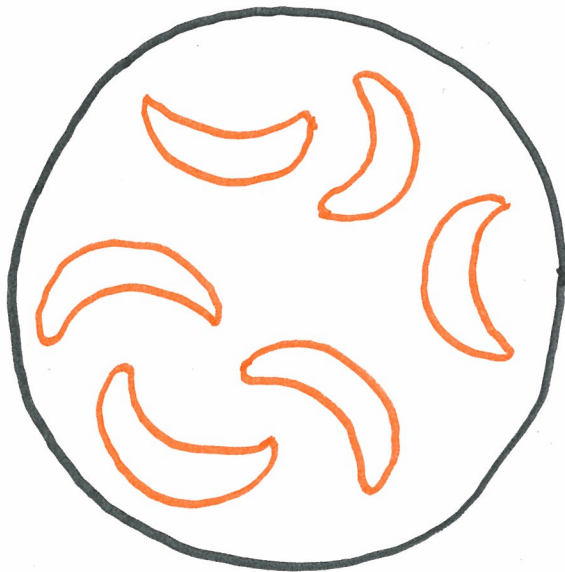


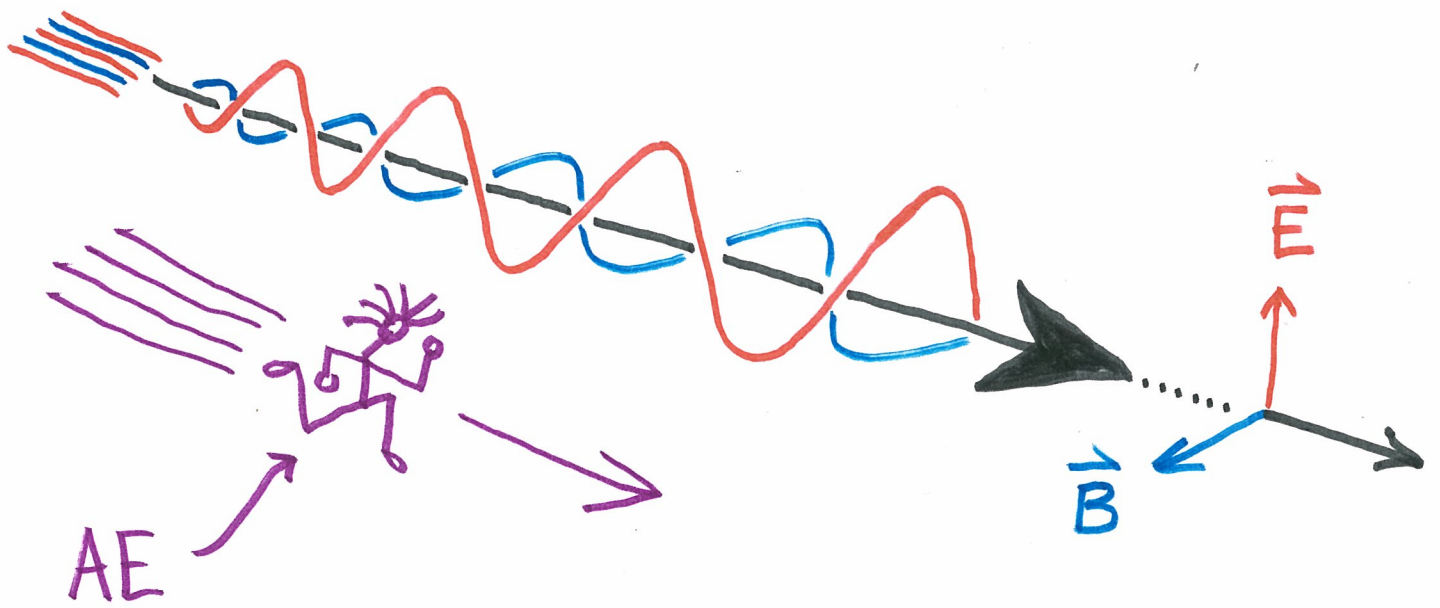
À ce moment-là [en particulier, vers la fin de son premier article sur  $E = mc^2$ , à l'automne 1905] Albert Einstein, inspiré par son instinct d'unité cosmique, laissa nonchalamment échapper une remarque pénétrante et d'une importance énorme, à savoir le fait que l'énergie dégagée par l'objet prenne une forme **électromagnétique** ne peut évidemment jouer aucun rôle [dans la perte d'un peu de la masse dudit objet].

