

# RELATIVITÀ SPECIALE E MECCANICA QUANTISTICA

Roberto Franceschini - 9 Marzo 2022  
Masterclass 2022 in Fisica delle Particelle Elementari



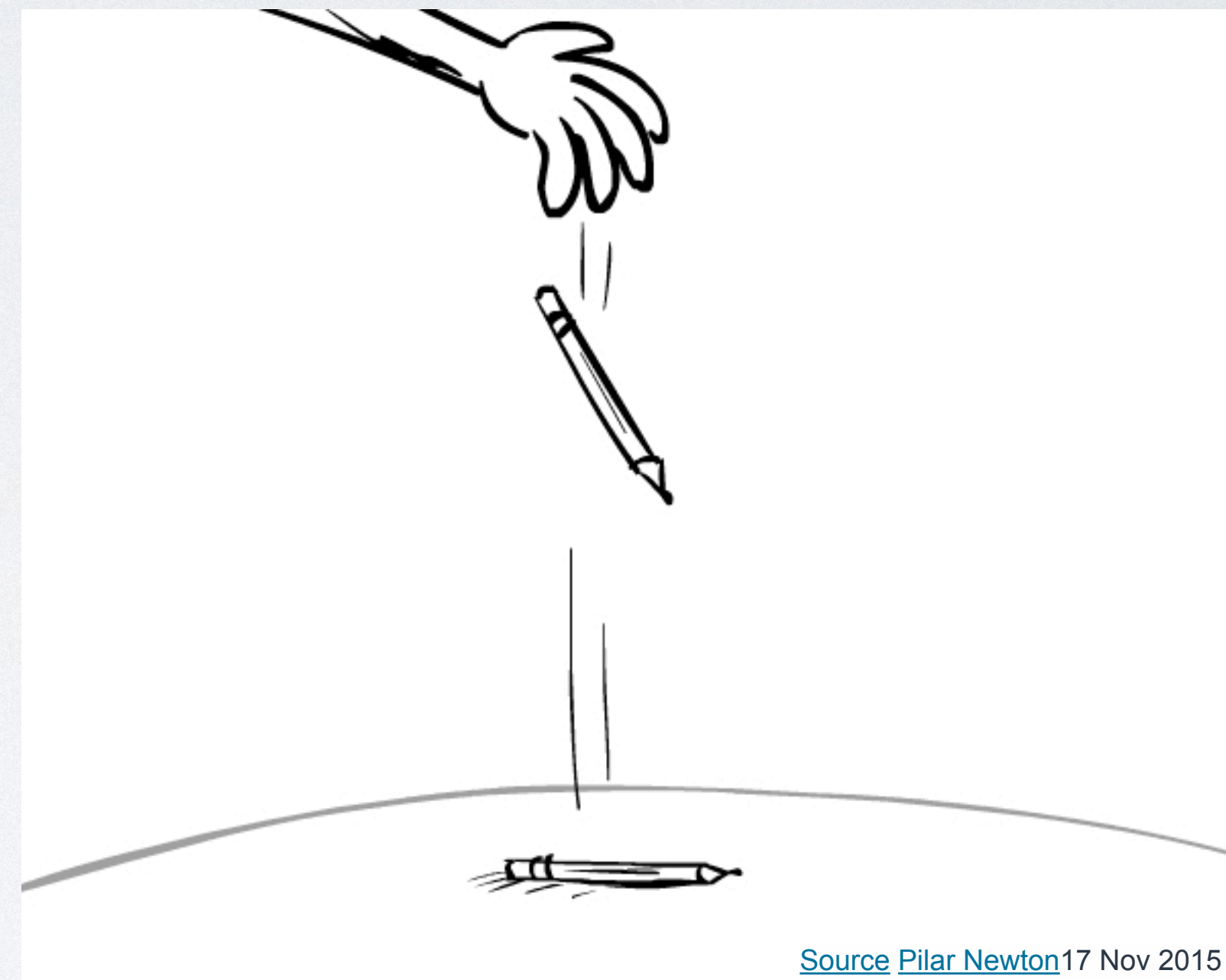


# RELATIVITÀ SPECIALE



# CADUTA DI UN CORPO

Se lasciamo cadere un oggetto dalle nostre mani, ci aspettiamo di vederlo cadere in linea retta davanti a noi

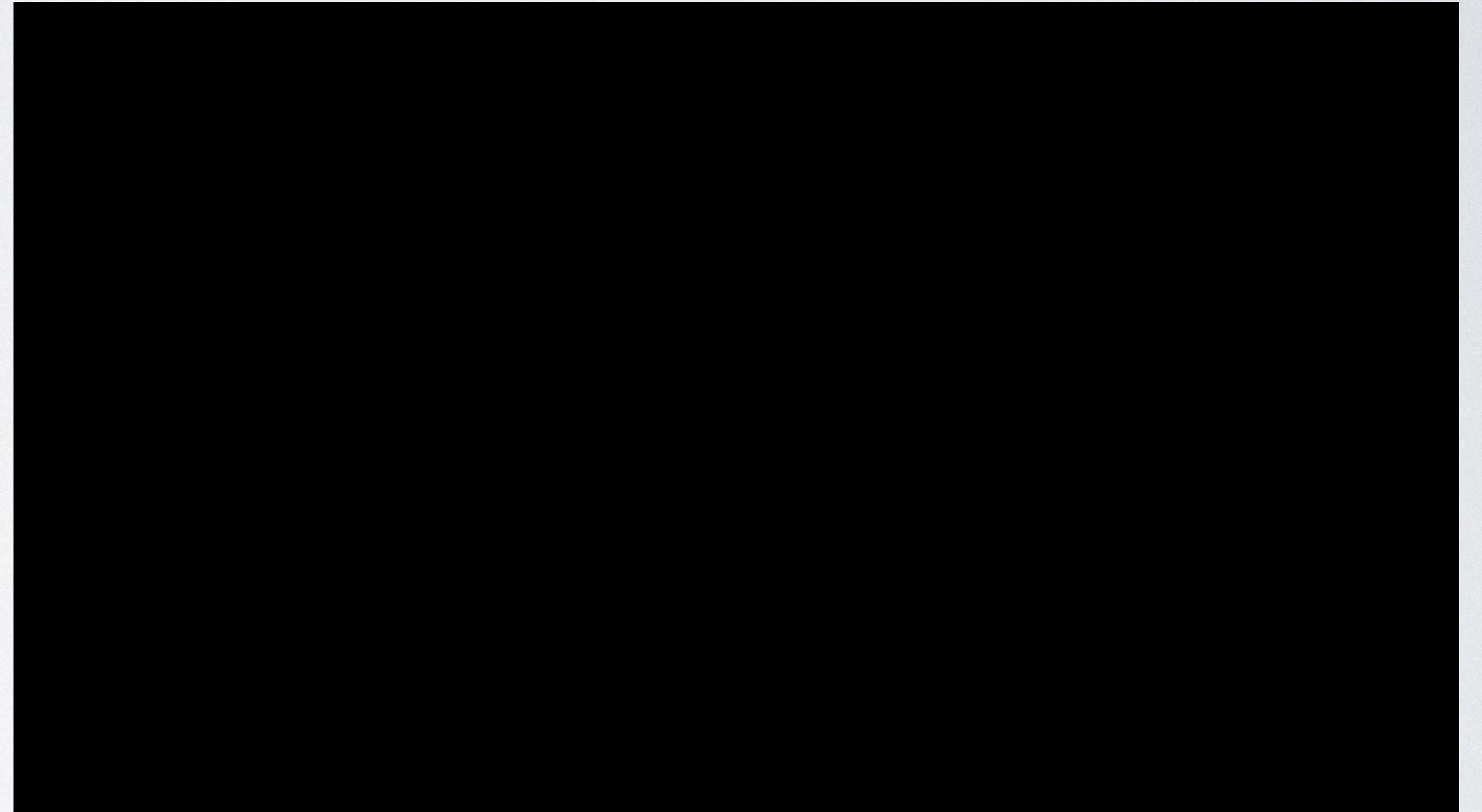




# CADUTA DI UN CORPO

Se lasciamo cadere un oggetto dalle nostre mani, ci aspettiamo di vederlo cadere in linea retta davanti a noi

Questo è vero anche se ci stiamo muovendo ...



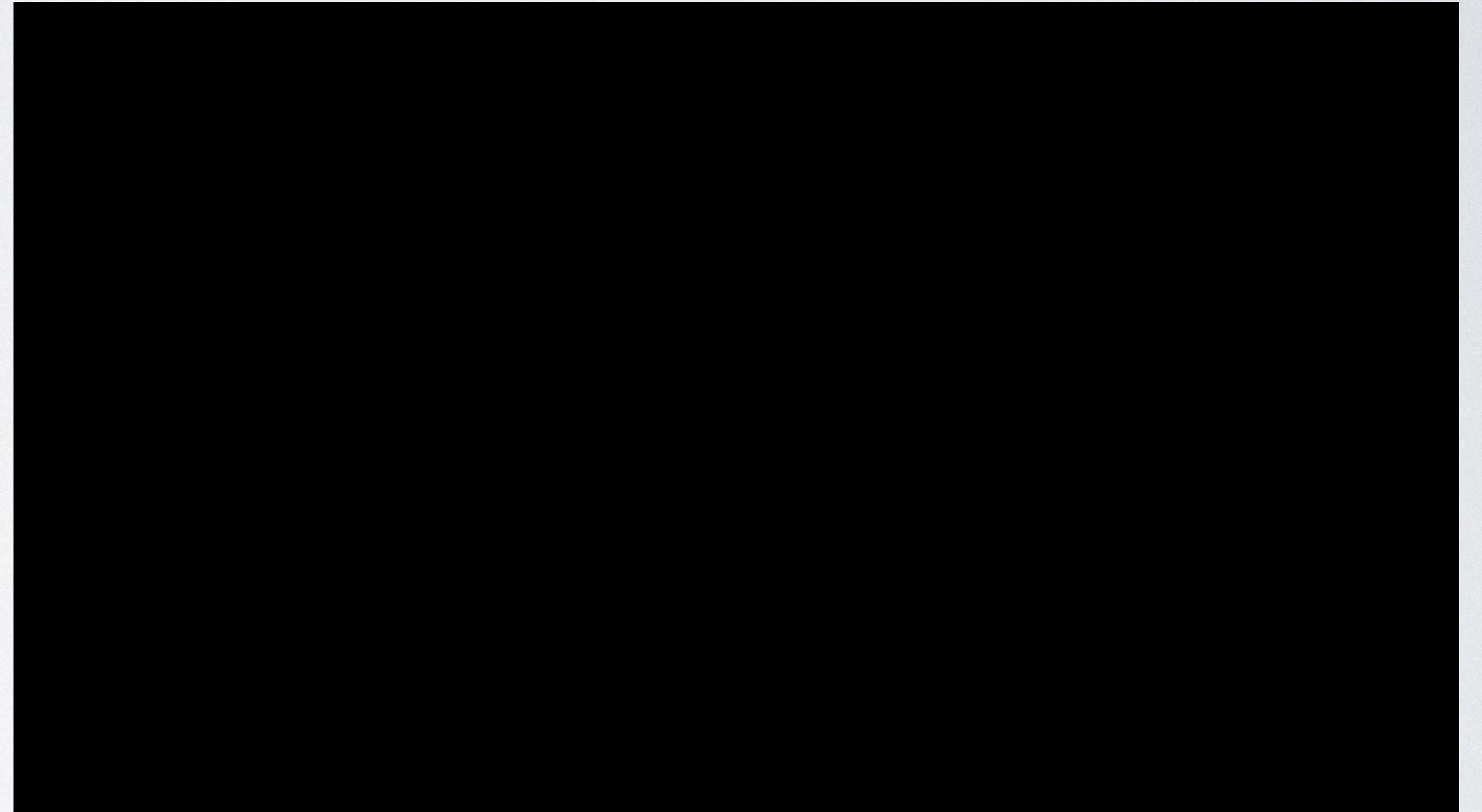
<https://www.youtube.com/watch?v=Fftar0rLi7Q>



# CADUTA DI UN CORPO

Se lasciamo cadere un oggetto dalle nostre mani, ci aspettiamo di vederlo cadere in linea retta davanti a noi

Questo è vero anche se ci stiamo muovendo ...



<https://www.youtube.com/watch?v=Fftar0rLi7Q>



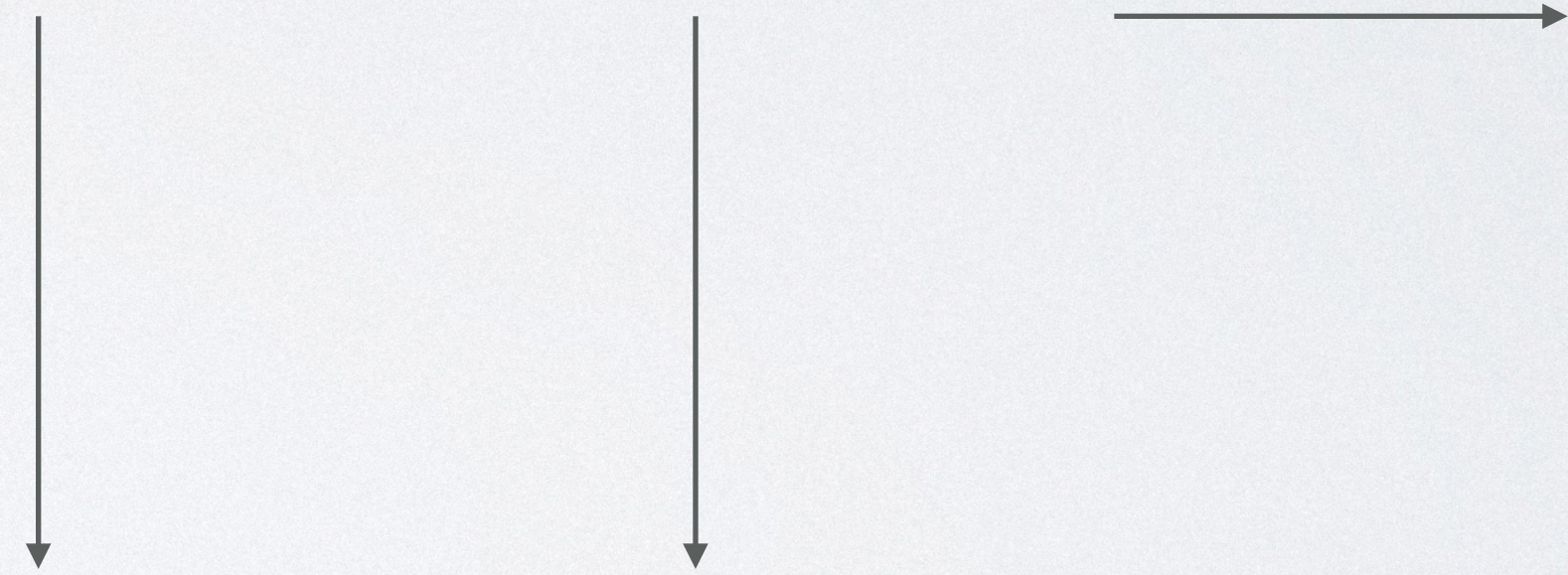
# CADUTA DI UN CORPO

Se lasciamo cadere un oggetto dalle nostre mani, ci aspettiamo di vederlo cadere in linea retta davanti a noi

Questo è vero anche se ci stiamo muovendo ...

Relatività di Galilei

$$x_{\text{fermo}}(t) = x_{\text{automobile}}(t) + V_{\text{automobile}} \cdot t$$



Composizione delle velocità



# CADUTA DI UN CORPO

Se lasciamo cadere un oggetto dalle nostre mani, ci aspettiamo di vederlo cadere in linea retta davanti a noi

Questo è vero anche se ci stiamo muovendo ...

Relatività di Galilei

$$x_{\text{fermo}}(t) = x_{\text{automobile}}(t) + V_{\text{automobile}} \cdot t$$



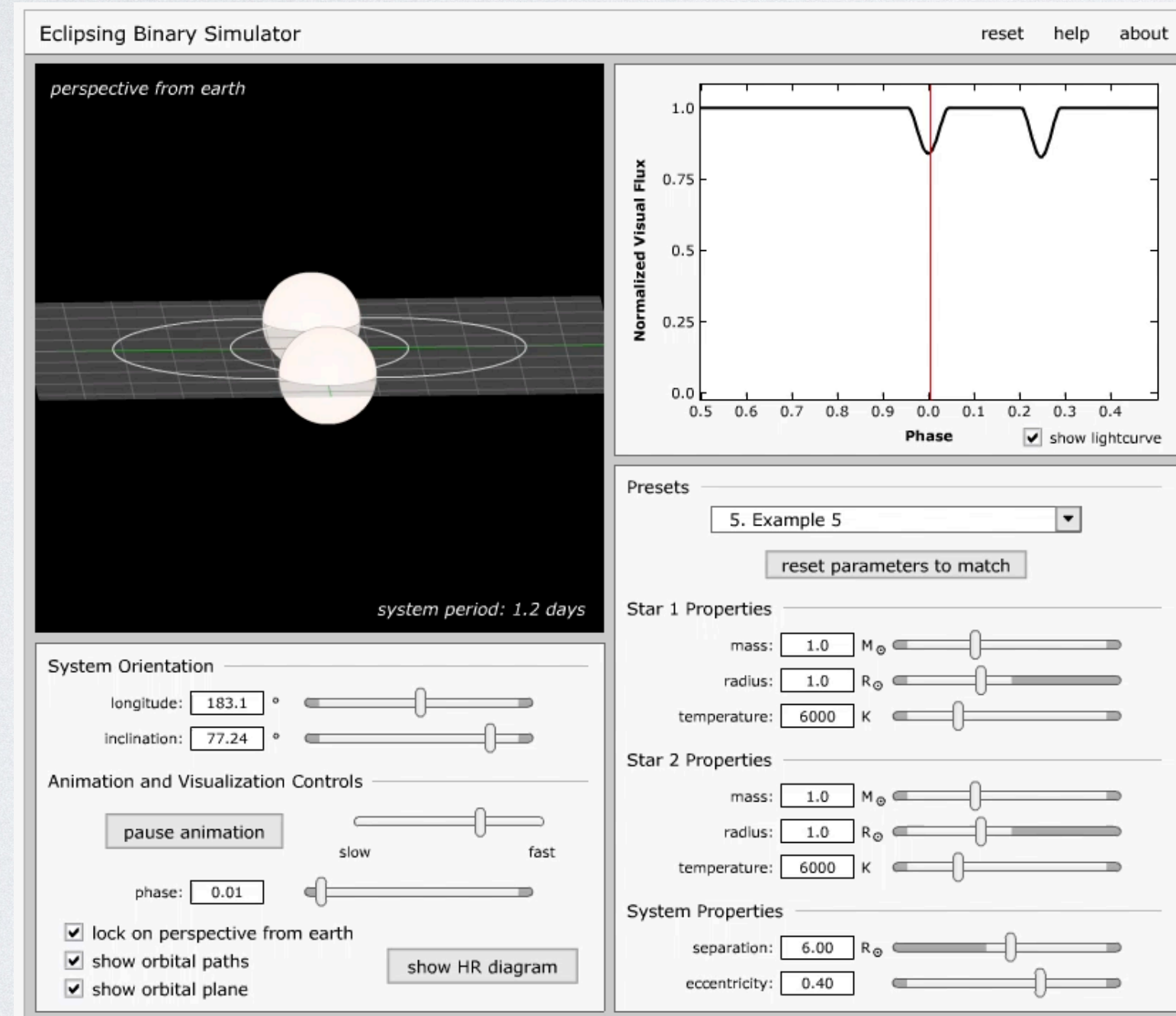
Composizione delle velocità

$$V_{\text{fermo}} = V_{\text{automobile}} + V_{\text{automobile}}$$



# LA VELOCITÀ DELLA LUCE

La composizione delle velocità non vale per la luce!



<http://astro.unl.edu/naap/ebs/animations/ebs.html>

Relatività di Galilei

$$x_{\text{fermo}}(t) = x_{\text{macchina}}(t) + V_{\text{macchina}} \cdot t$$



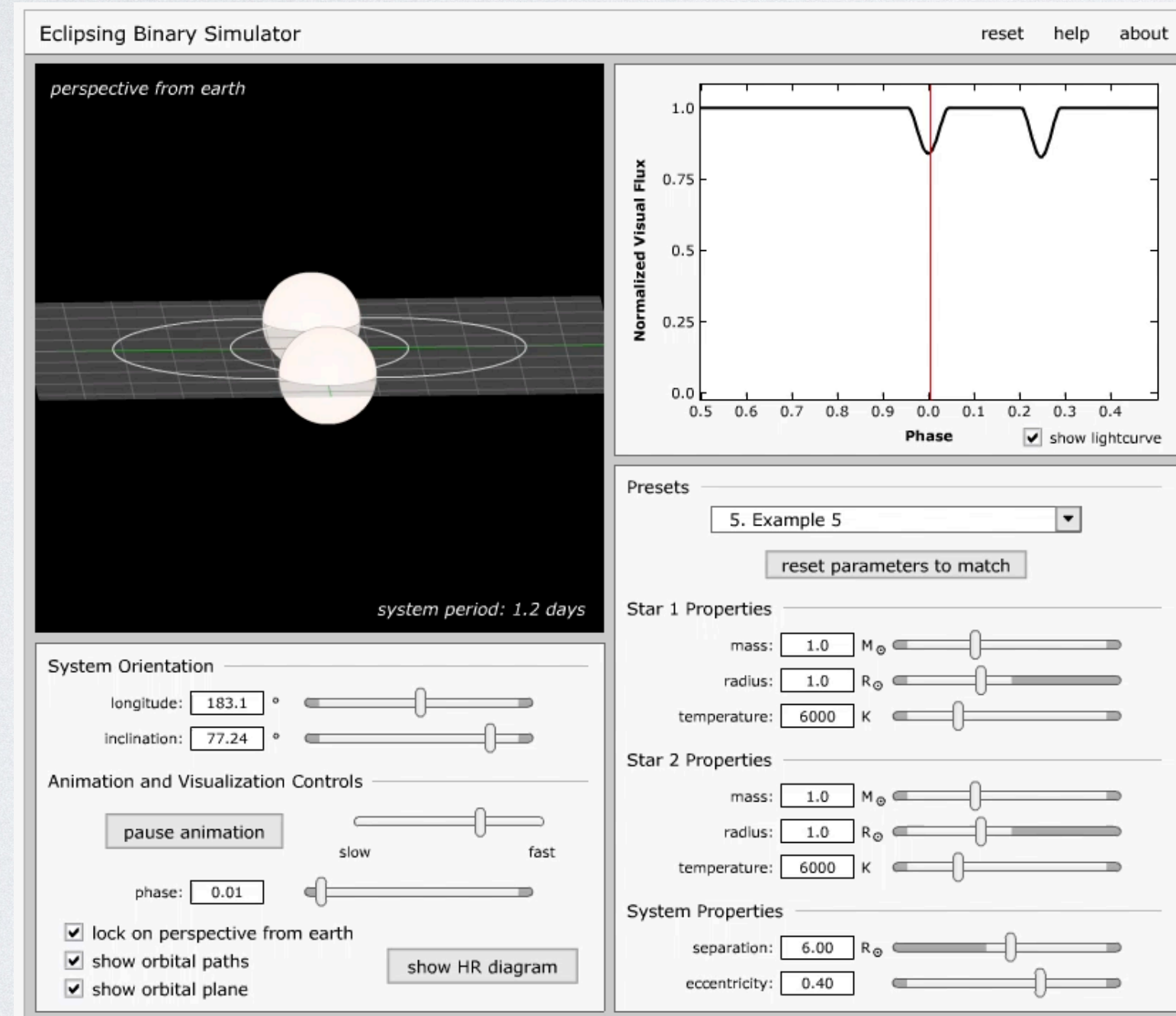
Composizione delle velocità

$$V_{\text{fermo}} = V_{\text{automobile}} + V_{\text{automobile}}$$



# LA VELOCITÀ DELLA LUCE

La composizione delle velocità non vale per la luce!



