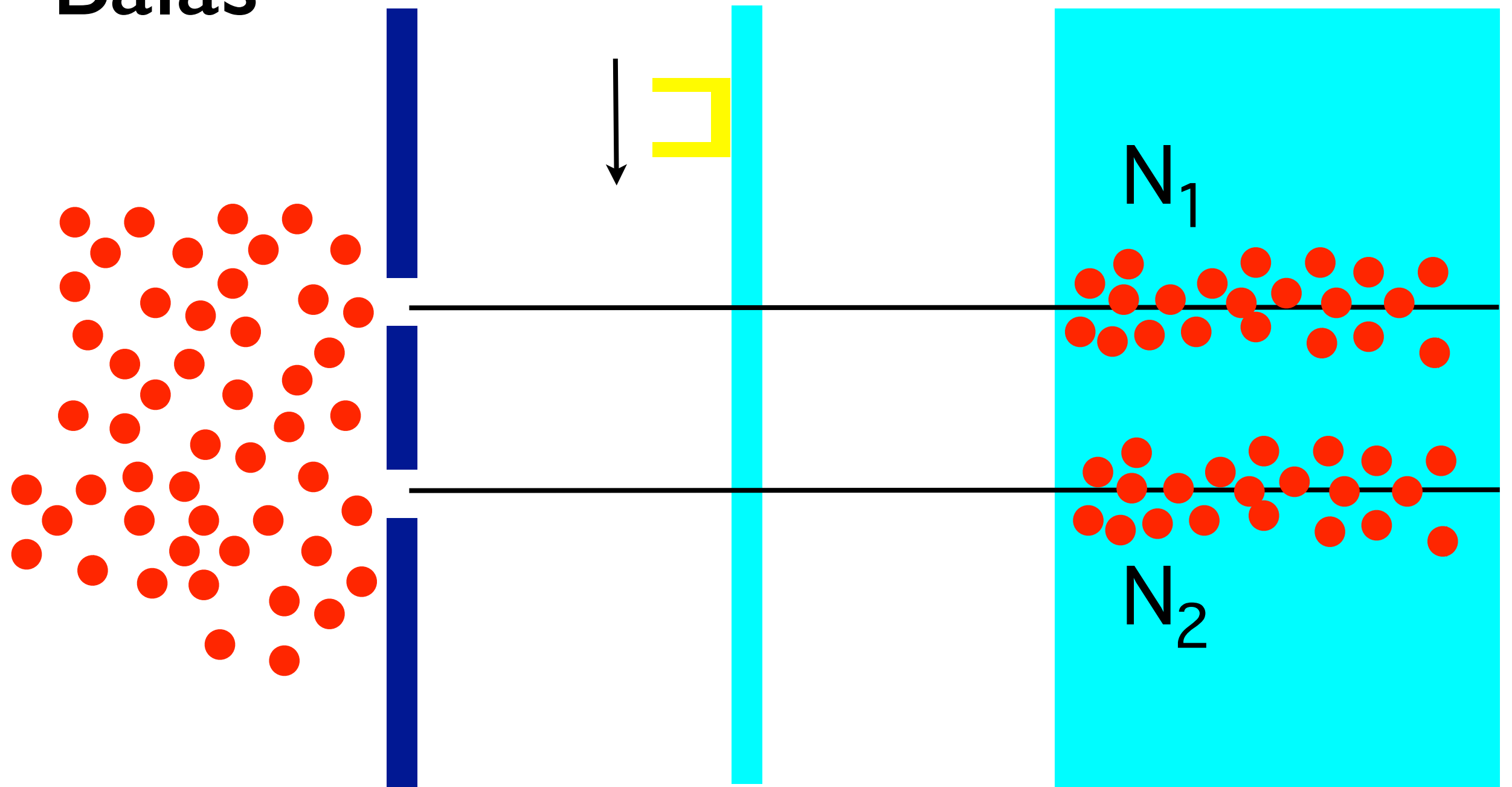


Pantalla con
una rendija

Recogemos
las balas

Experimento de la doble rendija

Balas



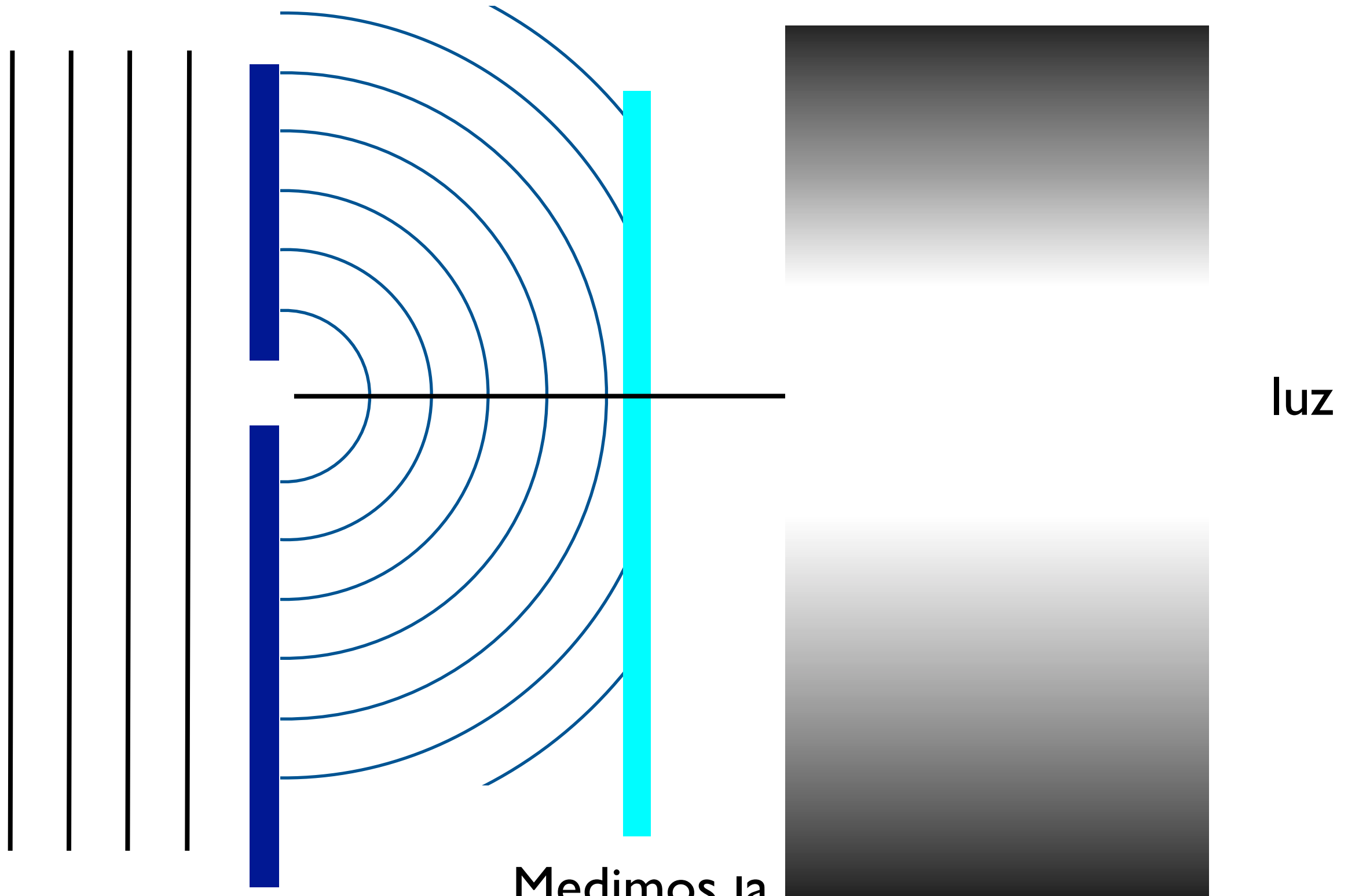
Pantalla con
dos rendijas

Recogemos
las balas

Repetimos el experimento con ondas



Ondas



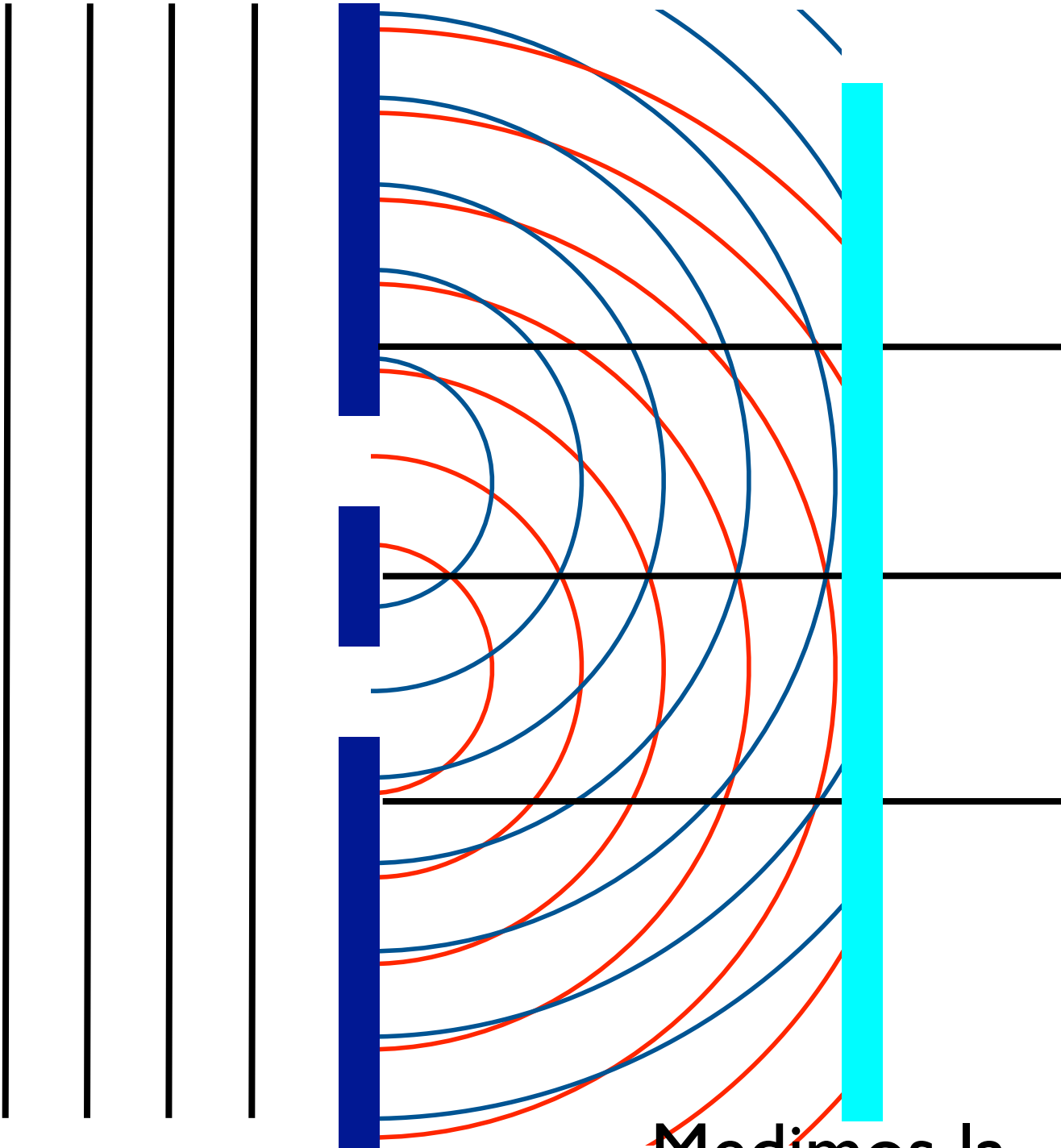
Pantalla con
una rendija

Medimos la
intensidad
de la luz

luz

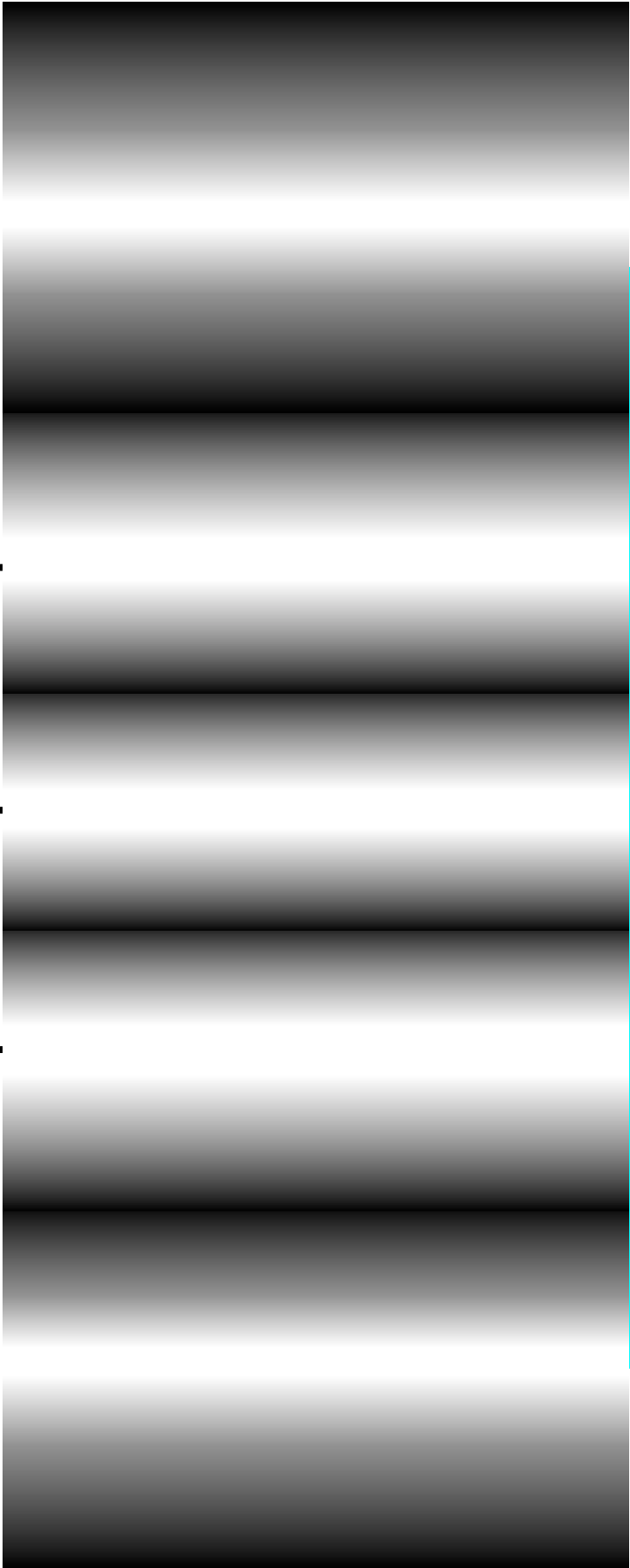
Ondas

Interferencia



Pantalla con dos rendijas

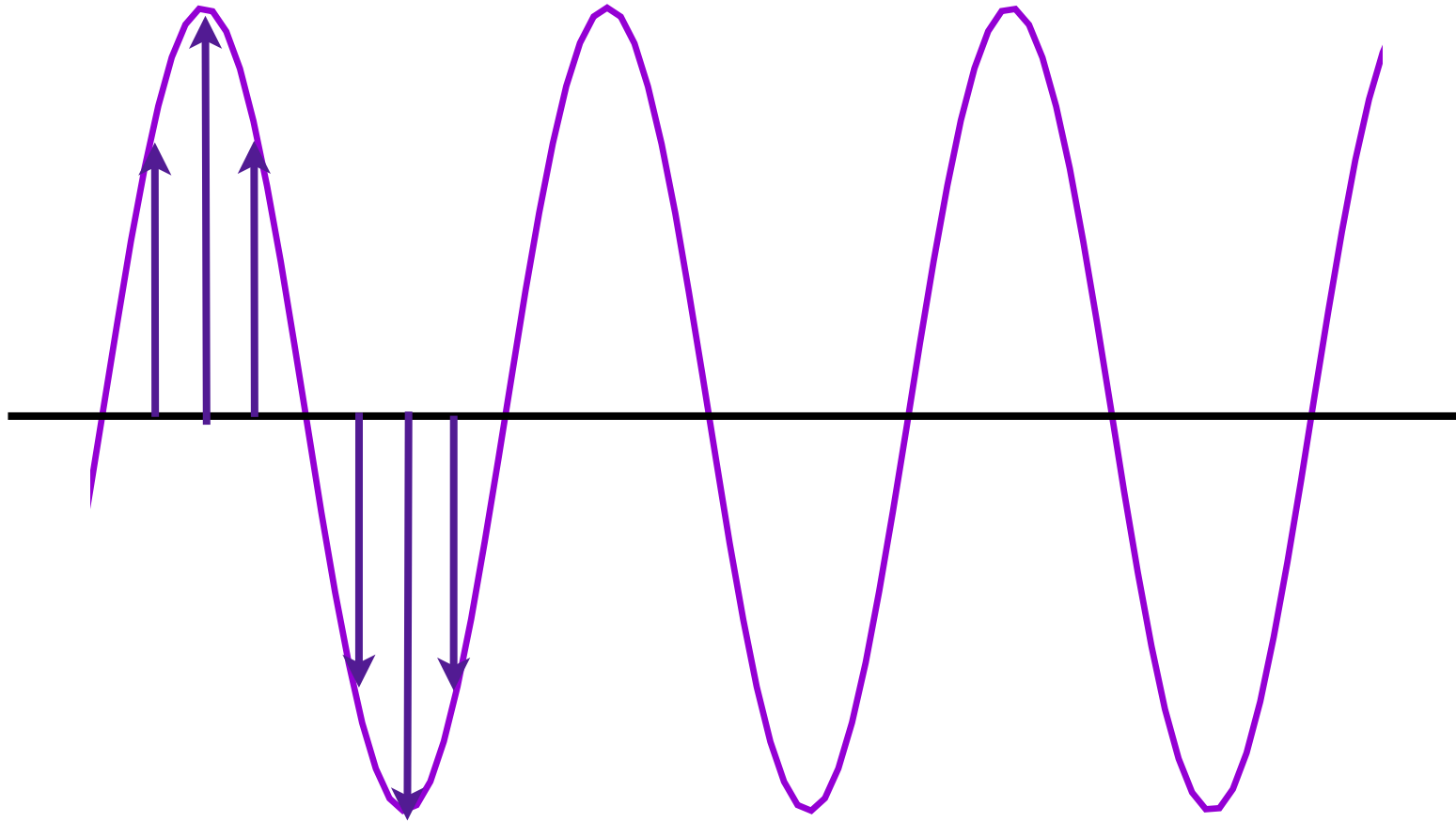
Medimos la intensidad de la luz

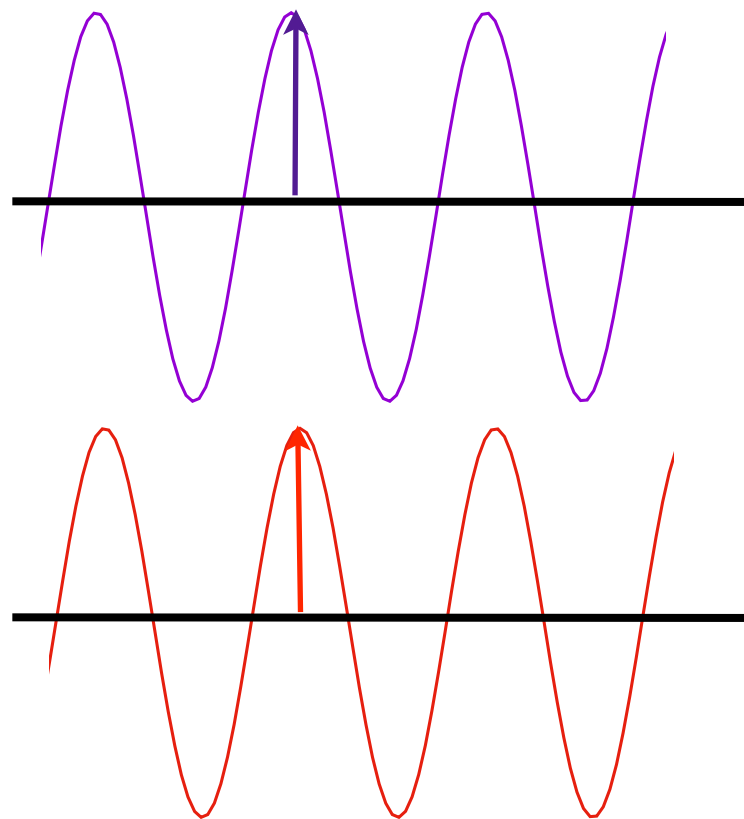


luz
oscuridad
luz
oscuridad

A

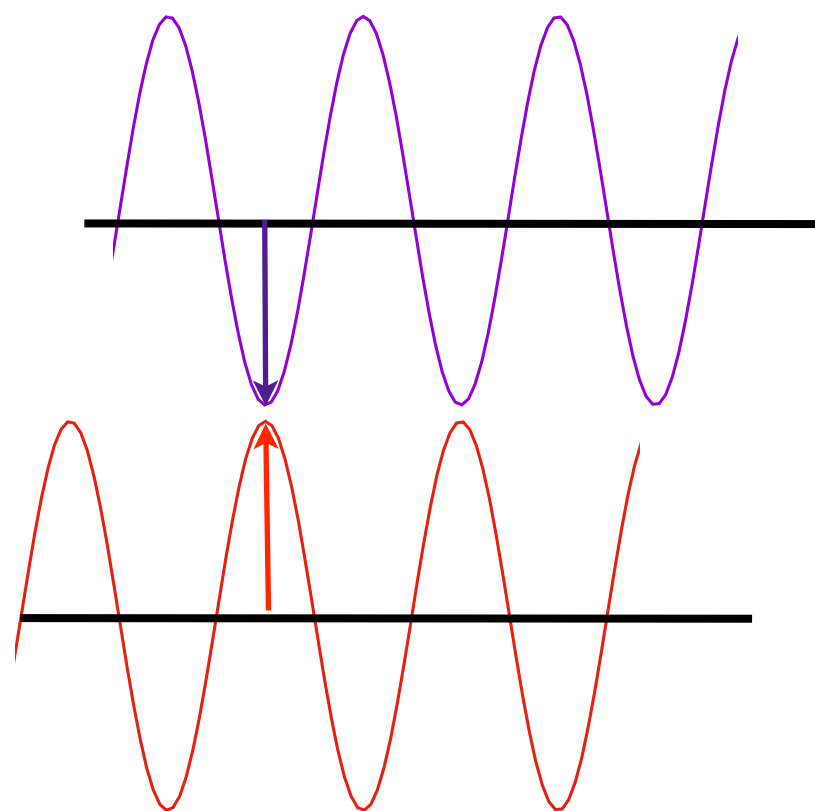
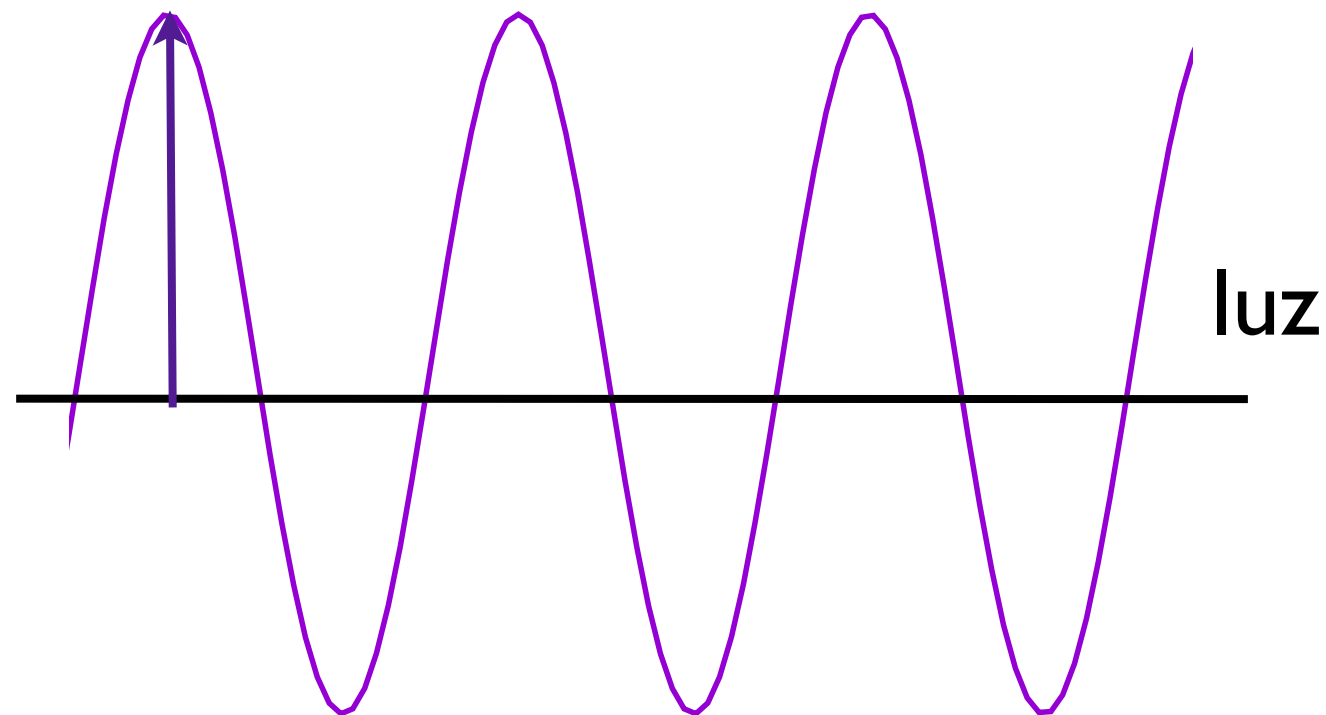
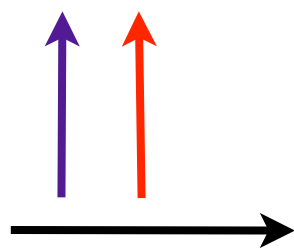
Altura de la onda





