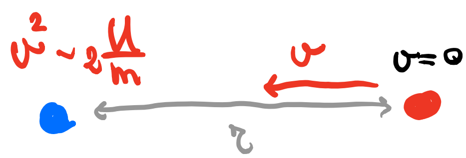
$$F = \frac{m_1 m_2}{r^2}\gamma \qquad \gamma = \begin{cases} \gamma_e & \text{elettrostatica} \\ \gamma_g & \text{gravitaz.} \end{cases}$$

$$\frac{q_1 q_2}{r^2}\gamma$$

$r \to 10^{-15}\,m$ ? la forza cresce all'infinito!

$$F \propto \frac{\Delta U}{\Delta r} \qquad U \propto \frac{1}{r} \quad \text{energia potenziale}$$




$$E \longleftrightarrow mc^2 \;???$$

Se una sorgente di forza elettrostatica o gravitazionale può essere molto piccola, un oggetto può essere posto molto vicino alla sorgente ed avere un energia enorme!

anche molto maggiore di energie di riposo dovute alle masse.

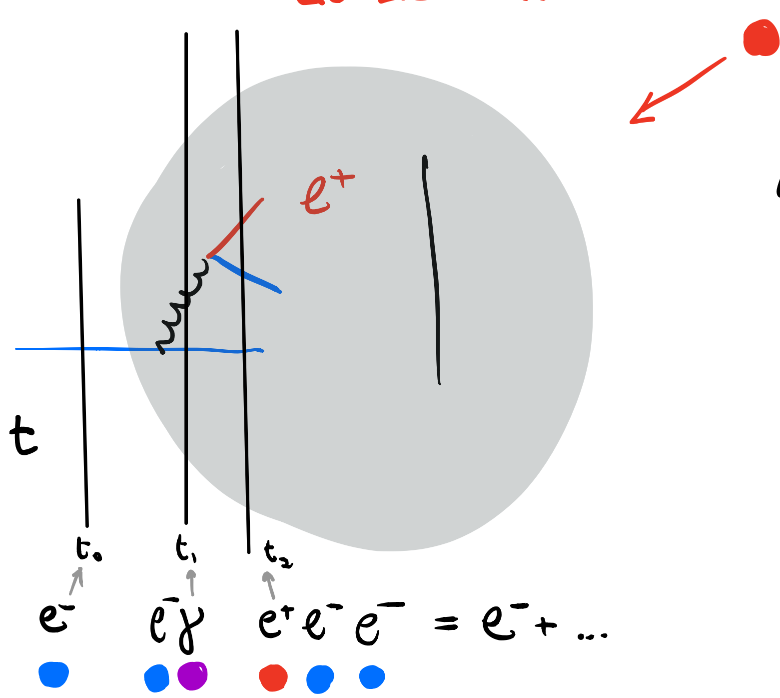
$$m_A c^2 + m_B \cdot c^2 \ll U(r \to 0)$$

Soluzione viene dal comportamento quantistico, che è inevitabile quando si va a distanze molto piccole

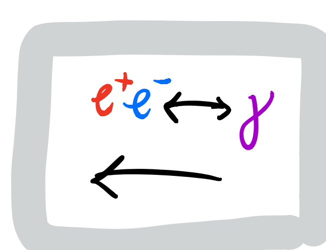
$$\Delta x \cdot \Delta p \sim \hbar$$

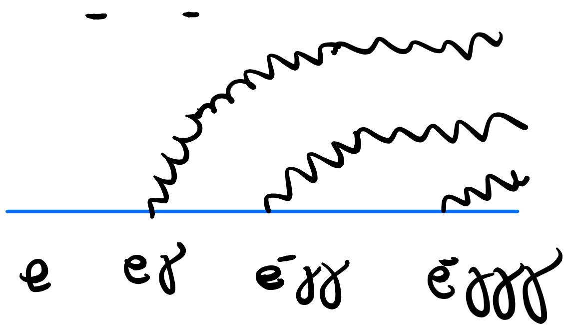
$$\Delta x \cdot \Delta p/c \cdot c \sim \hbar \qquad \left[\frac{\Delta x}{c}\right] = \text{tempo} \qquad [\Delta p \cdot c] = \text{Energia}$$

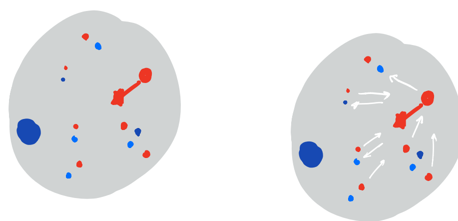
$$\Delta t \; \Delta E \sim \hbar$$

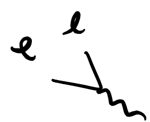


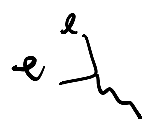

$$\Delta E \propto \frac{\hbar}{\Delta t}$$

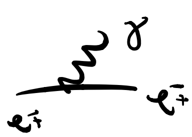




$n_{e^+}$ $\uparrow$  $\downarrow$ 


$n_{e^-}$ $\uparrow$  $\downarrow$ 


$n_\gamma$ $\uparrow$ 

$\downarrow$ 


$$N_{e^+}(t+\Delta t) = N_{e^+}(t) + n_\gamma - n_{e^-e^+}$$

$$N_{e^-}(t+\Delta t) = N_{e^-}(t) + n_\gamma - n_{e^-e^+}$$

$e^-$ sono ancora qui con noi

$e^+$ sono scomparsi

ci sono $10^{10}$ $\gamma$ per ciascun $e^-$ nell'universo