<http://astro.unl.edu/naap/ebs/animations/ebs.html>

Relatività di Galilei

$$x_{\text{fermo}}(t) = x_{\text{macchina}}(t) + V_{\text{macchina}} \cdot t$$



Composizione delle velocità

$$V_{\text{fermo}} = V_{\text{automobile}} + V_{\text{automobile}}$$



SERVE UNA NUOVA LEGGE DELLA FISICA ...



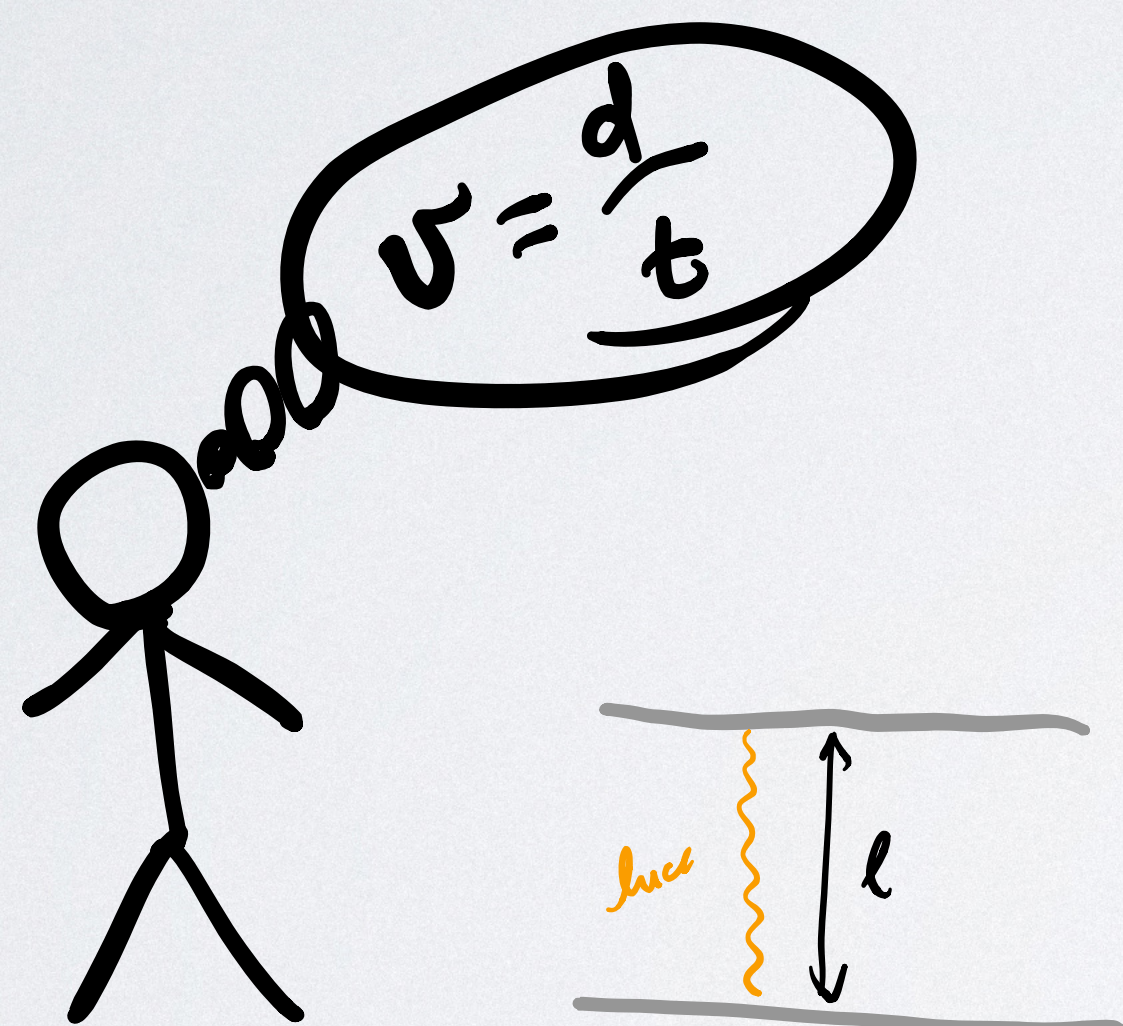
... COSTRUIAMOLA ...



# UN OROLOGIO DI LUCE E SPECCHI

$$c \approx 30 \text{ cm/ns}$$

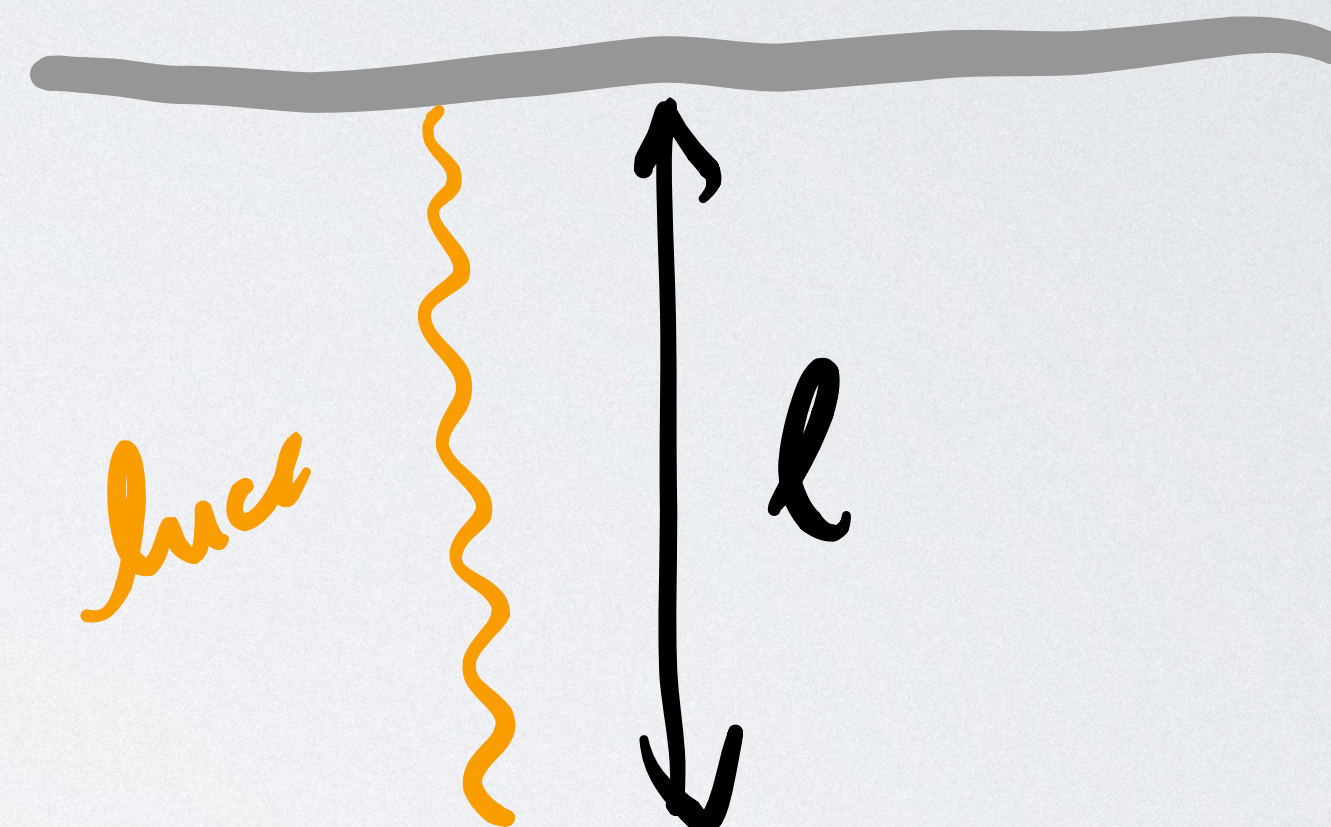
Io, fermo, vicino all'orologio, anch'esso fermo



$$\text{velocità} = \frac{\text{distanza}}{\text{tempo}}$$

$$\text{tempo} = \frac{\text{distanza}}{\text{velocità}}$$

specchia



specchia

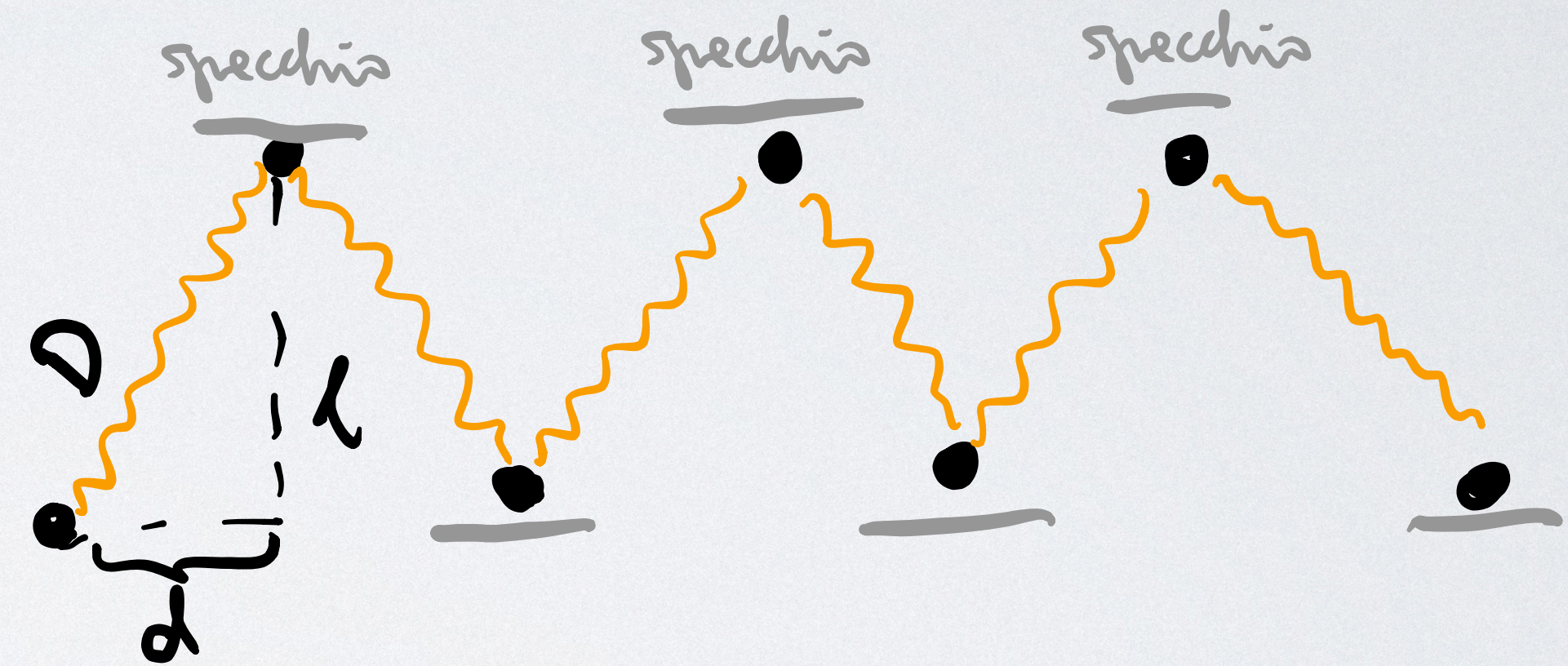
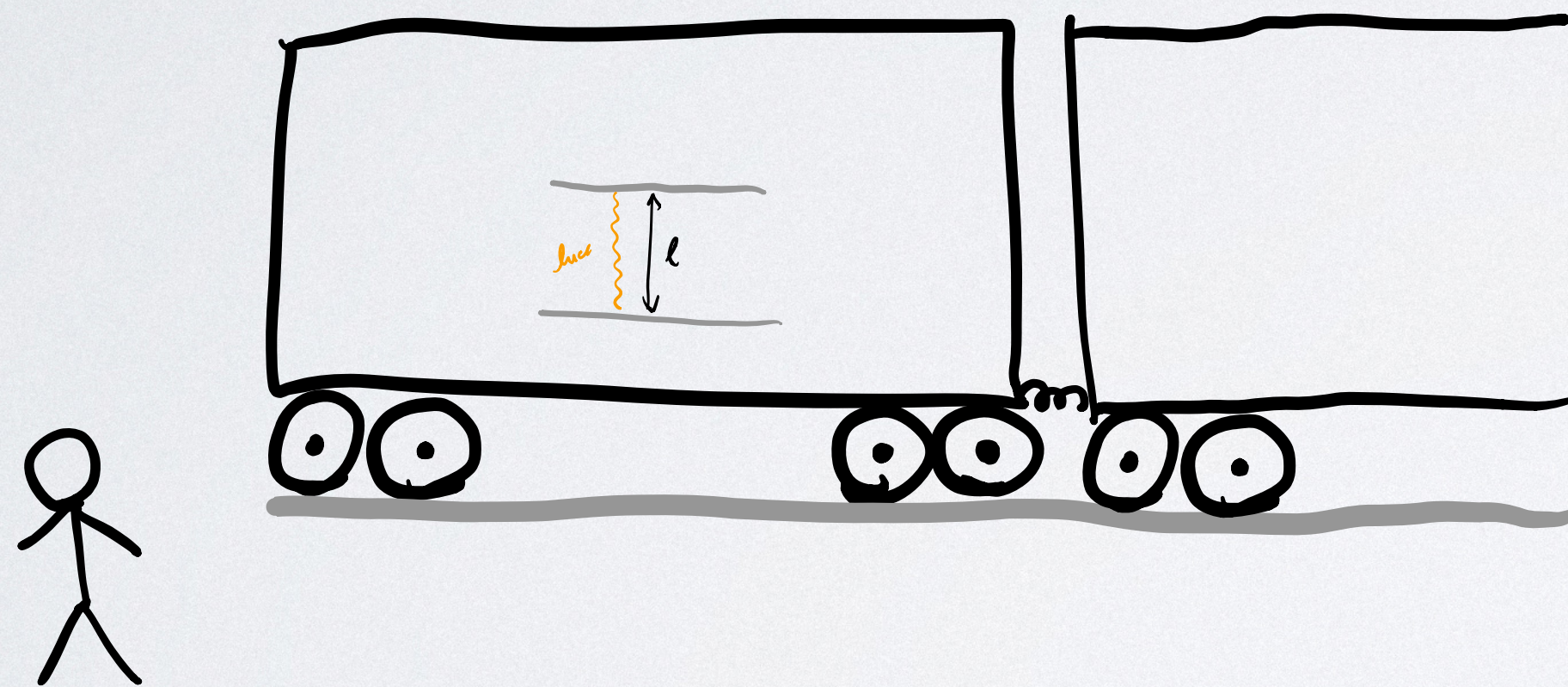
$$t_0 = 2l/c$$



# UN OROLOGIO DI LUCE E SPECCHI

$$c \approx 30 \text{ cm/ns}$$

Io fermo e l'orologio su un treno che si muove



$$D = \sqrt{l^2 + d^2}$$

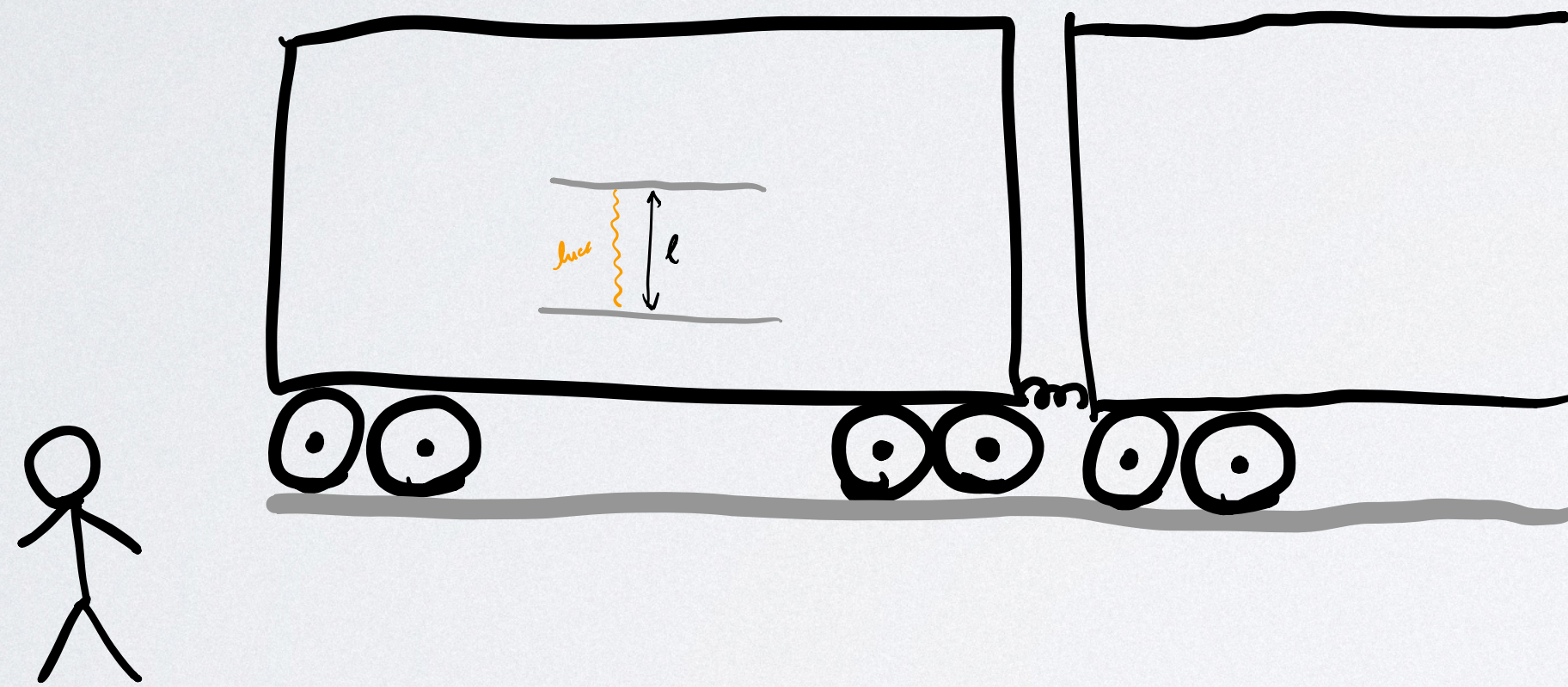
$$t = \frac{D}{c} > \frac{l}{c}$$



# UN OROLOGIO DI LUCE E SPECCHI

$$c \approx 30 \text{ cm/ns}$$

Io fermo e l'orologio su un treno che in moto



$$t^2 = \frac{l^2 + d^2}{c^2} = t_0^2 + \frac{d^2}{c^2} = t_0^2 + \left(\frac{v_{\text{treno}} t}{c}\right)^2$$

$$t_0^2 = t^2 - \frac{v_{\text{treno}}^2}{c^2} t^2$$

$$t_0 = t (1 - \beta^2)^{1/2} = t/\gamma$$

Il fattore  $\gamma$  genera la differenza tra i tempi misurati da un orologio fermo e da un orologio in moto



# UNA NUOVA COMPOSIZIONE DELLE VELOCITÀ

$$c \approx 30 \text{ cm/ns}$$

$$x_{\text{fermo}}(t) = (x_{\text{treno}}(t) + v_{\text{treno}} \cdot t) \cdot \gamma$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v_{\text{treno}}^2}{c^2}}} \quad \gamma = 1 \text{ quando } v_{\text{treno}} = 0$$

$$\beta_{\text{treno}} = \frac{v_{\text{treno}}}{c}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x' = \frac{x - \beta t c}{\sqrt{1 - \beta^2}} \\ t' = \frac{t - \beta \frac{x}{c}}{\sqrt{1 - \beta^2}} \end{array} \right.$$