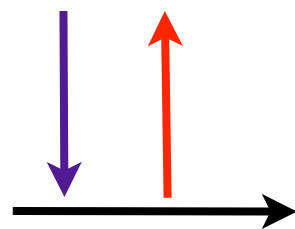
En fase

$$\mathcal{A}_1 + \mathcal{A}_2 = 2\mathcal{A}_1$$



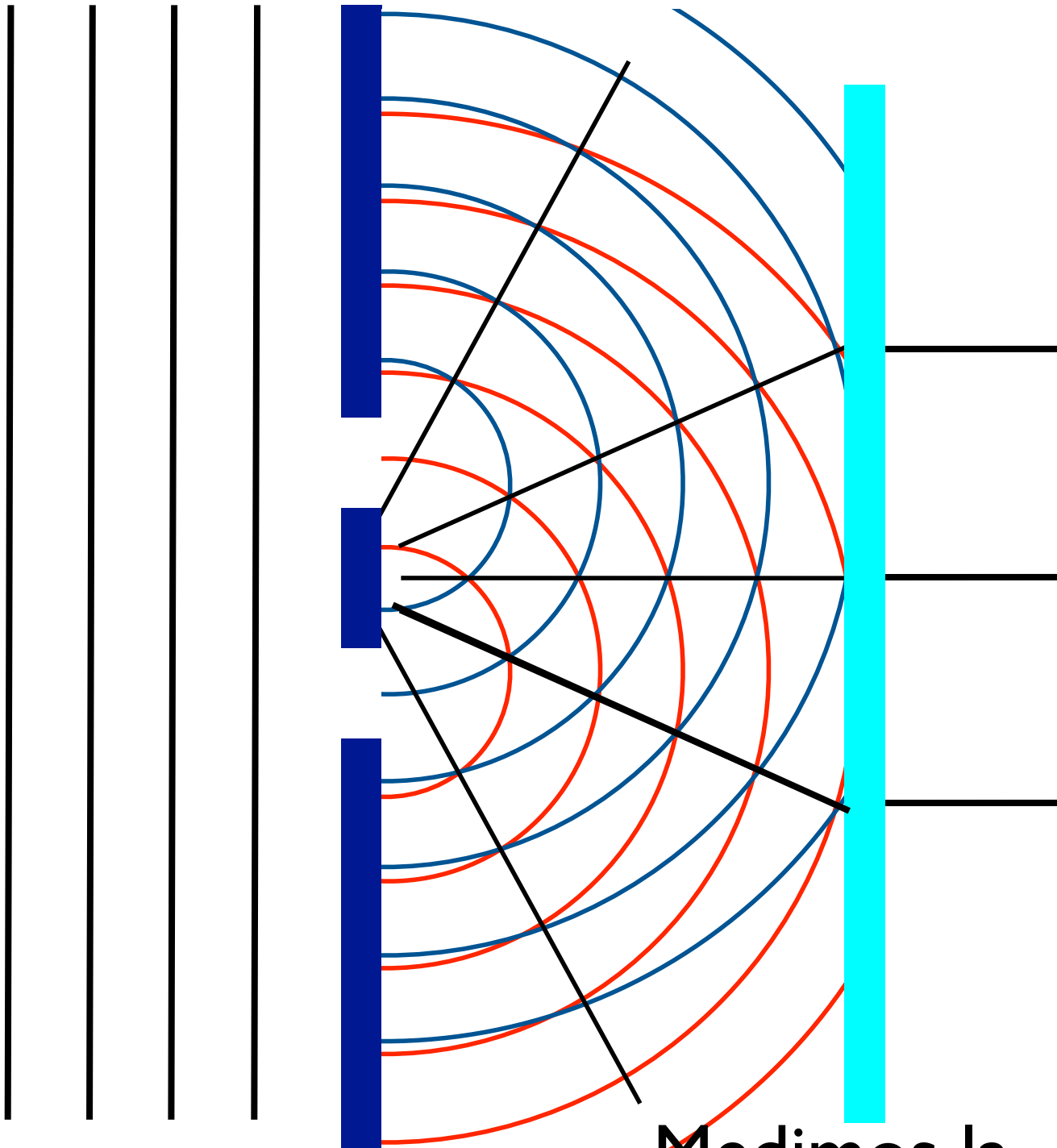
En oposición de fase

$$\mathcal{A}_1 + \mathcal{A}_2 = 0$$



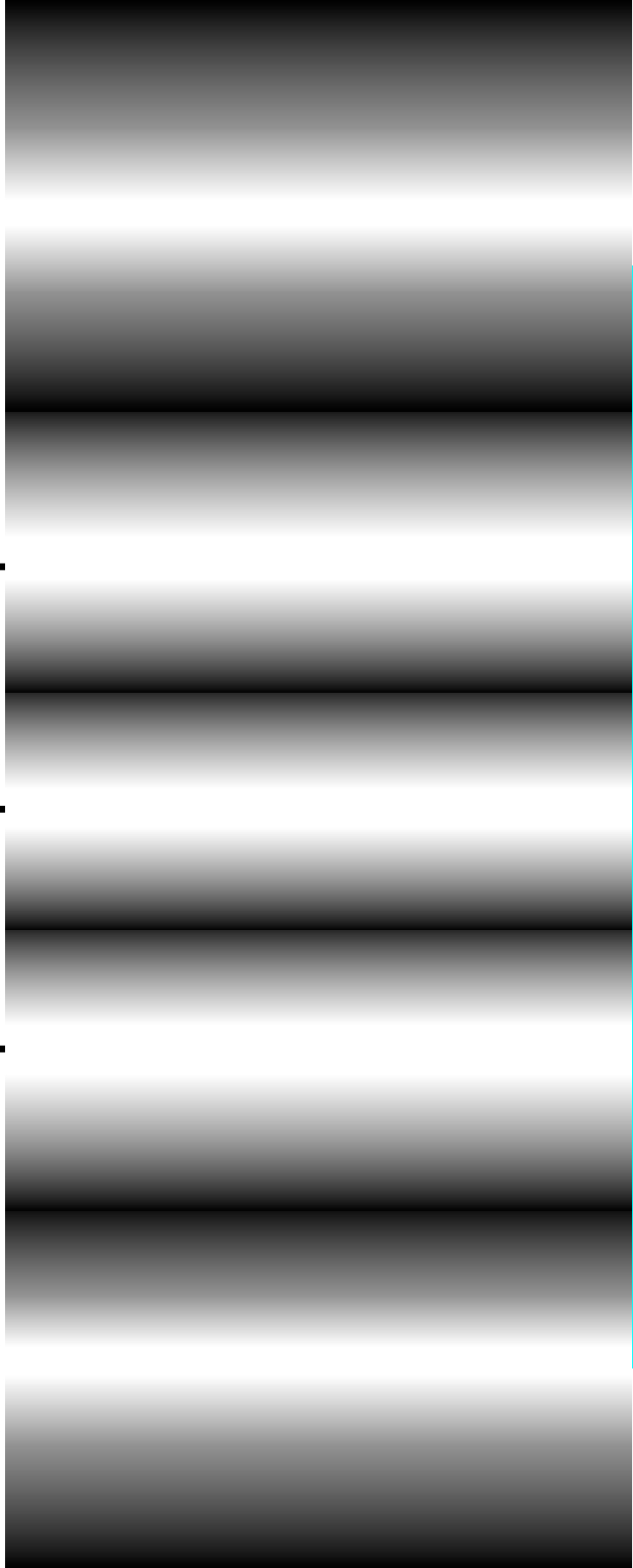
Ondas

Interferencia



Pantalla con dos rendijas

Medimos la intensidad de la luz



Intensidad

$$|A_1 + A_2|^2$$

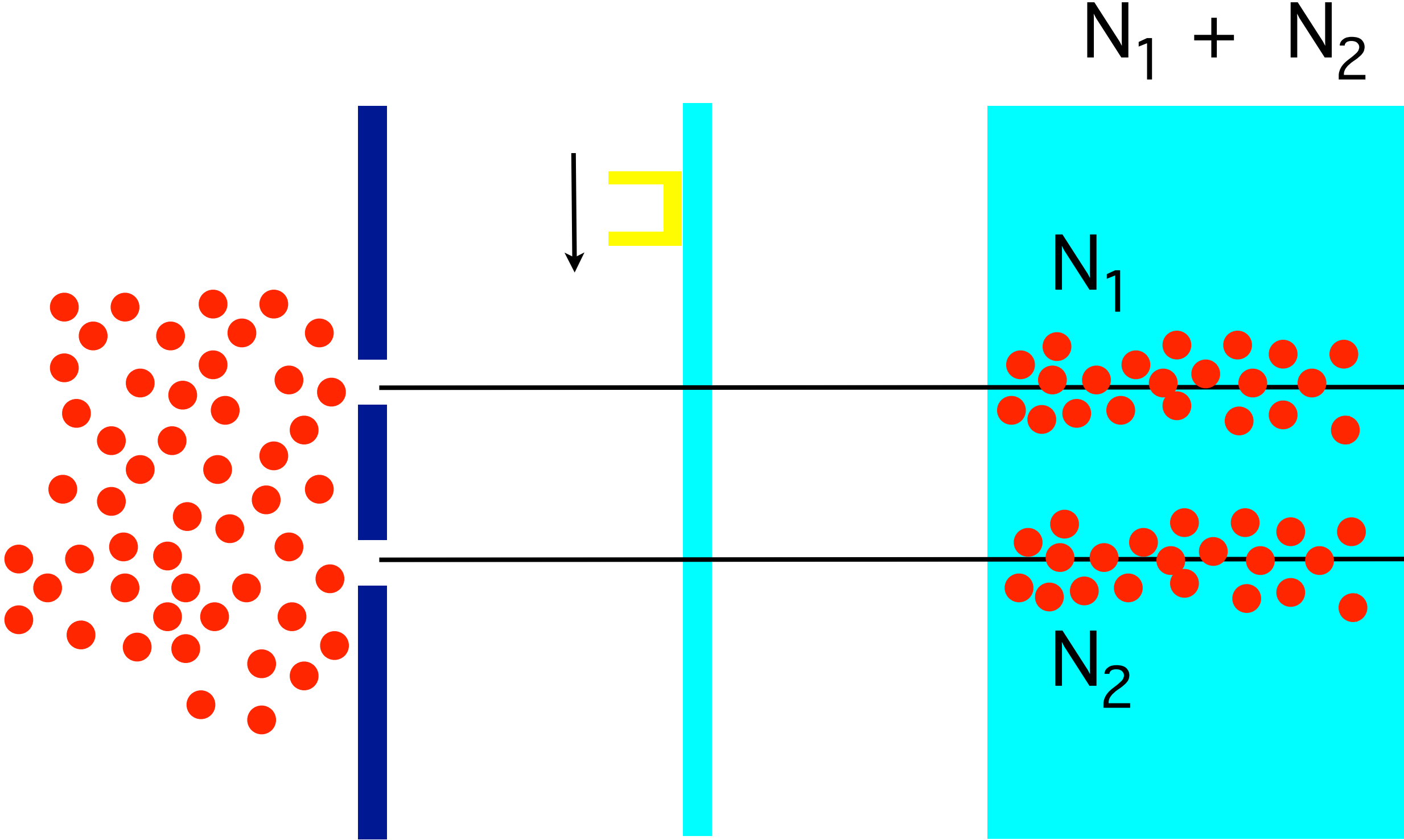
luz

oscuridad

luz

oscuridad

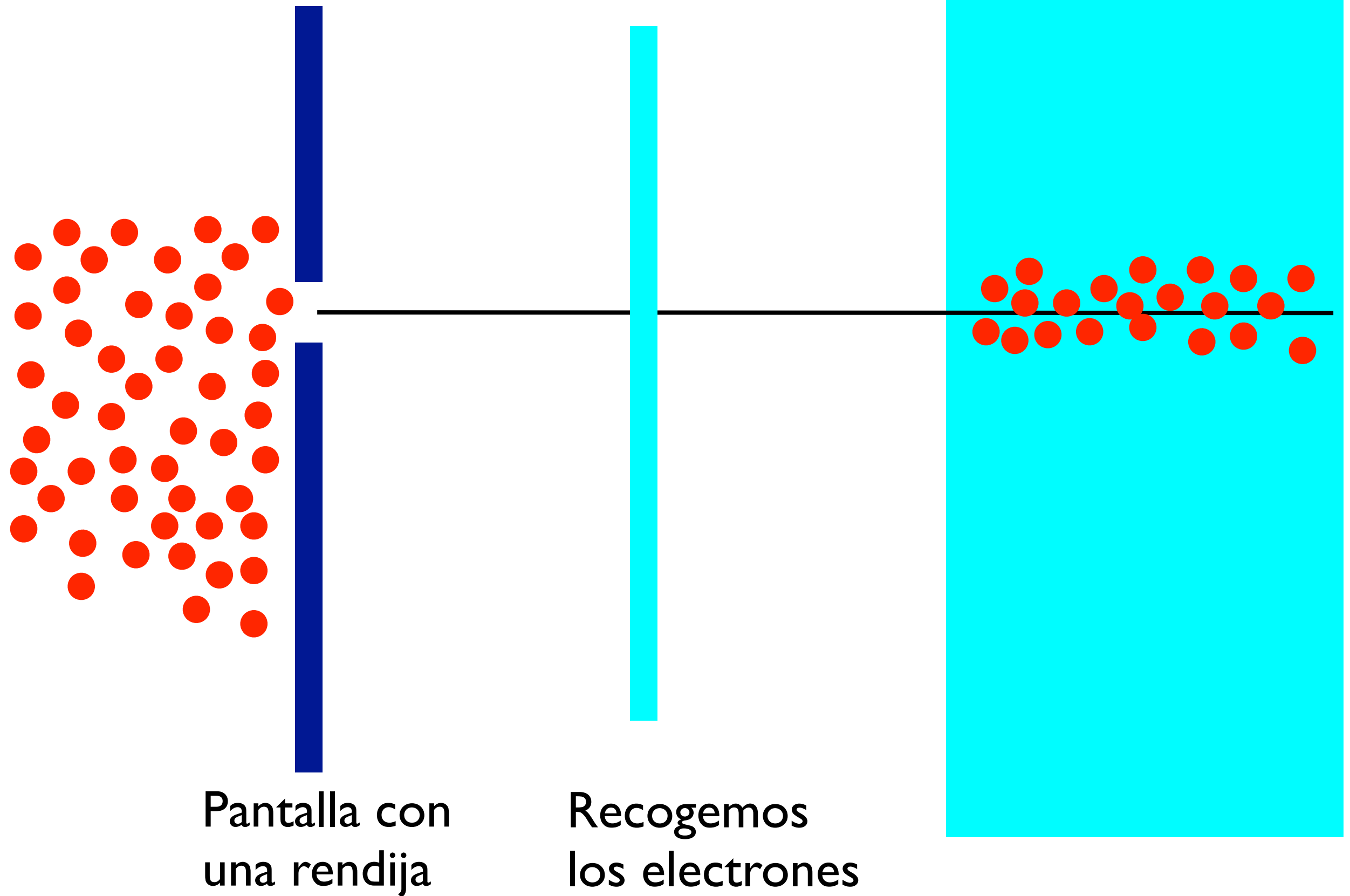
Balas



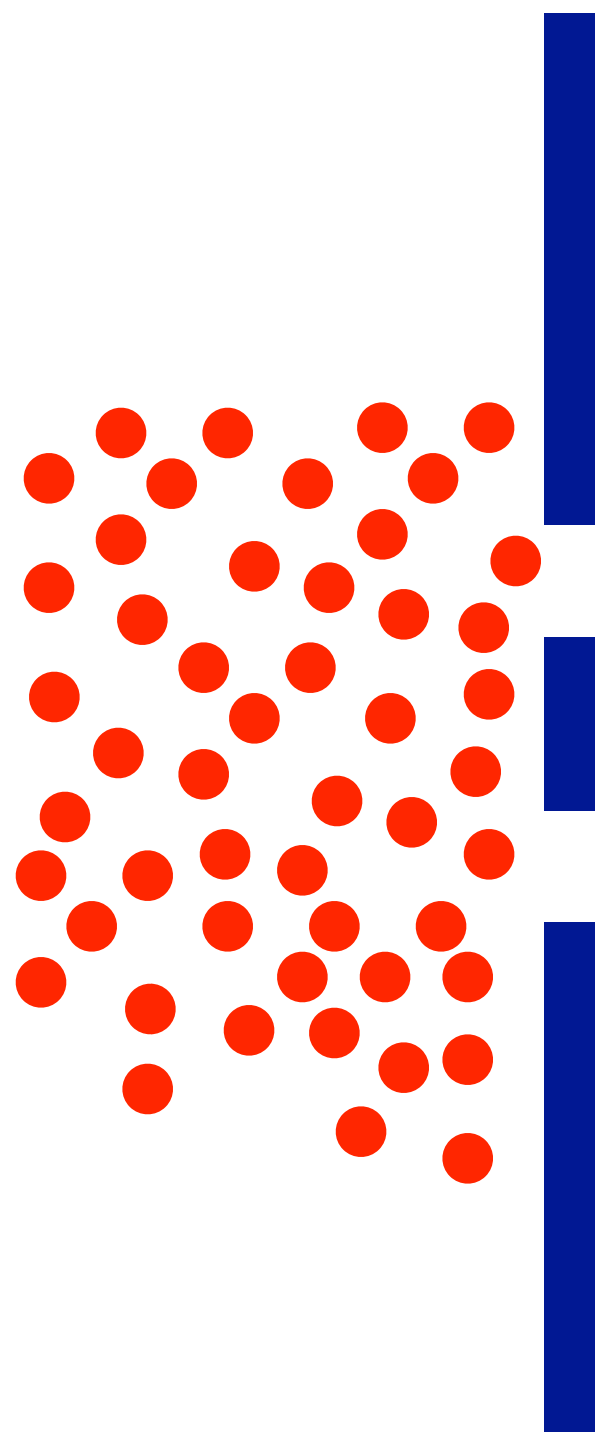
Pantalla con
dos rendijas

Recogemos
las balas

Electrones

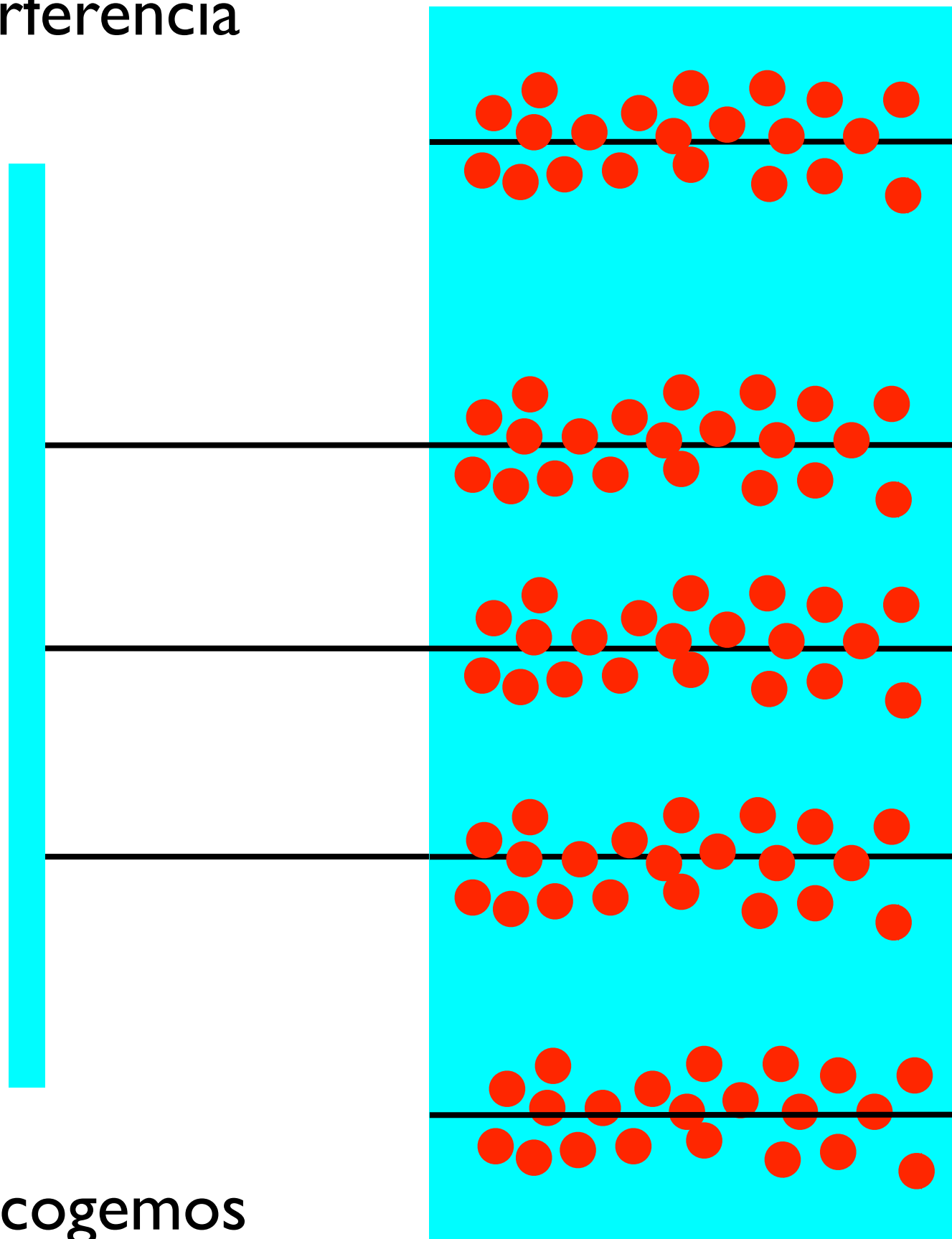


Electrones



Pantalla con
dos rendijas

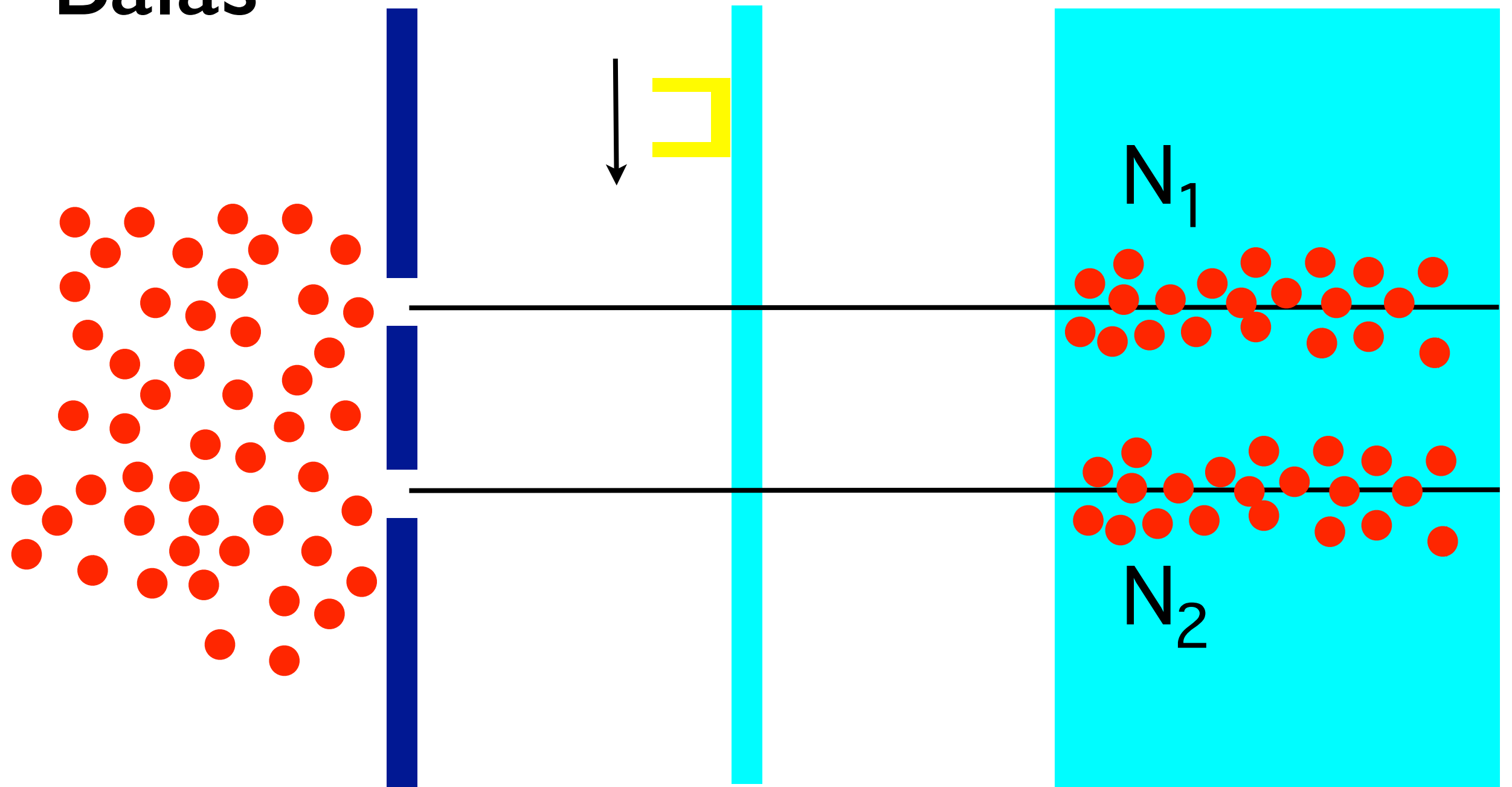
Interferencia



Recogemos
los electrones

Experimento de la doble rendija

Balas