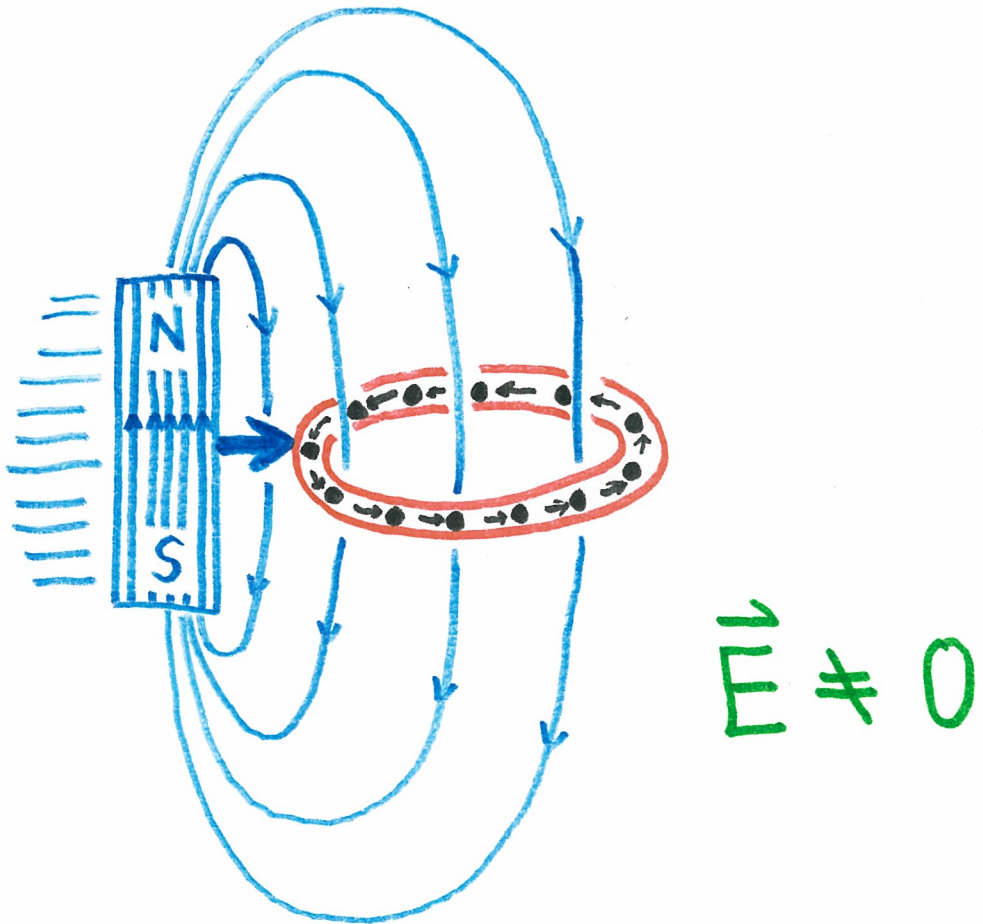
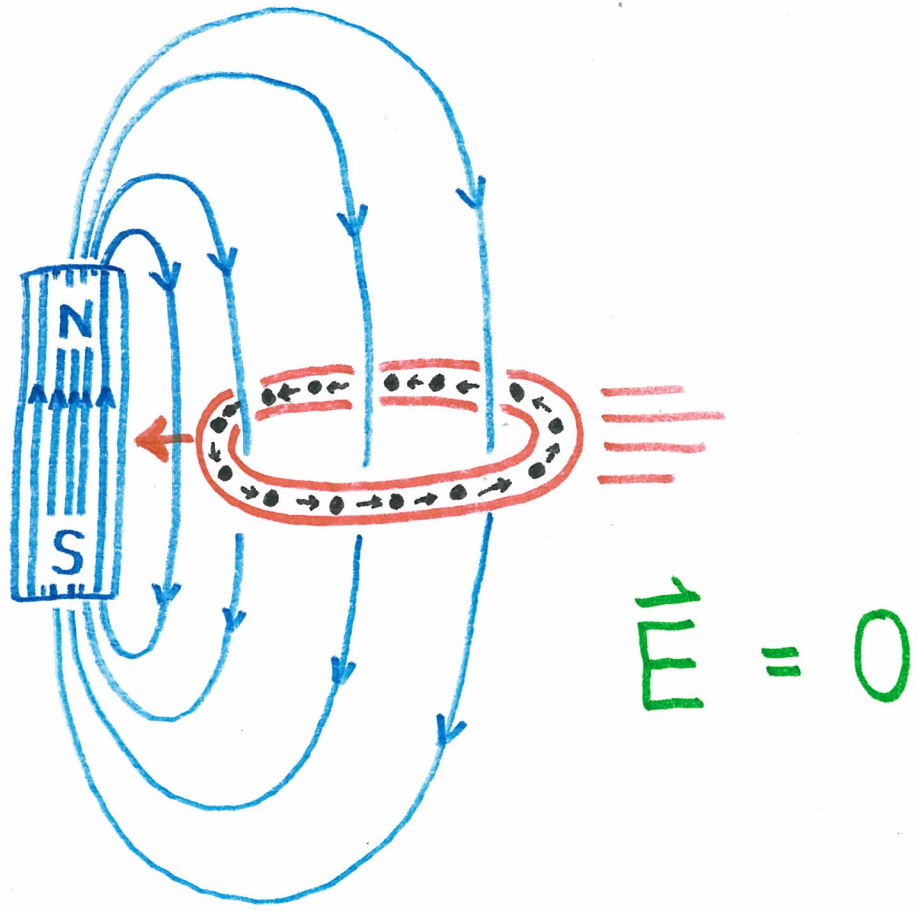
---

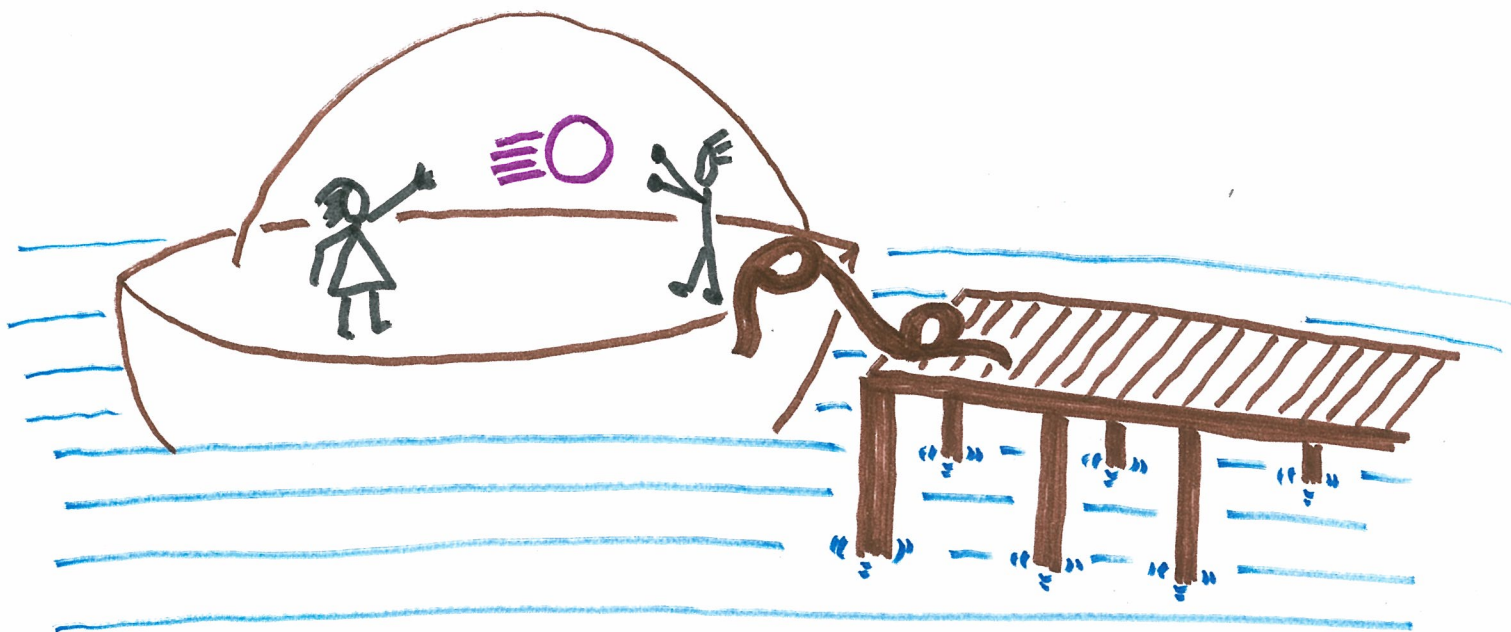
Dans son article de 1905, Einstein avait déclaré que toute forme d'énergie possède de la masse. Mais même pour lui il fallut encore deux ans avant d'arriver à la réalisation bouleversante que le contraire devait être le cas aussi : à savoir, que toute forme de masse doit posséder de l'énergie. Il fut amené à cette conclusion par des raisons esthétiques.