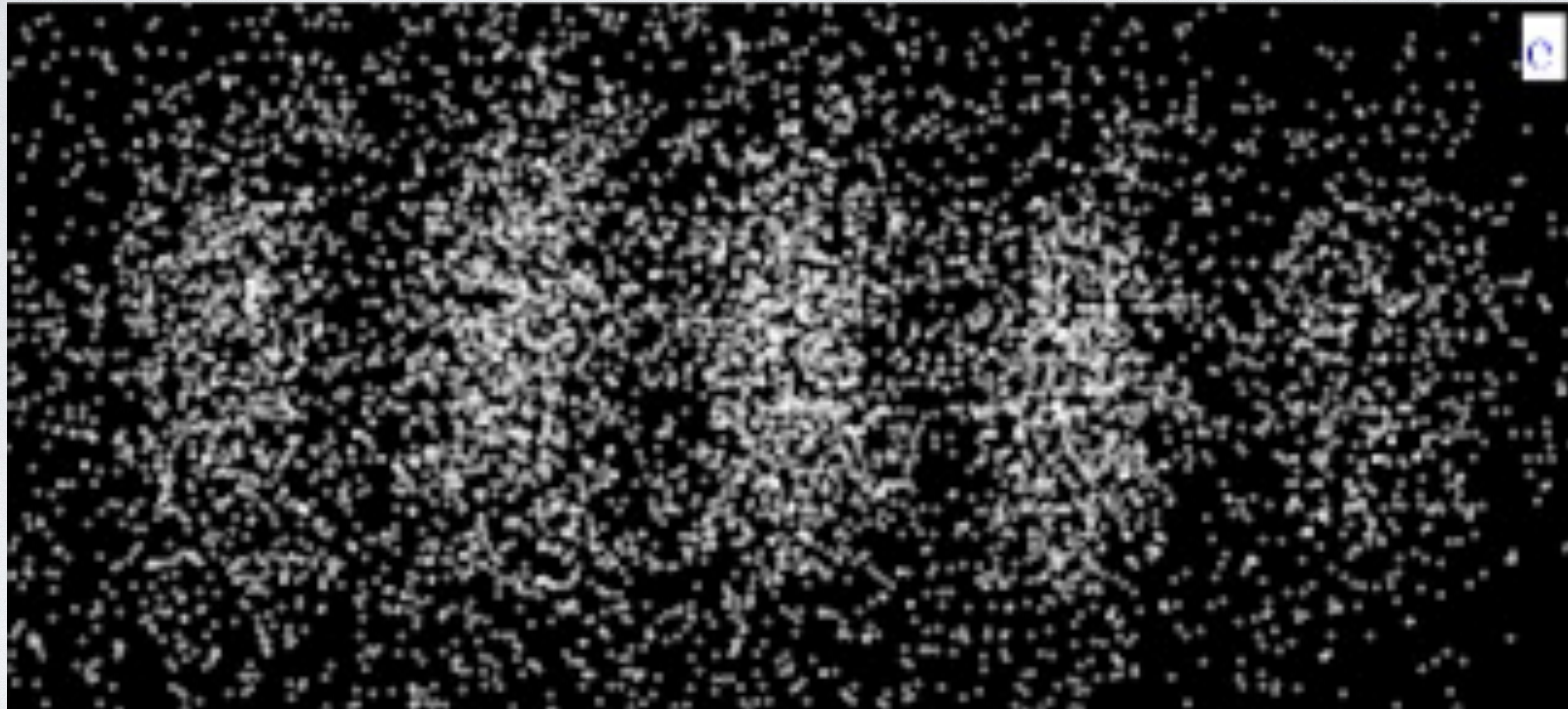
$$c^2 t'^2 - x'^2 = c^2 t^2 - x^2$$



# RIASSUMENDO

- La velocità della luce è una costante  $c \approx 30 \text{ cm/ns}$  (dato sperimentale).
- La velocità della luce non dipende dalla velocità dell'oggetto che emette la luce.
- La legge di trasformazione delle velocità va modificata in  $v' = \frac{v + V}{1 + \frac{vV}{c^2}}$
- Il tempo tra due eventi non è "universale"  $t' = t \frac{1}{\sqrt{1 + v^2/c^2}}$
- La quantità universale è la quantità "intervallo"  $s^2 = c^2 t^2 - x^2 \equiv (s')^2 = c^2 (t')^2 - (x')^2$





# MECCANICA QUANTISTICA



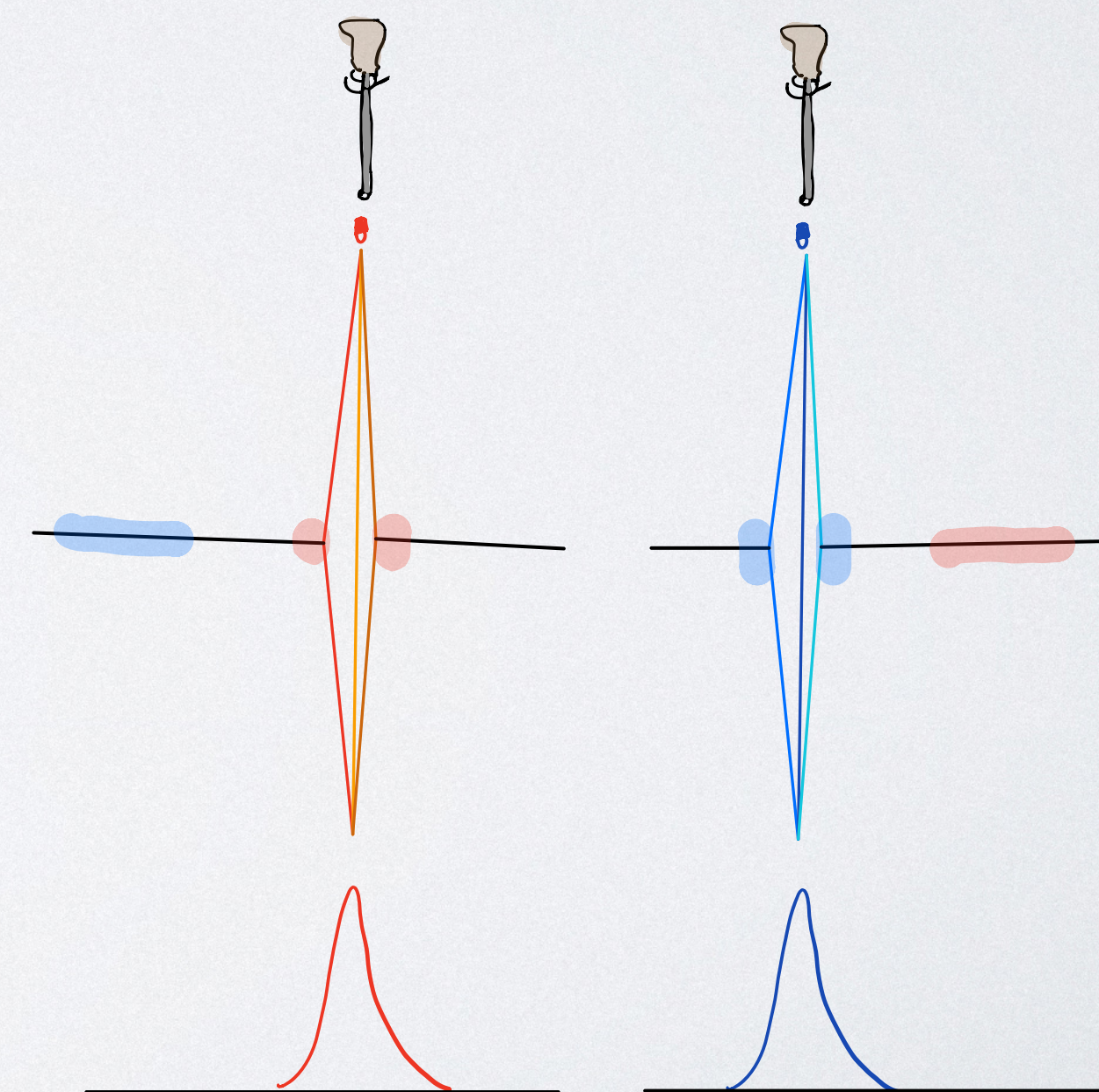
# DOVE PASSA LA PALLA?



<https://youtu.be/5I0FePBMJcY>

Lancio una palla, arriva una sola palla.

Se lancio a sinistra passa a sinistra,  
se lancio a destra passa a destra





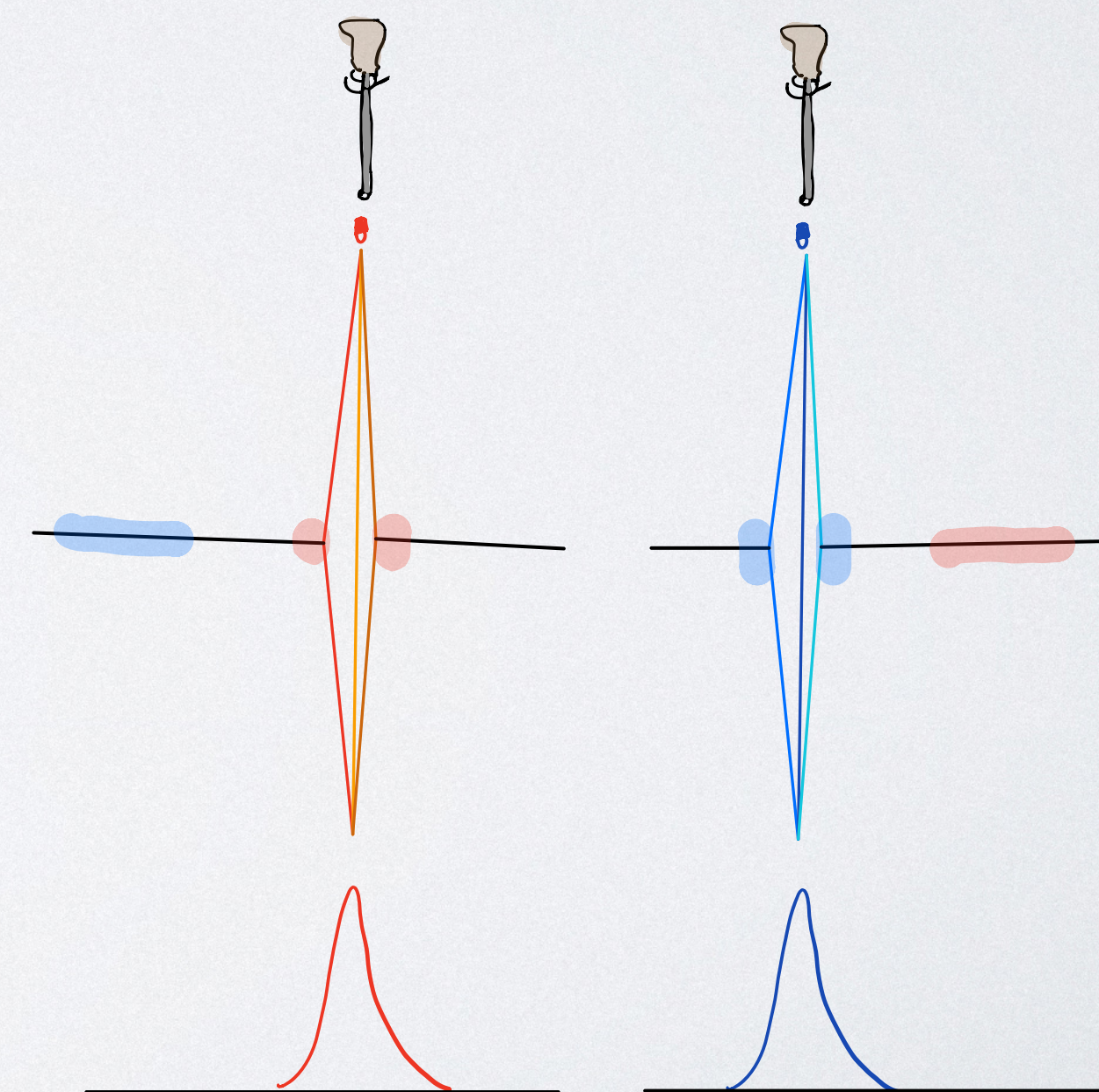
# DOVE PASSA LA PALLA?



<https://youtu.be/5I0FePBMJcY>

Lancio una palla, arriva una sola palla.

Se lancio a sinistra passa a sinistra,  
se lancio a destra passa a destra





# INTERFERENZA DELLE ONDE



<https://youtu.be/HpjC0gdifas>



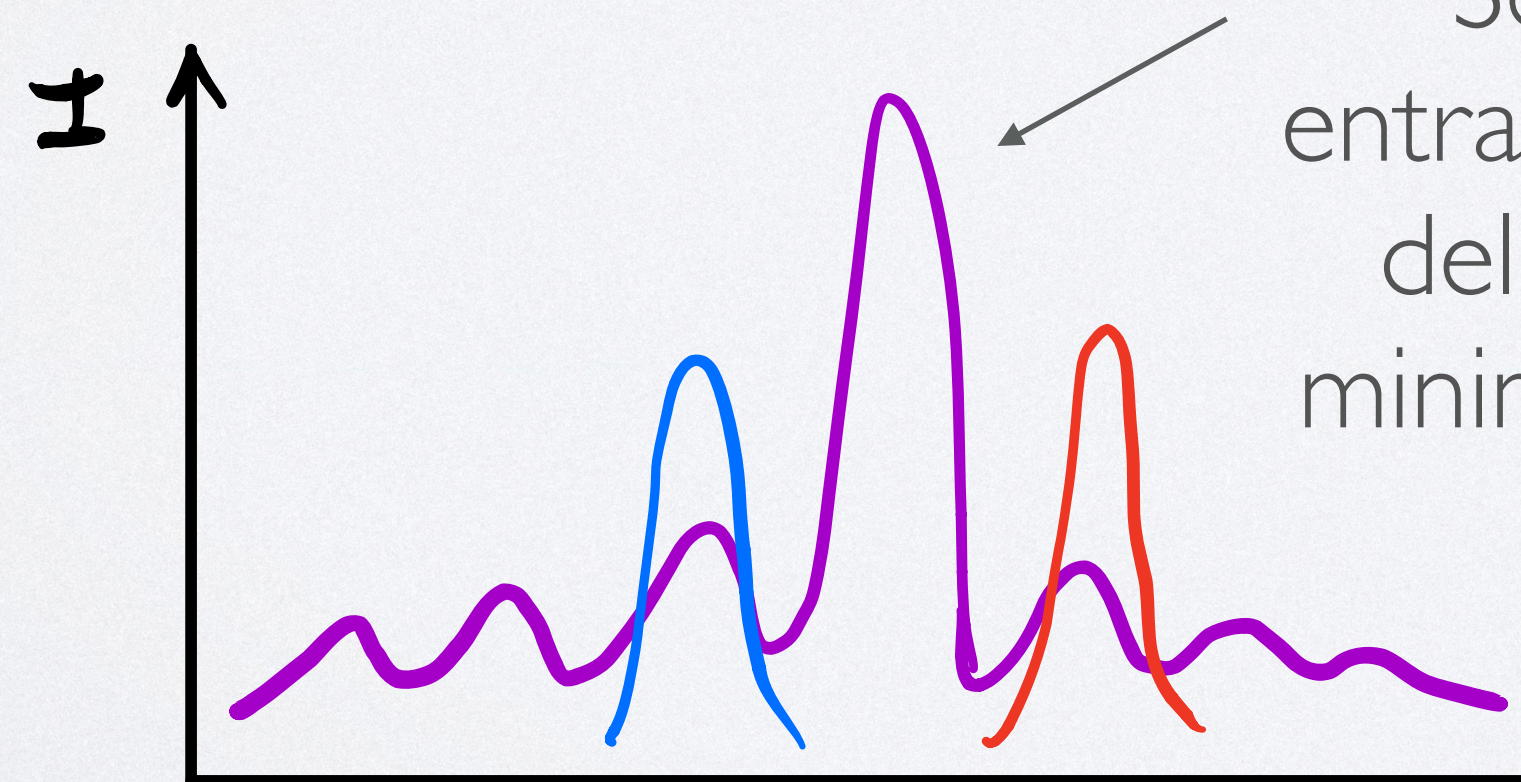
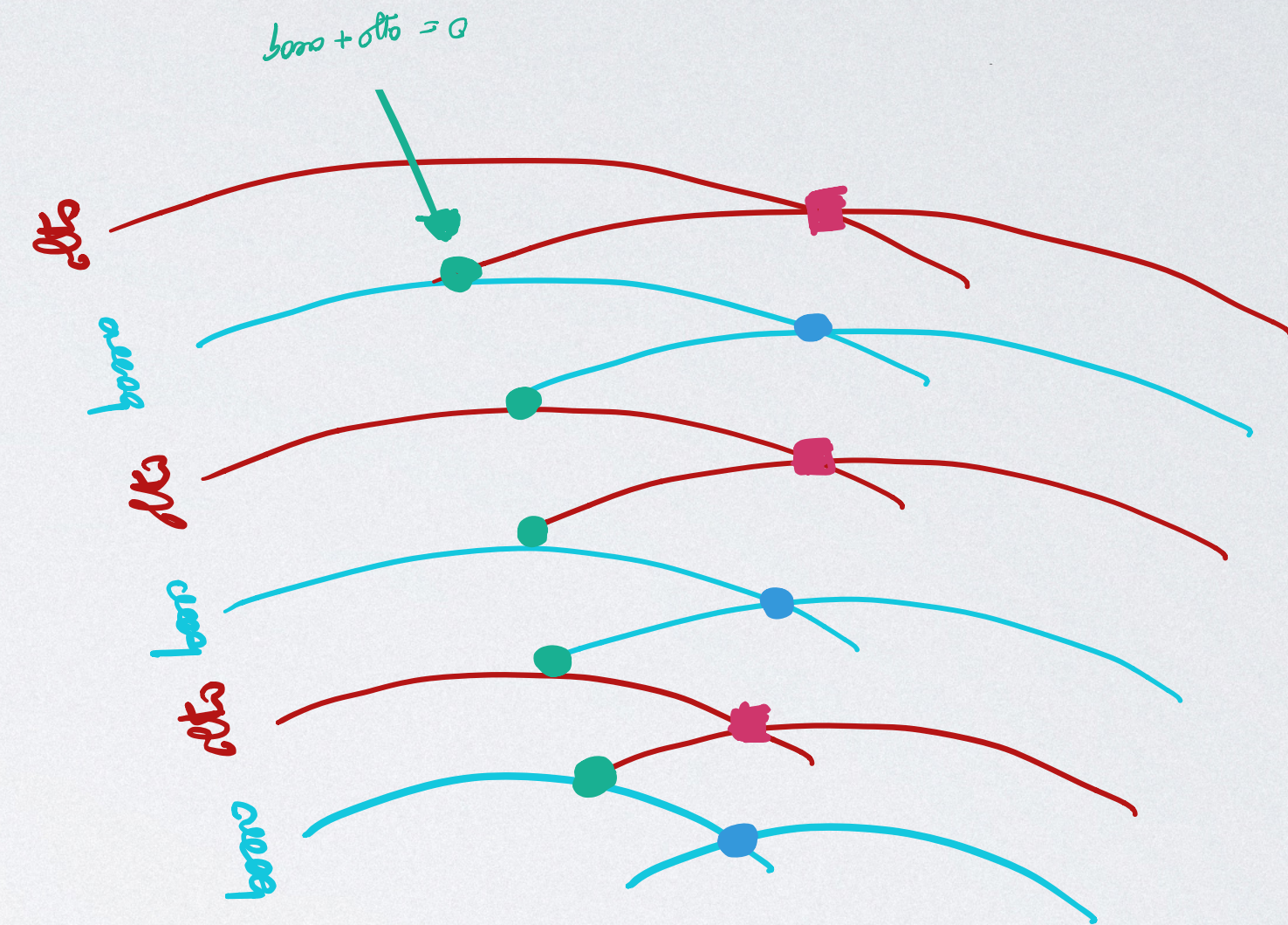
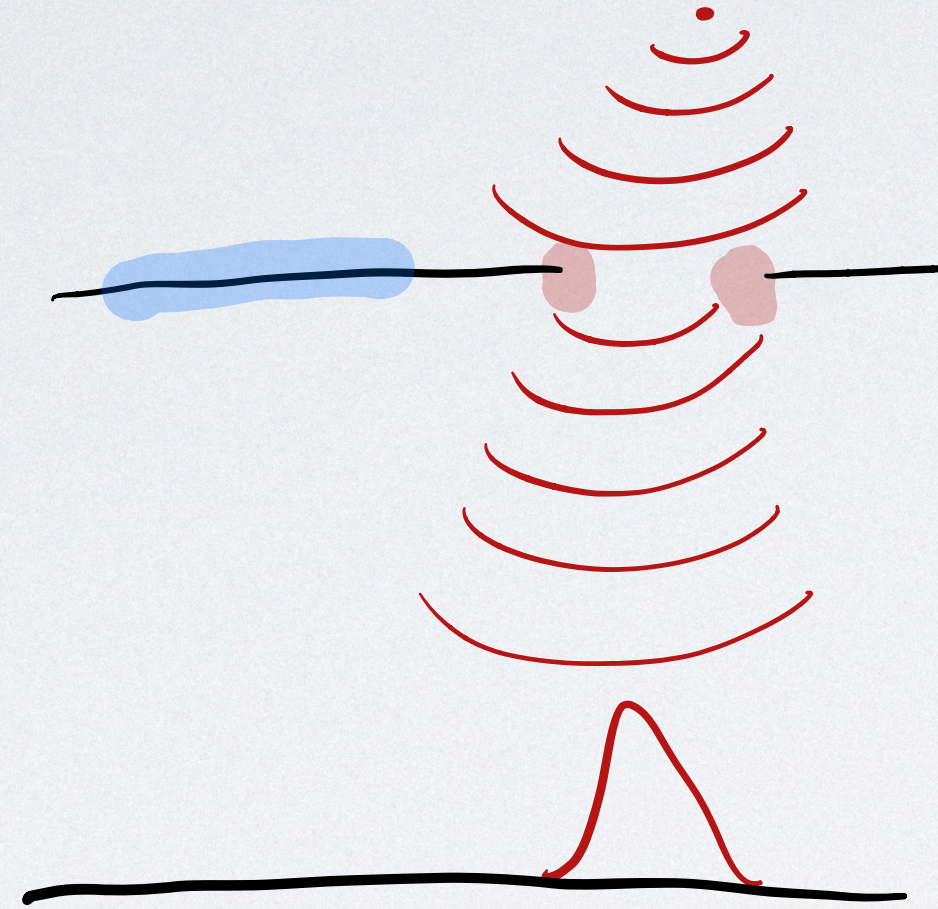
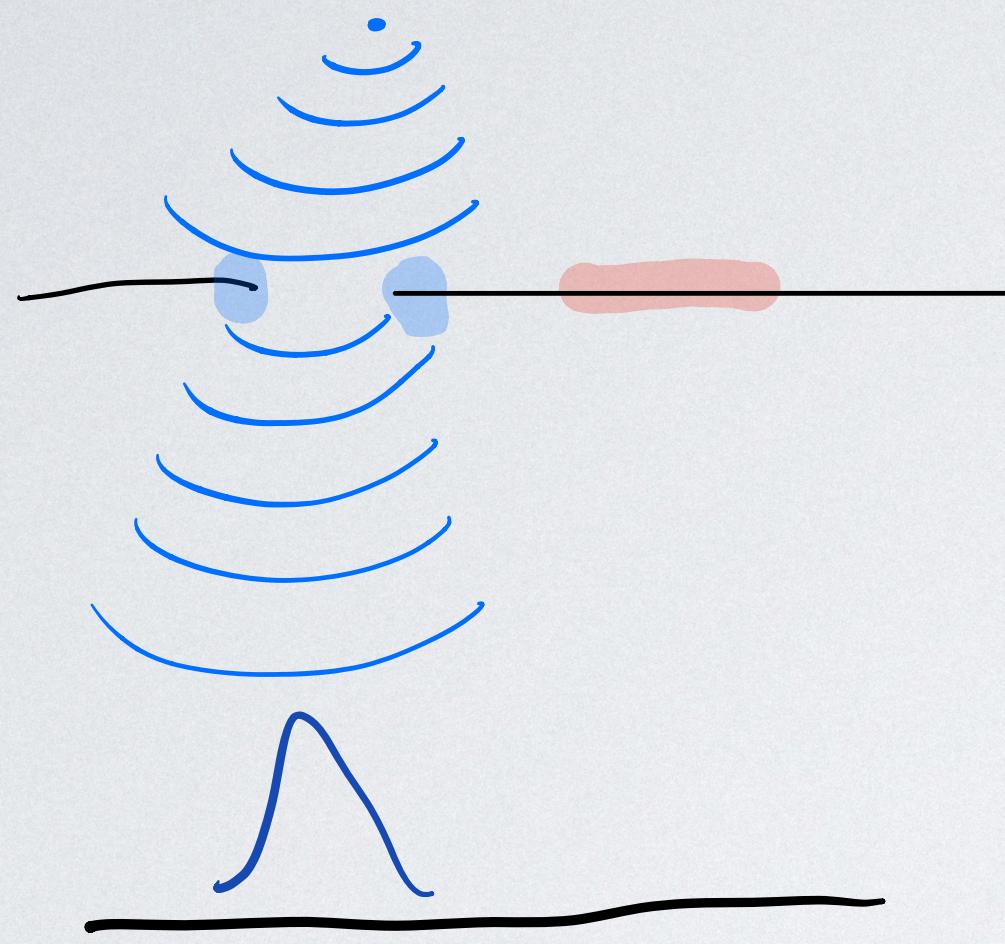
# INTERFERENZA DELLE ONDE