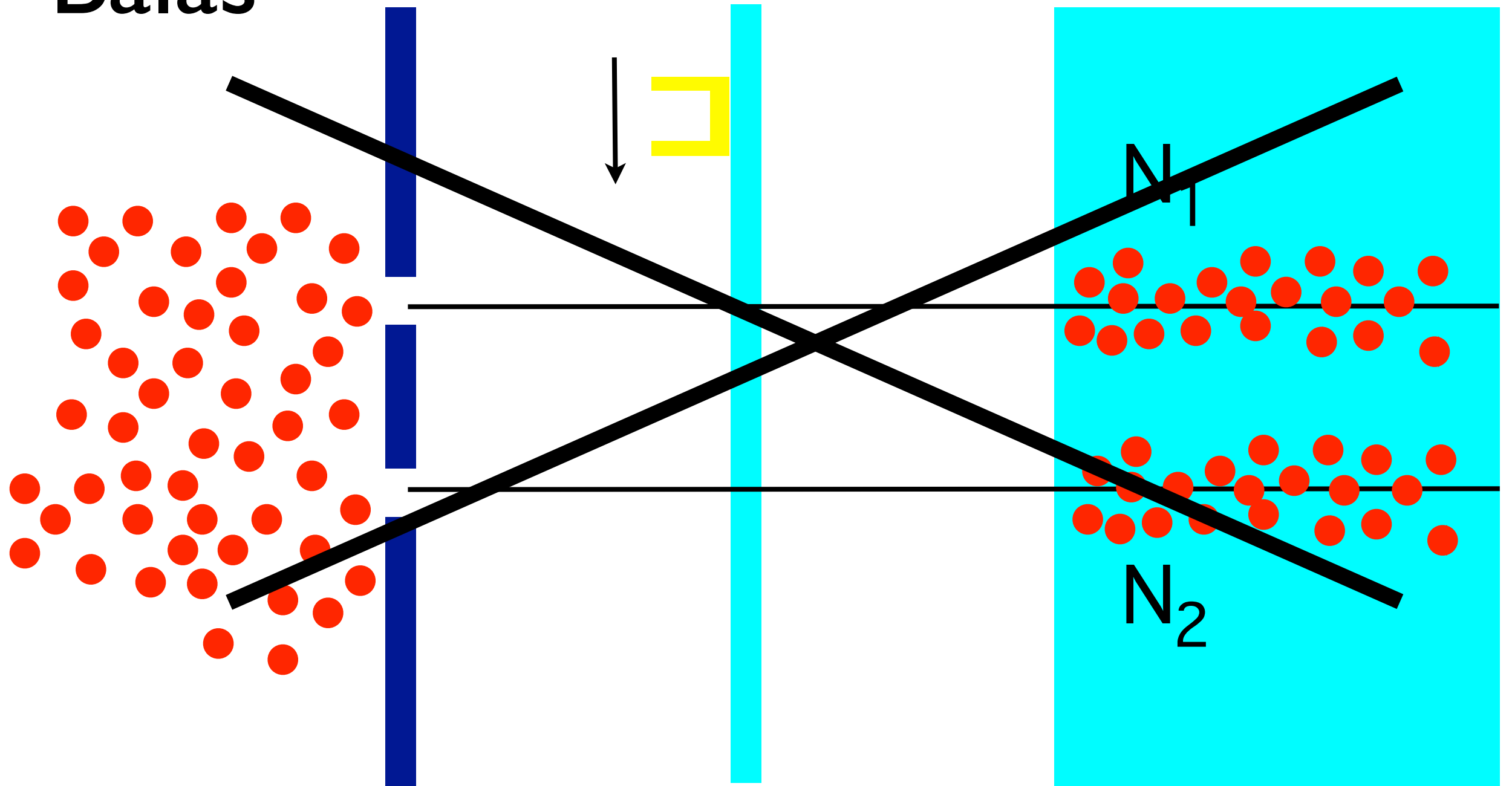
Pantalla con
dos rendijas

Recogemos
las balas

Experimento de la doble rendija

Balas

$N_1 + N_2$

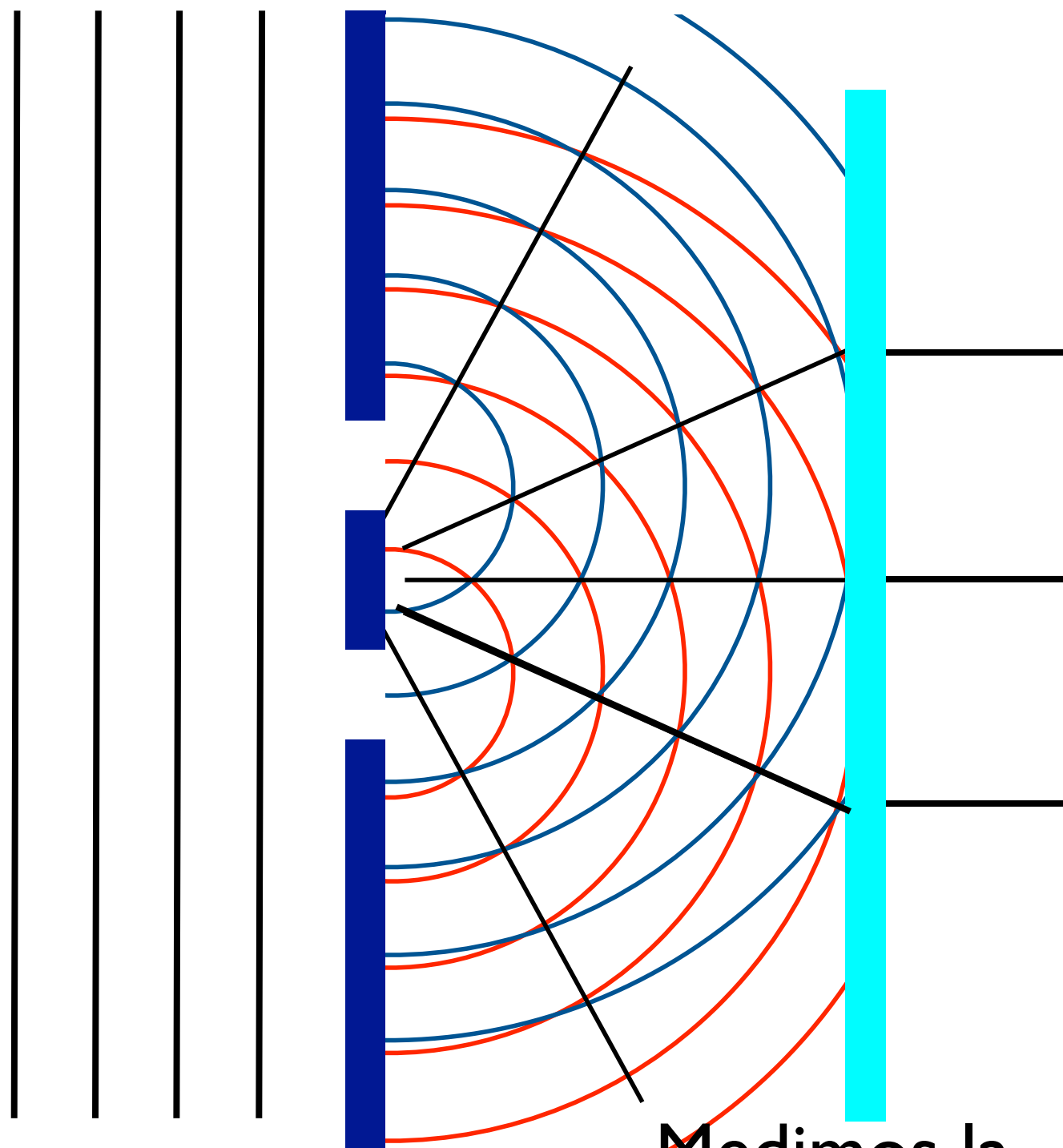


Pantalla con
dos rendijas

Recogemos
las balas

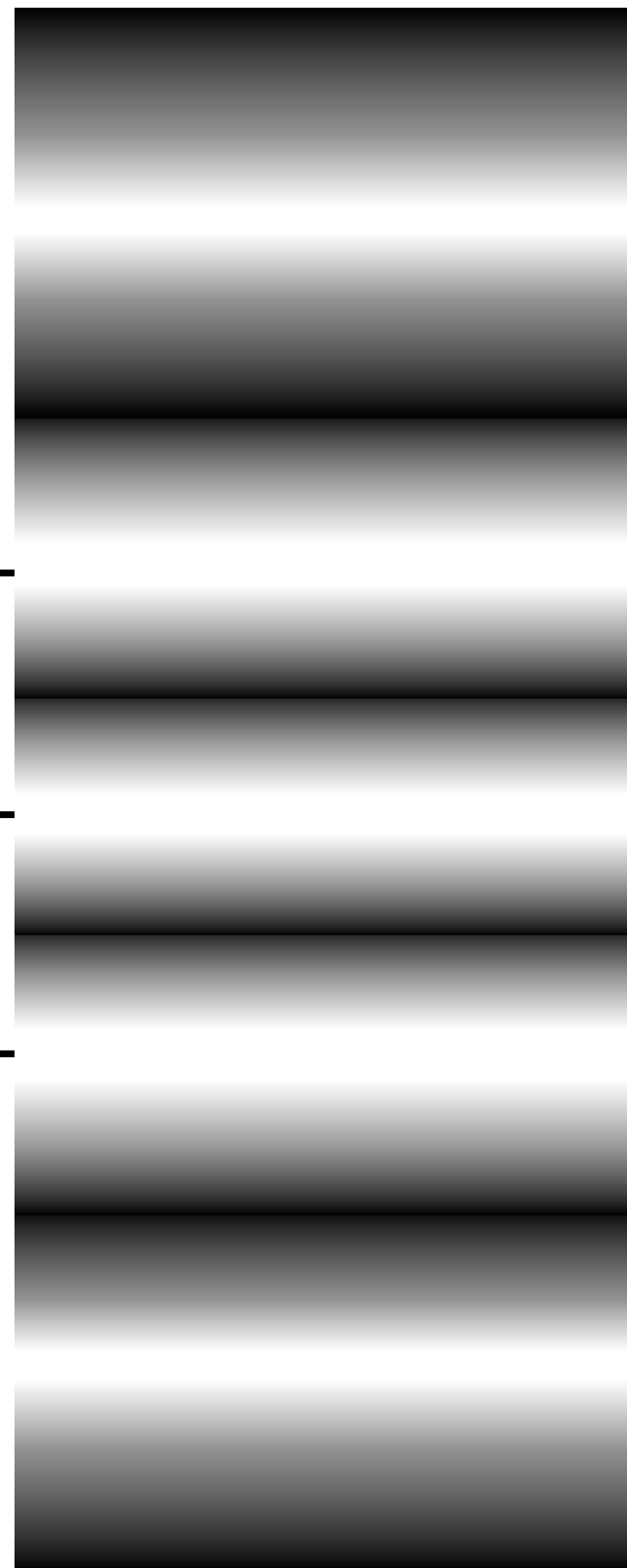
Ondas

Interferencia



Pantalla con
dos rendijas

Medimos la
intensidad
de la luz



Intensidad

$$|A_1 + A_2|^2$$

luz

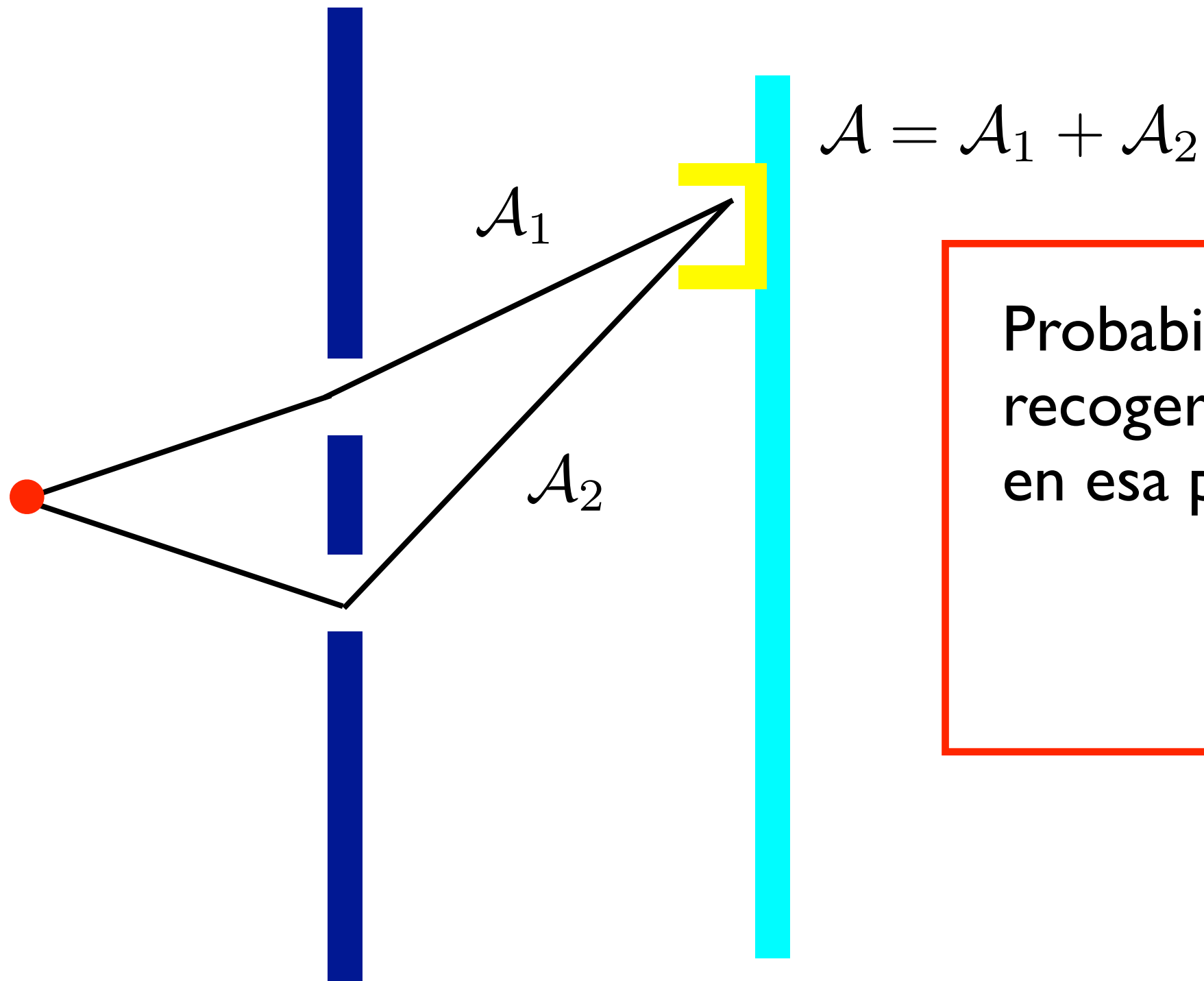
oscuridad

luz

oscuridad

Electrones

Interferencia



Probabilidad de recoger un electrón en esa posición

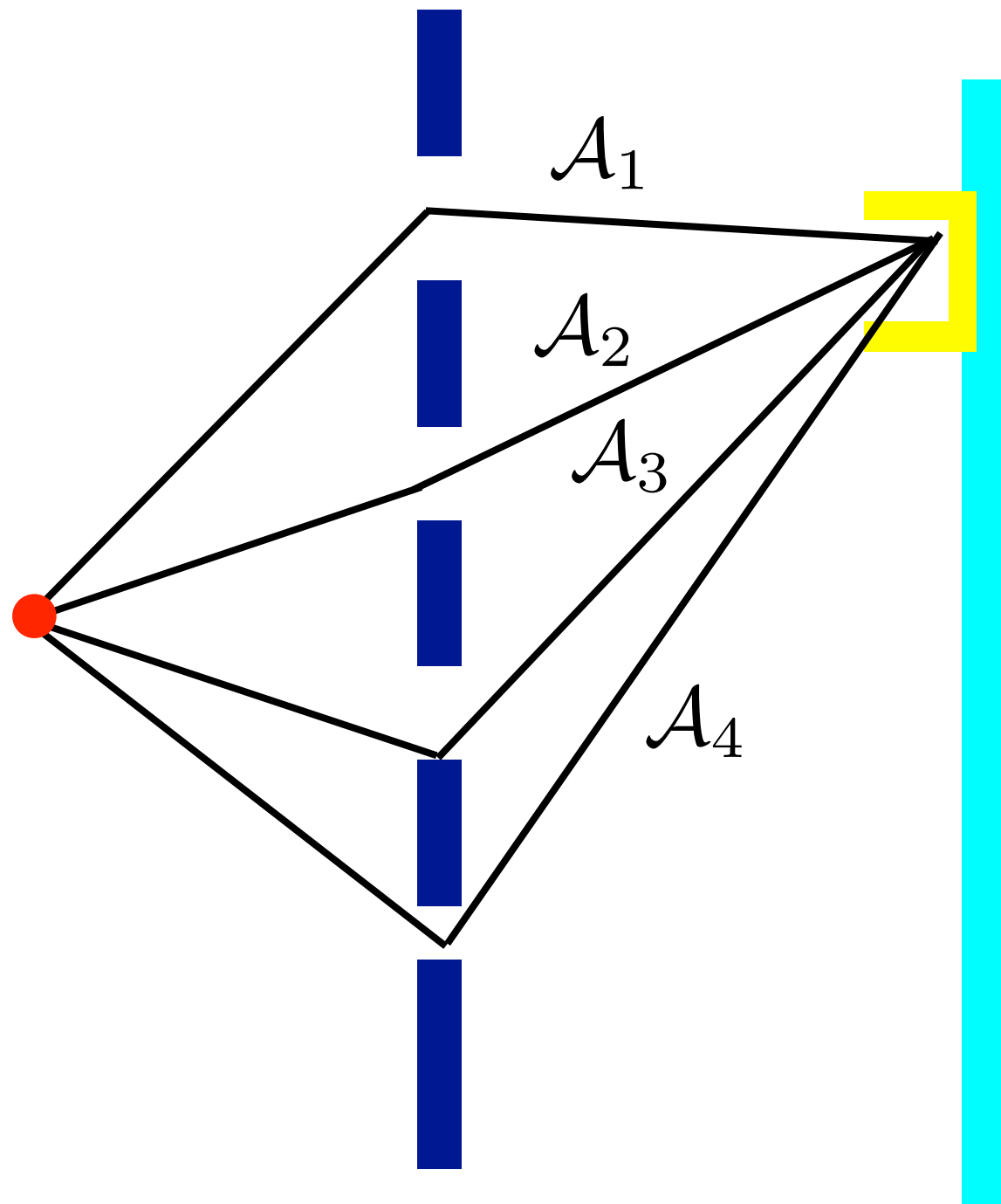
$$|A_1 + A_2|^2$$

Pantalla con dos rendijas

Recogemos los electrones

Electrones

Interferencia



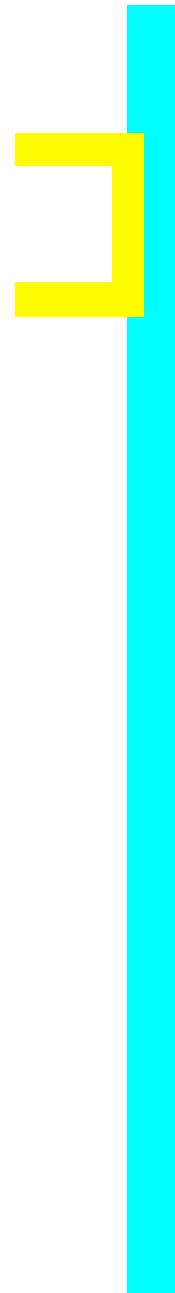
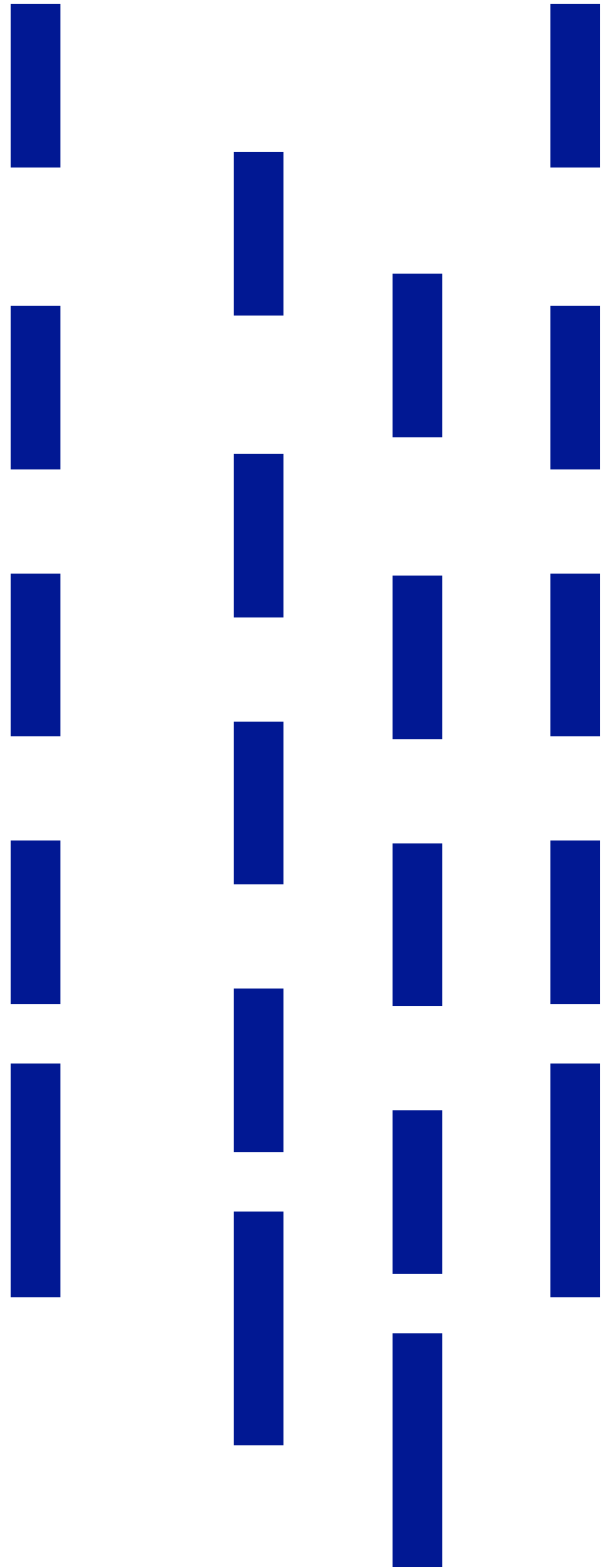
$$A = A_1 + A_2 + A_3 + A_4$$