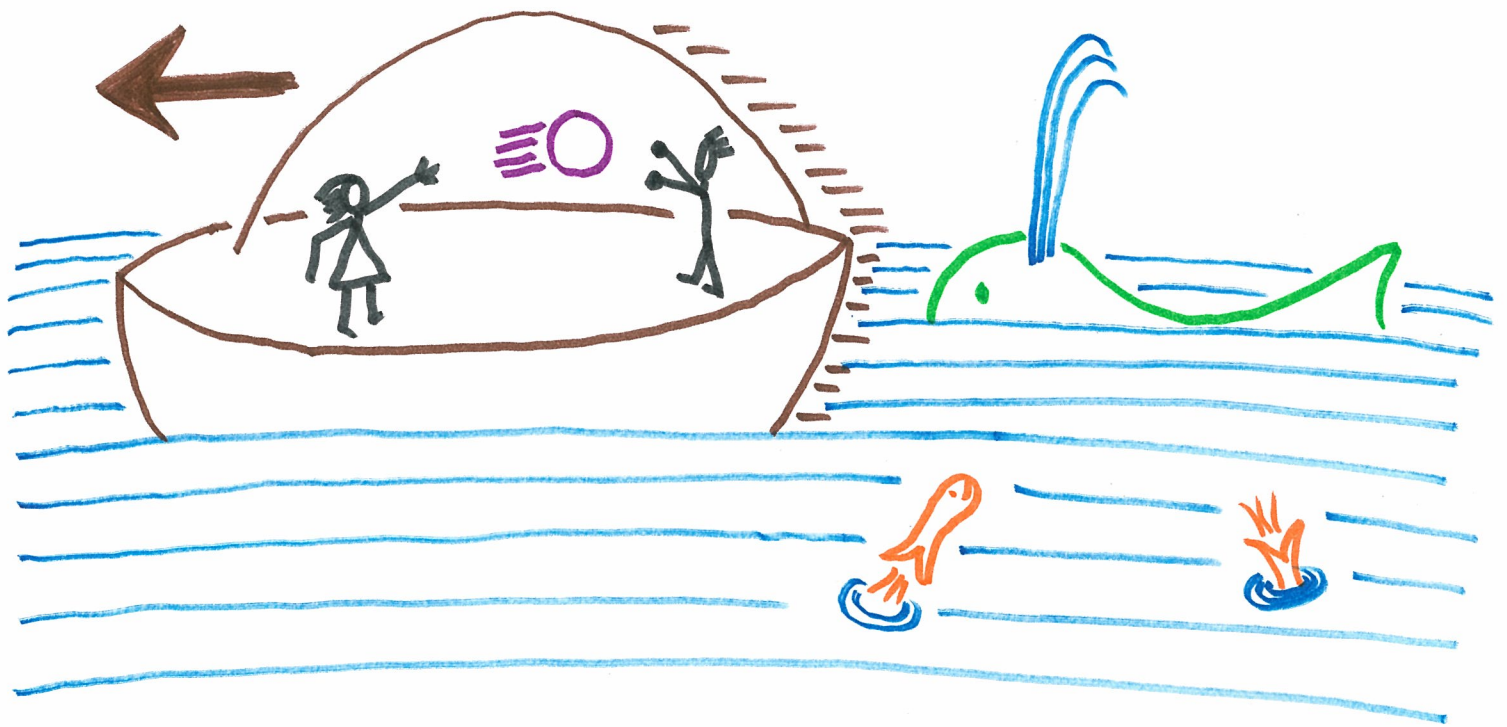
Pourquoi trancher nettement entre, d'un côté, le type de masse qui appartient intrinsèquement à un objet donné, et d'un autre côté, le type de masse qu'il perd quand il dégage de l'énergie ? Faire ainsi serait imaginer, sans aucune motivation, deux types de masse, alors qu'un seul type suffirait. Une telle dichotomie serait inélégante et privée de toute défense logique. Il s'ensuivit [dans la tête d'Einstein] qu'à toute forme de masse était nécessairement associée de l'énergie.

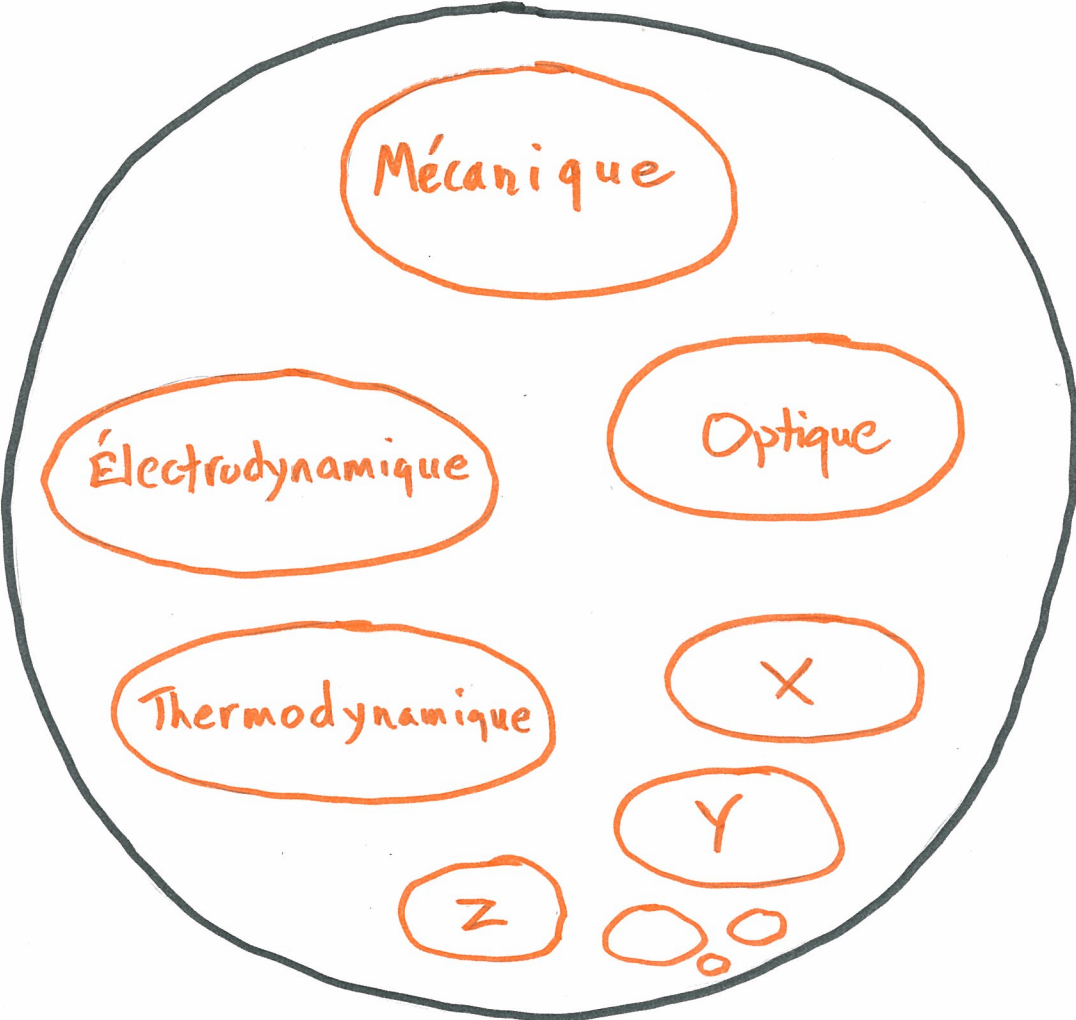












Albert Einstein sur sa généralisation par analogie du Principe de relativité galiléenne :

L'idée qu'un principe [celui de Galilée] ayant une généralité tellement large puisse valoir dans *un* domaine de la physique [la mécanique] mais en même temps ne pas valoir dans *un autre* domaine [l'électromagnétisme] me frappa comme *a priori* assez peu probable.