<https://youtu.be/HpjC0gdifas>



# DOVE PASSA L'ONDA?

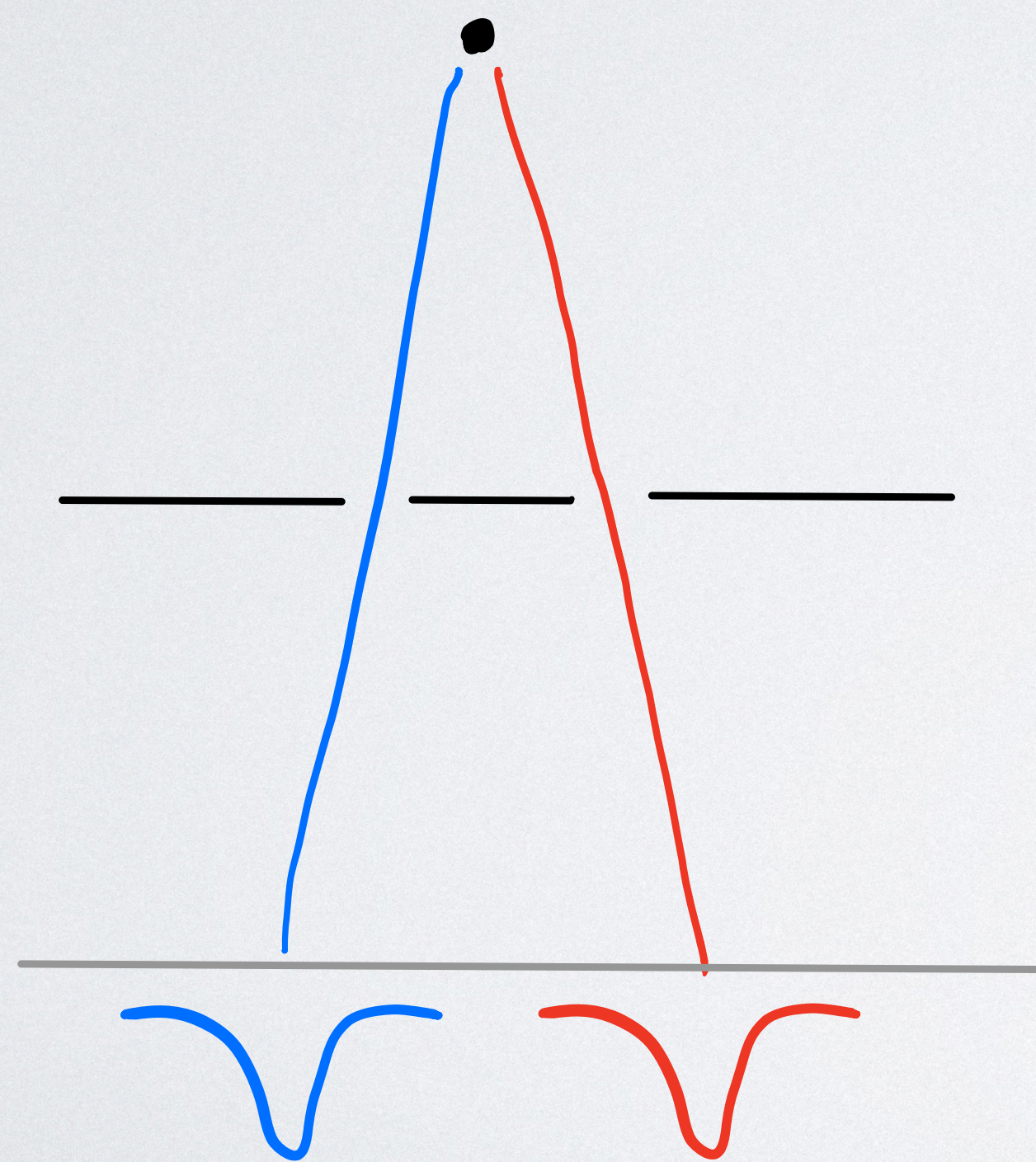


Se l'onda può attraversare entrambe le aperture, l'intensità dell'onda ha tanti massimi e minimi (effetto di interferenza).

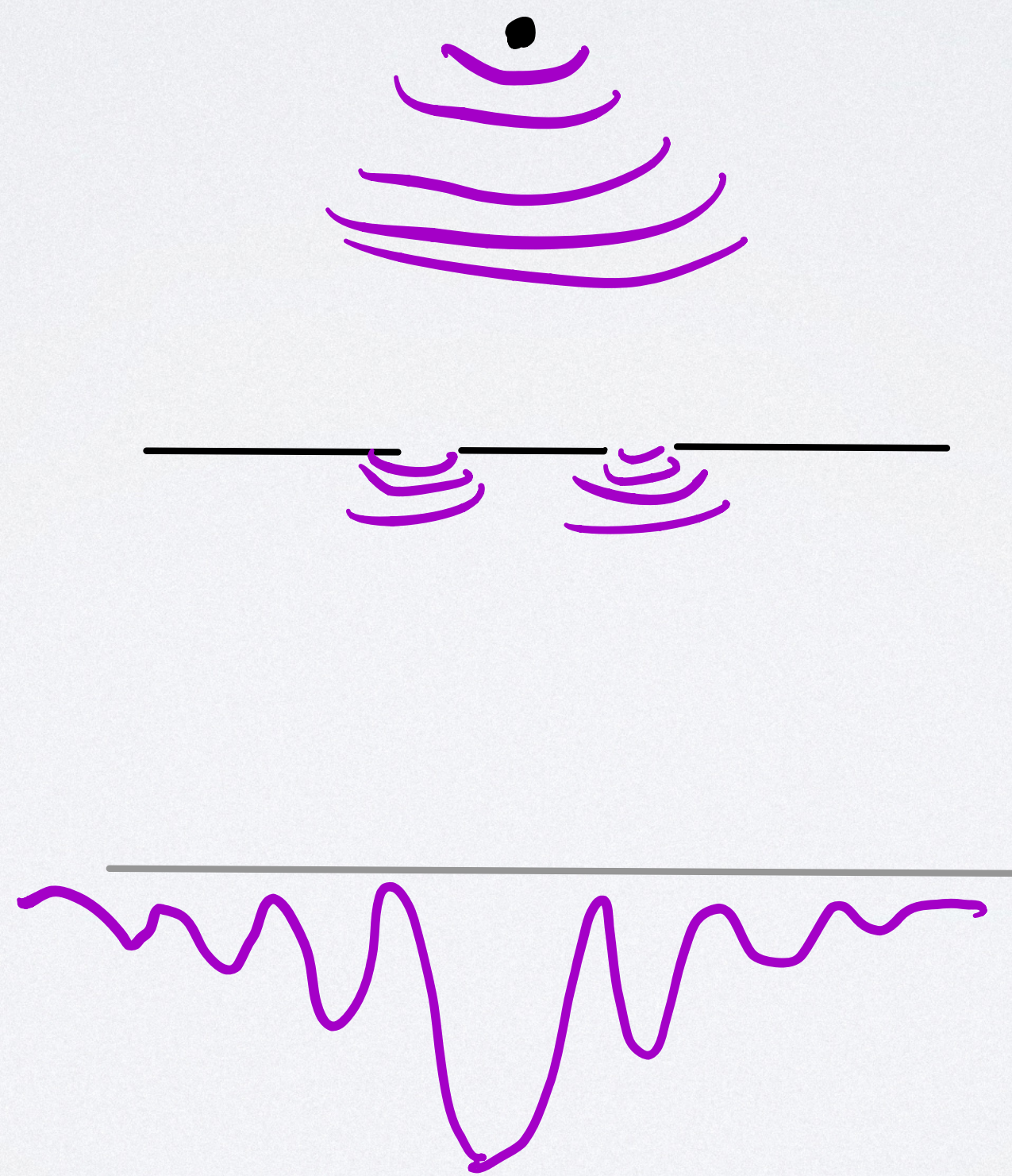


# DOVE PASSA L'ELETTRONE?

Se l'elettrone fosse come  
le palle da baseball

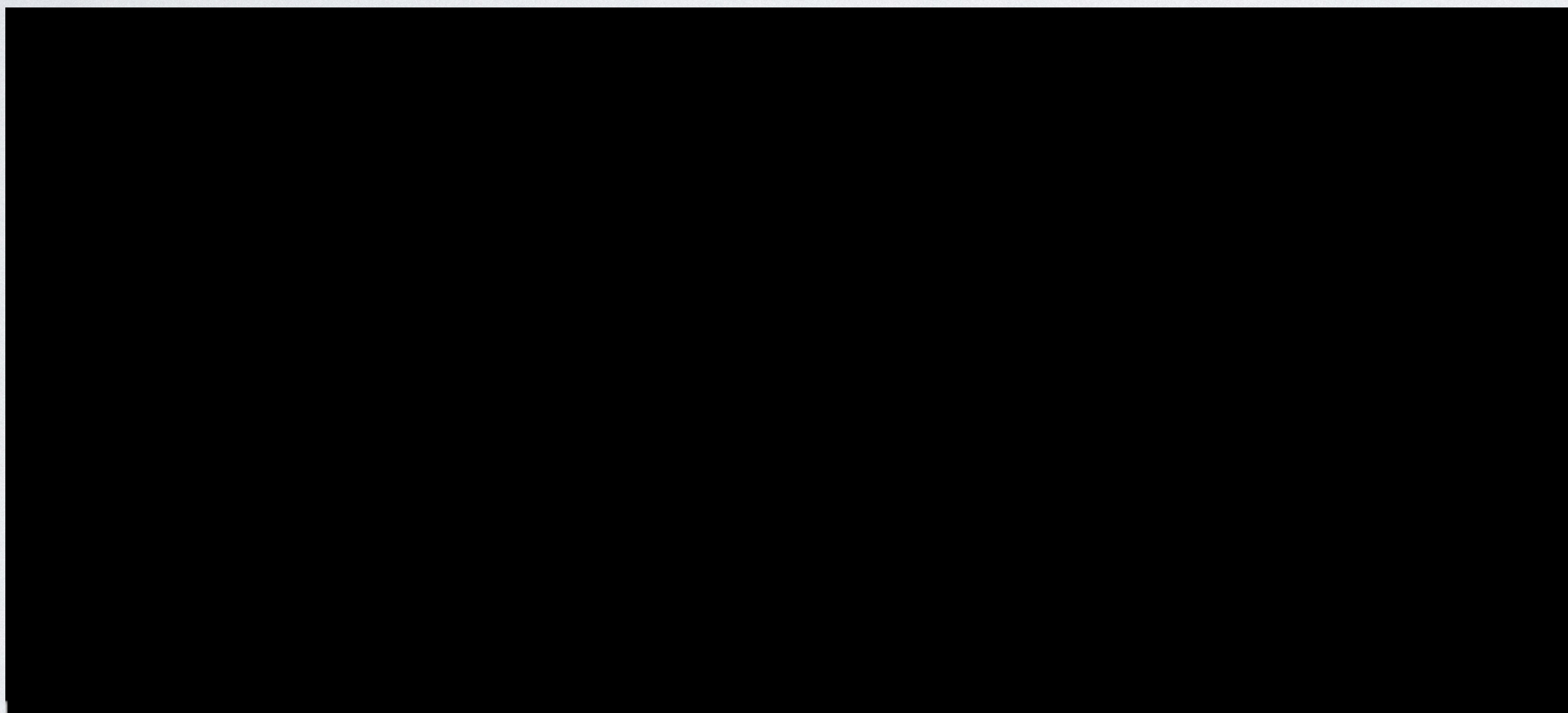


Se l'elettrone fosse come  
le onde d'acqua





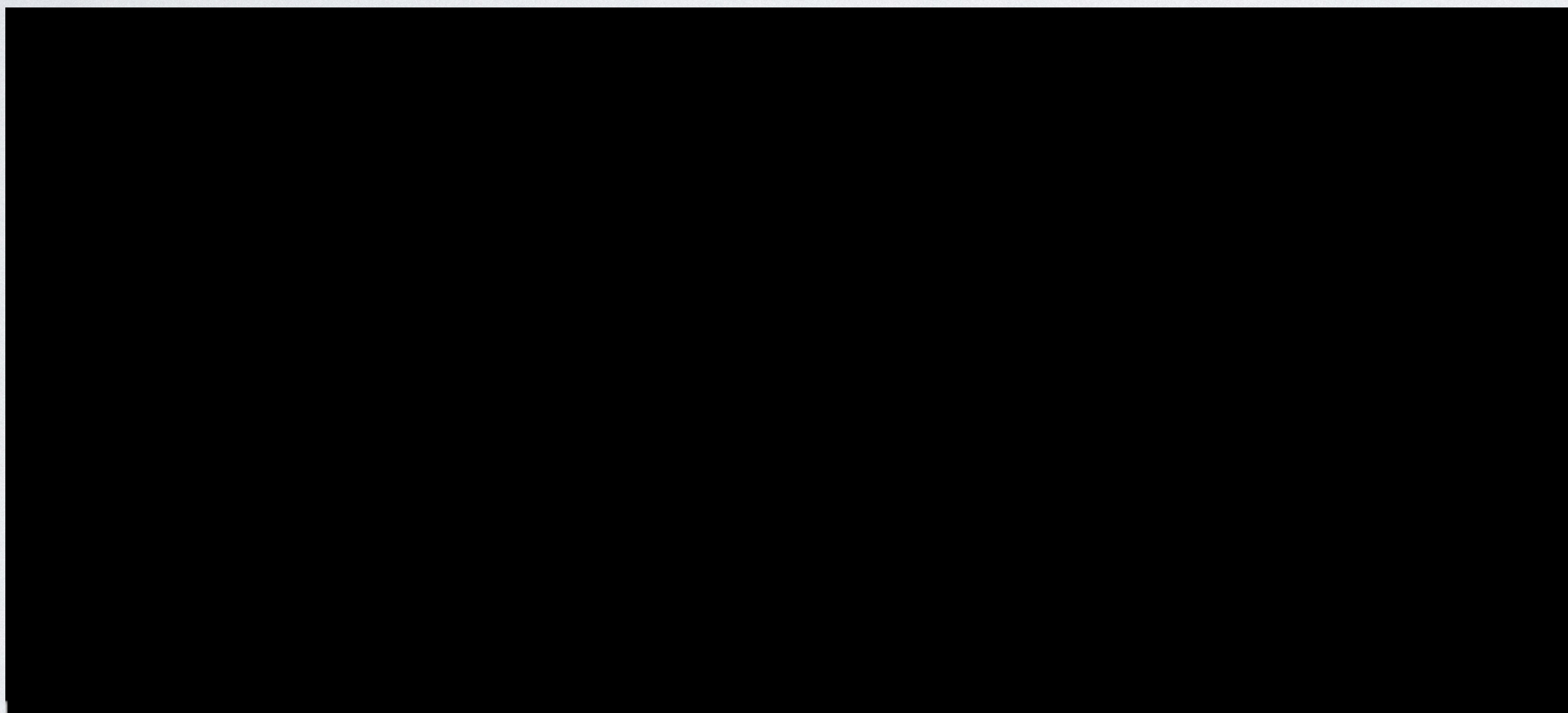
# DOVE PASSA L'ELETTRONE?



<https://youtu.be/mSKOKWwexcA>



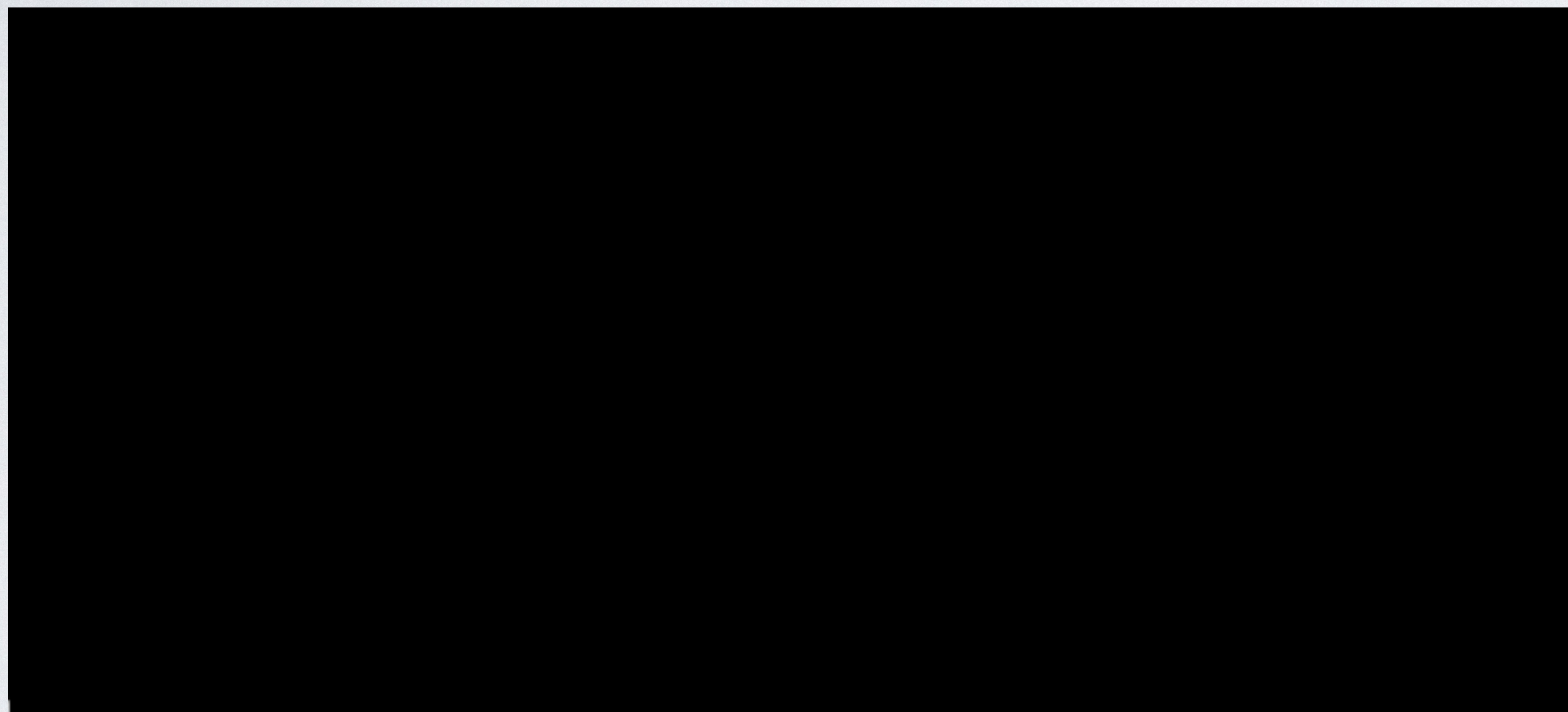
# DOVE PASSA L'ELETTRONE?