Probabilidad de recoger un electrón en esa posición

$$|A_1 + A_2 + A_3 + A_4|^2$$

Pantalla con 4 rendijas

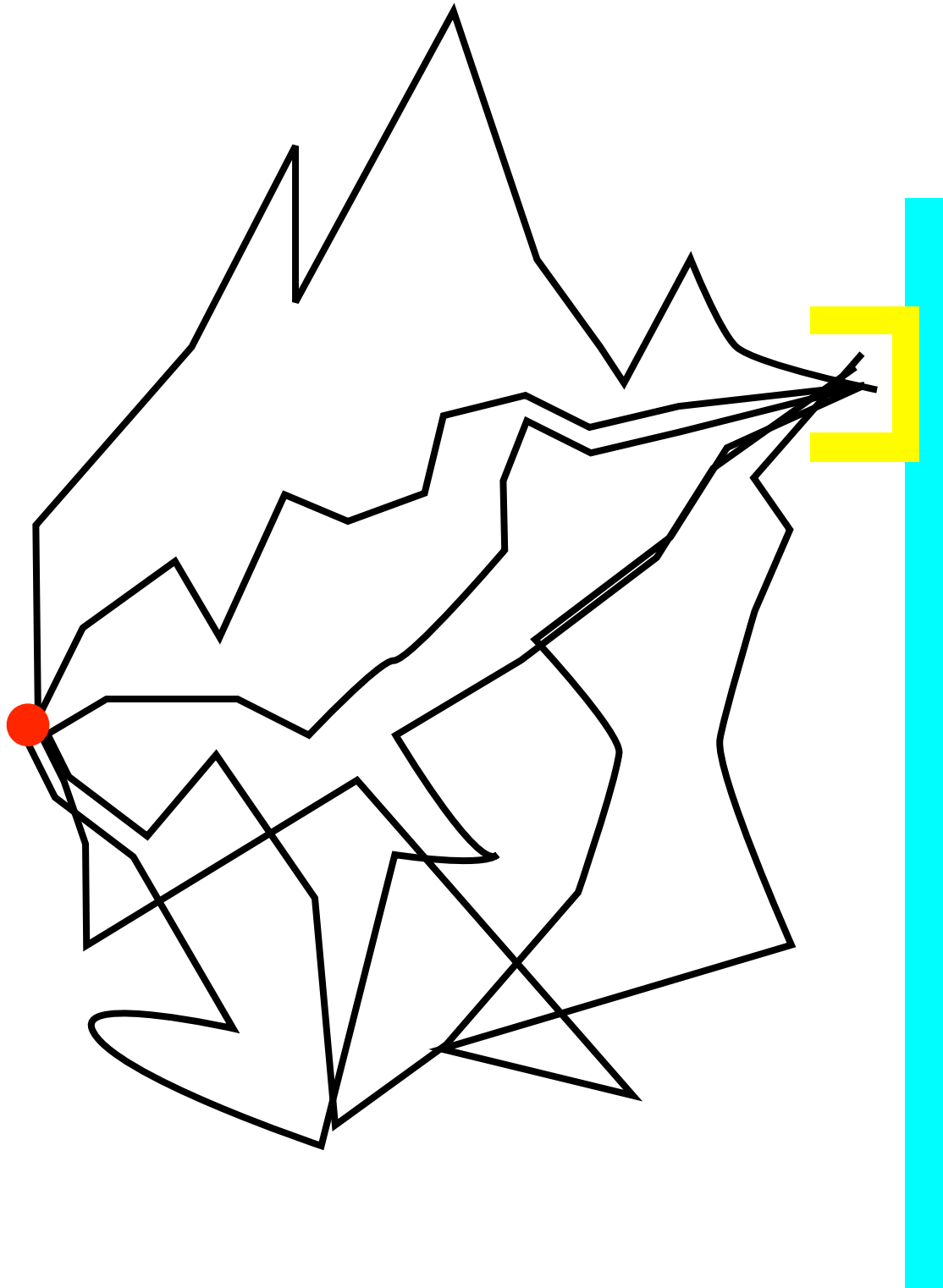
Recogemos los electrones



$$|A|^2$$

A = Suma de todas las historias posibles

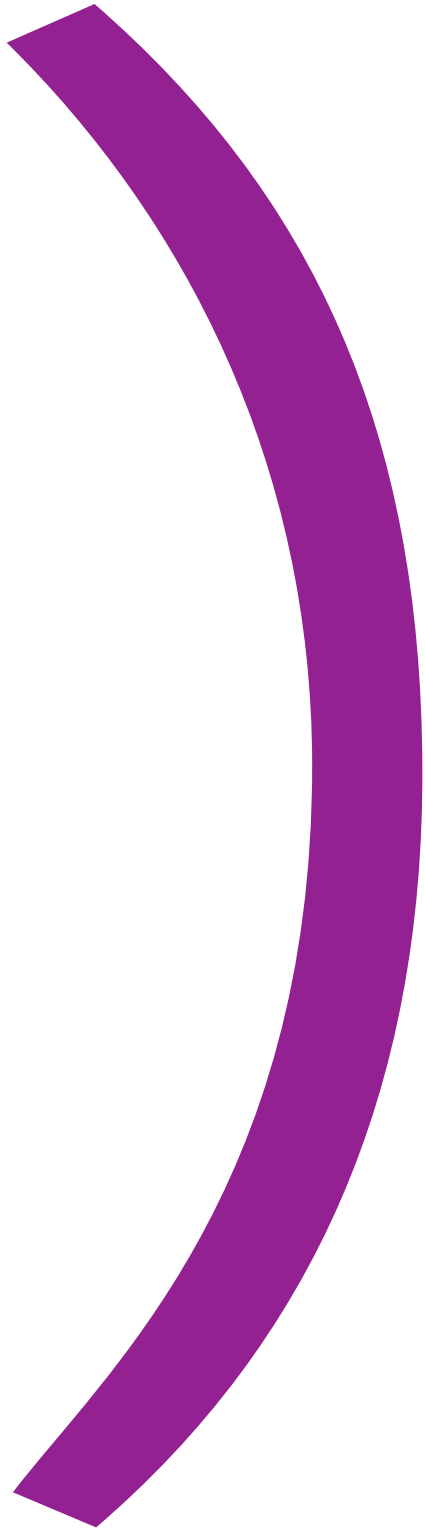
Integral de caminos de Feynman



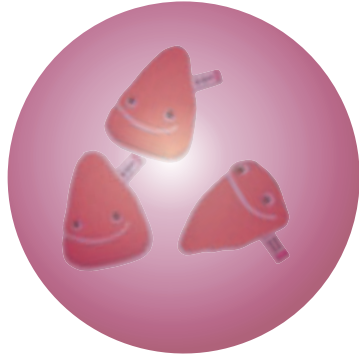
\mathcal{A} = Suma de todas
las historias
posibles

!!! Incluso sin rendijas !!!

$|\mathcal{A}|^2$ Probabilidad de detección

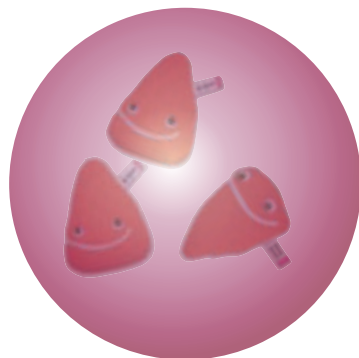


t



Protón

A = Suma de todas
las historias
posibles



¿Cómo representamos historias?

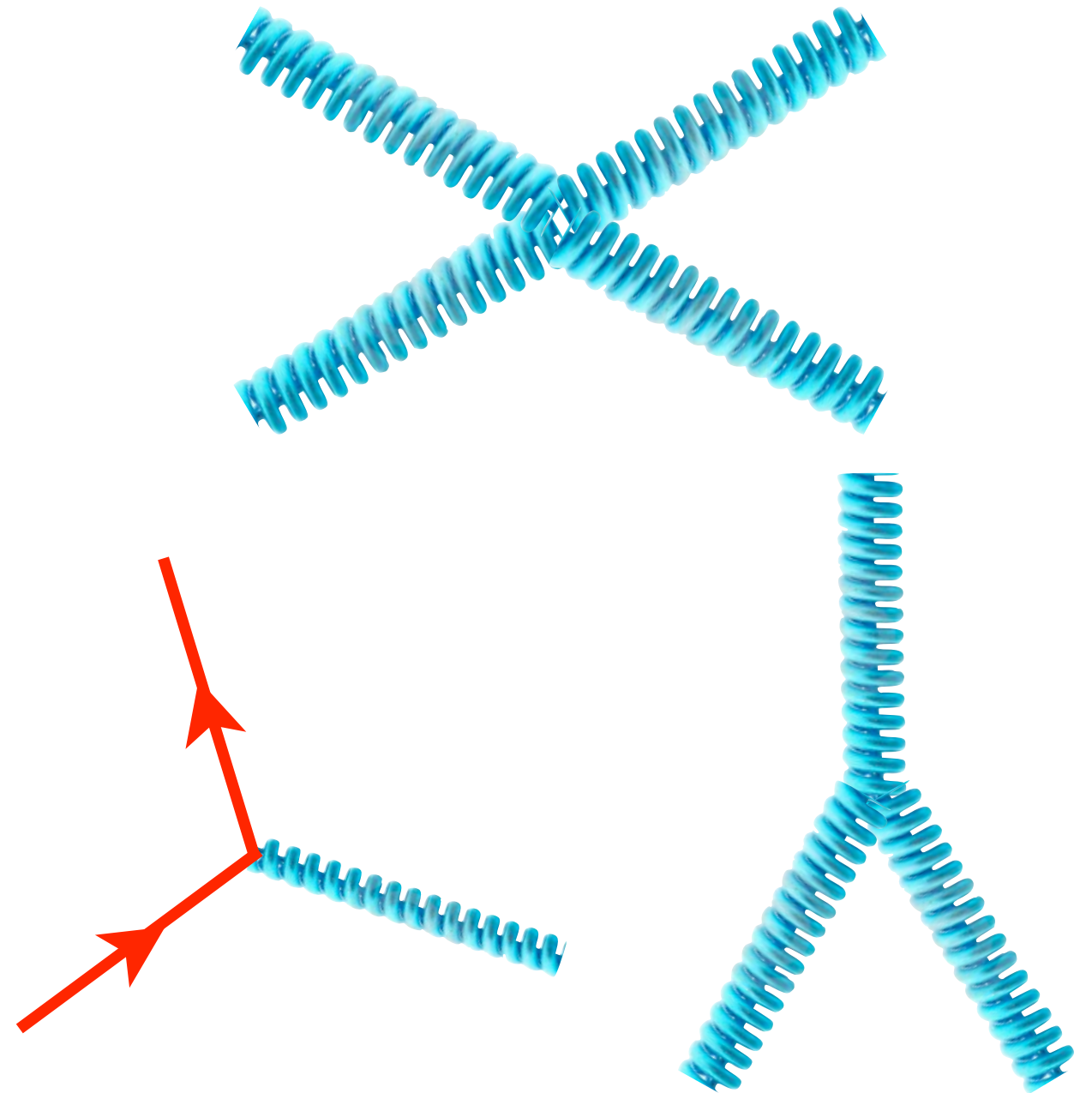
Diagramas de Feynman

Quark



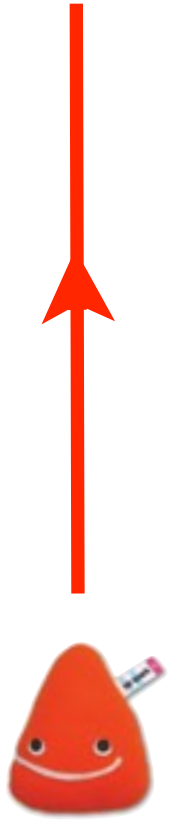
Líneas de propagación

Gluón

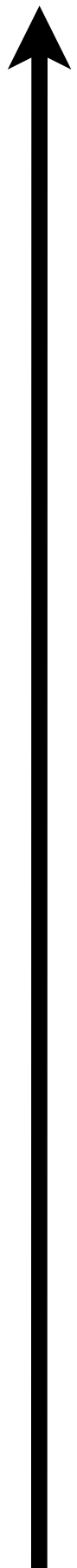


Vértices de interacción

t



t

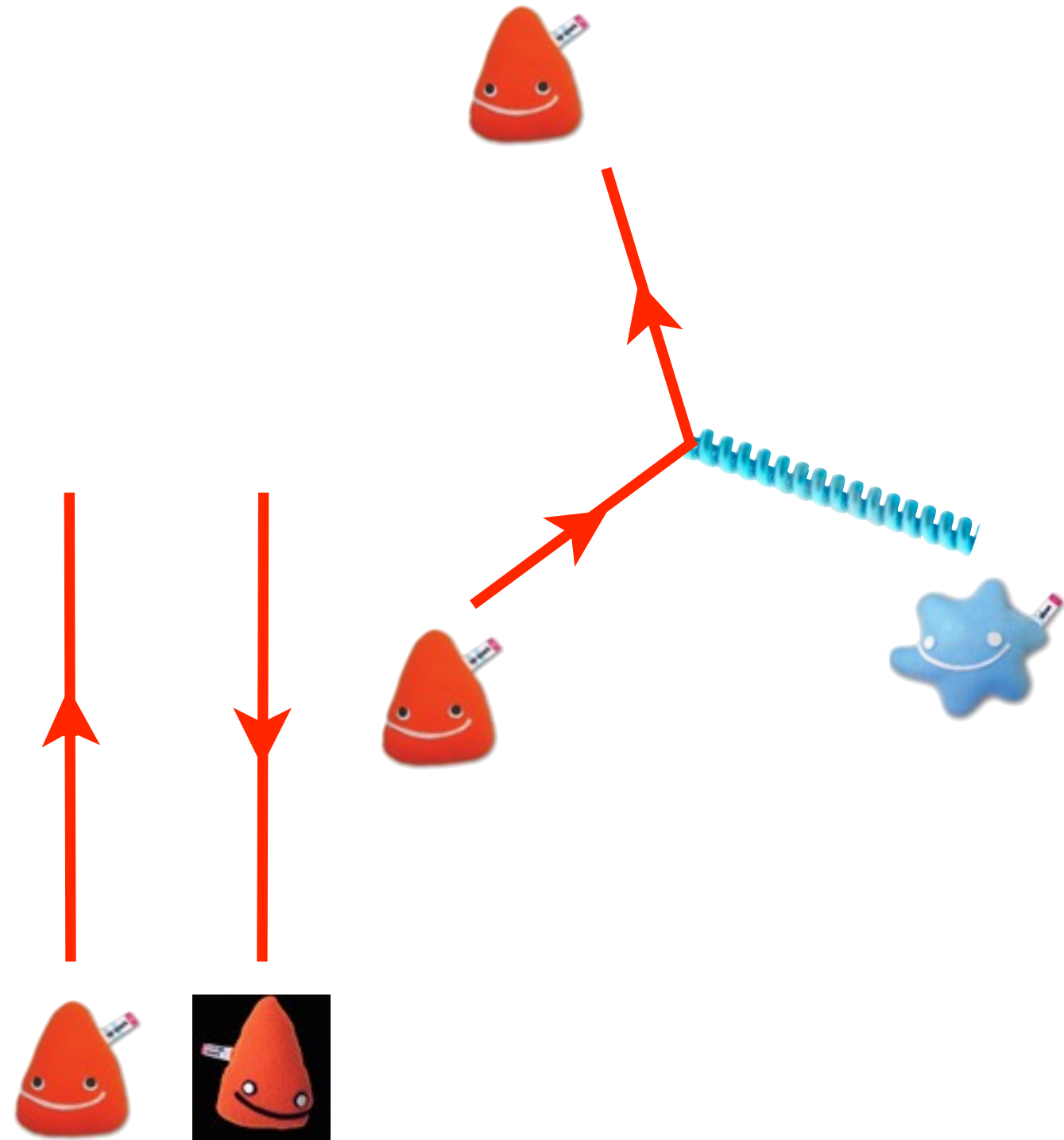
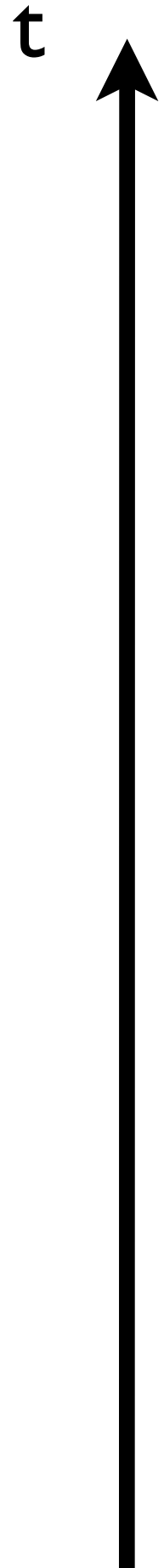


t



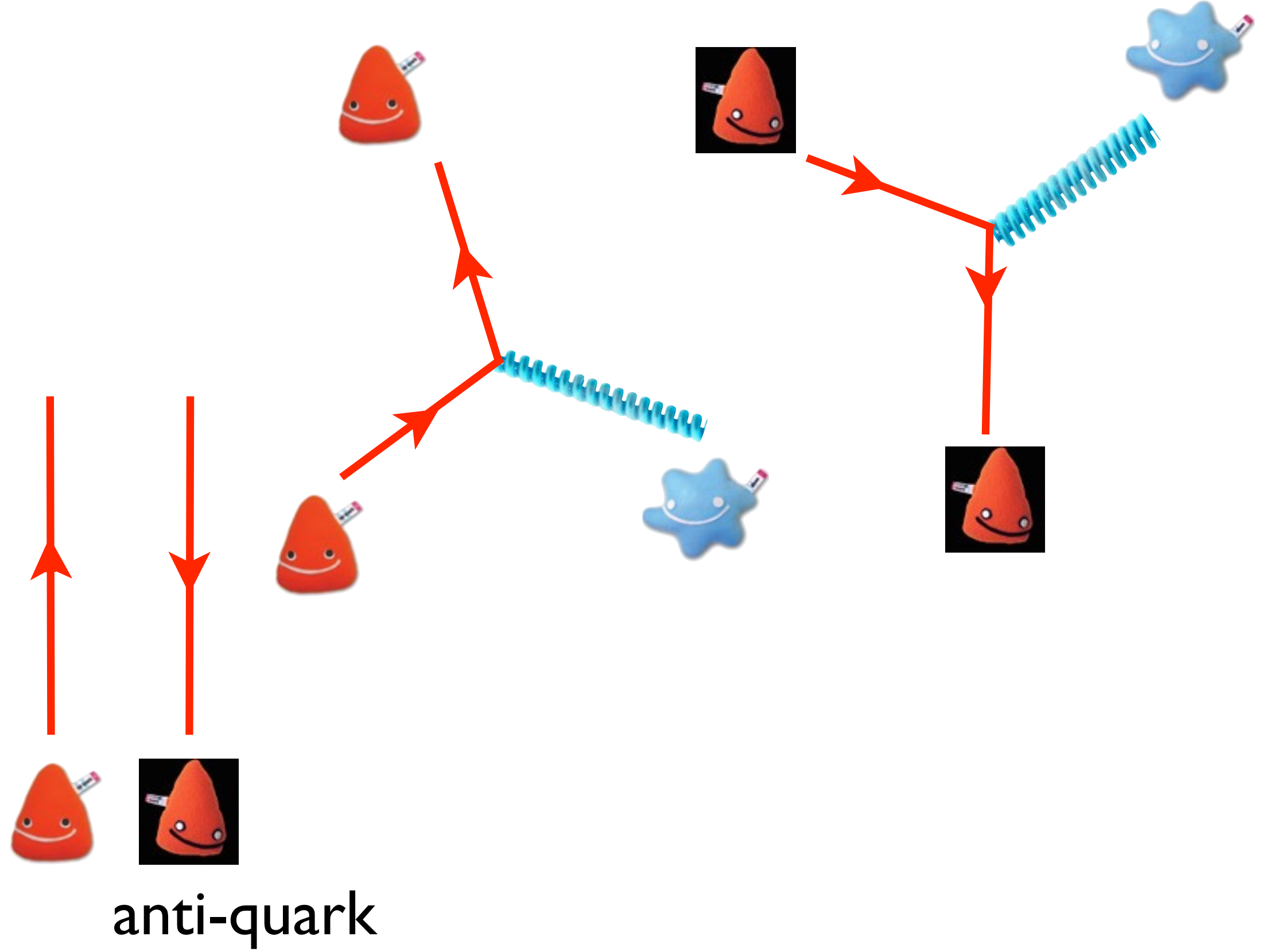
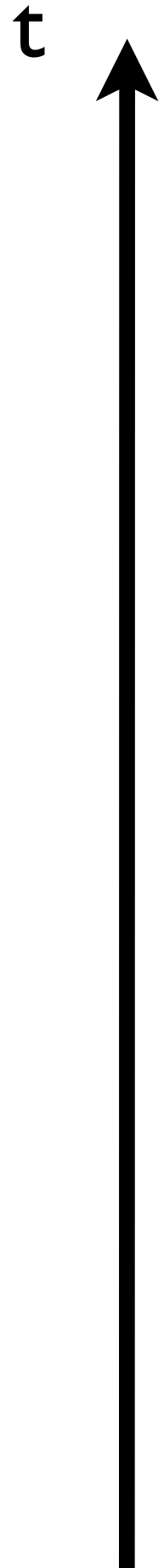
anti-quark

t

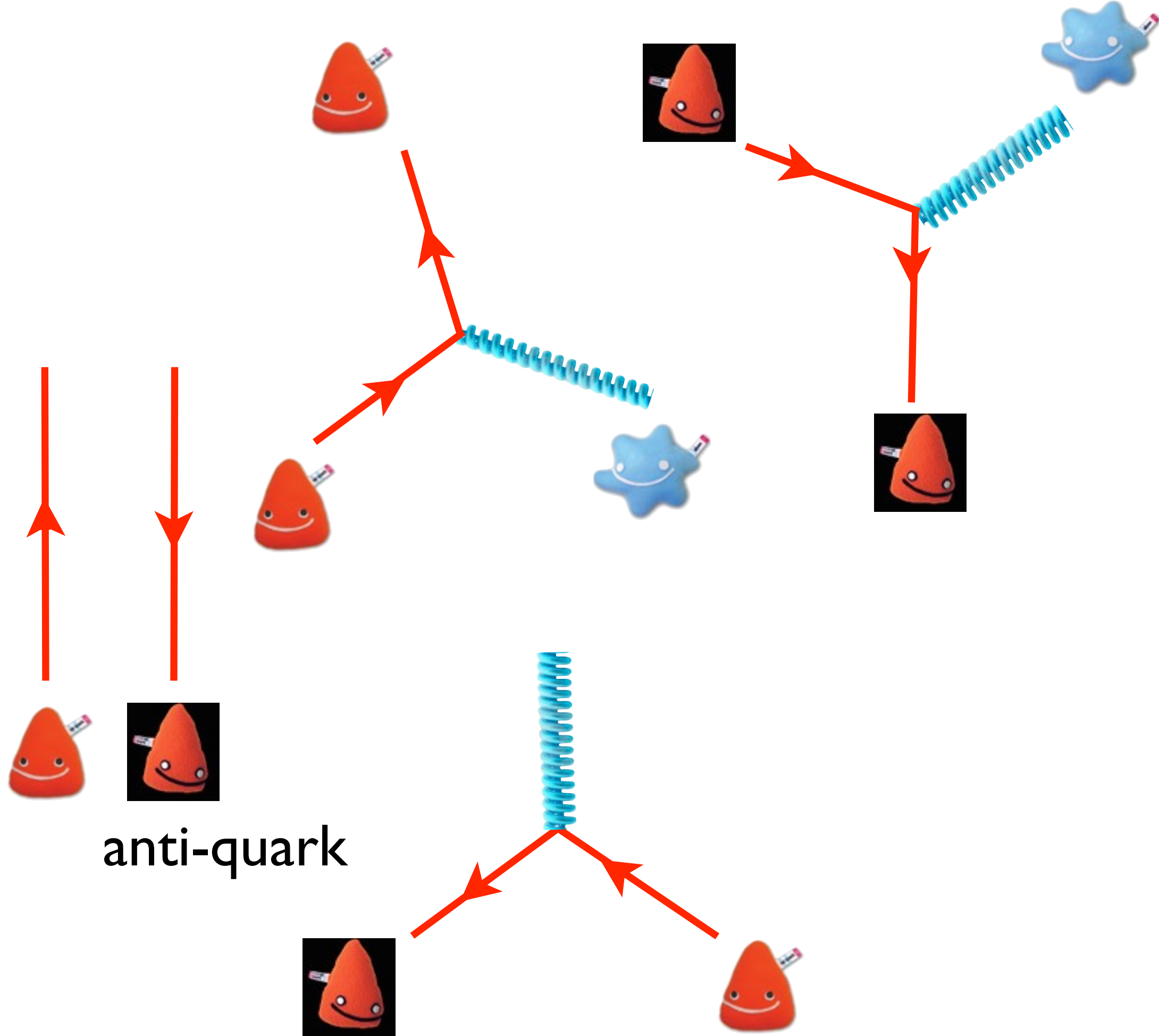
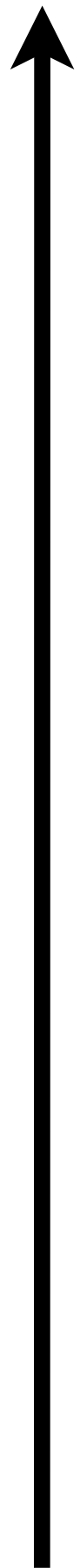


anti-quark

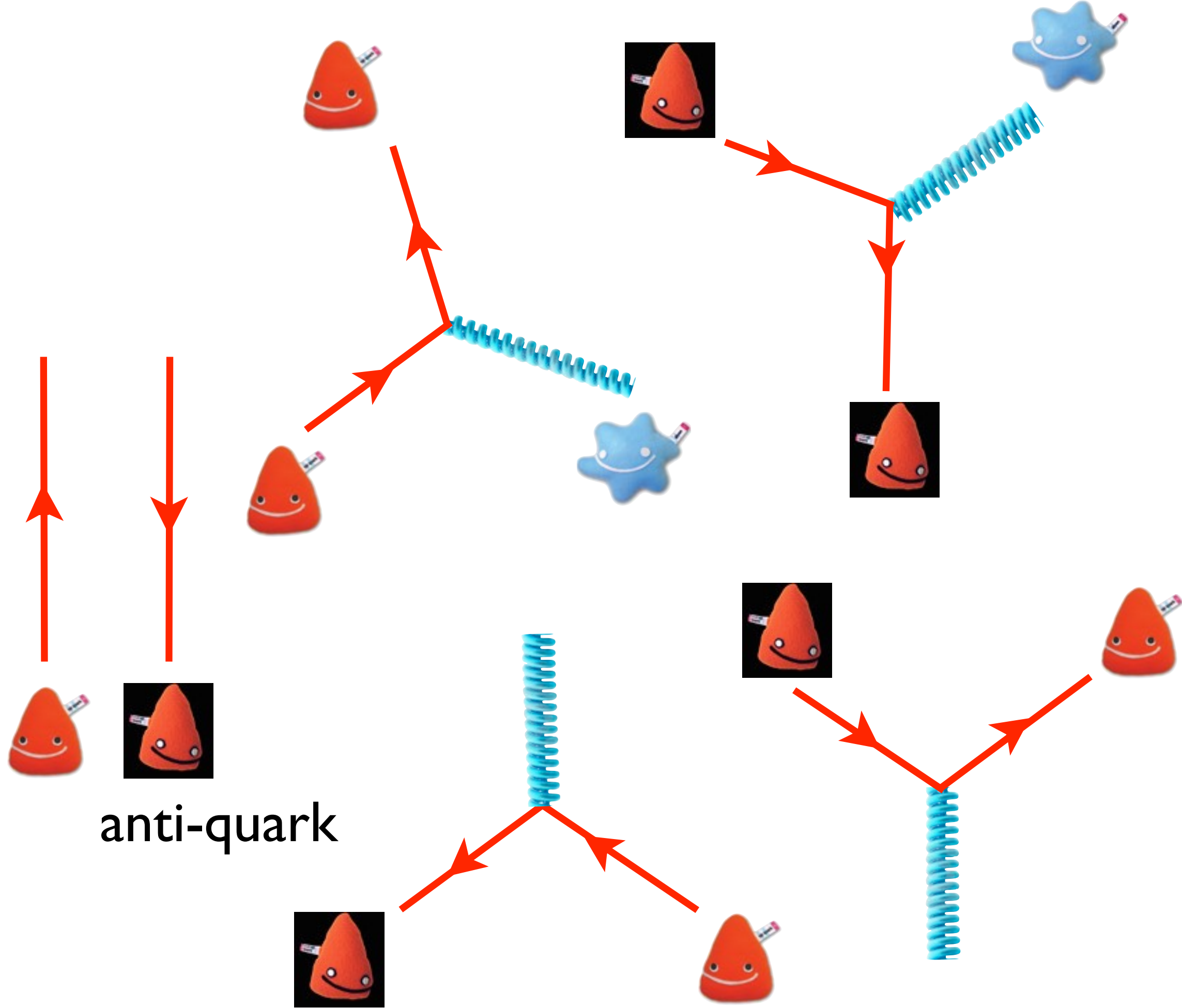
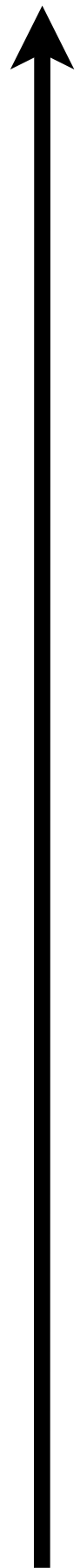
t