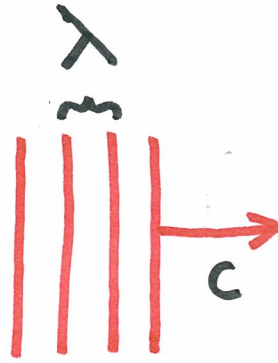


LIGHT IS A

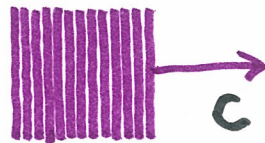
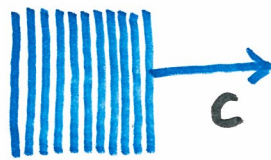
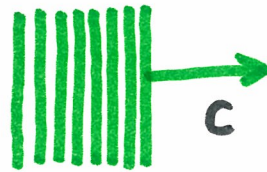
WAVE!

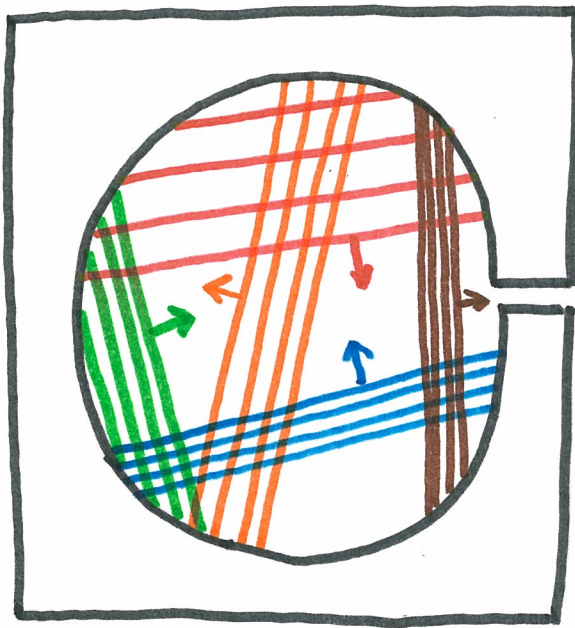


$$\lambda \nu = c$$

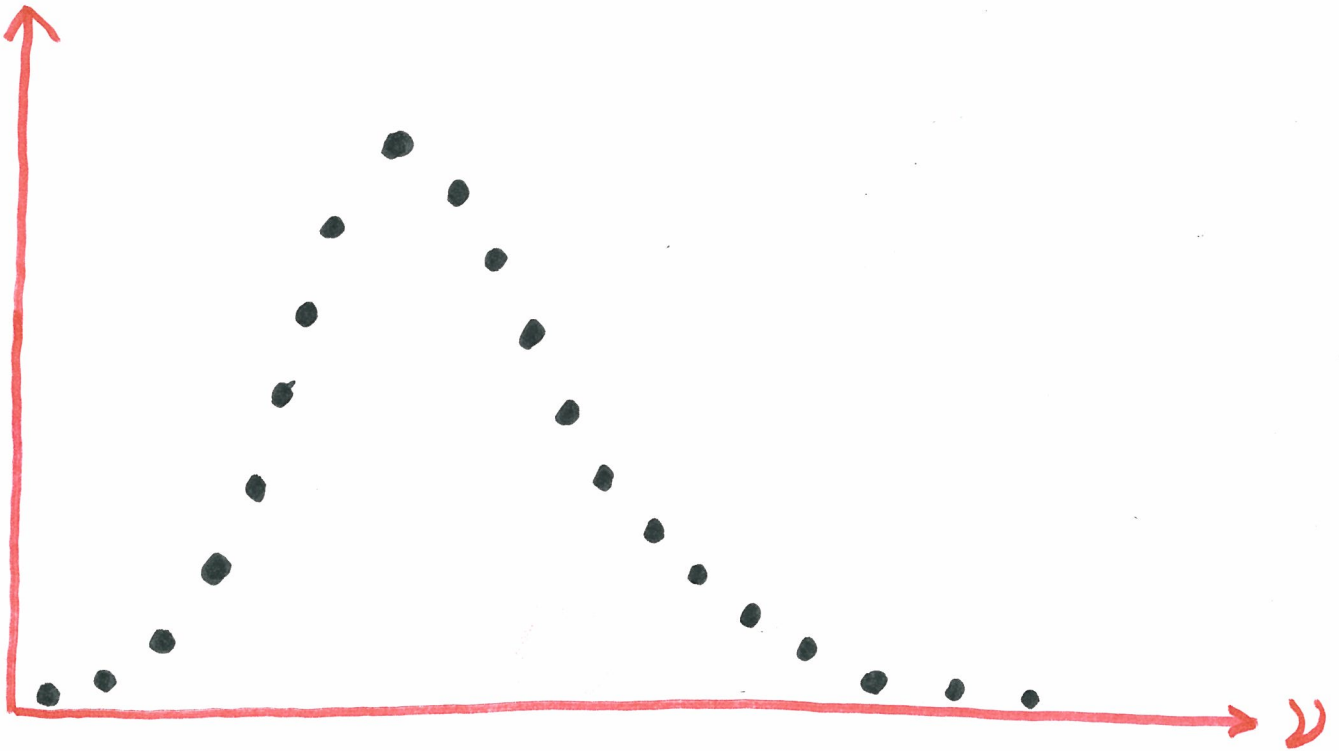


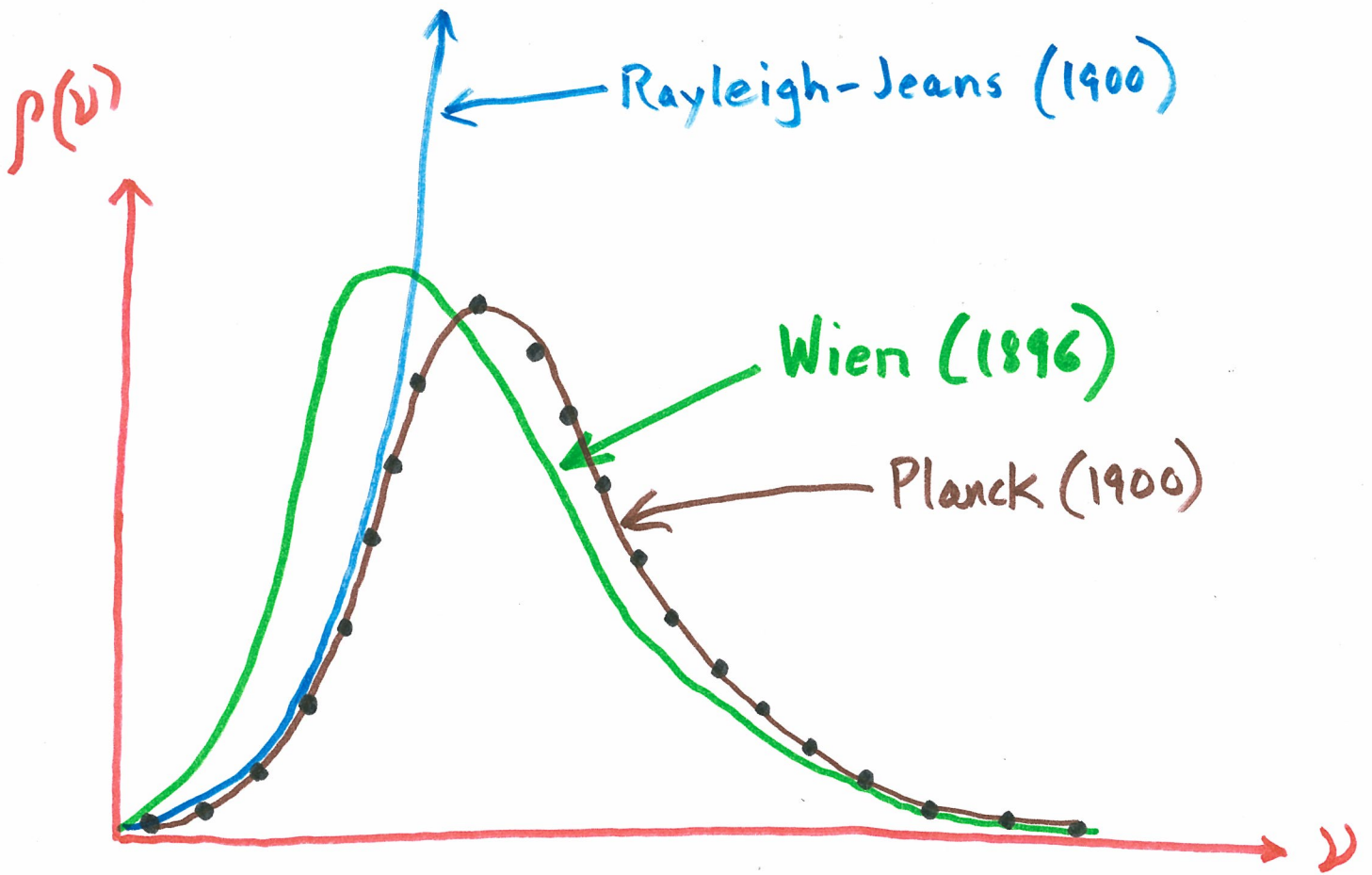
$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$





$\rho(\nu)$

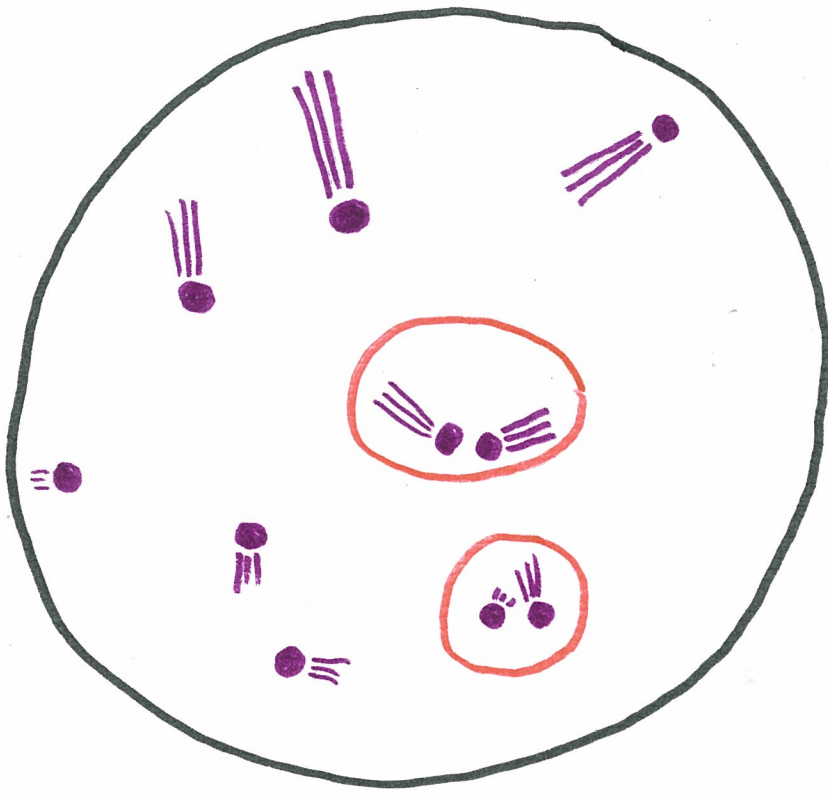




$$\text{R-J : } \rho(\nu) \sim \nu^2$$

$$\text{Wien : } \rho(\nu) \sim \nu^3 e^{-h\nu/kT}$$