<https://youtu.be/mSKOKWwexcA>



# DOVE PASSA L'ELETTRONE?



<https://youtu.be/mSKOKWwexcA>

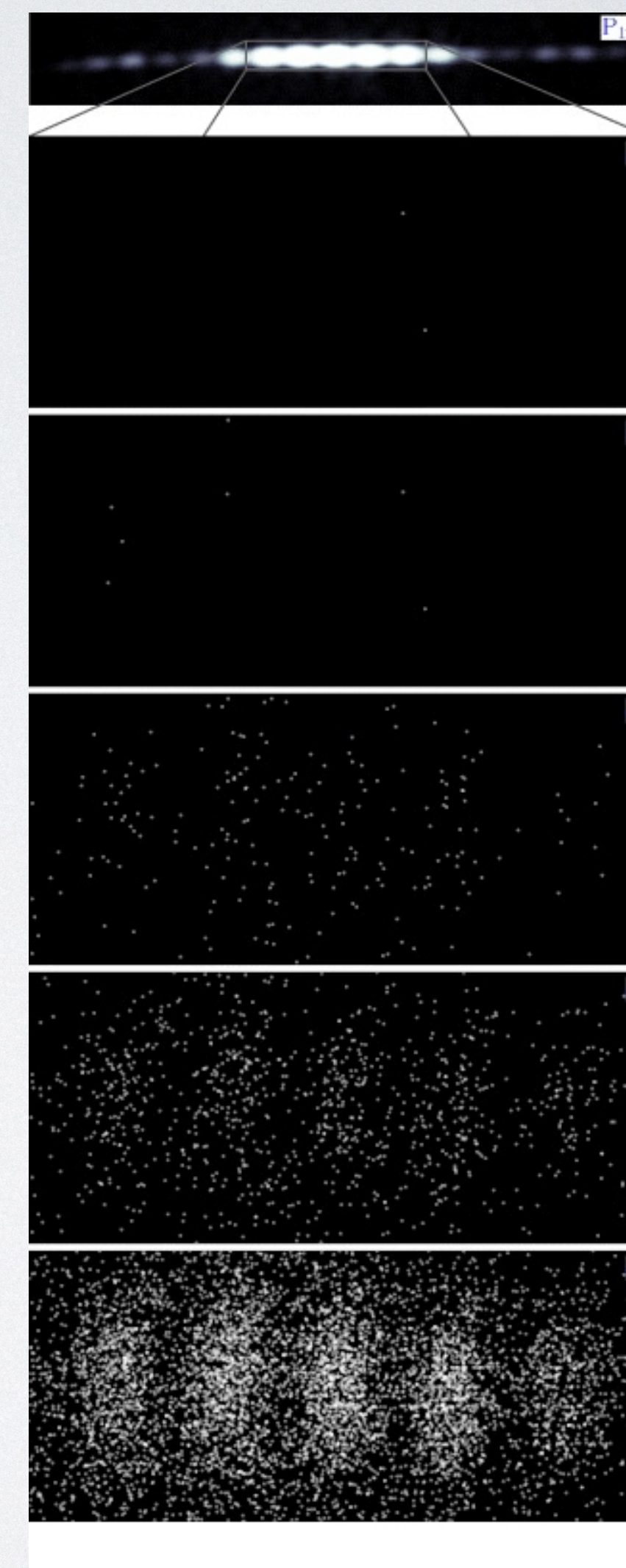
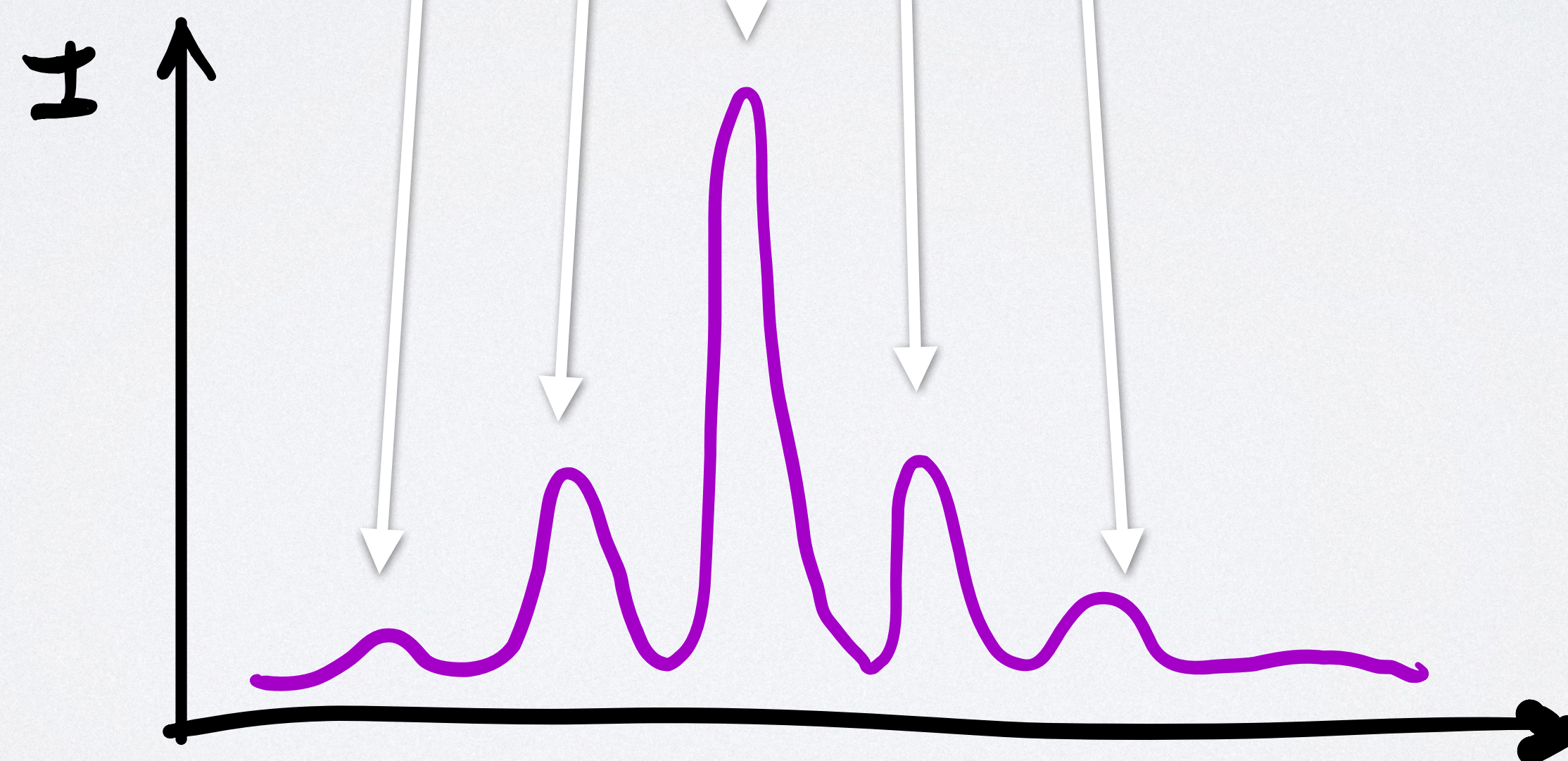


Figure 3 from Controlled double-slit electron diffraction  
Roger Bach et al 2013 New J. Phys. 15 033018 doi:10.1088/1367-2630/15/3/033018



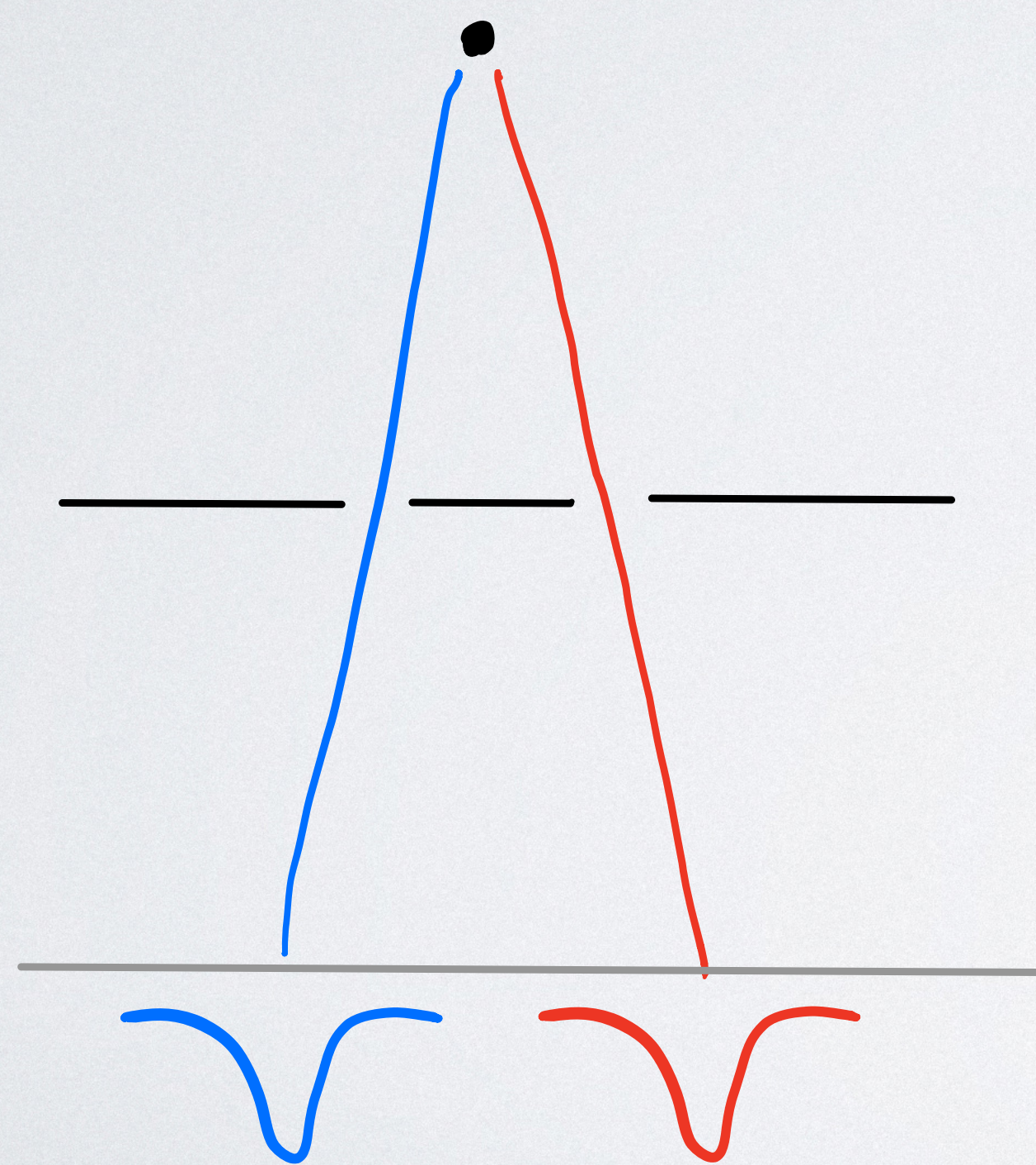
# DOVE PASSA L'ELETTRONE?



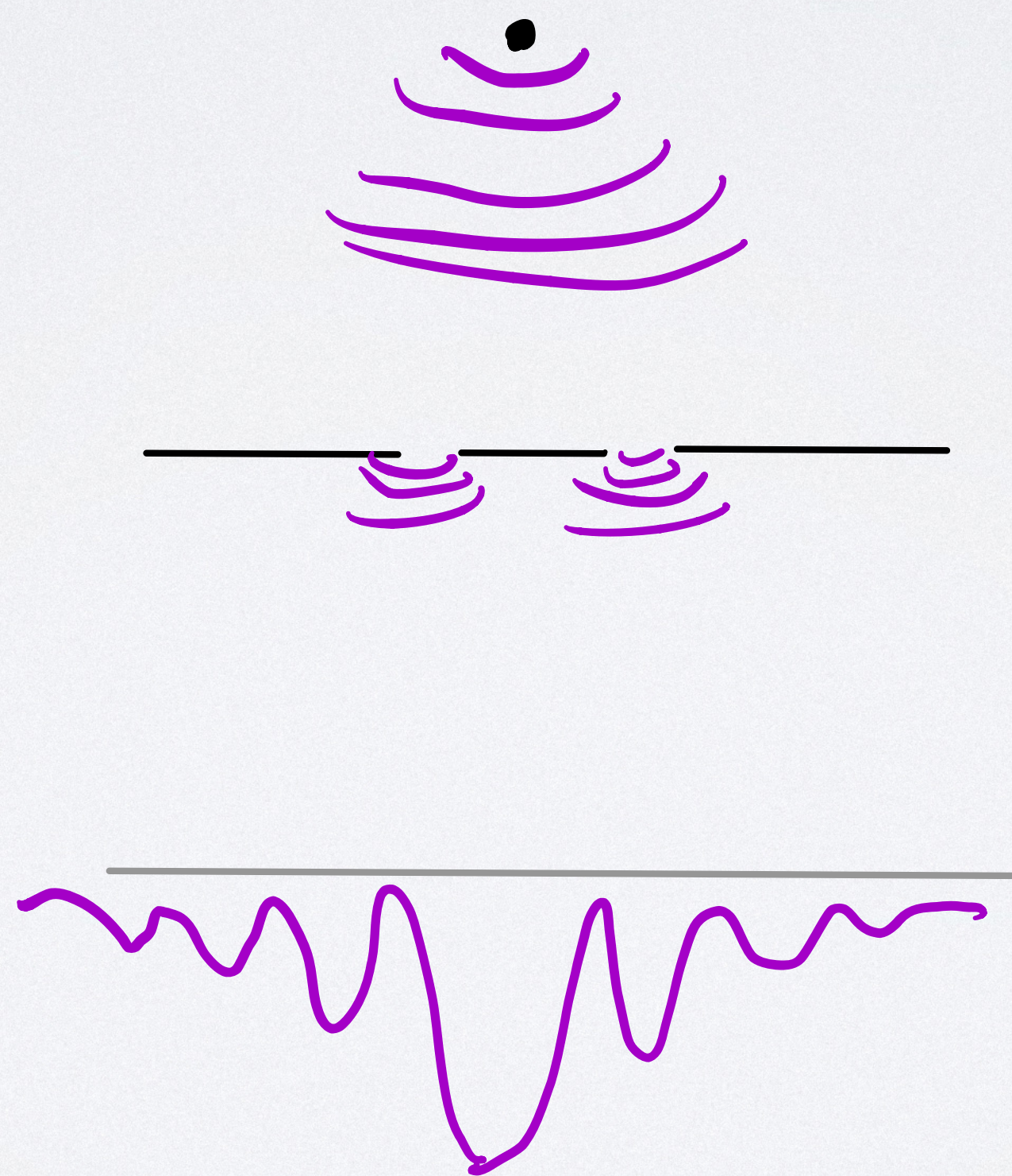


# DOVE PASSA L'ELETTRONE?

Se l'elettrone fosse come le palle da baseball

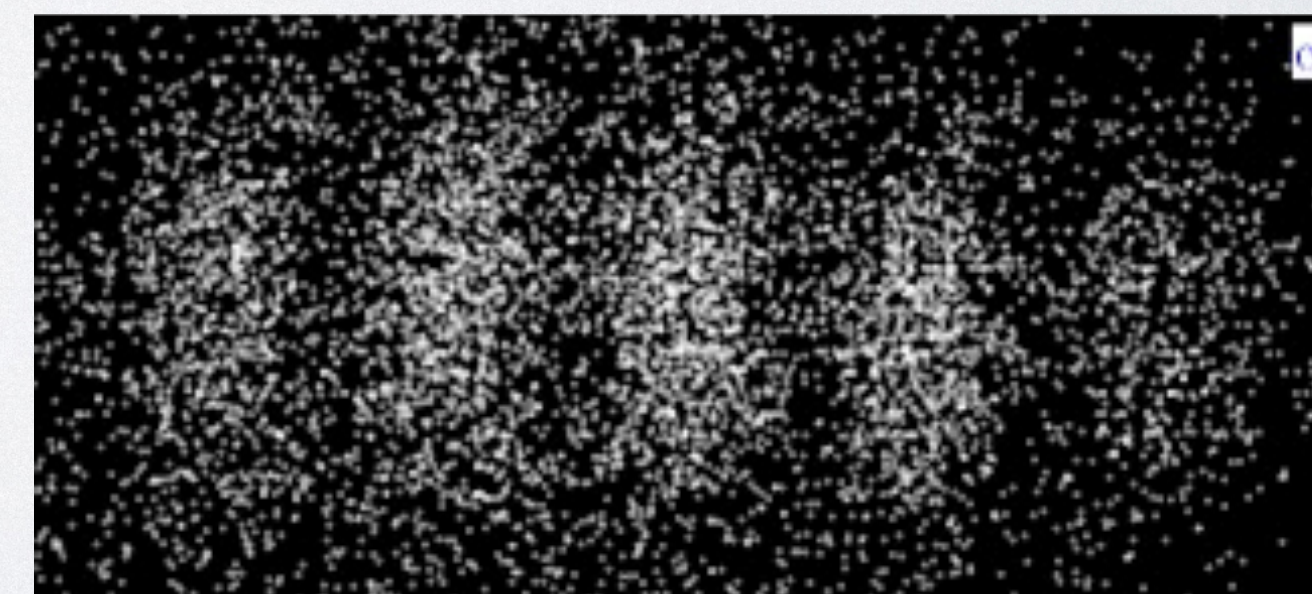


Se l'elettrone fosse come le onde d'acqua



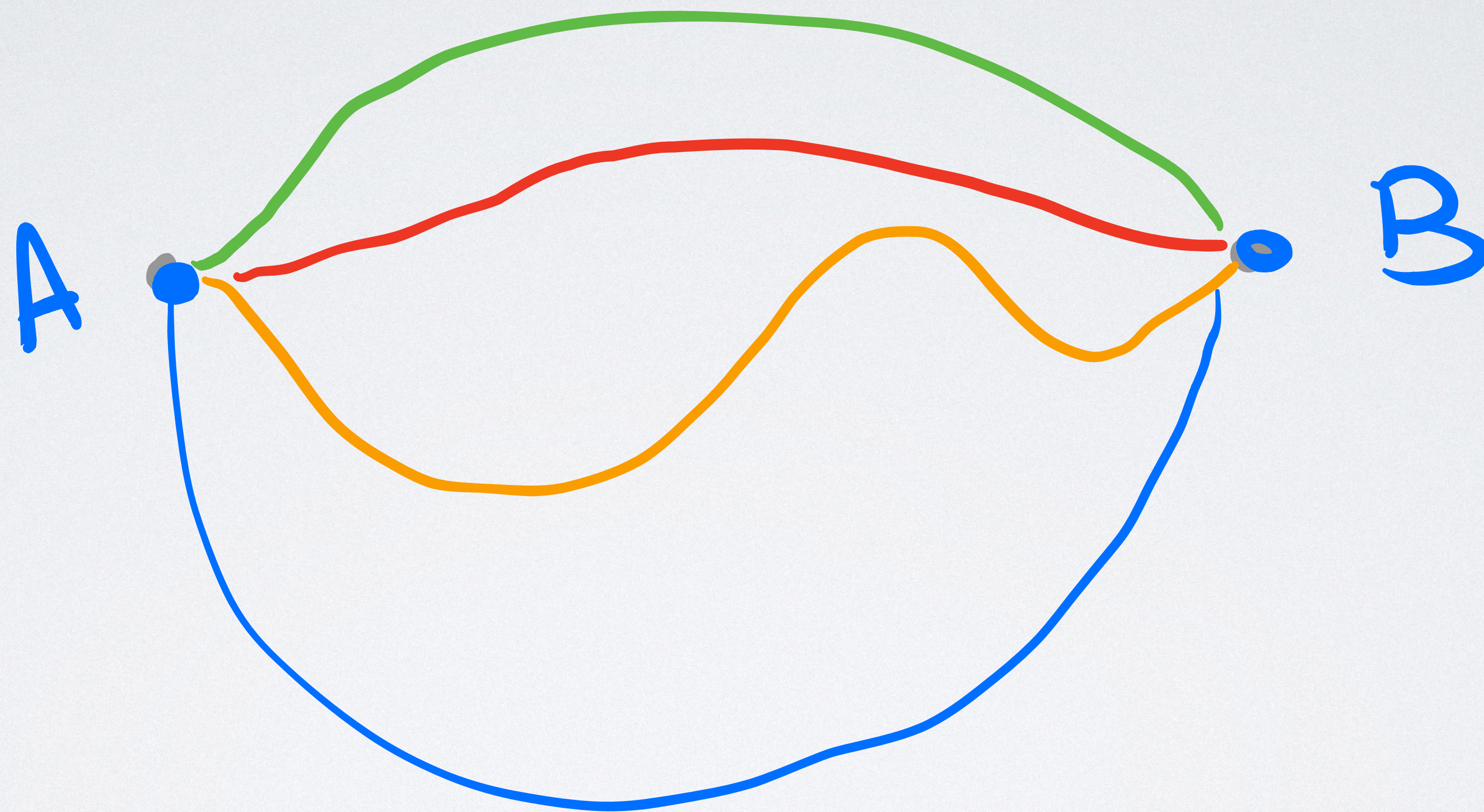
Ogni elettrone lascia un puntino, cioè viene visto singolarmente come una palla da baseball.