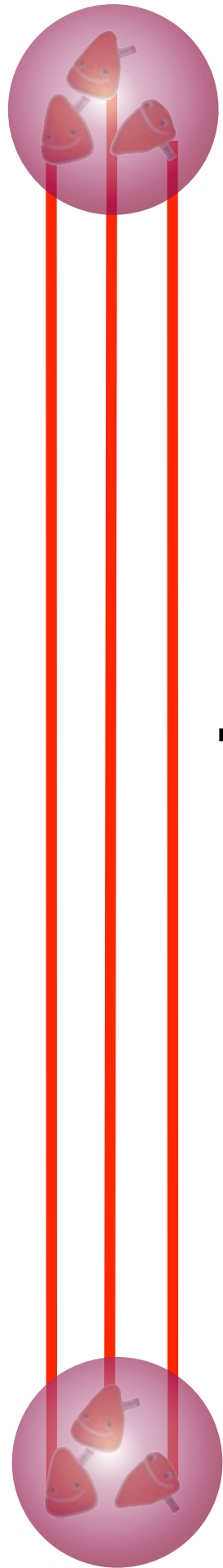

t



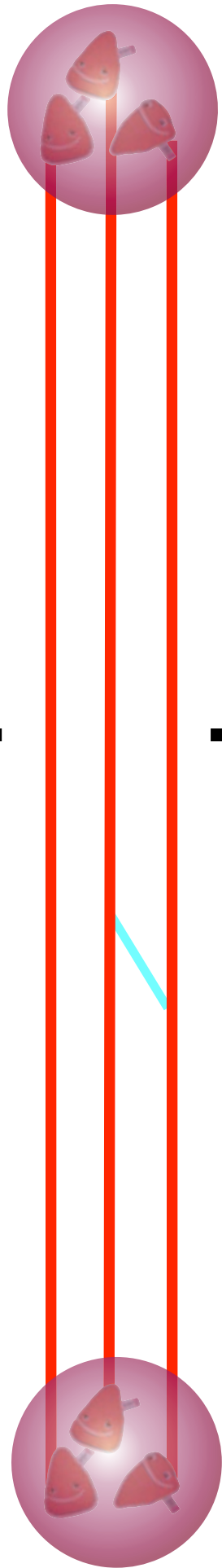
t



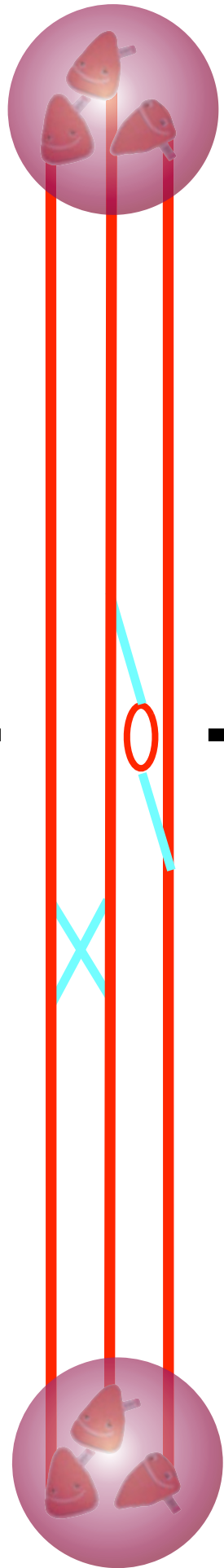
t



+



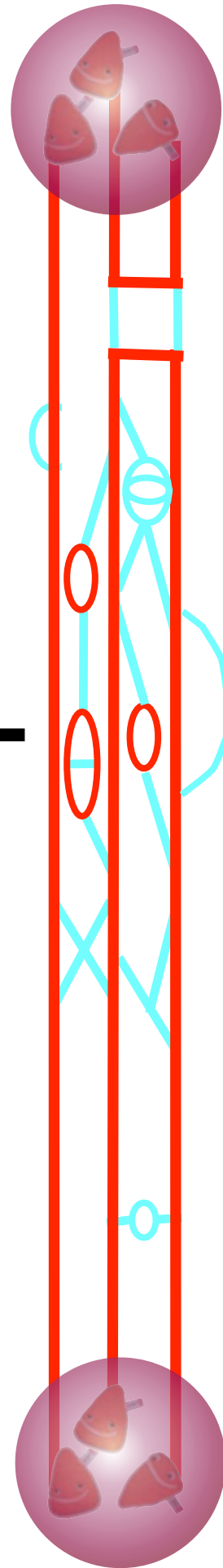
+



+

...

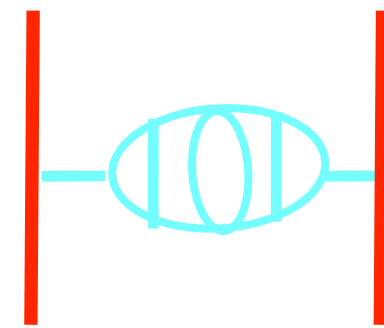
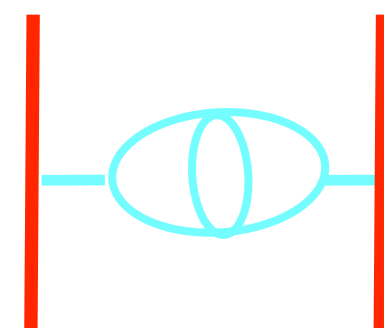
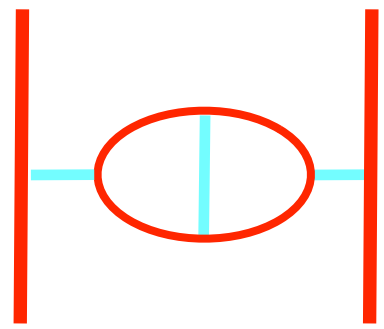
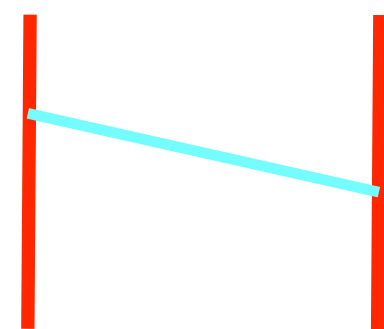
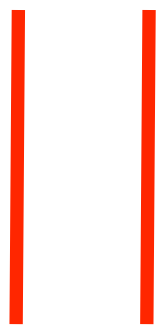
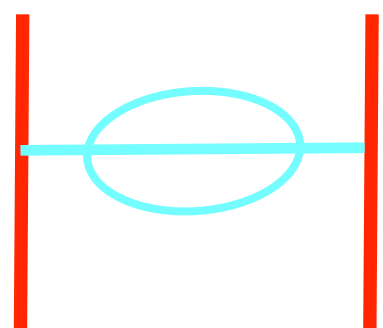
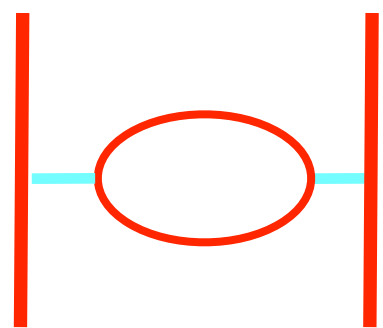
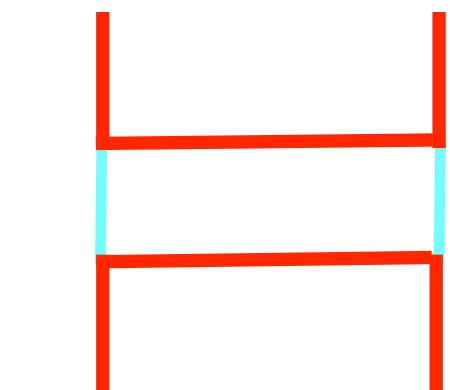
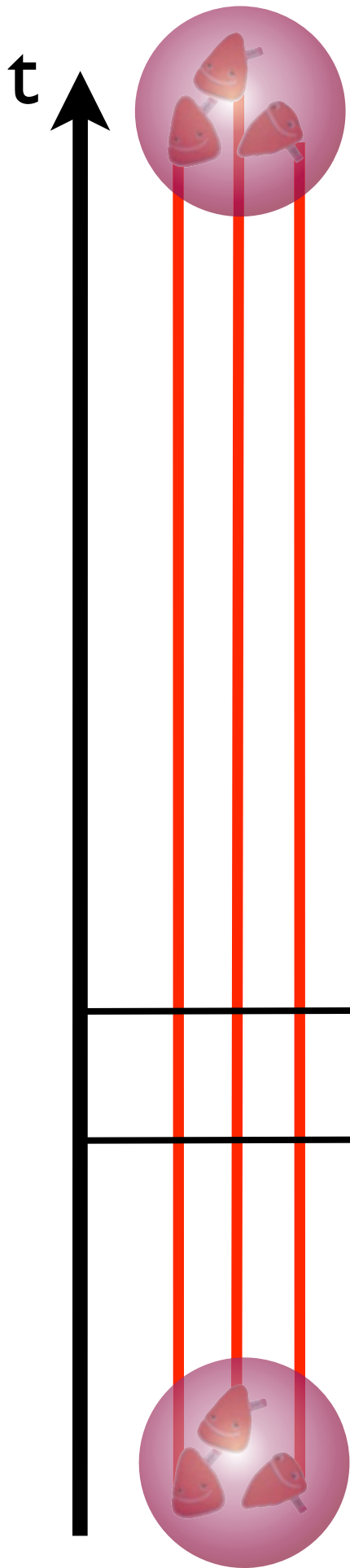
+



A = Suma de todas las historias posibles

+

...



...



¿Tarea imposible?