$$\text{Planck : } \rho(\nu) \sim \frac{\nu^3}{e^{h\nu/kT} - 1}$$



Wien:  $(h\nu)^3 e^{-(h\nu)/kT}$

Maxwell-Boltzmann:  $(K.E.) e^{-(K.E.)/kT}$



Einstein 1905:

$$\Delta S_{\text{Max-Boltz}} = k \log \left[ \left( \frac{\nu}{\nu_0} \right)^{\textcircled{N}} \right]$$

$$\Delta S_{\text{Wien}} = k \log \left[ \left( \frac{\nu}{\nu_0} \right)^{\textcircled{E/h\nu}} \right]$$

$$\frac{E}{h\nu} = N \quad ?$$

LIGHT IS A

particle!

LIGHT IS A

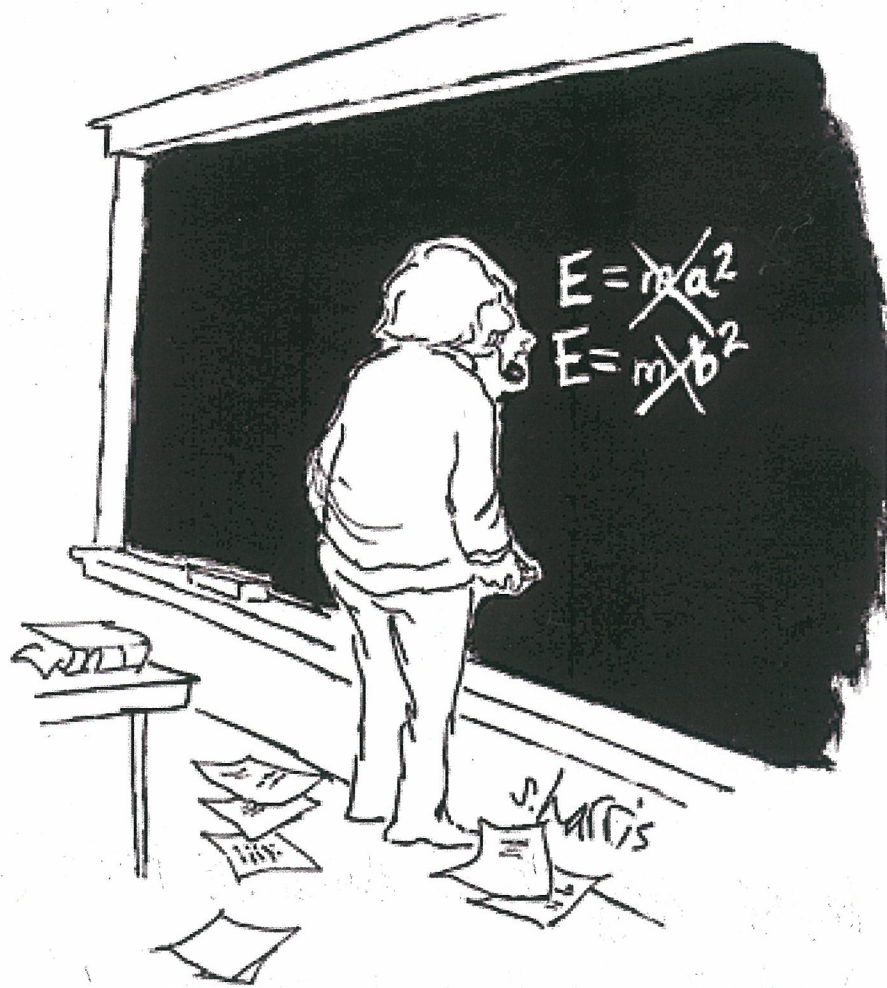
WAVE!