“onda di probabilità”





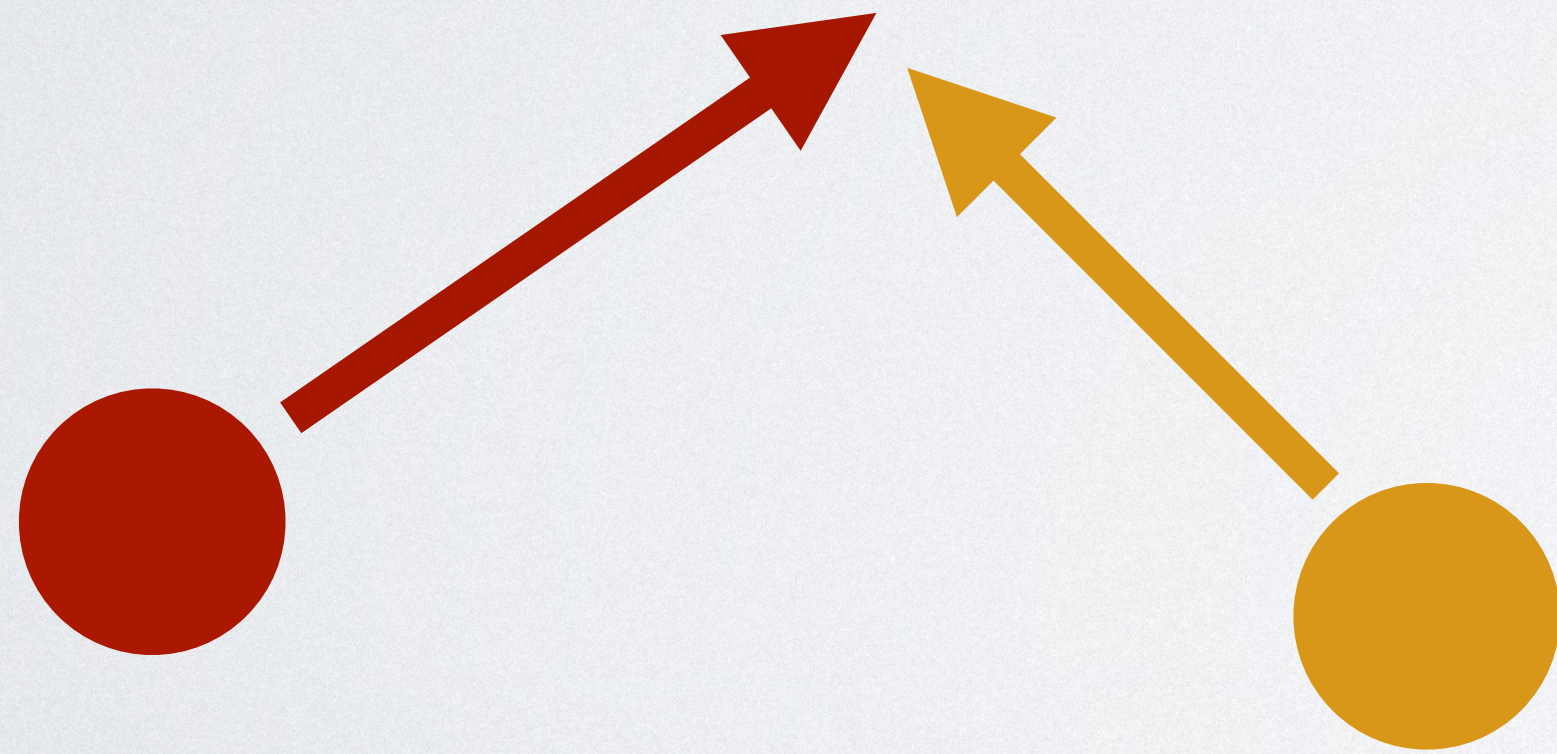
# DOVE PASSA L'ELETTRONE?



L'elettrone passa su tutte le traiettorie possibili, allo stesso tempo, e interferisce con se stesso ...

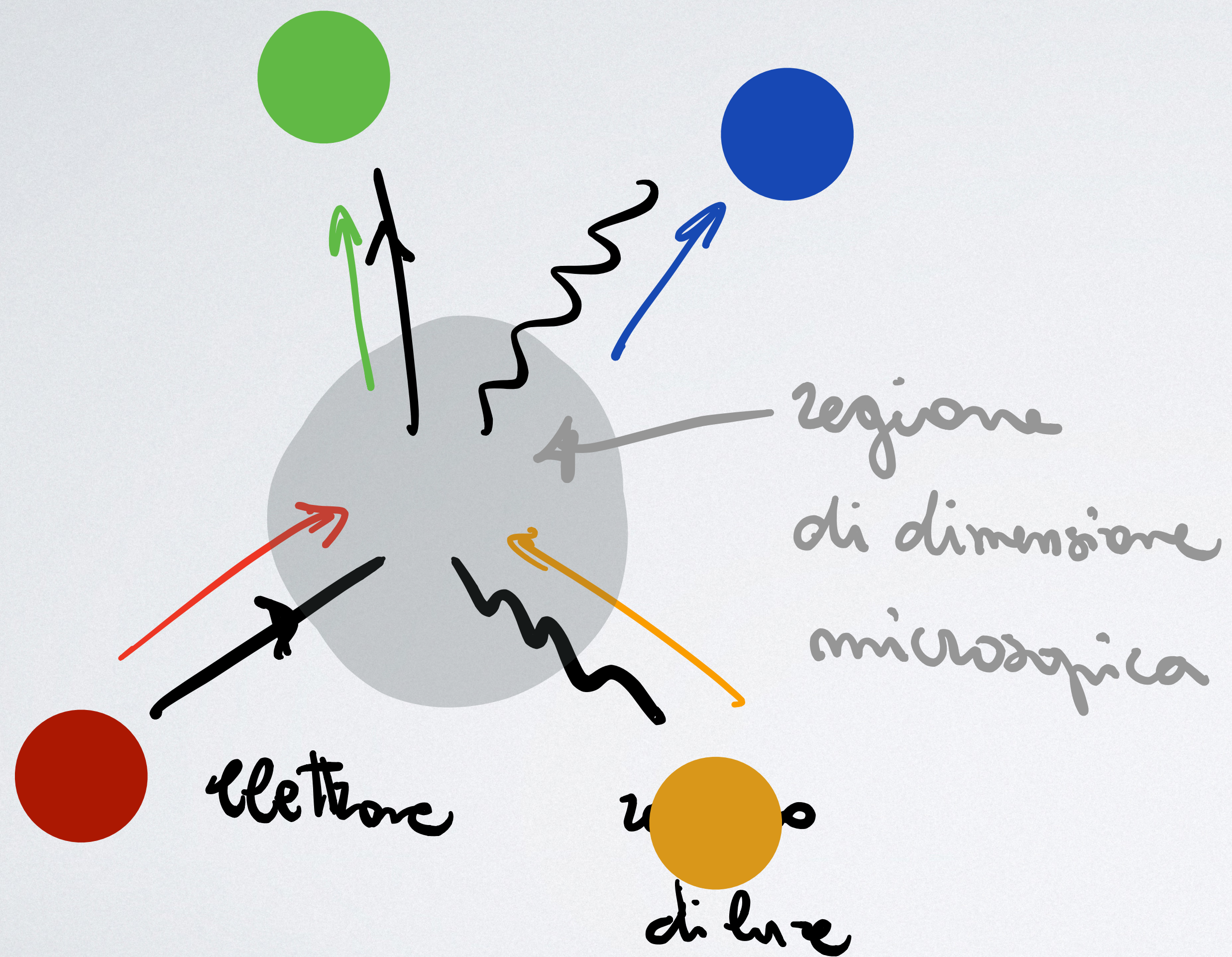


CHE SUCCEDDE SE FACCIAMO COLLIDERE DUE PARTICELLE?



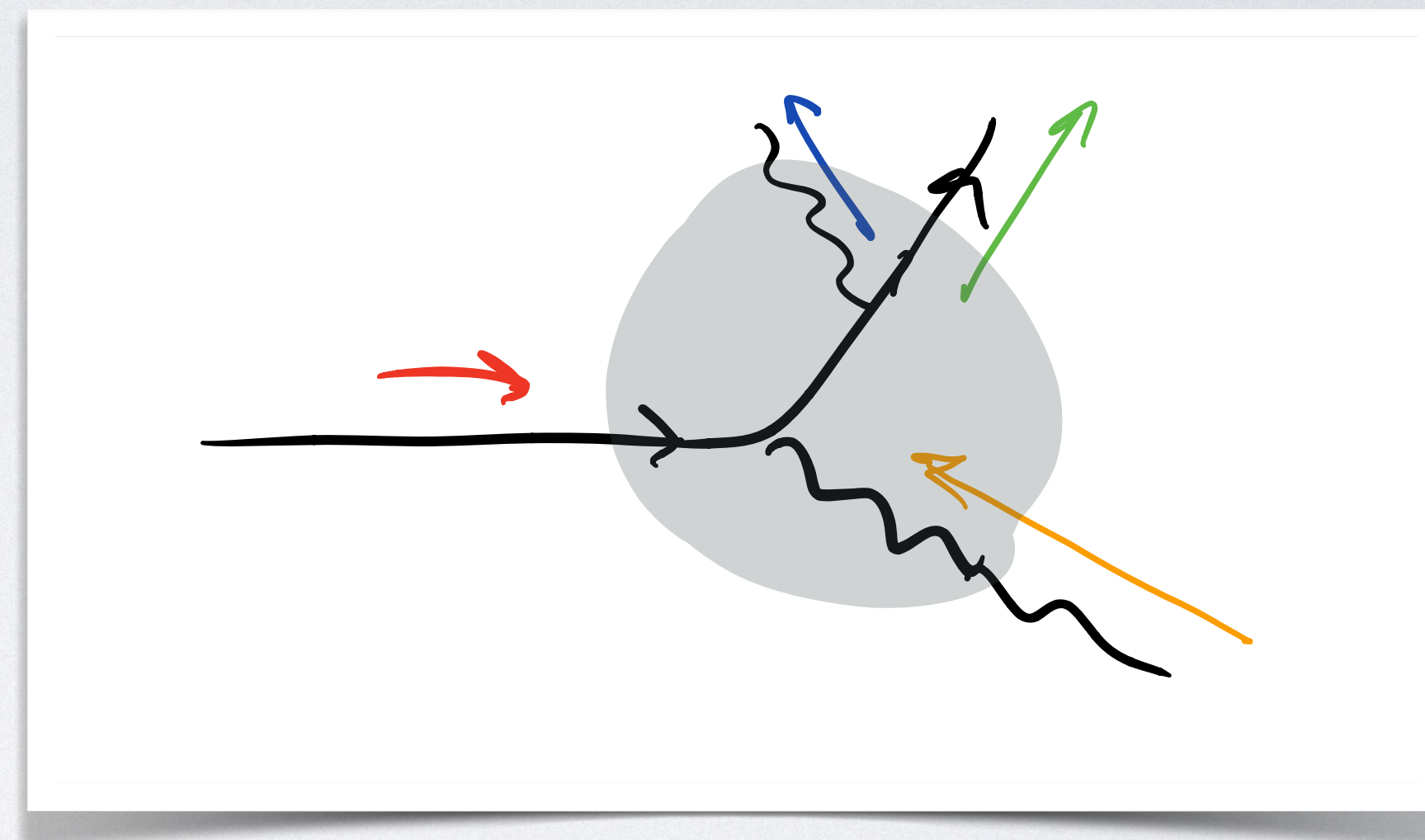
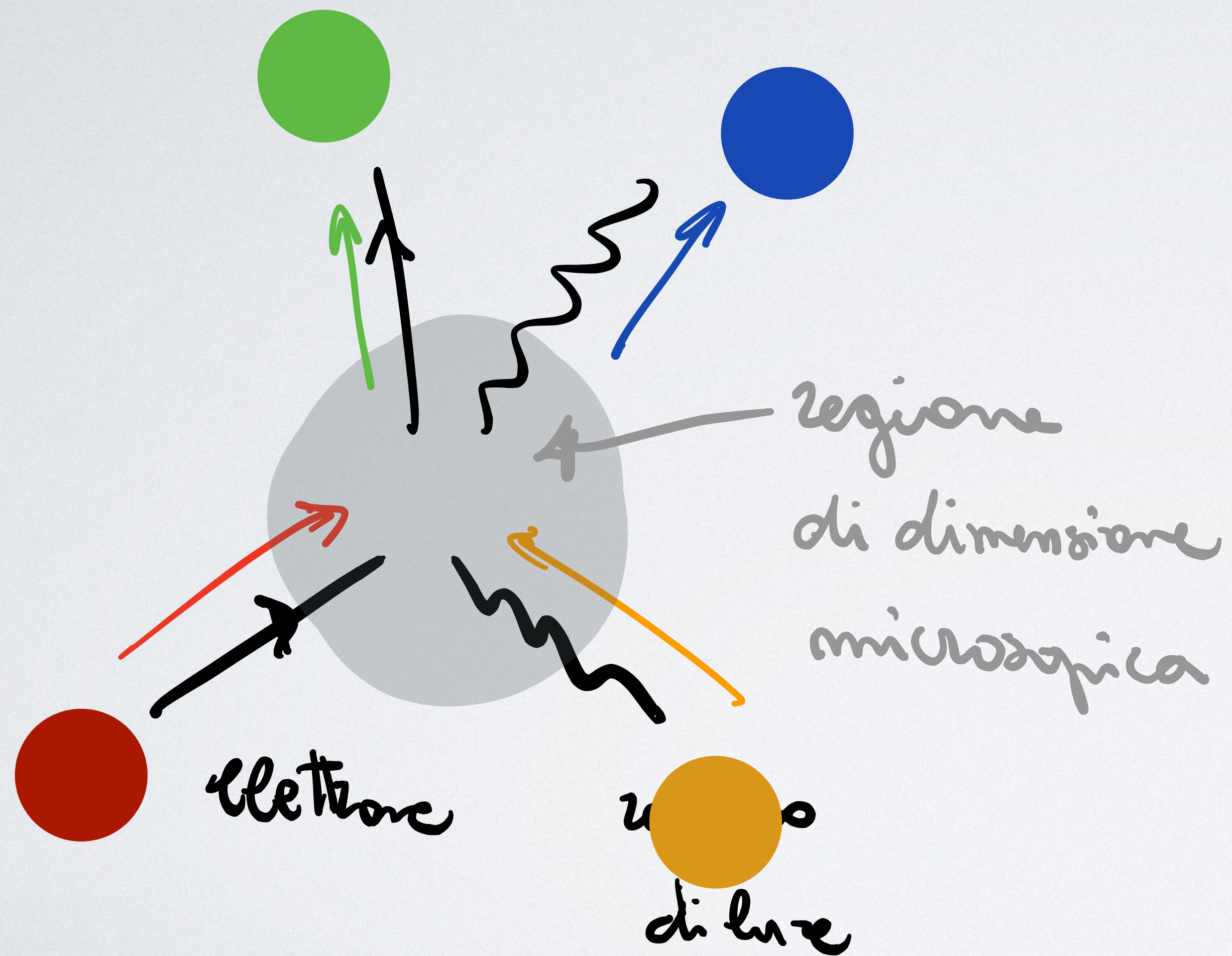


CHE SUCCEDDE SE FACCIAMO COLLIDERE DUE PARTICELLE?



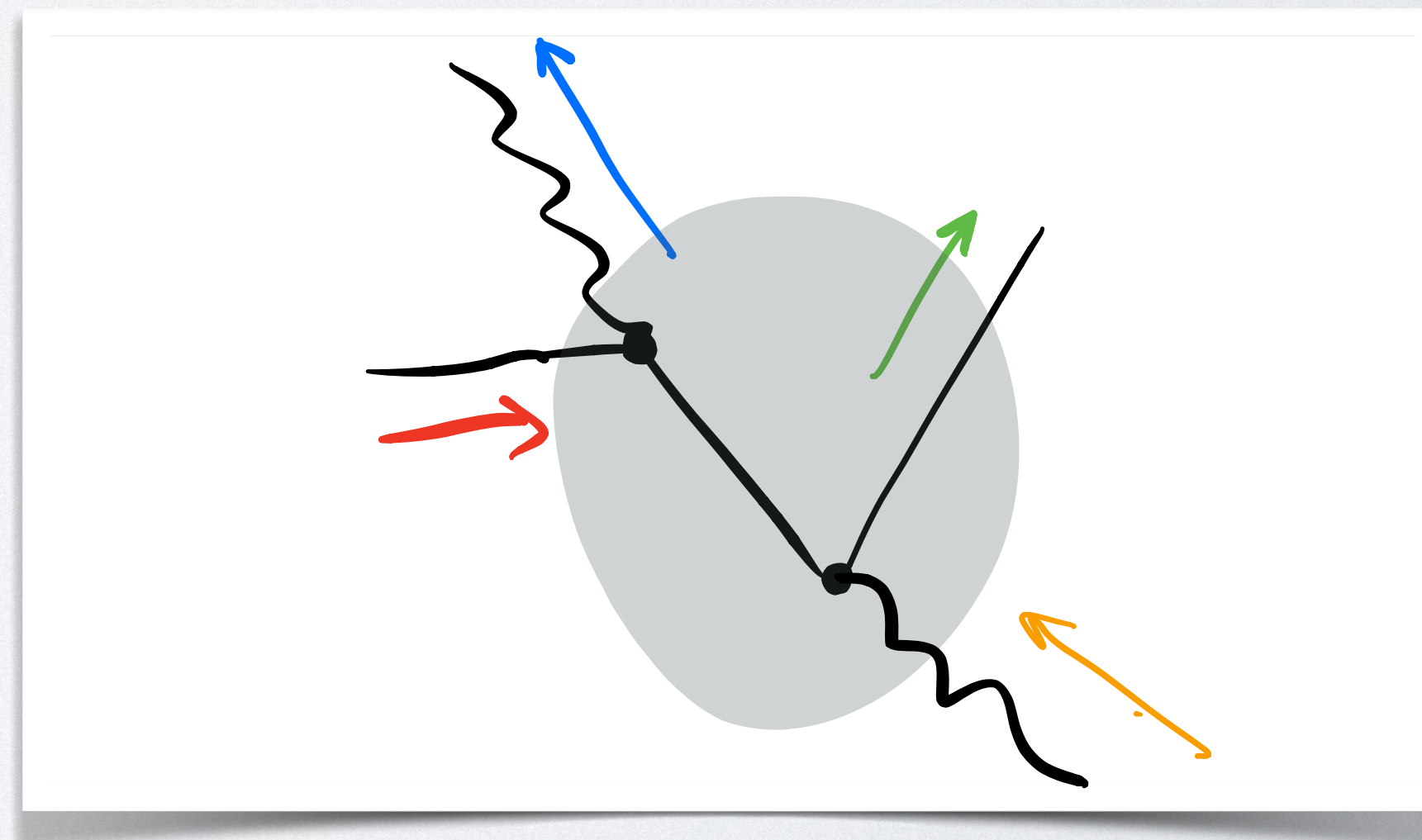
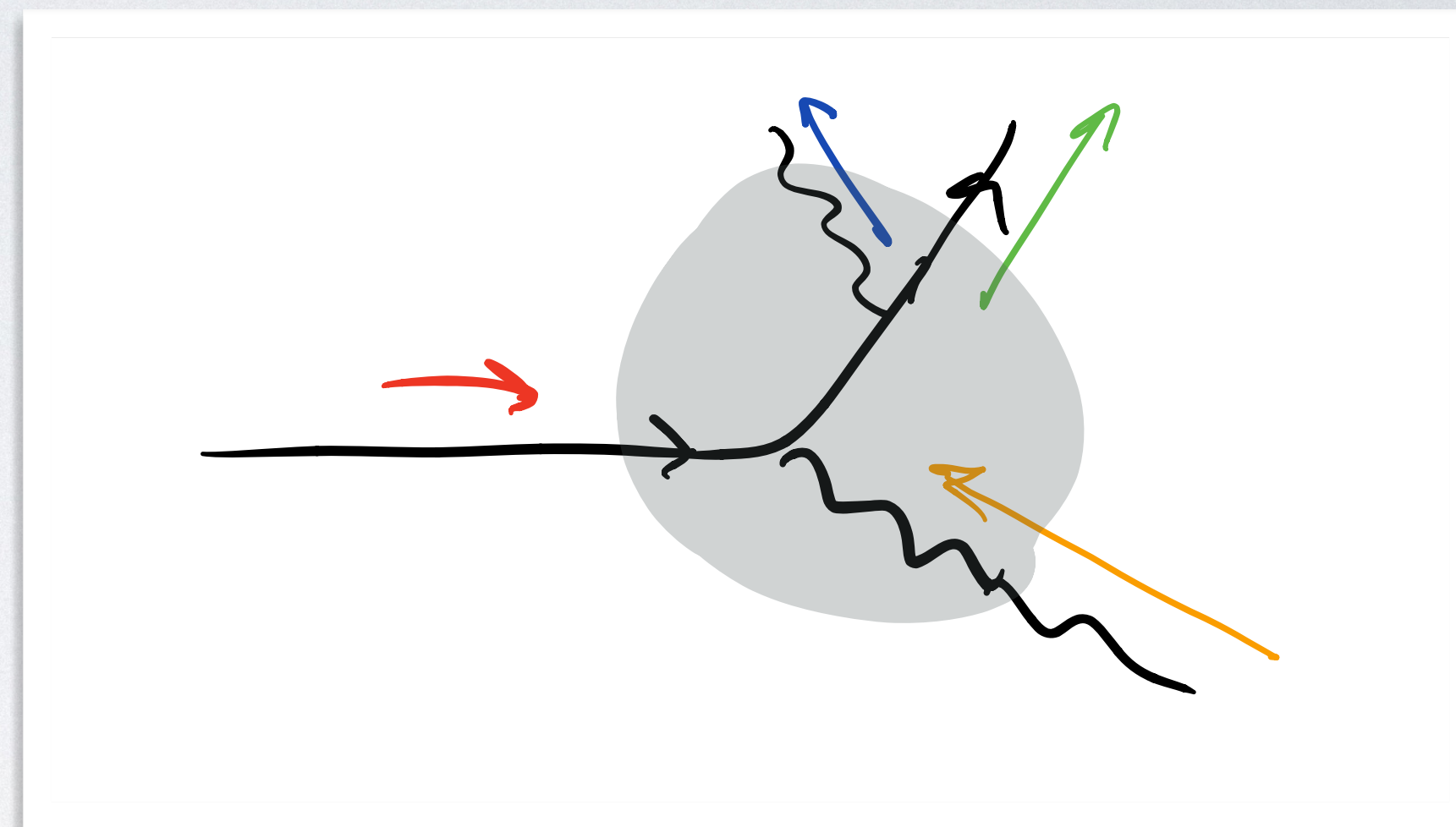
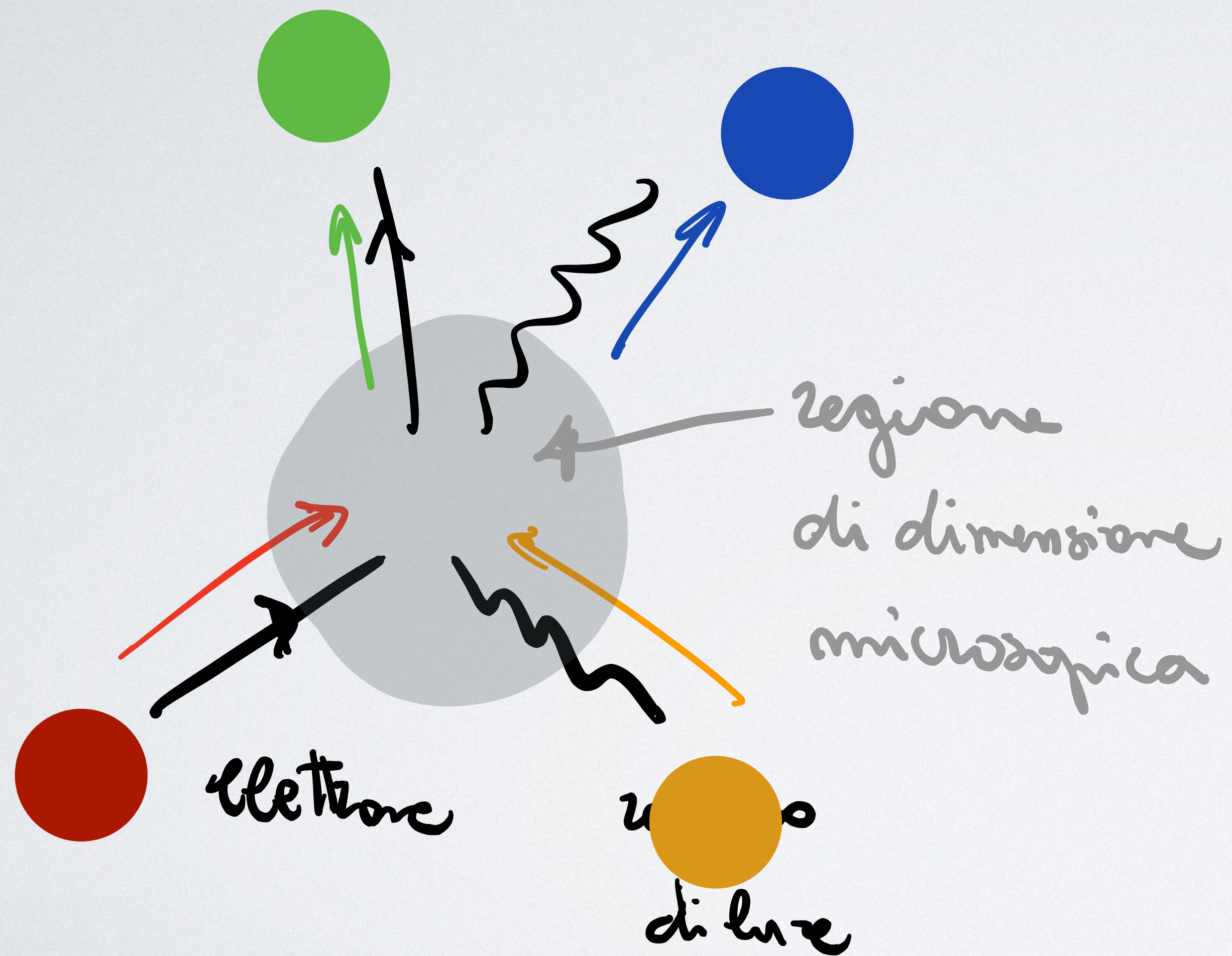