Seleccionar las más importantes

$$\frac{1}{1 + 0.01} = 0.99009900990099 \dots$$

Pequeño

$$\frac{1}{1 + 0.01} = 1 - 0.01 + 0.01^2 - 0.01^3 + 0.01^4 + \dots$$

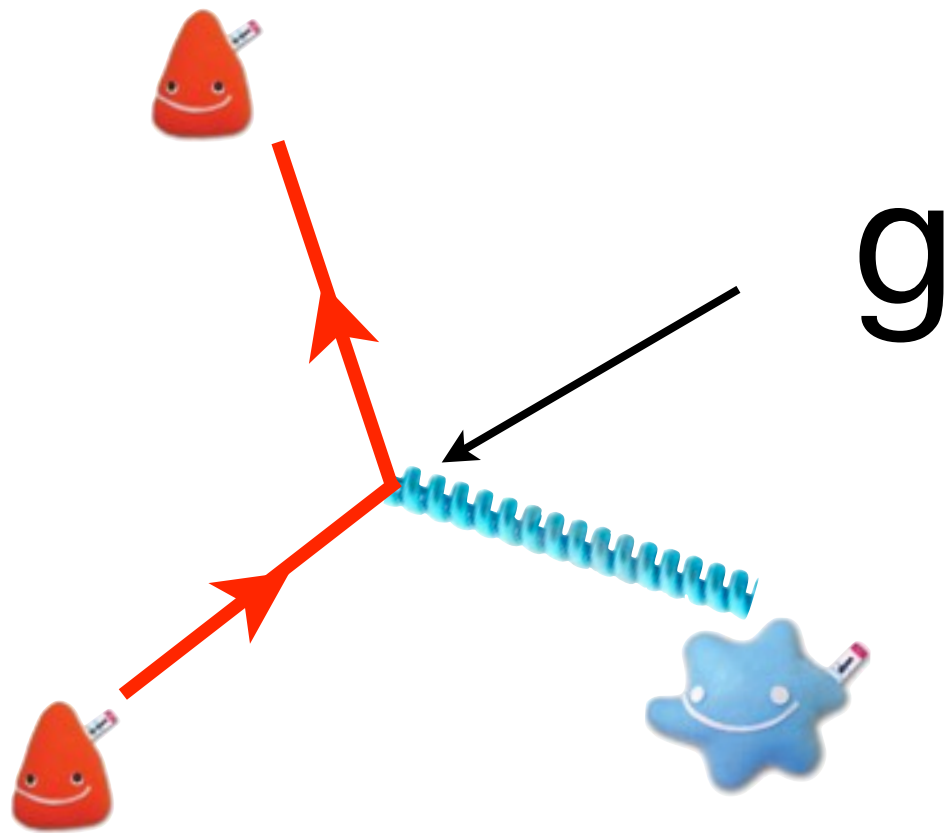
0.99

0.9901

0.990099

Pequeño - Grande

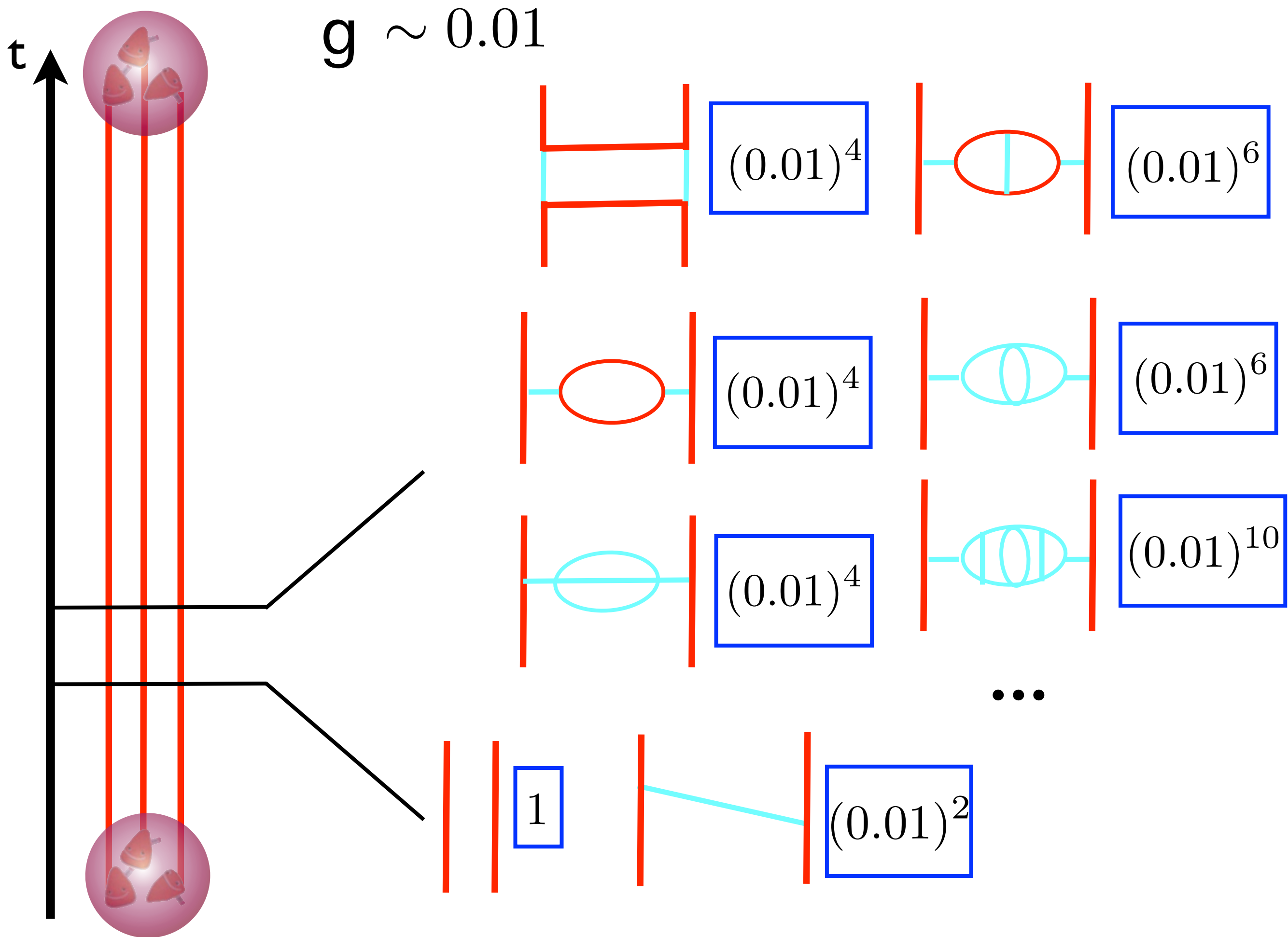
Intensidad de la fuerza

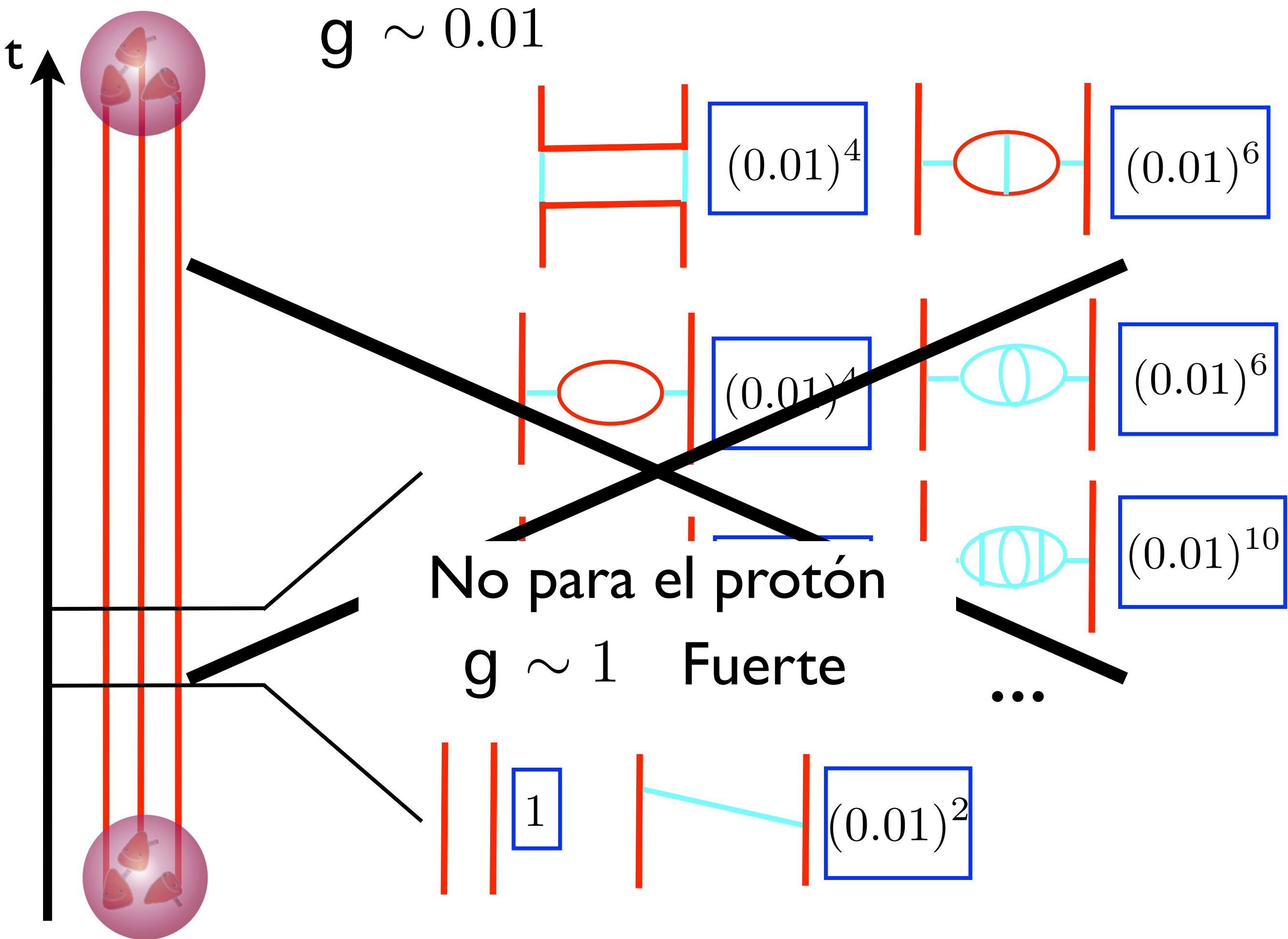


$g \sim 0.01$ Débil

g g^2 g^3 g^4

$$\frac{1}{1 + 0.01} = 1 - 0.01 + 0.01^2 - 0.01^3 + 0.01^4 + \dots$$



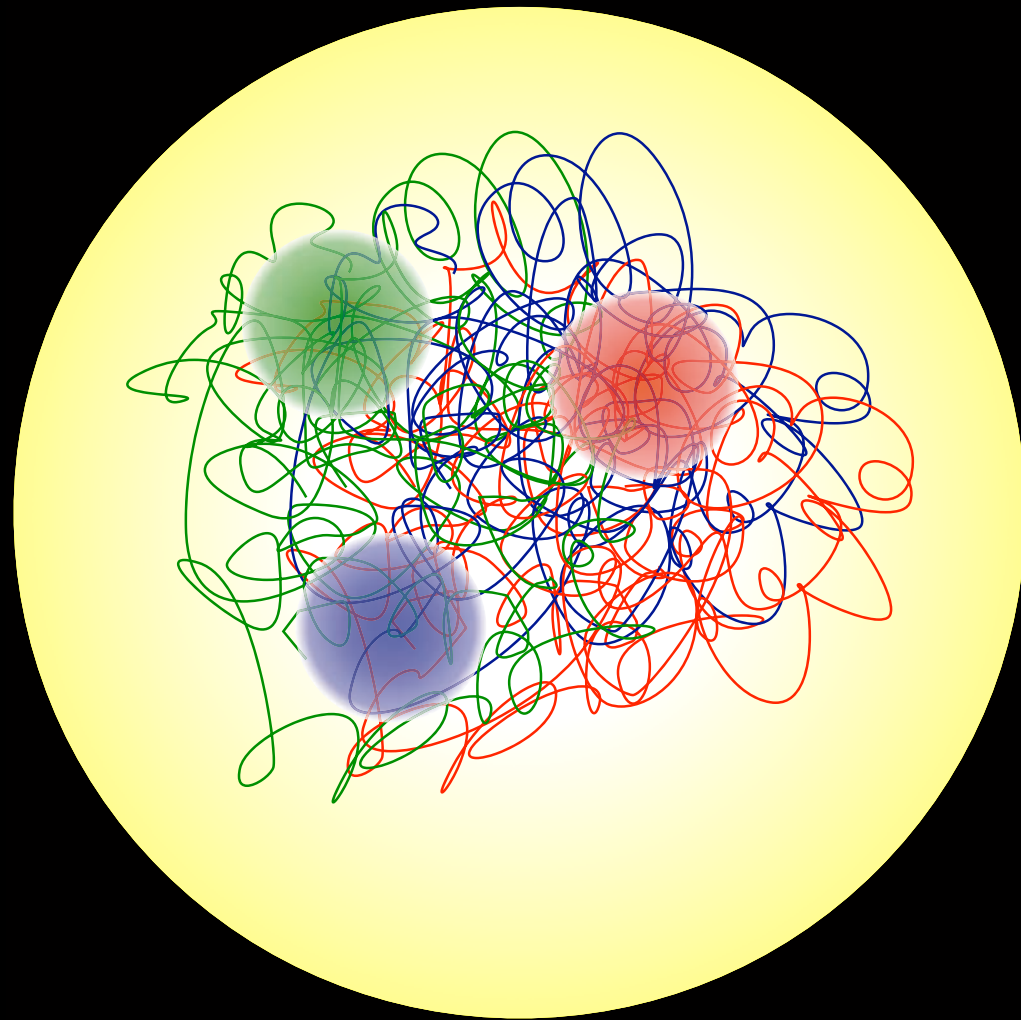


protón $g \sim 1$ Fuerte

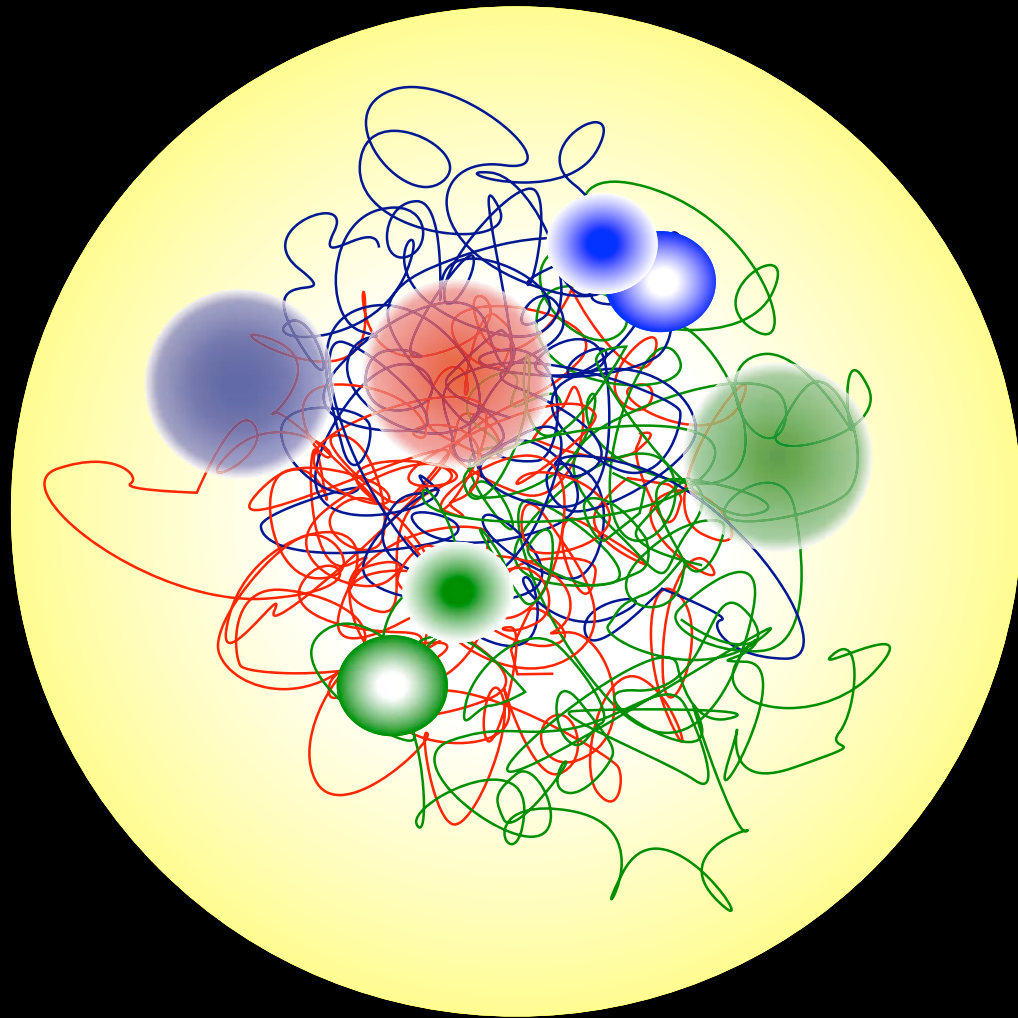
$$\frac{1}{1 + 1} = 0.5 = \underbrace{1 - 1}_{0} + \underbrace{1 - 1}_{1} + \underbrace{1 - 1}_{0} + \underbrace{1 - 1}_{1} \dots$$

The diagram illustrates the expansion of the fraction $\frac{1}{1+1}$ as an alternating series. The denominator's second '1' is circled in blue and labeled 'Grande' with a blue arrow. The series is shown as $1 - 1 + 1 - 1 + 1 - 1 + 1 - 1 + \dots$. Brackets are drawn under the series to show that the first two terms sum to 0, the next two terms sum to 1, the following two terms sum to 0, and the final two terms sum to 1.