LIGHT IS A

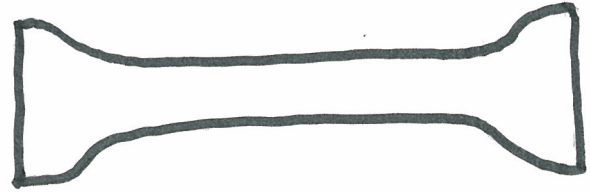
WAVE!

LIGHT IS A

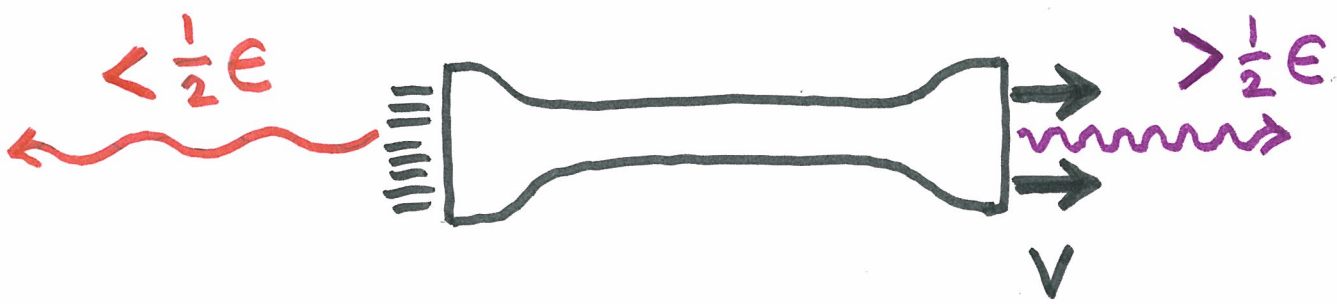
particle!



$\frac{1}{2} \epsilon$



$\frac{1}{2} \epsilon$



Énergie cinétique d'un objet quelconque  
de masse  $m$  et vitesse  $v$  :

$$\frac{1}{2}mv^2$$

l'énergie qui manque, grâce à  
l'effet Doppler :

$$\frac{1}{2}\left(\frac{E}{c^2}\right)v^2$$

Conclusion :

l'ampoule a perdu une masse de

$$\frac{E}{c^2}$$

$$\text{Masse perdue} = \frac{E}{c^2}$$

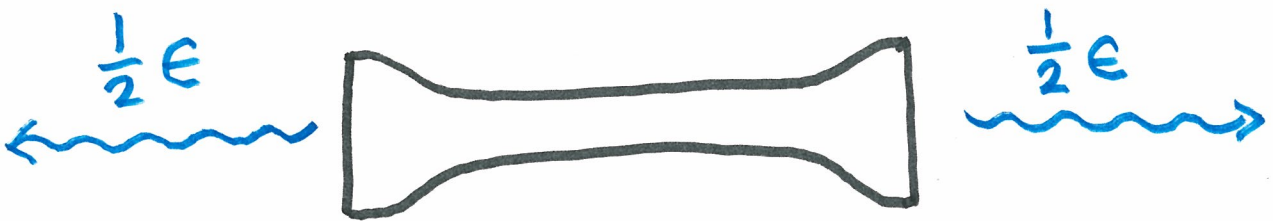


À ce moment-là [en particulier, vers la fin de son premier article sur  $E = mc^2$ , à l'automne 1905] Albert Einstein, inspiré par son instinct d'unité cosmique, laissa nonchalamment échapper une remarque pénétrante et d'une importance énorme, à savoir le fait que l'énergie dégagée par l'objet prenne une forme **électromagnétique** ne peut évidemment jouer aucun rôle [dans la perte d'un peu de la masse dudit objet].

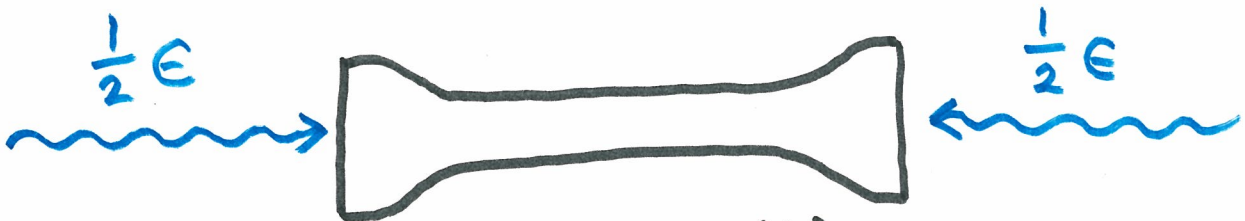
---

Dans son article de 1905, Einstein avait déclaré que toute forme d'énergie possède de la masse. Mais même pour lui il fallut encore deux ans avant d'arriver à la réalisation bouleversante que le contraire devait être le cas aussi : à savoir, que toute forme de masse doit posséder de l'énergie. Il fut amené à cette conclusion par des raisons esthétiques.