# CHE SUCCEDDE SE FACCIAMO COLLIDERE DUE PARTICELLE?



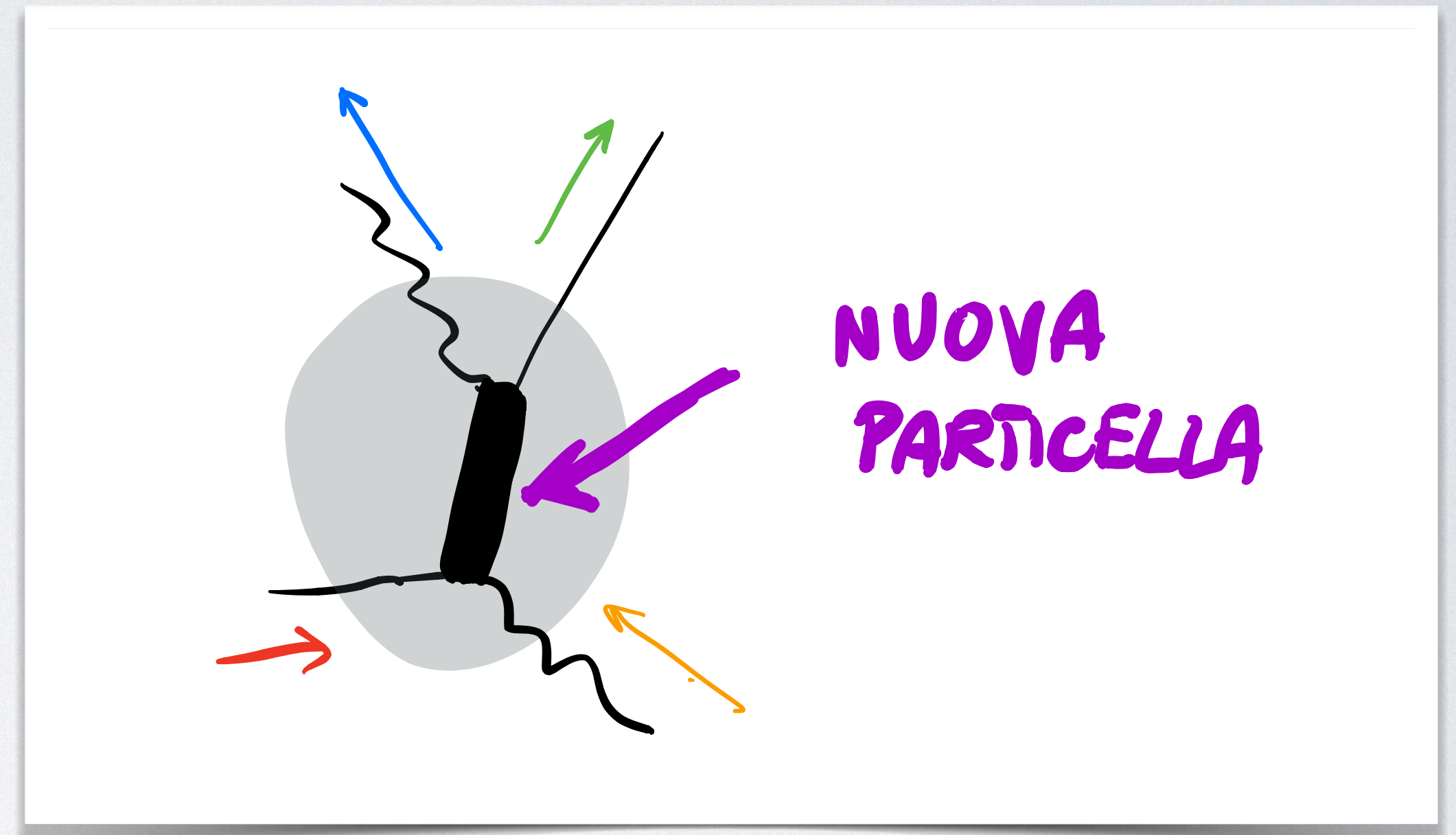
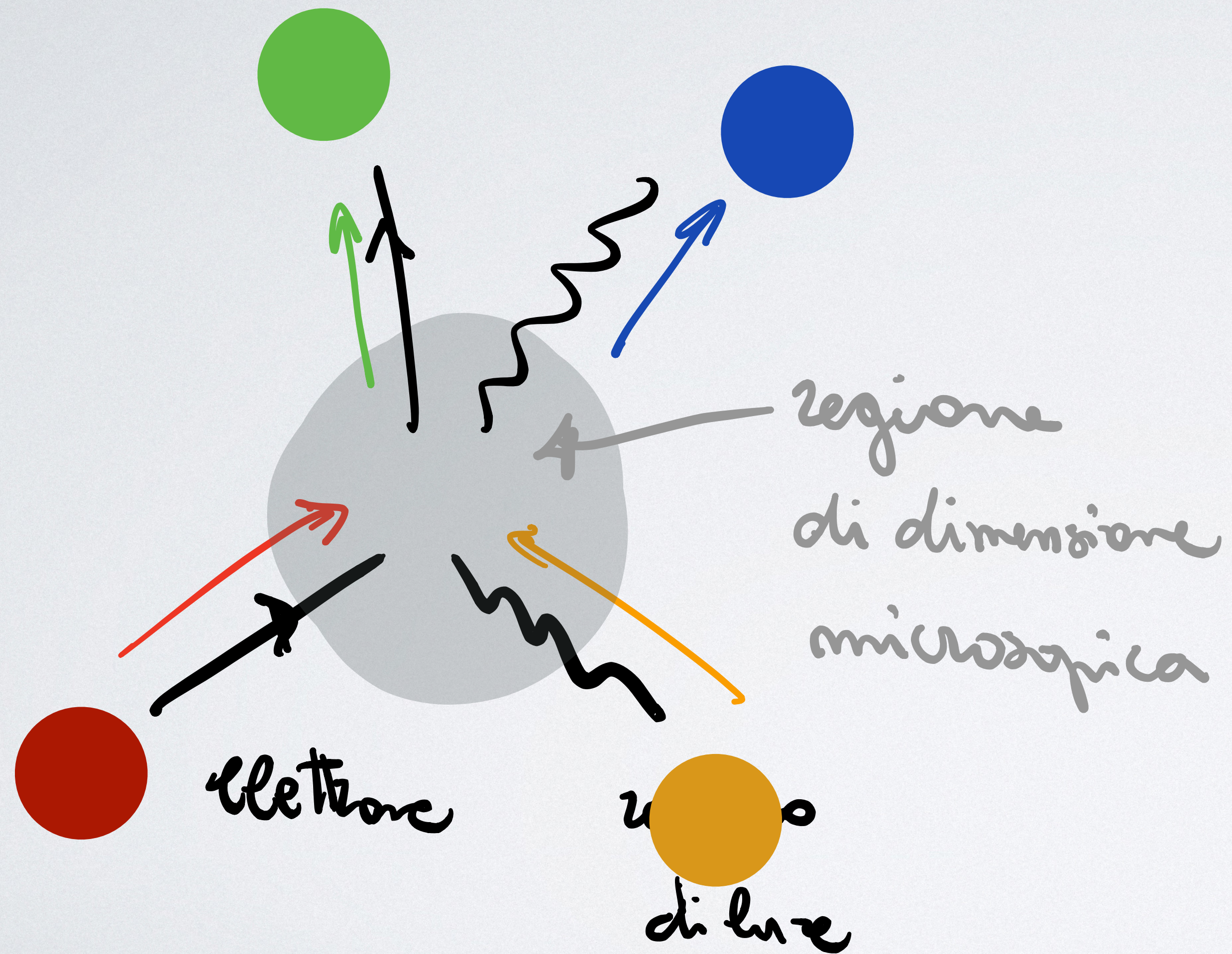


# CHE SUCCEDDE SE FACCIAMO COLLIDERE DUE PARTICELLE?





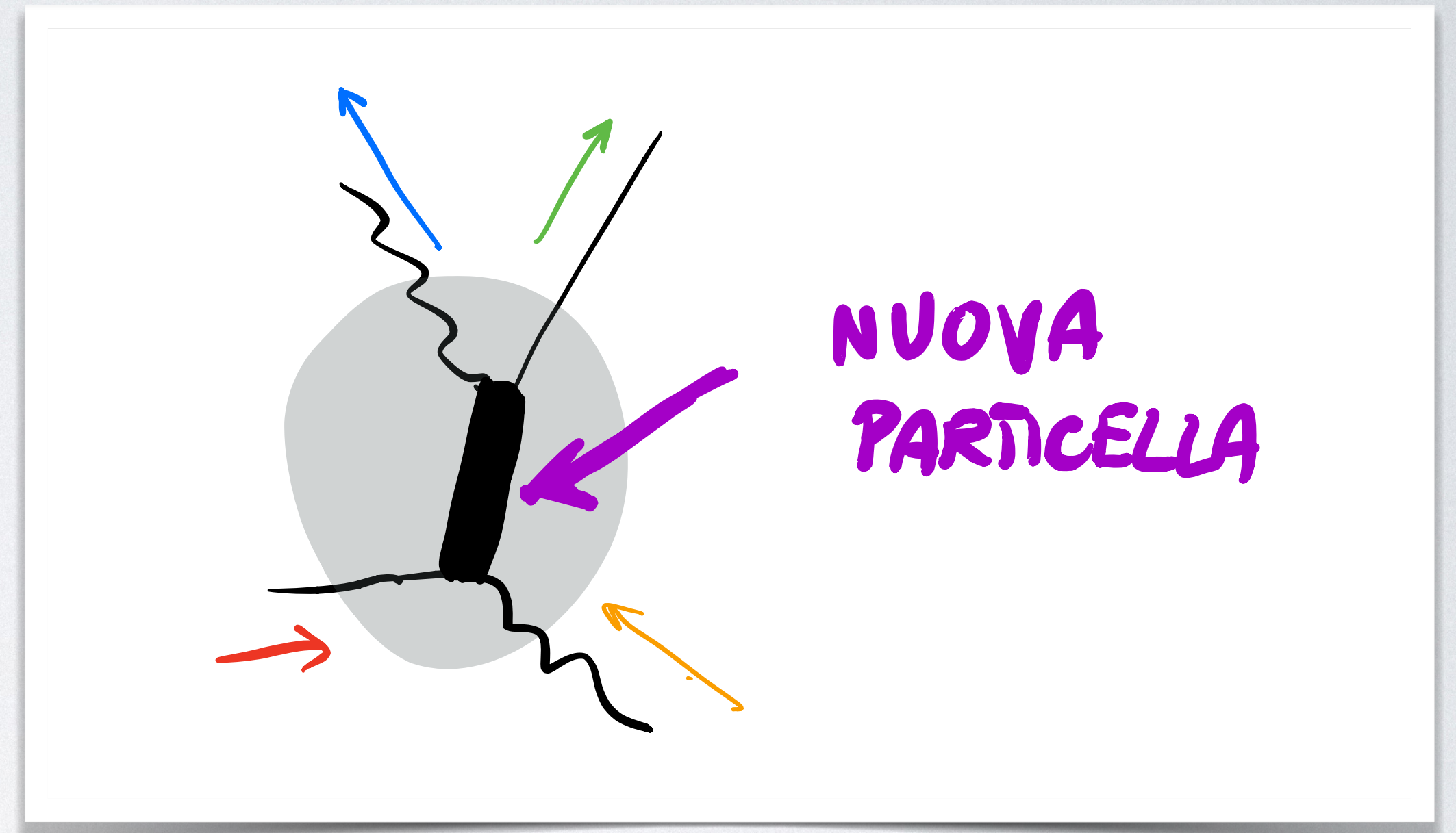
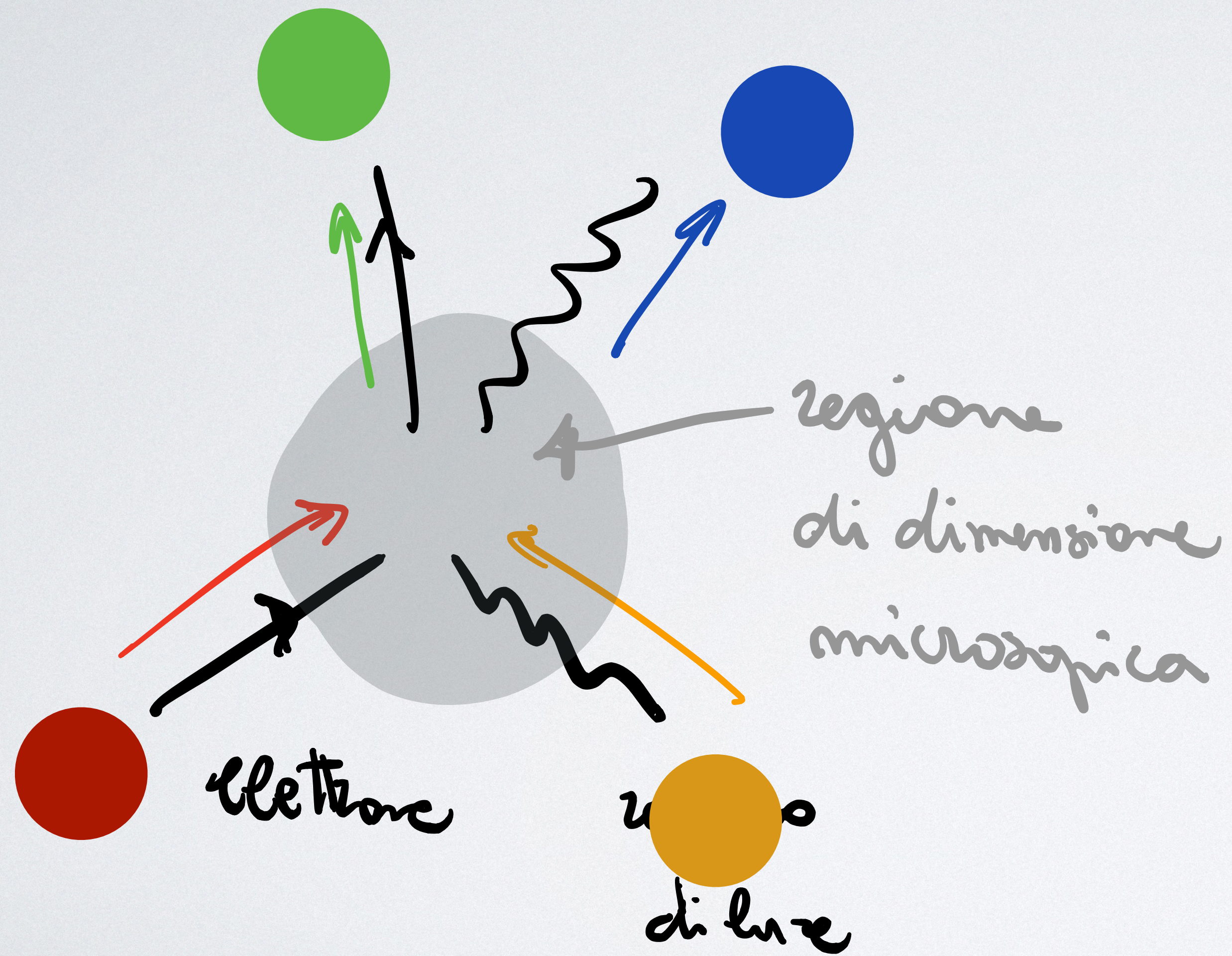
# UN CASO SPECIALE ... UNA NUOVA PARTICELLA!