PROTÓN



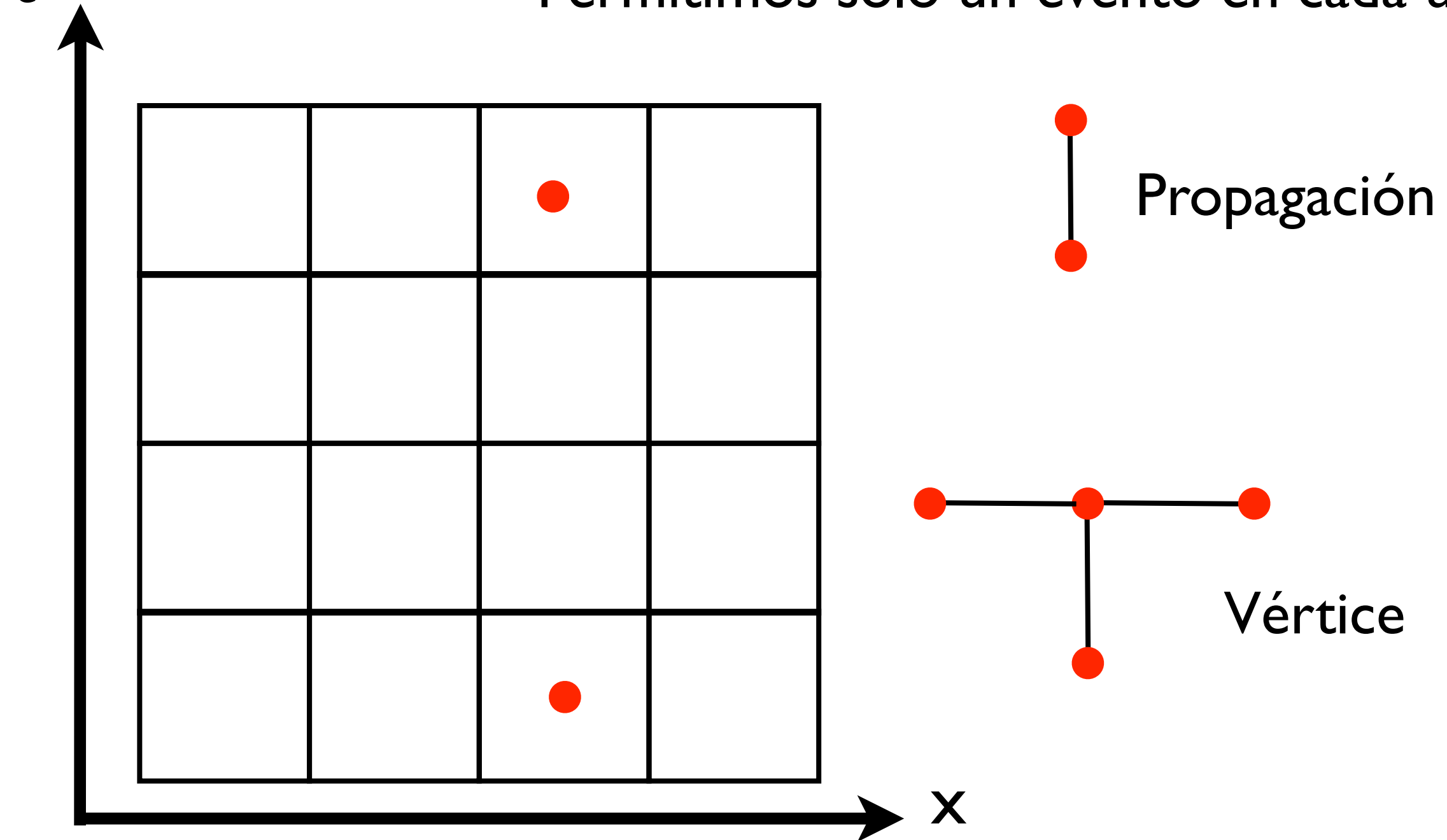
PROTÓN



Buscar otra forma de calcular la suma sobre historias

Dividir el espacio-tiempo en celdillas

Permitimos sólo un evento en cada una

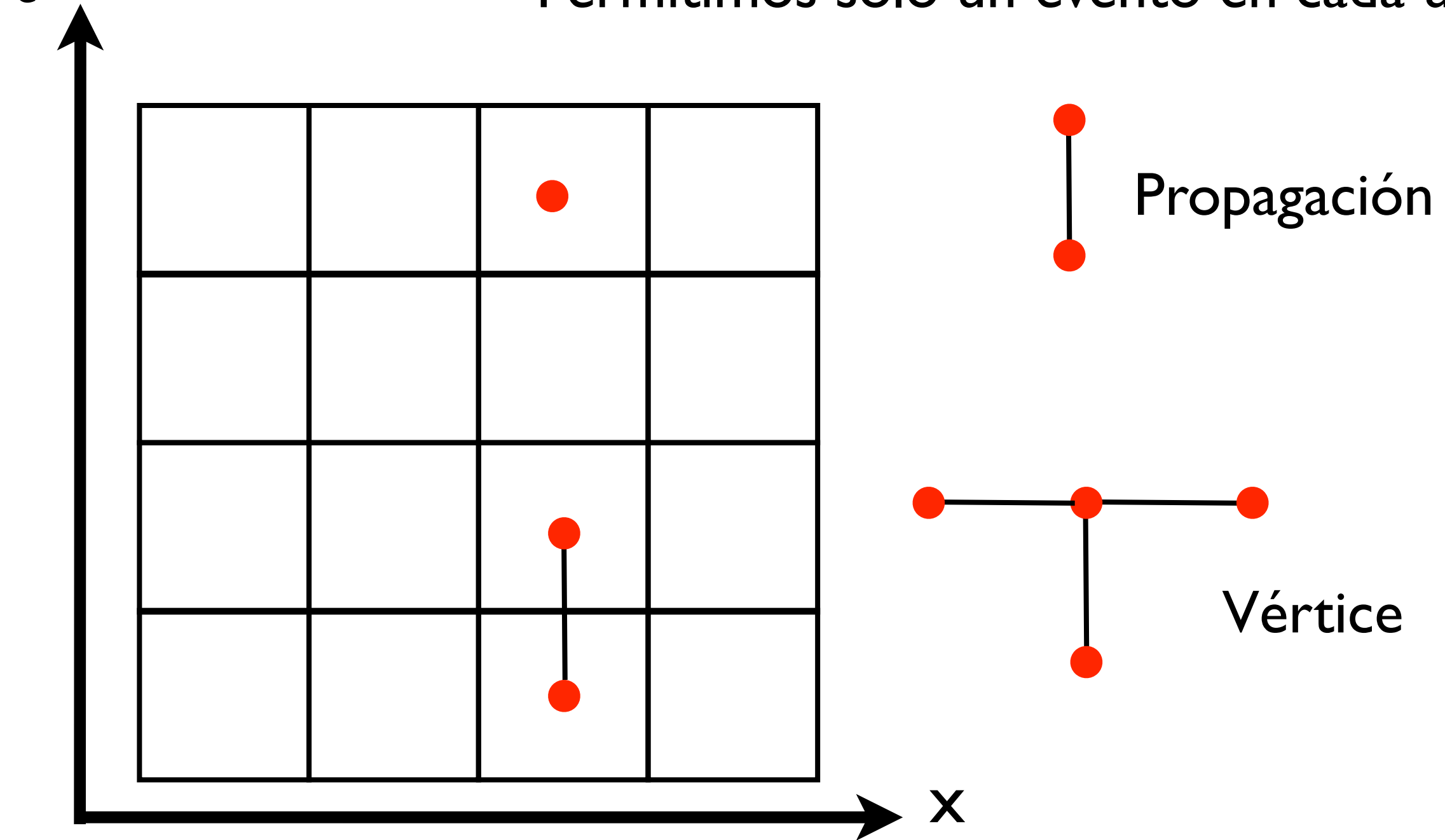


Evaluar estadísticamente las posibilidades

Buscar otra forma de calcular la suma sobre historias

Dividir el espacio-tiempo en celdillas

Permitimos sólo un evento en cada una

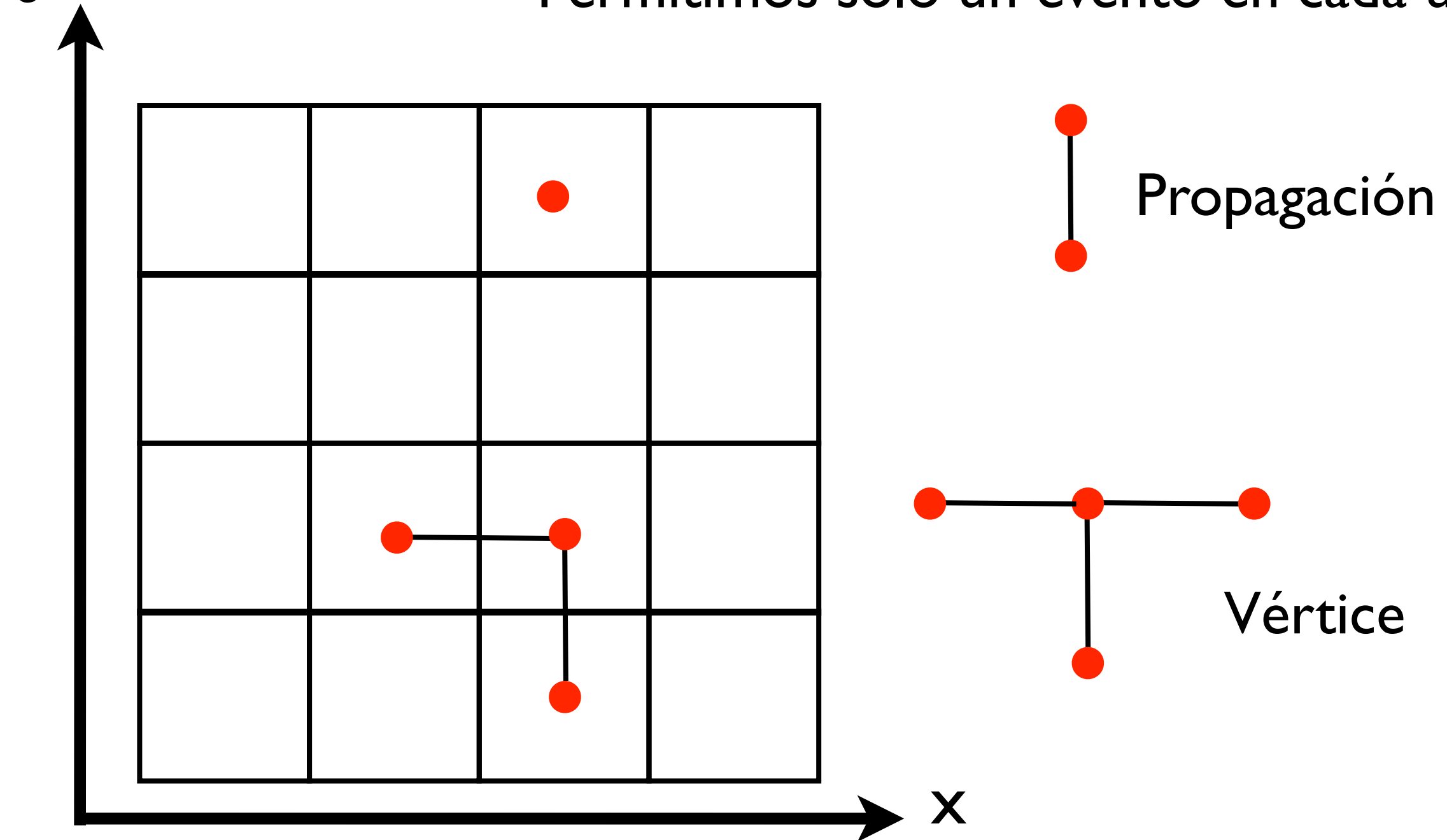


Evaluar estadísticamente las posibilidades

Buscar otra forma de calcular la suma sobre historias

Dividir el espacio-tiempo en celdillas

Permitimos sólo un evento en cada una

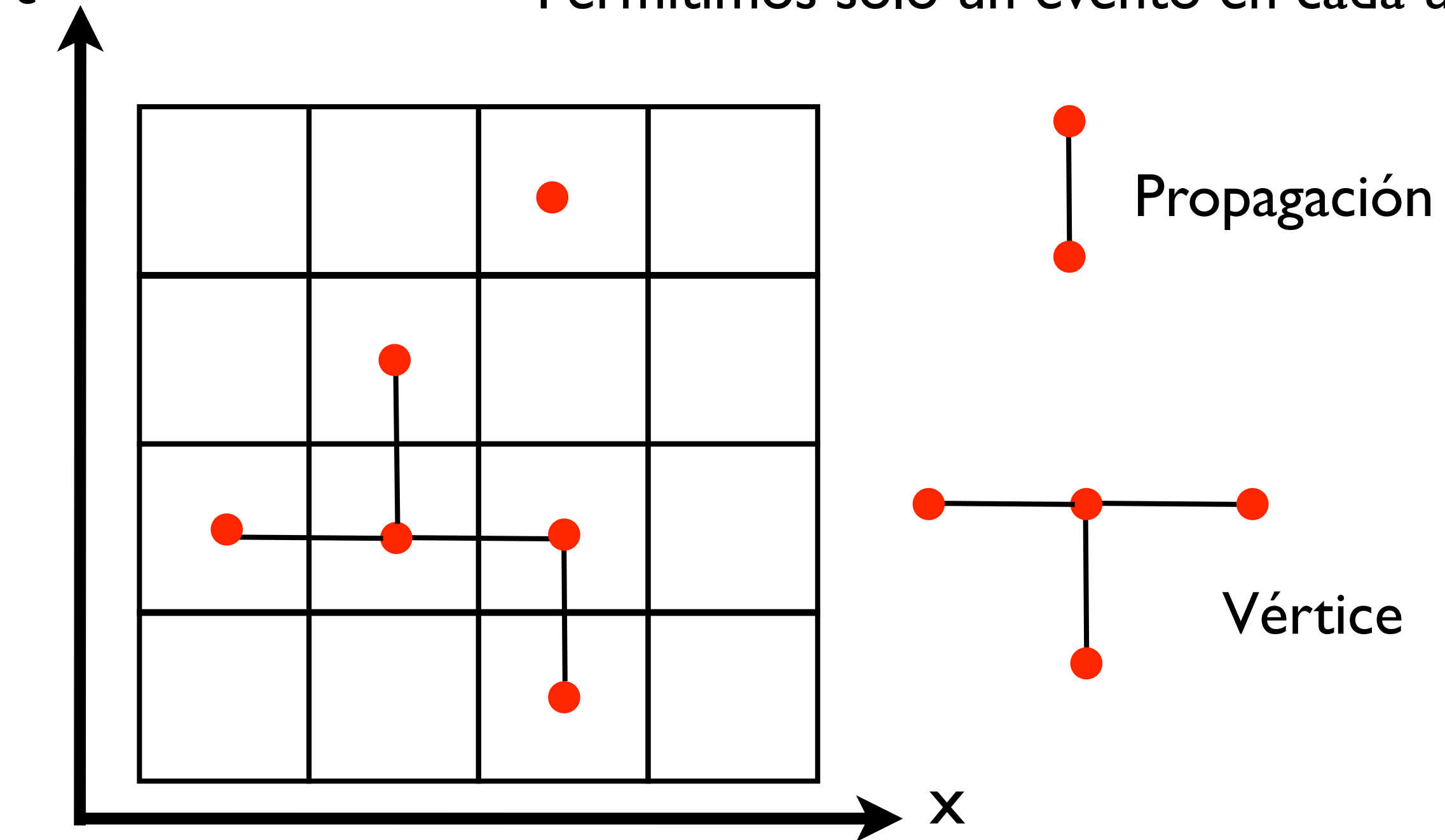


Evaluar estadísticamente las posibilidades

Buscar otra forma de calcular la suma sobre historias

Dividir el espacio-tiempo en celdillas

t Permitimos sólo un evento en cada una

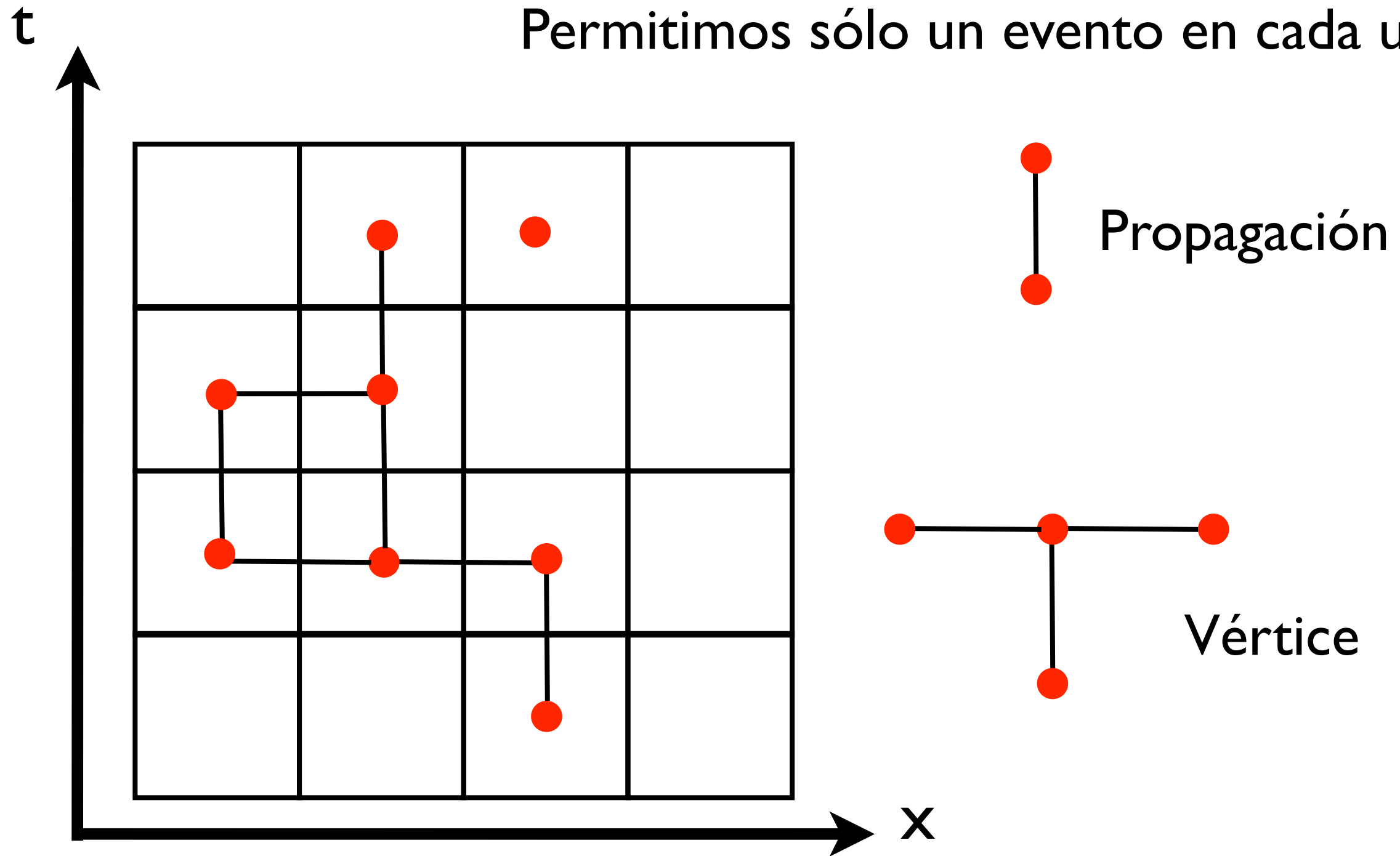


Evaluar estadísticamente las posibilidades

Buscar otra forma de calcular la suma sobre historias

Dividir el espacio-tiempo en celdillas

Permitimos sólo un evento en cada una

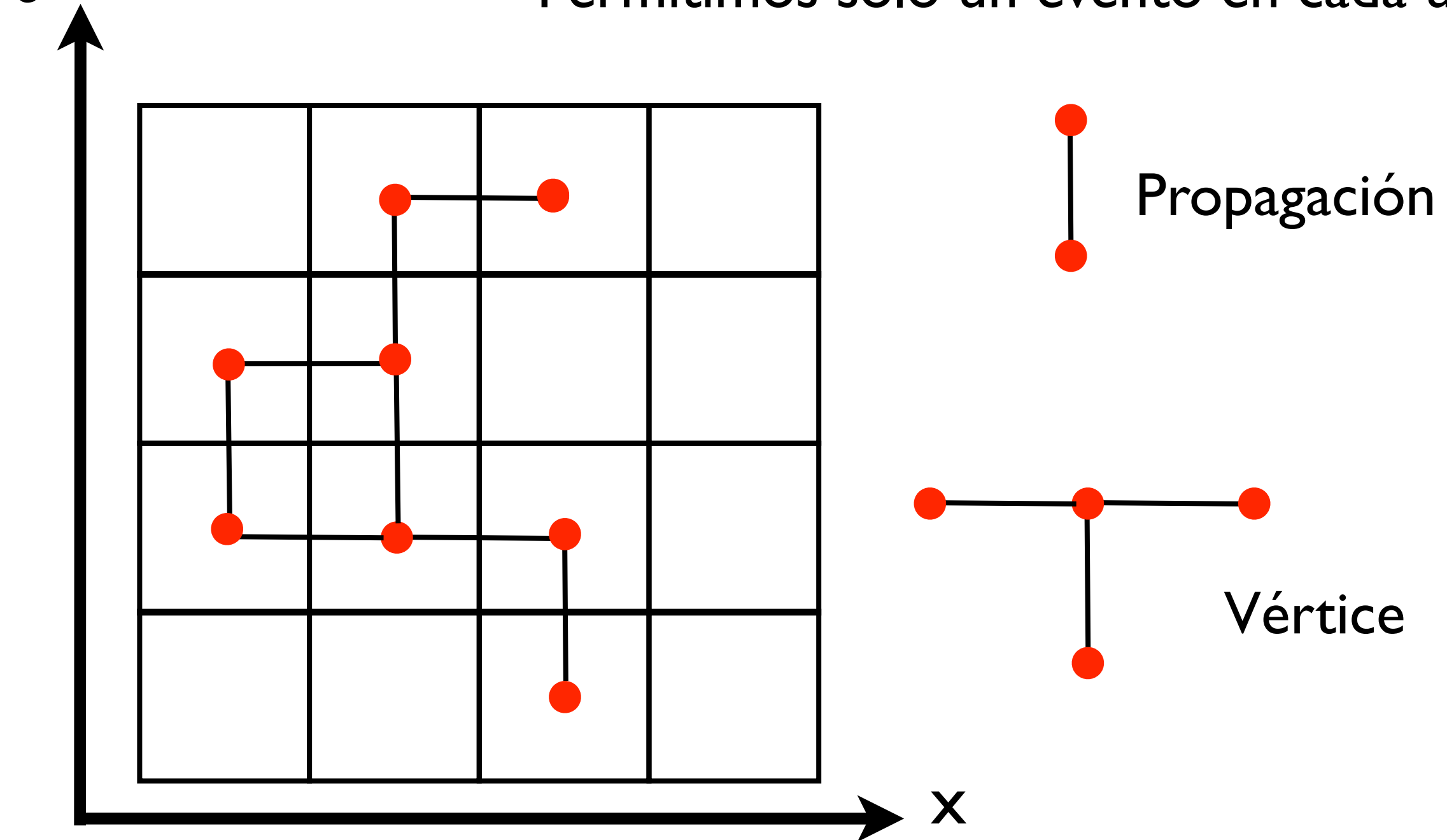


Evaluar estadísticamente las posibilidades

Buscar otra forma de calcular la suma sobre historias

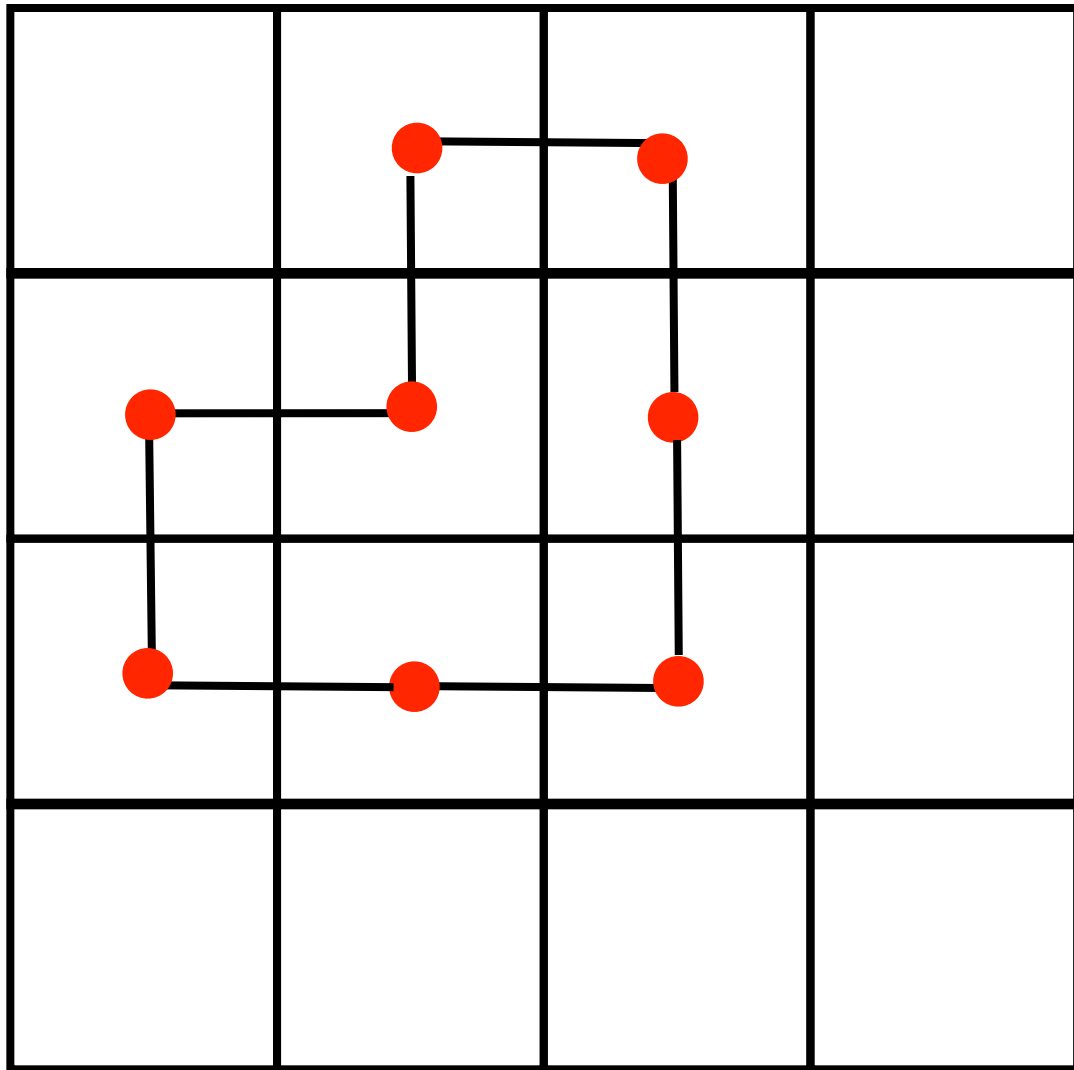
Dividir el espacio-tiempo en celdillas

Permitimos sólo un evento en cada una



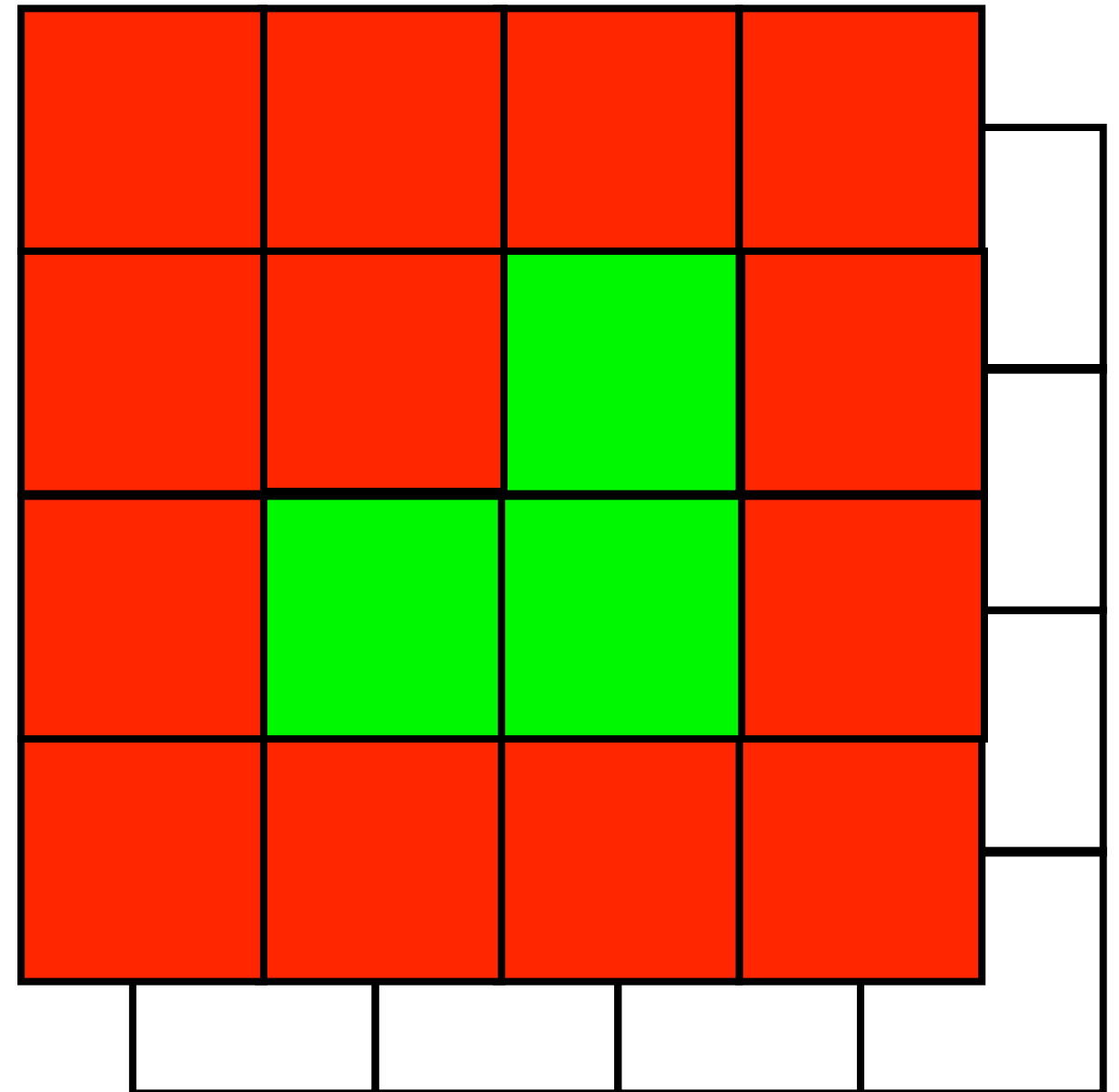
Evaluar estadísticamente las posibilidades

Ejemplo

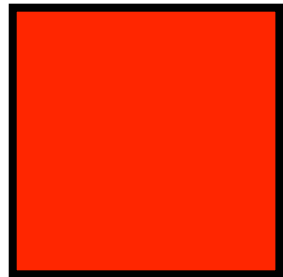
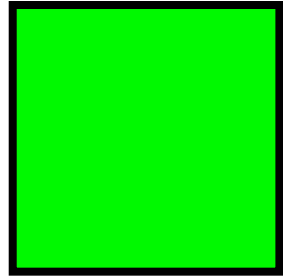


A = Suma a todos los poligonos posibles

A = Suma a todos los coloreados posibles



Tenemos dos posibles formas de recubrir las celdillas



Lanzar una moneda para decidir

Casos más complejos



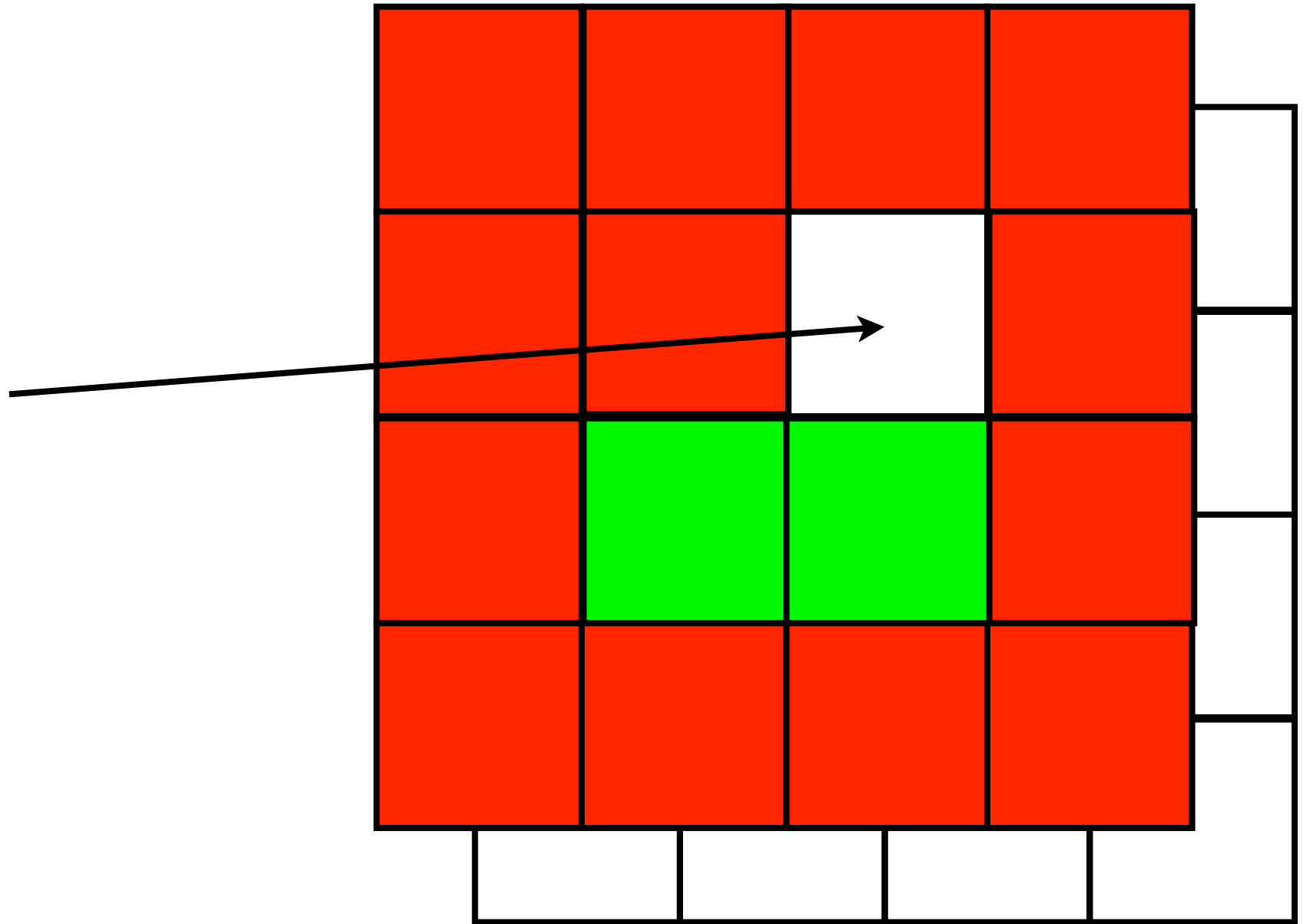
6 posibles recubrimientos de la celda

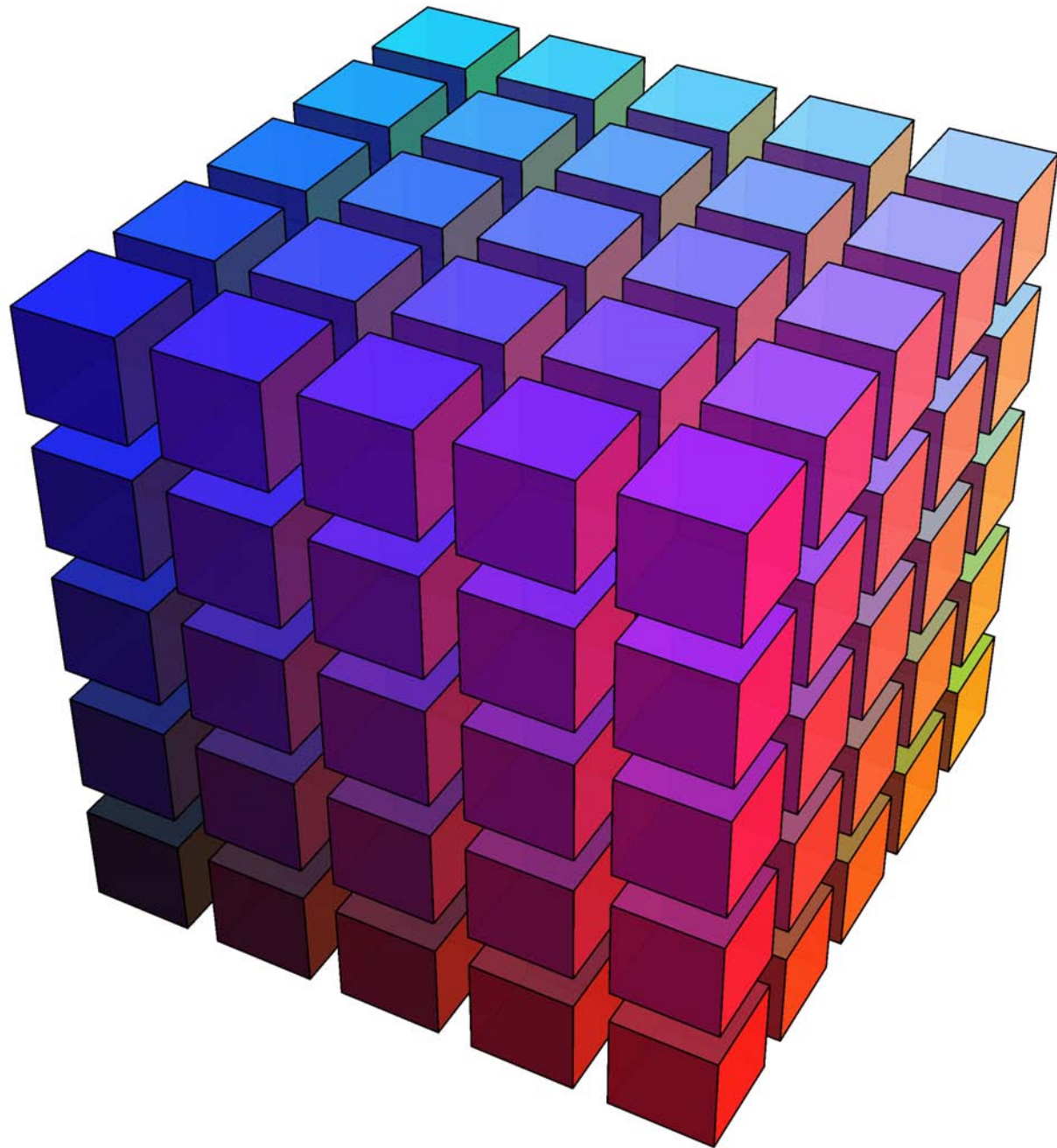




Monedas trucadas que conocen lo que ocurre en los vecinos

Los colores próximos influyen al decidir



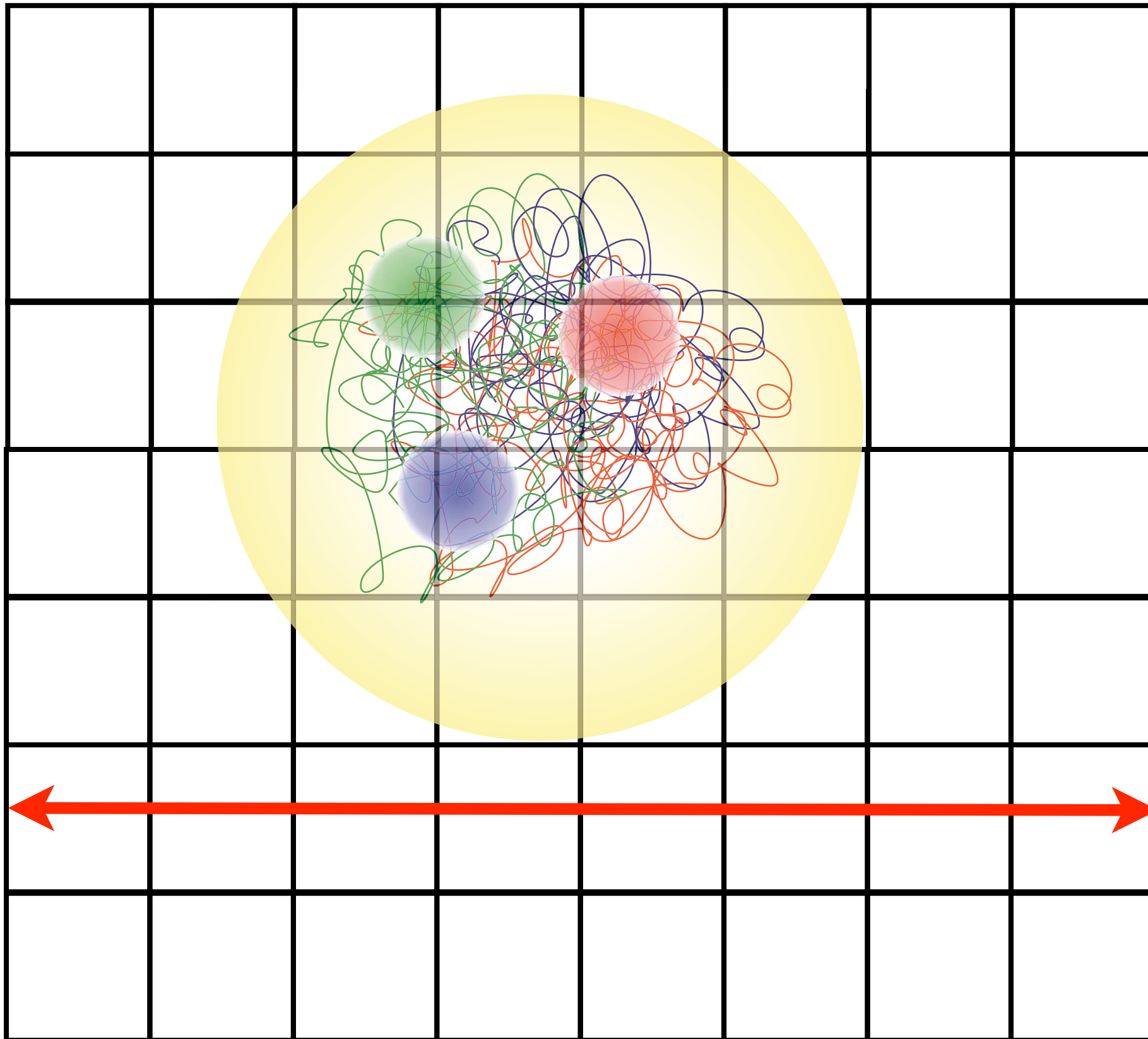


Reglas del juego

- Conjunto posible de valores
- Peso del “dado”