Pourquoi trancher nettement entre, d'un côté, le type de masse qui appartient intrinsèquement à un objet donné, et d'un autre côté, le type de masse qu'il perd quand il dégage de l'énergie ? Faire ainsi serait imaginer, sans aucune motivation, deux types de masse, alors qu'un seul type suffirait. Une telle dichotomie serait inélégante et privée de toute défense logique. Il s'ensuivit [dans la tête d'Einstein] qu'à toute forme de masse était nécessairement associée de l'énergie.



$$\Delta M = -\left(\frac{\epsilon}{c^2}\right)$$



$$\Delta M = +\left(\frac{\epsilon}{c^2}\right)$$

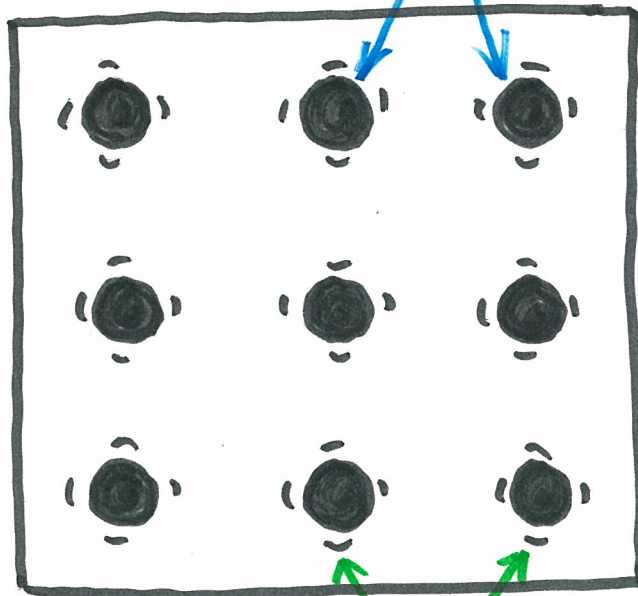
Le départ ou l'arrivée d'énergie  $E$   
change la masse d'un objet de  $E/c^2$

$$\pm E \longrightarrow \pm \Delta M = \pm \frac{E}{c^2}$$

$$E \Rightarrow Mc^2$$

la cause  $\nearrow$   $\nwarrow$  le résultat

Masse due aux particules



Masse  
« grumeleuse »

Masse due à leur mouvement  
Masse « frétilante »

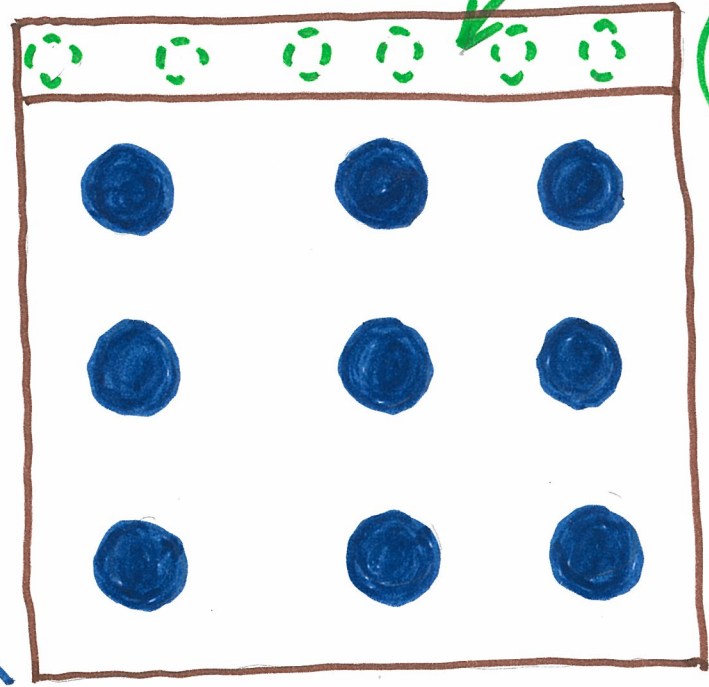
2 types de masse (1905)

Réservoir de  
masse utilisable

Masse frétilante

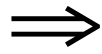
(due à l'énergie)  
des atomes

Masse  
grumeleuse  
inutilisable



Conclusion sur la masse :

« *Certains types* d'énergie ont de la masse »

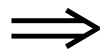


« *Tous les types* d'énergie ont de la masse »

---

Inversion de cette conclusion sur la masse :

« *Certains types* de masse ont de l'énergie »



« *Tous les types* de masse ont de l'énergie »

---

Pressions inconscientes pour ce glissement conceptuel :

B. Hoffmann :

« Pourquoi trancher nettement entre, d'un côté, le type de masse qui appartient intrinsèquement à un objet donné, et d'un autre côté, le type de masse qu'il perd quand il dégage de l'énergie ? Faire ainsi serait imaginer, sans aucune motivation, deux types de masse, alors qu'un seul type suffirait. Une telle dichotomie serait inélégante et privée de toute défense logique. »

Analogie :

L'énergie est conservée / La masse est conservée

(alors la masse ressemble beaucoup à l'énergie)

Mais une particule (un grumeau) ne peut pas disparaître !

Gros problème.

L'analogie à la rescousse !

Hypothèse :

Les deux types d'énergie —

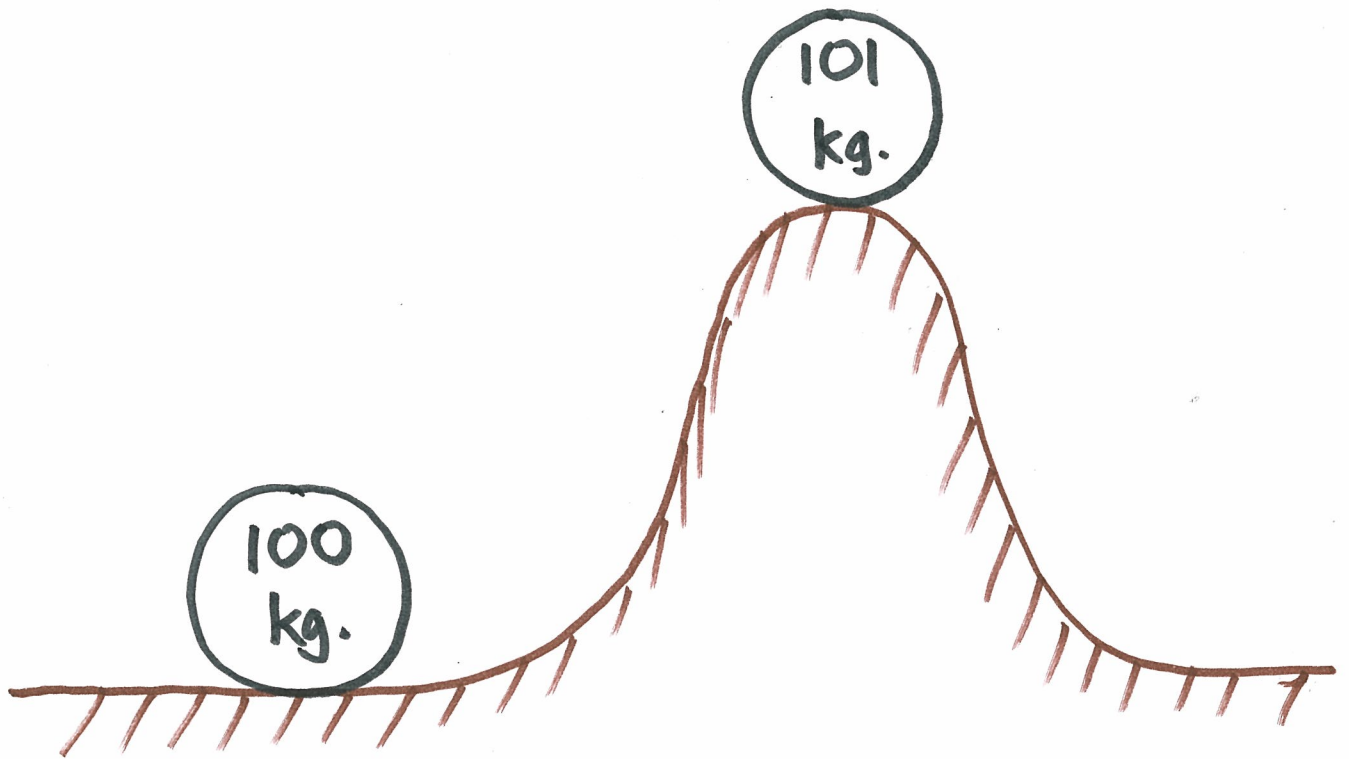
énergie cinétique et énergie potentielle

correspondent aux deux types de masse —

masse grumeleuse et masse frétilante.