$$c^2t^2 - x^2 = s^2 \longrightarrow E^2 - p^2c^2 = m^2c^4$$

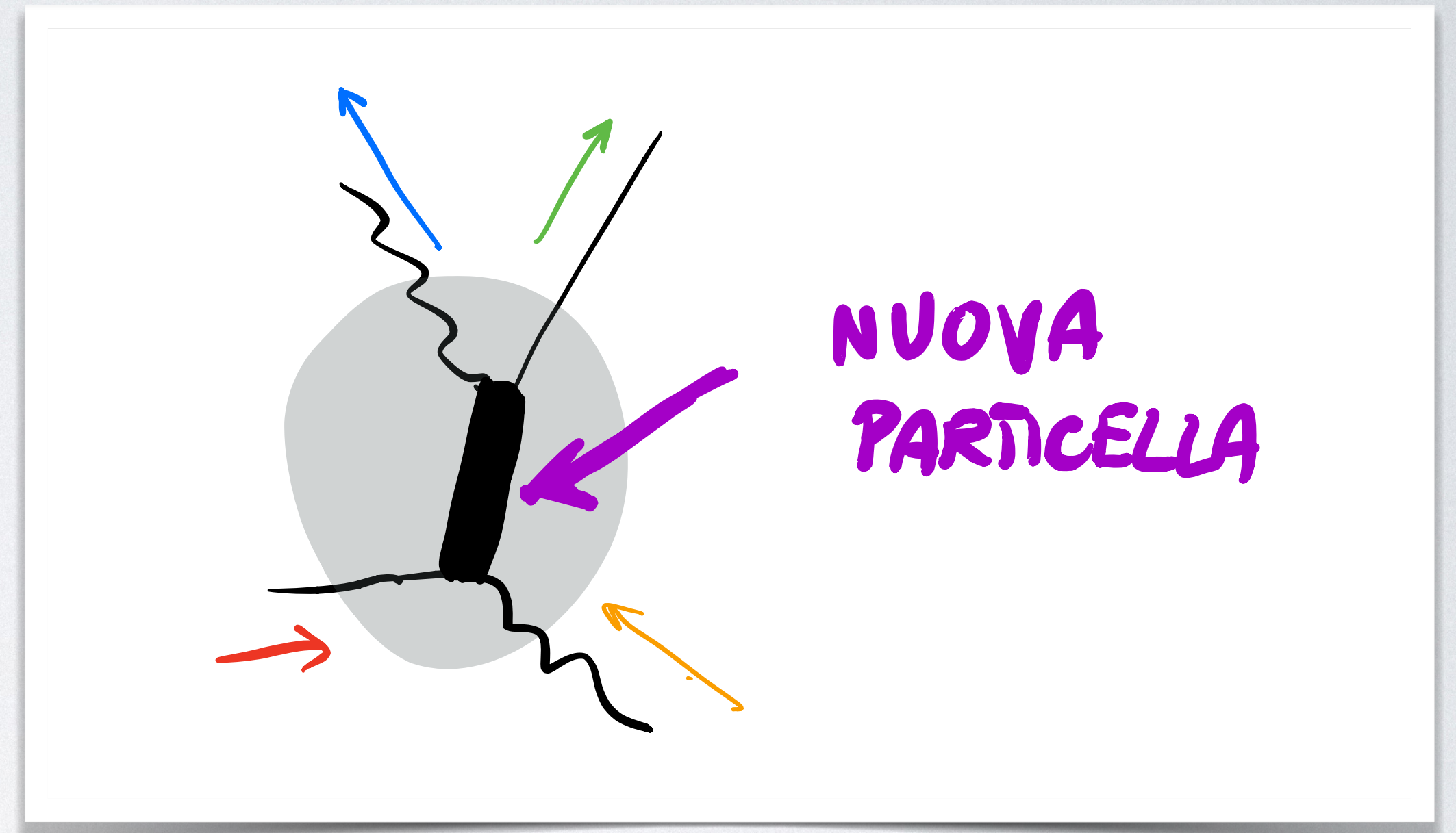
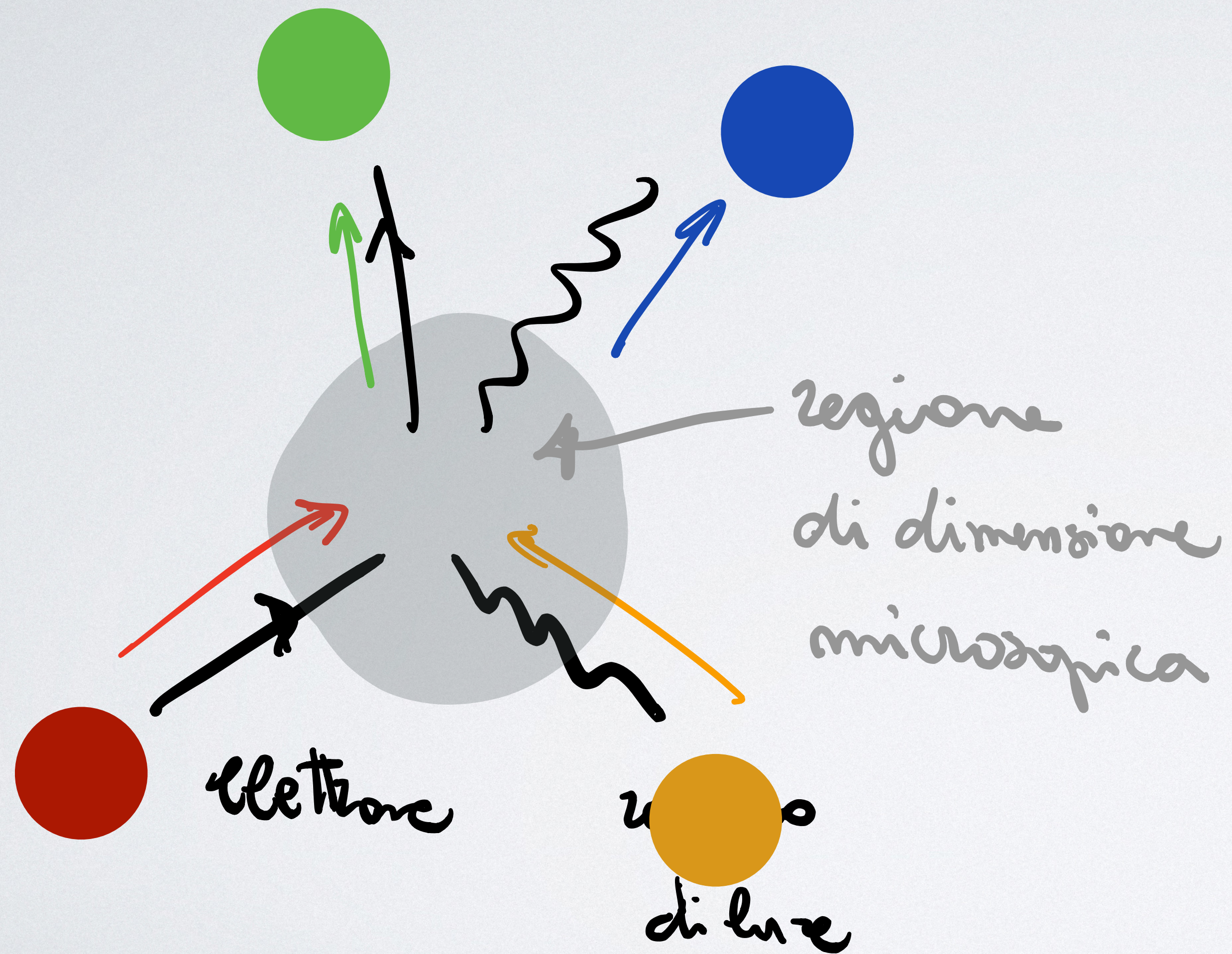


# UN CASO SPECIALE ... UNA NUOVA PARTICELLA!





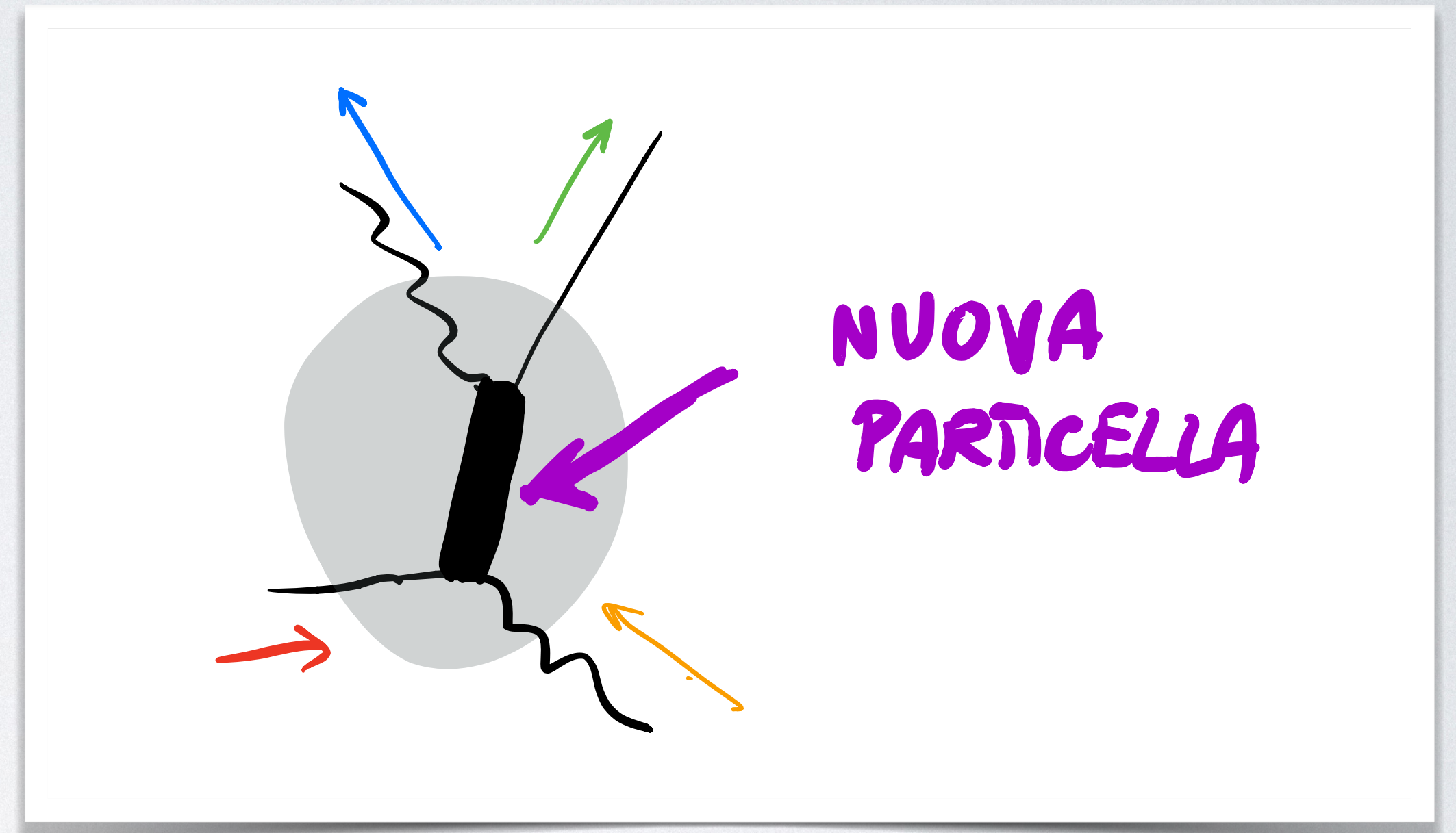
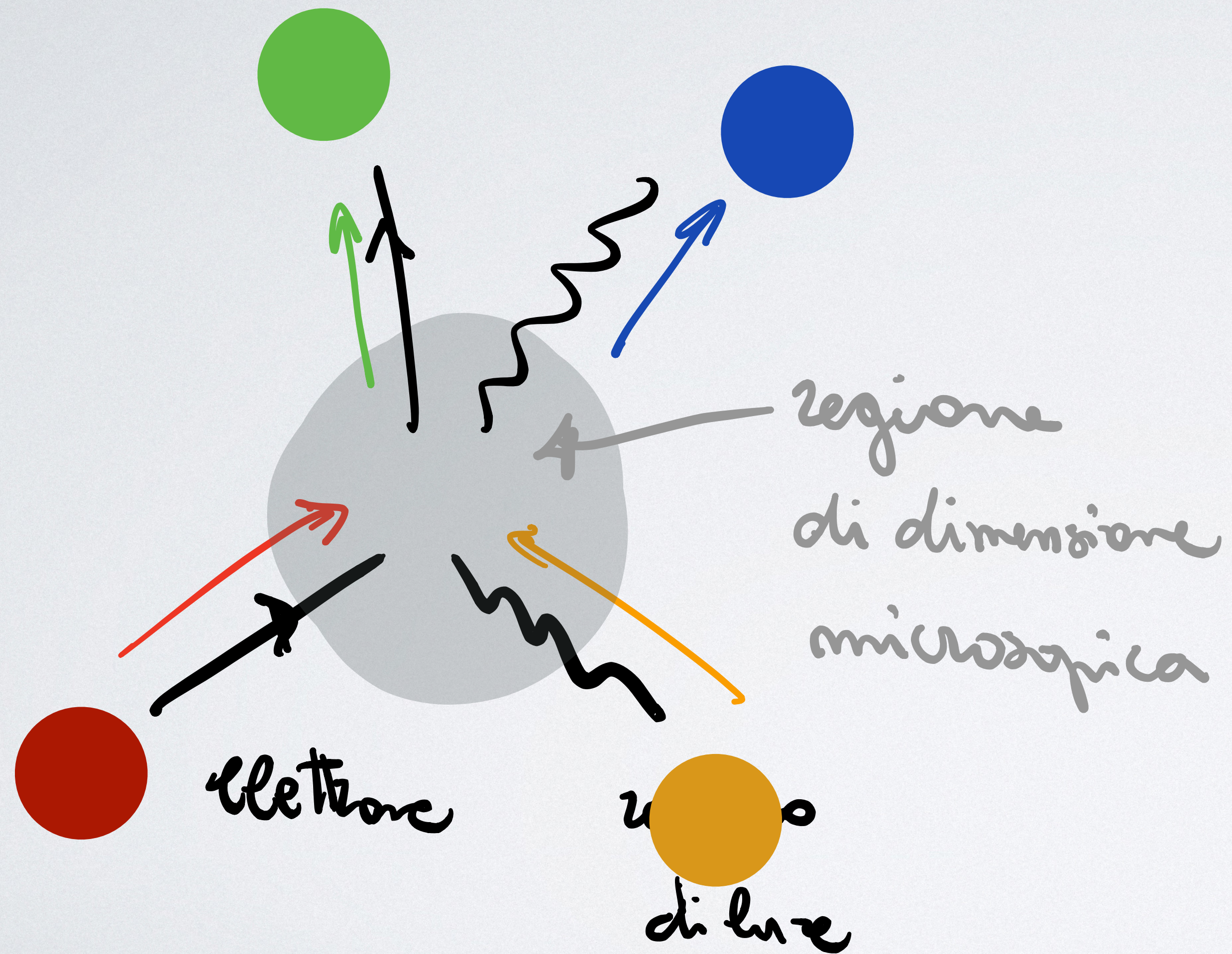
# UN CASO SPECIALE ... UNA NUOVA PARTICELLA!



$$c^2t^2 - x^2 = s^2 \longrightarrow E^2 - p^2c^2 \simeq m^2c^4$$



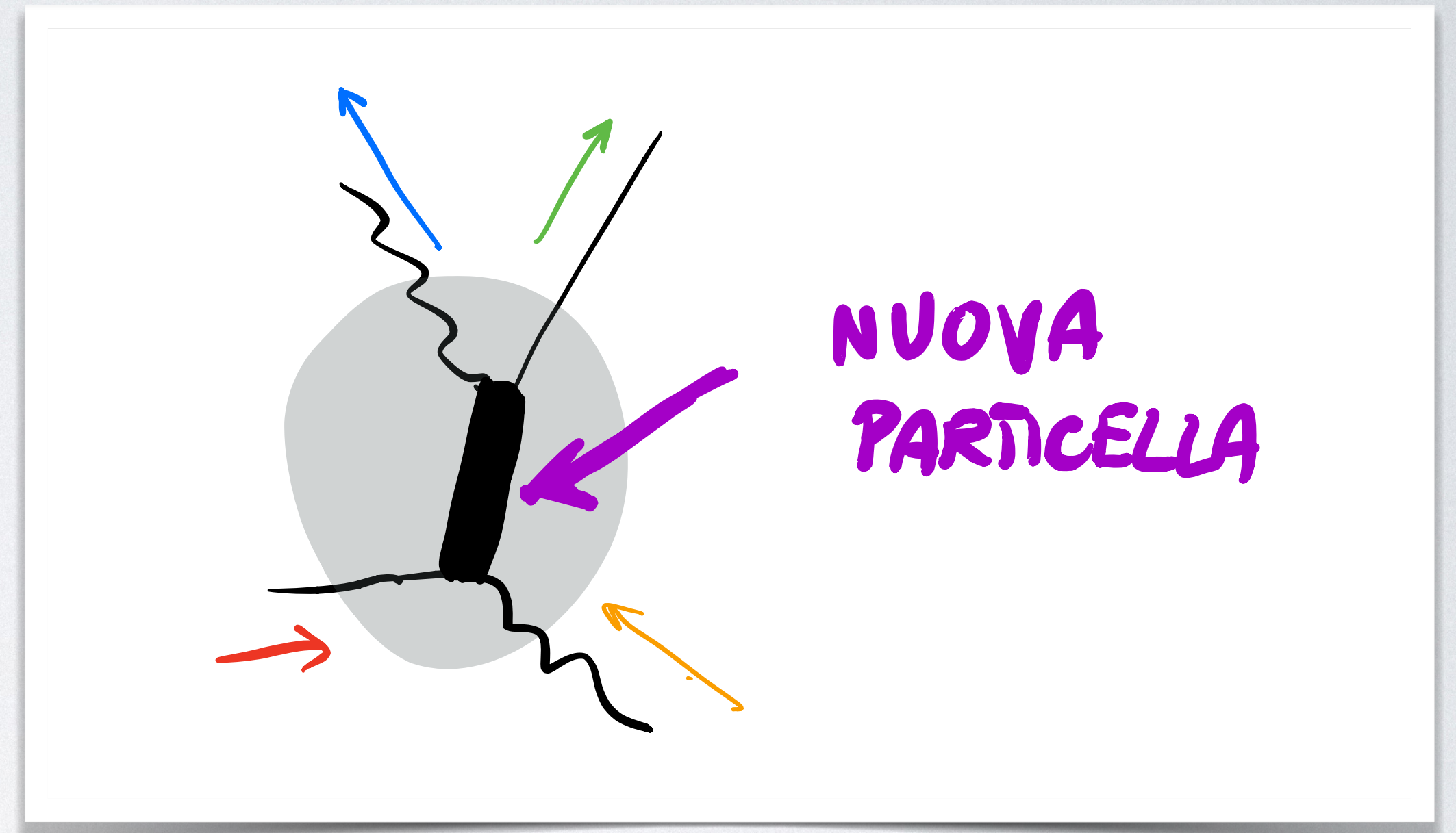
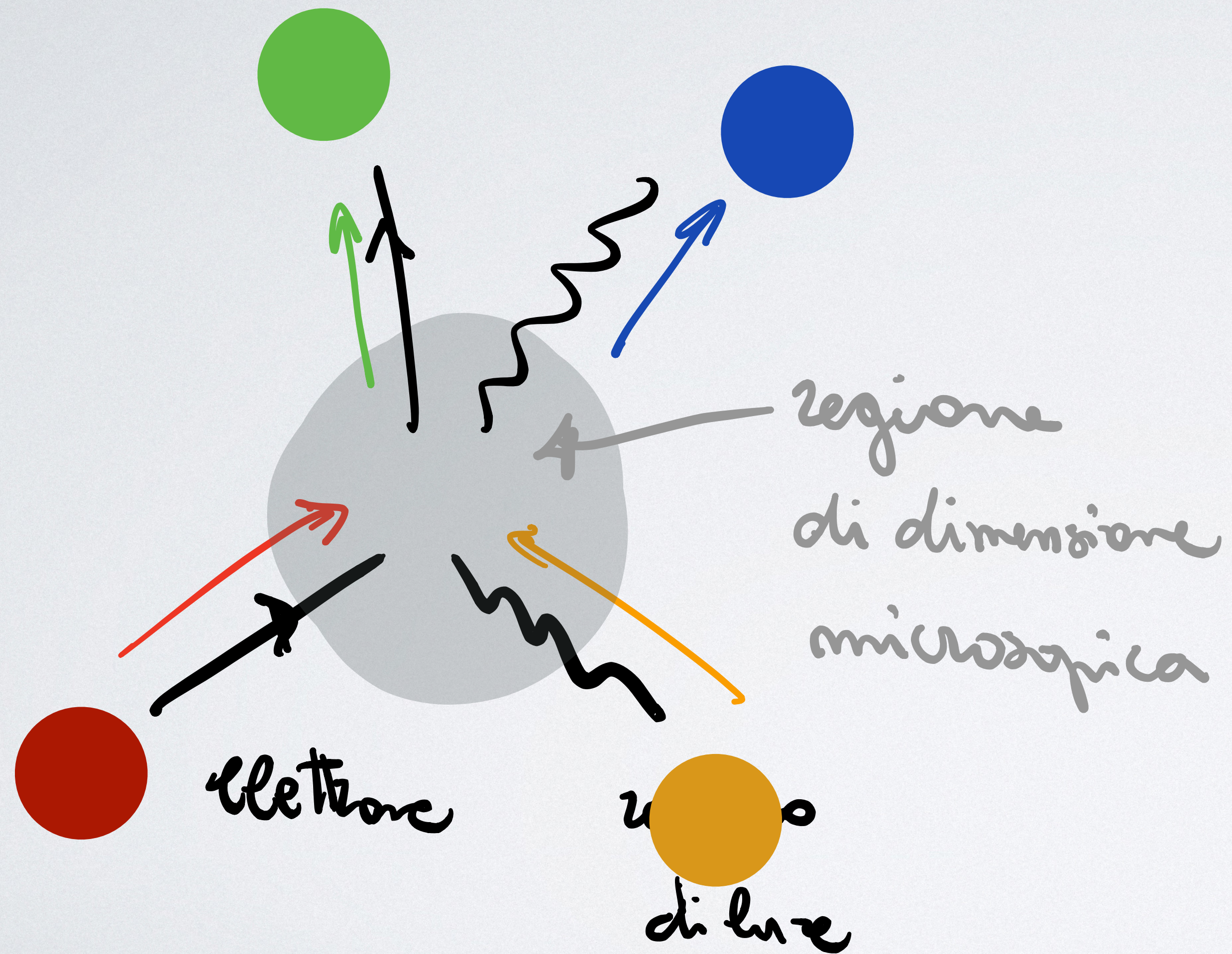
# UN CASO SPECIALE ... UNA NUOVA PARTICELLA!



$$c^2t^2 - x^2 = s^2 \longrightarrow E^2 - p^2c^2 \simeq m^2c^4 \pm \Gamma$$



# UN CASO SPECIALE ... UNA NUOVA PARTICELLA!



$$c^2t^2 - x^2 = s^2 \longrightarrow E^2 - p^2c^2 \simeq m^2c^4 \pm \Gamma$$

$$\sqrt{E^2 - p^2c^2} \simeq (m \pm \Gamma)c^2$$



# RIASSUMENDO

- Gli oggetti microscopici (più piccoli di un atomo) si comportano in modo assai diverso da quello che ci è familiare dall'esperienza comune.
- La traiettoria degli oggetti microscopici non è ben determinata, segue leggi probabilistiche (l'elettrone "passa" allo stesso tempo attraverso entrambe le fenditure!).
- Allo stesso tempo gli oggetti microscopici non sono onde, si presentano in quantità discrete (ogni elettrone fa un puntino sullo schermo)