Condiciones

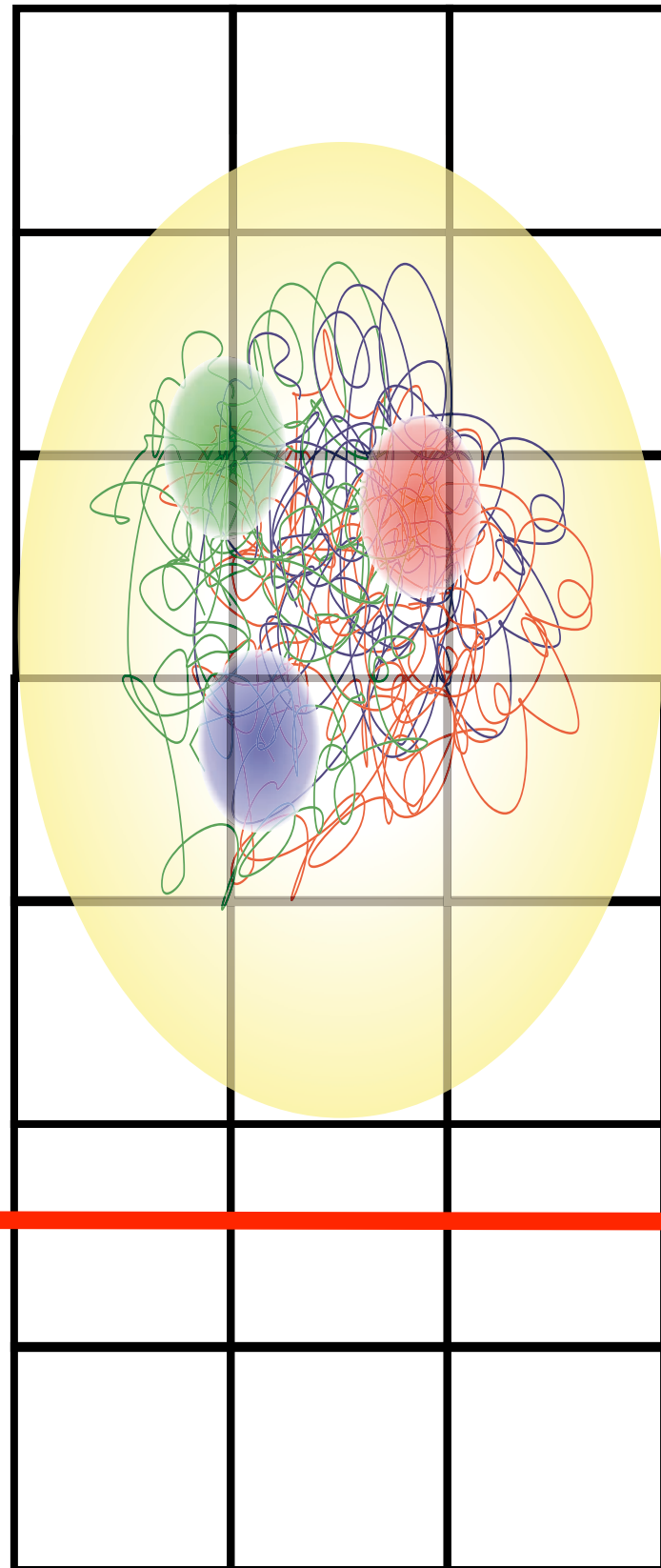
1



Tiene que
caber

Condiciones

1



Tiene que
caber

Condiciones

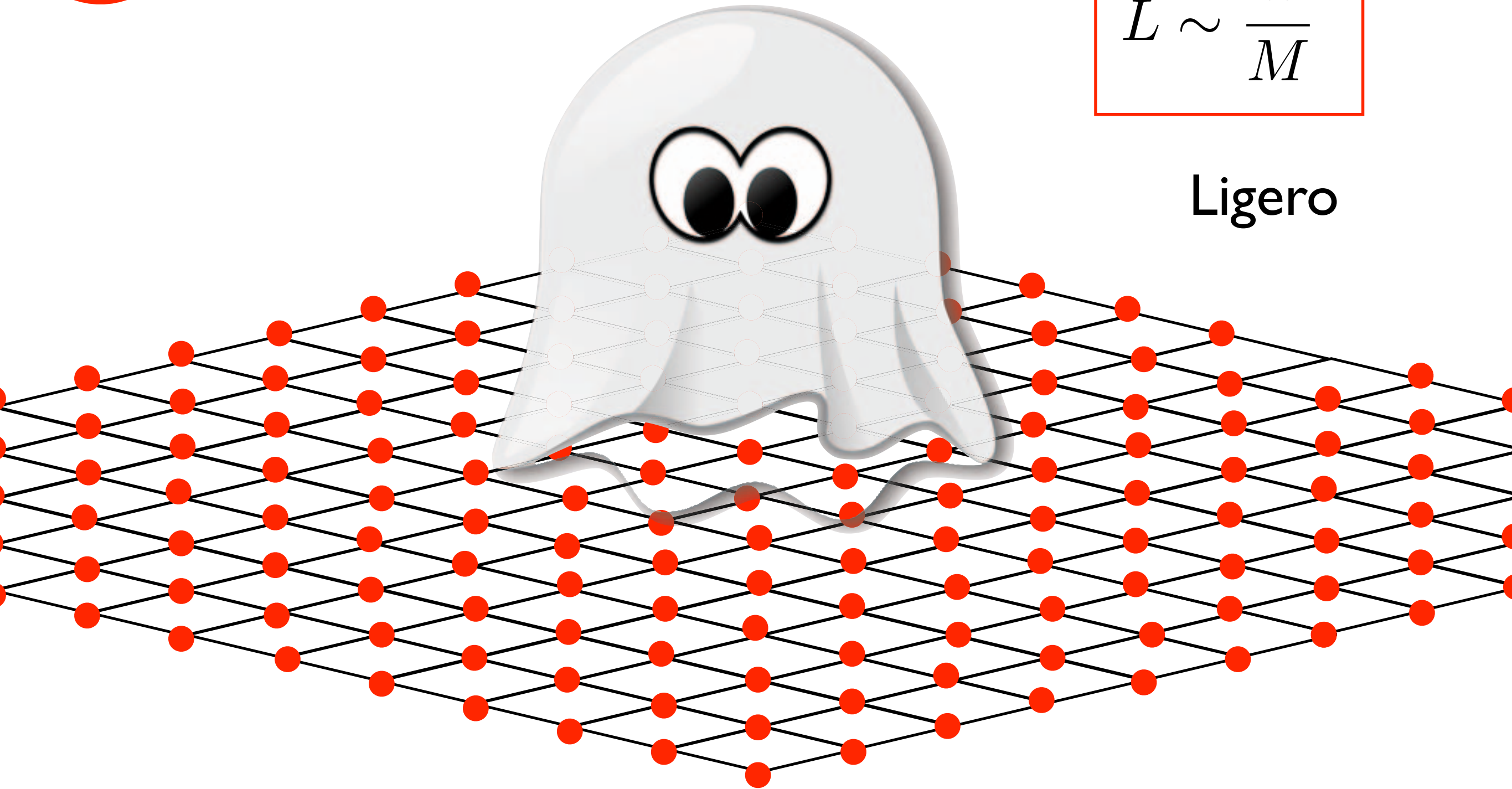
2

Tiene que ser grande comparado con la celdilla

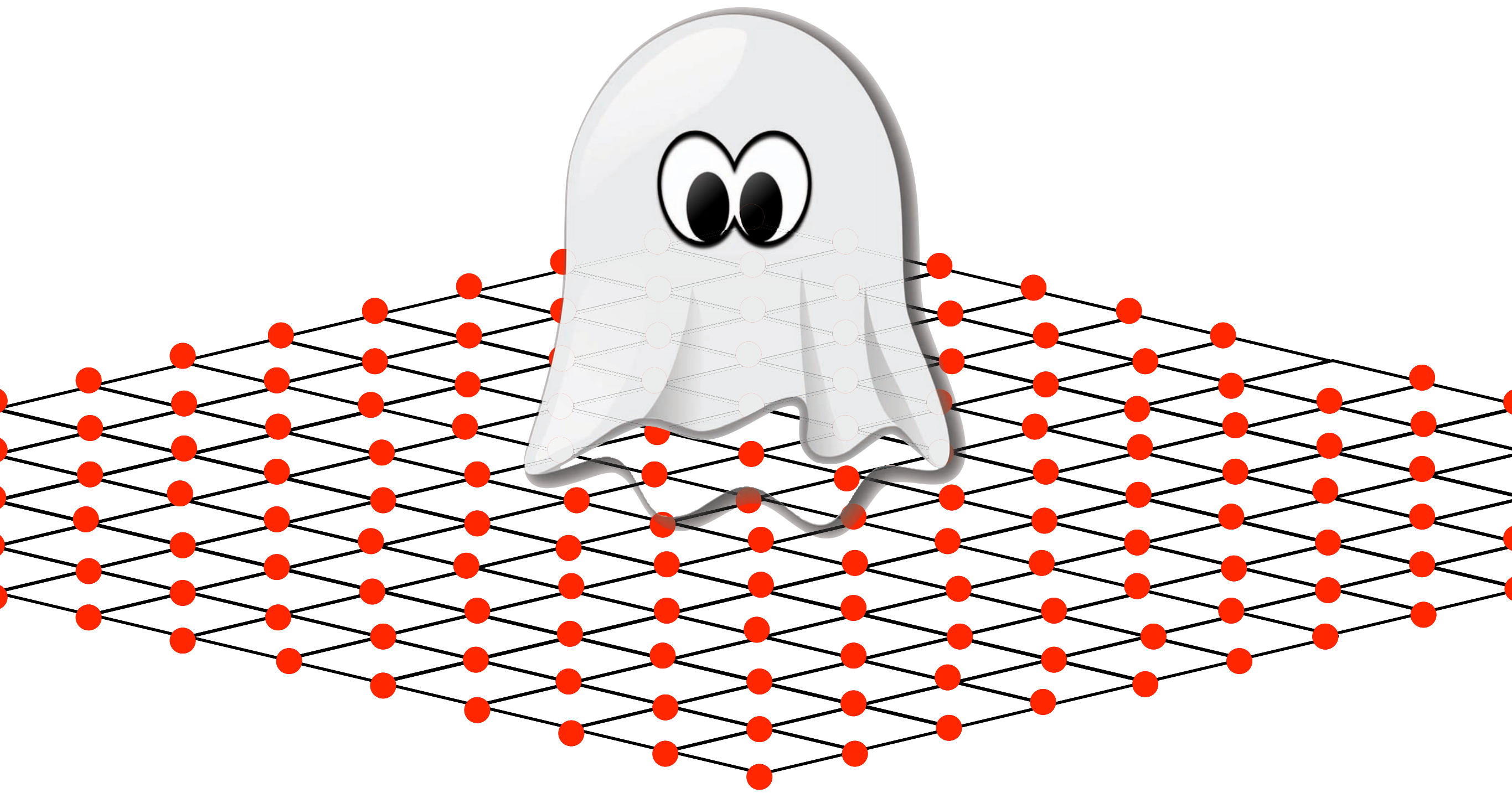


$$L \sim \frac{1}{M}$$

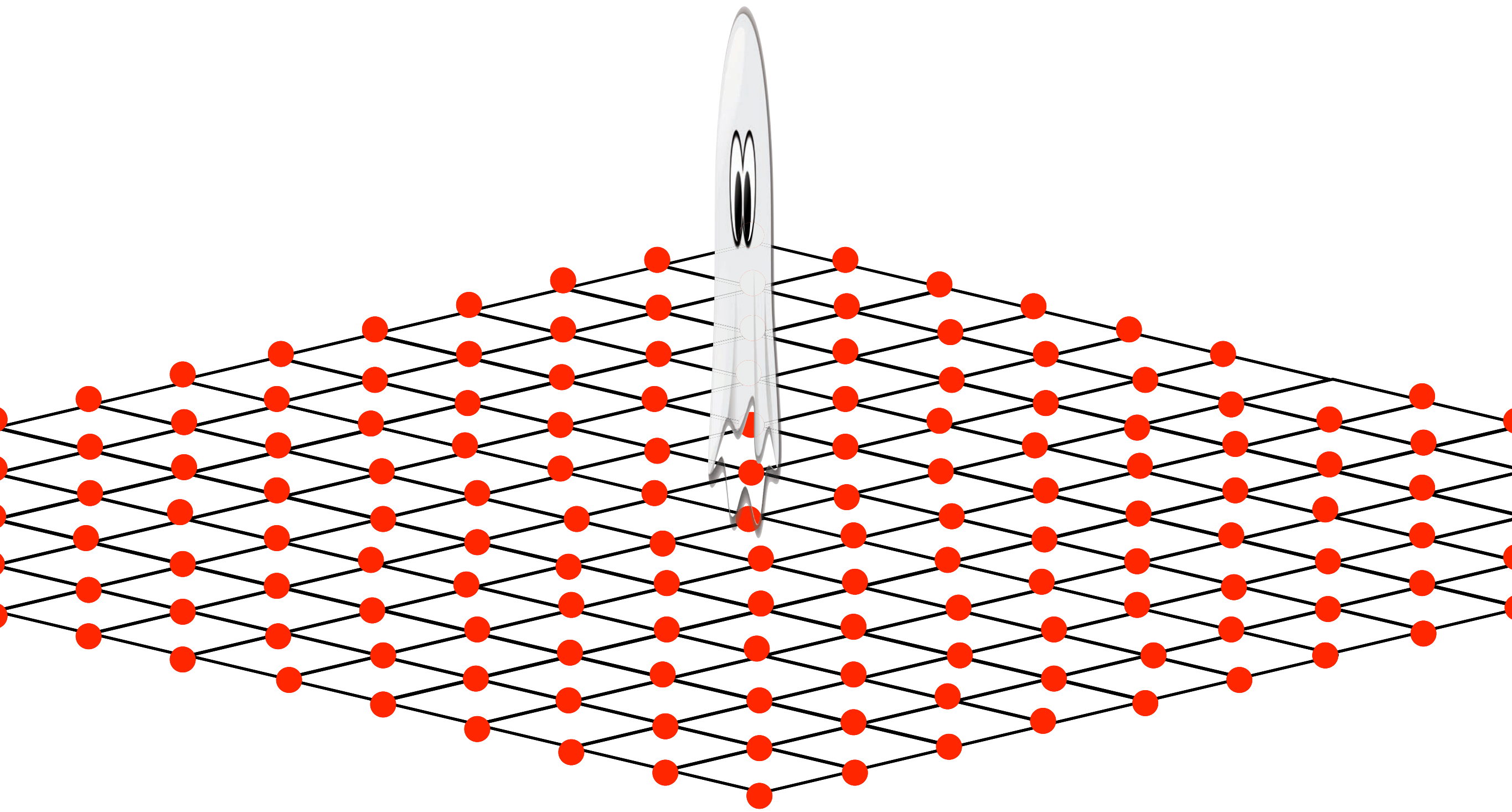
Ligero



$$L \sim \frac{1}{M}$$



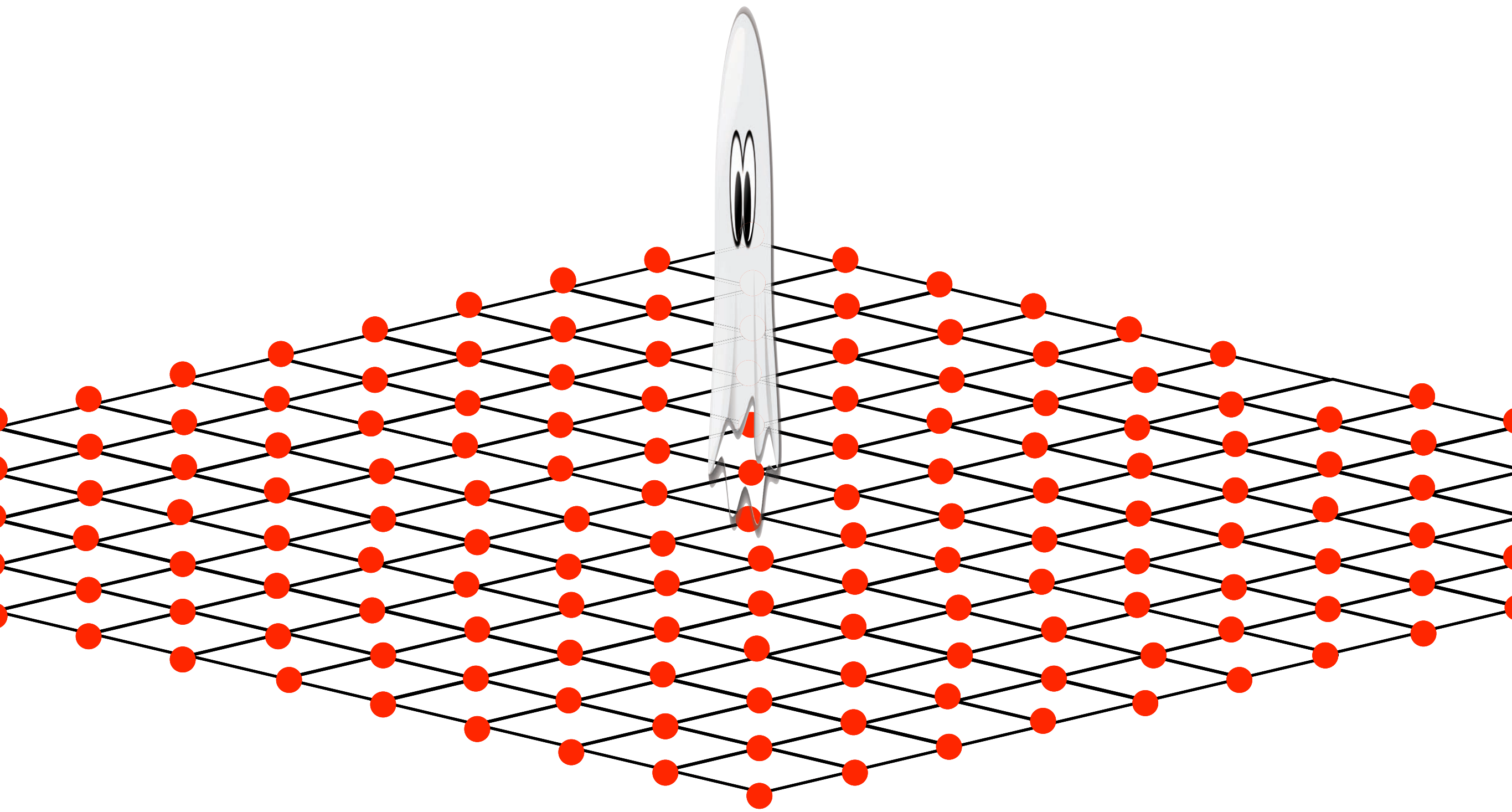
$$L \sim \frac{1}{M}$$



$$L \sim \frac{1}{M}$$

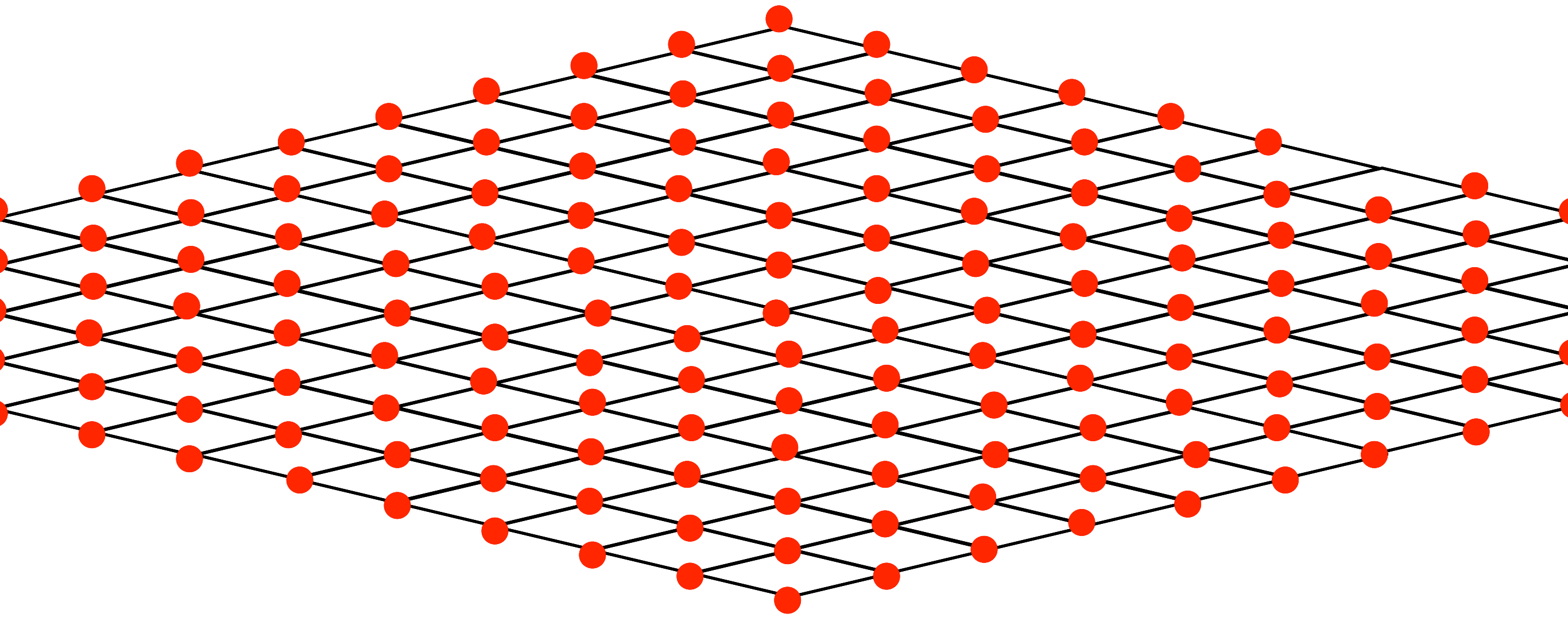


pesado



$$L \sim \frac{1}{M}$$

pesado



Retículo - Lattice QCD

$10^7 = 10.000.000$ puntos

Reglas del juego en QCD



Ken Wilson

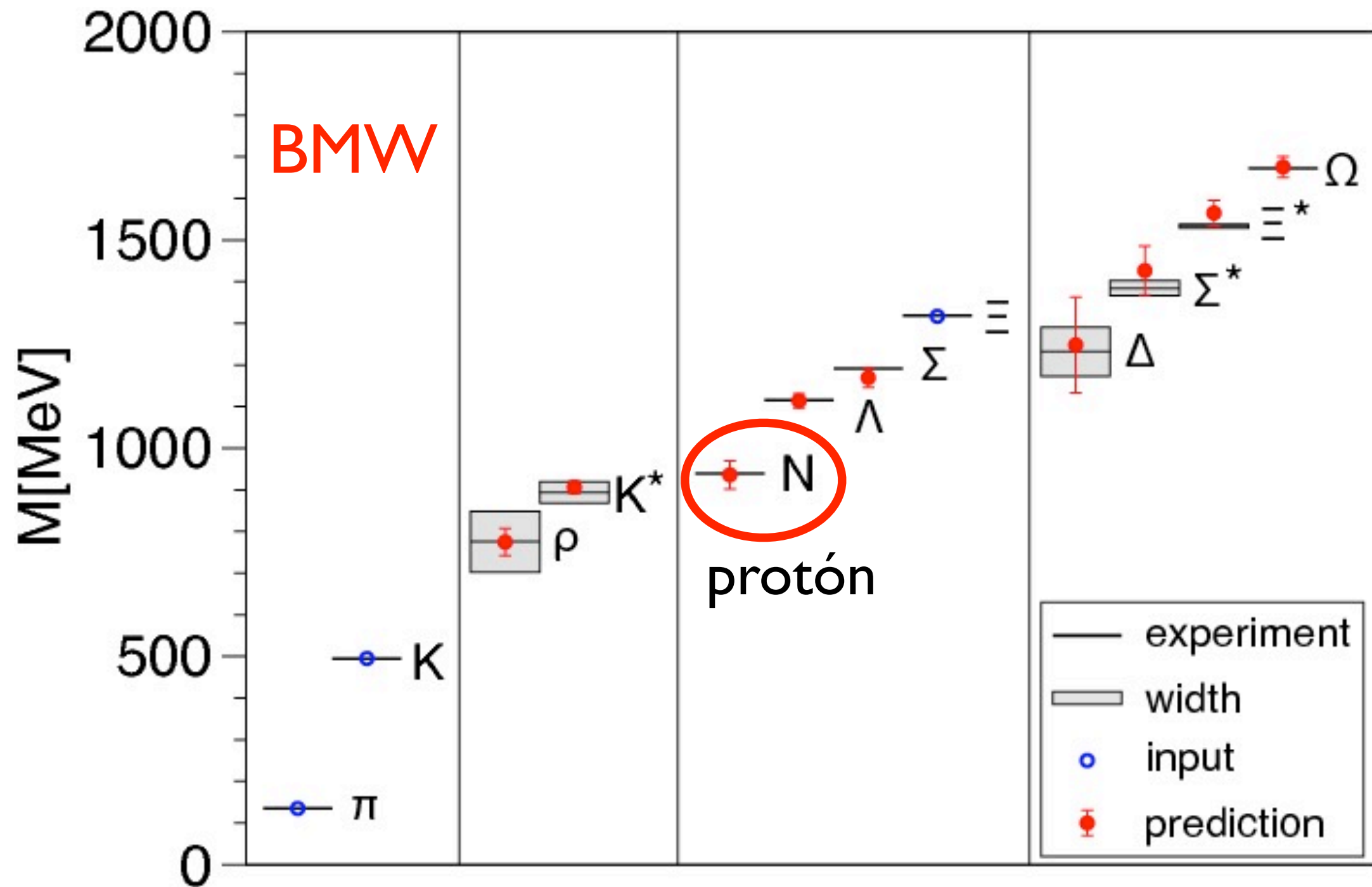
1974

Superordenadores



Copyright 2005. Barcelona Supercomputing Center - BSC

Masas generadas por la interacción fuerte





The End

Image credit - D.T.Waller