Tout cela plusieurs décennies avant la découverte de l'annihilation, lors d'une collision, des électrons et de leurs antiparticules, les positrons, pour former deux photons.

C'est l'ambilampe de 1905 mais avec la masse *grumeleuse* cette fois au lieu de la masse *frétilante* ; c'est la confirmation absolue de l'interprétation de 1907 d'Einstein de son équation la plus célèbre.



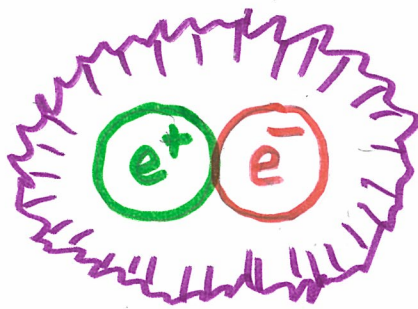
L'énergie potentielle a aussi de la masse!



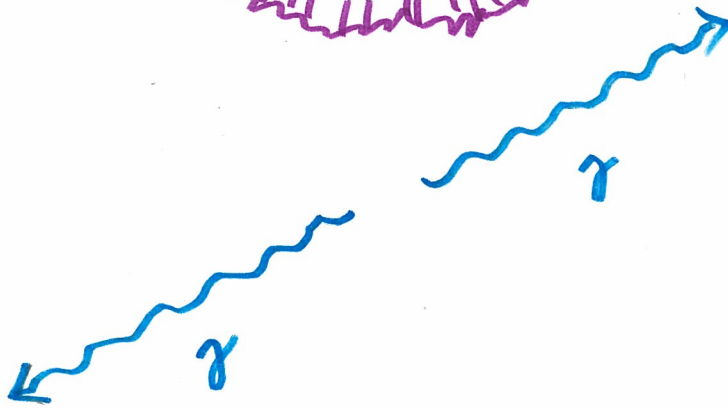
①



②

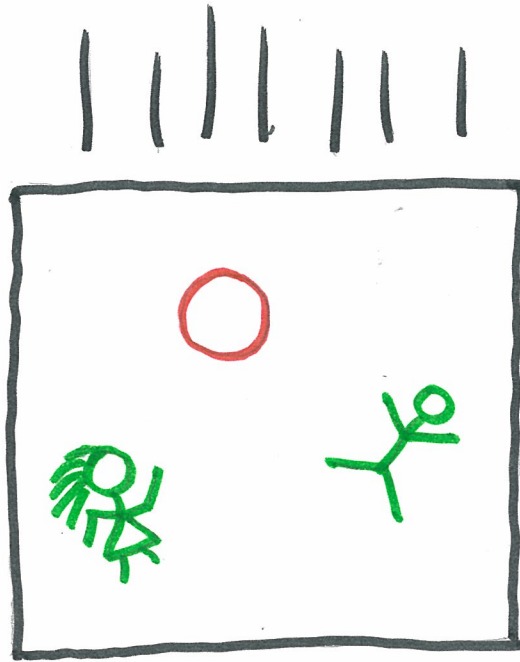


③

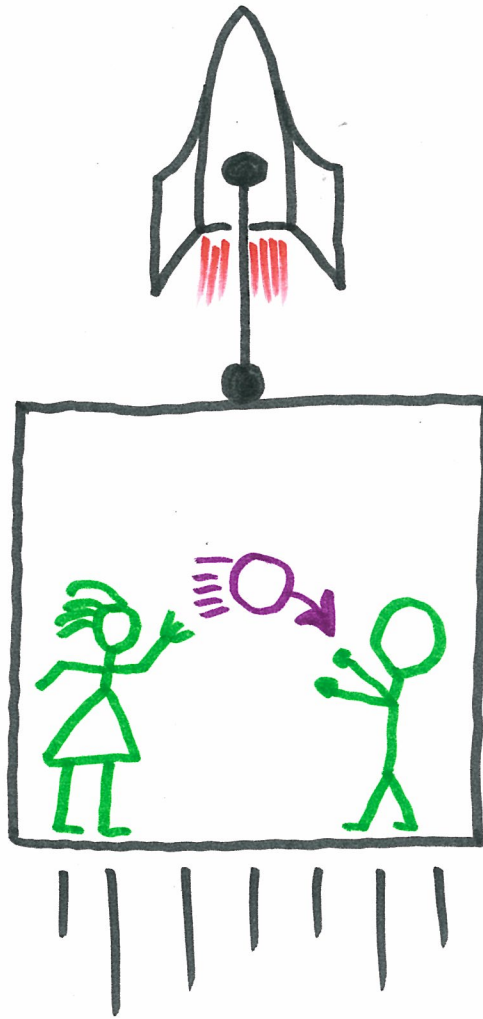


L'idée que l'on puisse distinguer entre le mouvement à vitesse constante et le mouvement accéléré est « aussi puérile que l'idée du “centre du monde” dans la philosophie d'Aristote ».

— Albert Einstein.



$$F_{\text{grav}} = 0$$



$$F_{\text{fict}} = F_{\text{"grav"}}$$

$$F_{\text{grav}} \propto m$$

$$F_{\text{fict}} \propto m$$

GRAVITATION

« Je trouvais enfin l'analogie décisive entre les systèmes en rotation et la géométrie non-euclidienne lors de mon retour à Zurich.... » (1912)

Généralisation de Pythagore :

$$c^2 = a^2 + b^2 \implies c^2 = ka^2 + 2k'ab + k''b^2$$

$$c^2 = (a \ b) \begin{pmatrix} k & k' \\ k' & k'' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}$$

tenseur  
métrique

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

dans un système  
non accéléré

Principe de la relativité restreinte  
(la relativité galiléenne généralisée)

---

On ne peut distinguer  
entre un système de repères  
*qui est au repos*  
et un système *qui est en mouvement*

où « en mouvement »  
veut dire  
« qui se déplace  
à une vitesse constante »

à l'aide d'expériences  
mécaniques *et* optiques  
*et* électrodynamiques *et*  
thermodynamiques, etc.

Principe de la relativité générale  
(« Principe d'équivalence »)

---

On ne peut distinguer  
entre un système de repères  
*plongé dans un champ gravitationnel*  
et un système *en état d'accélération*

où « en état d'accélération »  
veut dire  
« qui se déplace  
de n'importe quelle façon »

à l'aide d'expériences  
mécaniques *et* optiques  
*et* électrodynamiques *et*  
thermodynamiques, etc.