



Pint Of Science 22/05/2019

Transformer la lumière en matière en laboratoire.

Léo Esnault

Doctorant au CELIA (Talence)

Encadrants :

Xavier Ribeyre, Emmanuel d'Humières

Sommaire

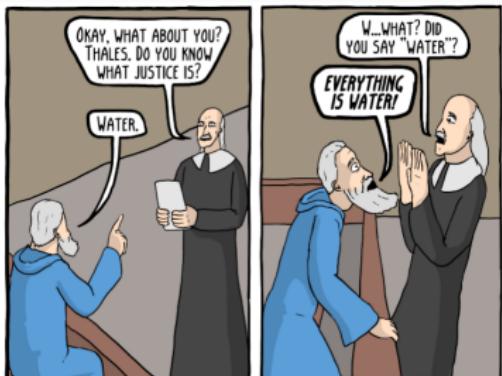
1. De quoi est fait l'Univers ?
2. Transformer la lumière en matière.
3. Concrètement, on fait quoi ?

De quoi est fait l'Univers ?

De quoi est fait l'Univers ? La philosophie antique

Toute bonne présentation commence par citer des grecs :

- Thalès : Tout est eau (matière)
- Anaximandre : Tout vient de l'*apeiron* (illimité, absolu)
- Pythagore : Tout est nombre
- Aristote : Tout est 4 éléments
- Leucippe : Tout est atome (discontinu)
- ...



Ces réflexions cherchent à explorer la **nature fondamentale** de l'Univers (= métaphysique), pas à **décrire son fonctionnement** (= physique).

De nombreux autres penseurs ont suivi de part le monde¹ ...

¹ Plus d'informations sur https://fr.wikipedia.org/wiki/Histoire_des_sciences ainsi que sur https://fr.wikipedia.org/wiki/Histoire_de_la_philosophie
La BD complète est disponible sur <http://existentialcomics.com/comic/155>

De quoi est fait l'Univers ? La découverte de l'atome

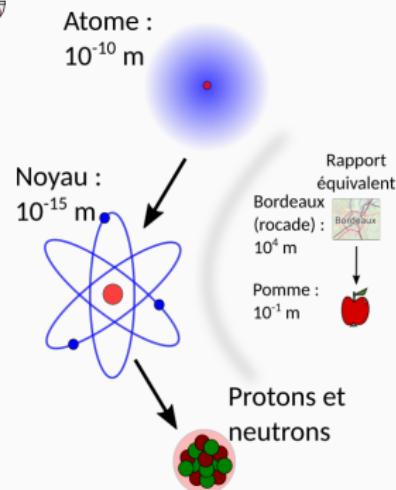
Quelques siècles et quelques expériences plus tard² ...

- 1804 : Proportions multiples $\text{O} + 2\text{H} = \text{H}_2\text{O}$
- XIX^{ème} : Débats entre atomistes, énergétistes et équivalentistes
- 1897 : Découverte de l'électron
- 1907 : Preuve ultime de l'existence des atomes
- 1909 : Découverte du noyau
- 1919 : Découverte du proton
- 1932 : Découverte du neutron

atomos = indivisible en Grec.

Atome = électrons autour d'un noyau (et noyau = protons + neutrons).

Molécule = assemblage d'atomes (chimie).



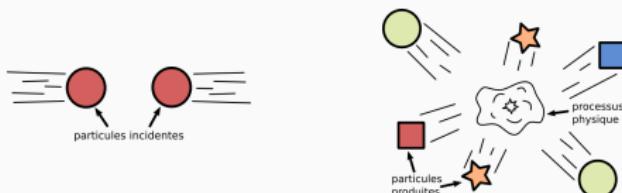
²Pour plus d'info, voir sur Youtube "e-penser : L'atome" et lire "M. Scheidecker, Débat sur les atomes au XIX^{ème} siècle".



De quoi est fait l'Univers ? De nouvelles particules ...

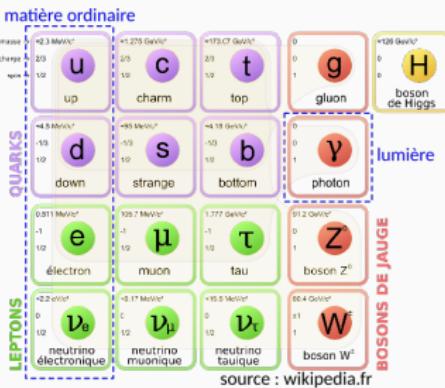
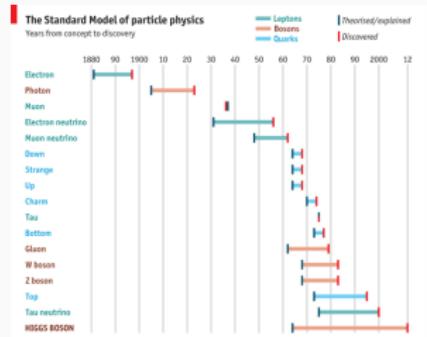
Observation = scénario (suite de processus) validé par les mesures³.

- 1932 : Découverte du positron
 - 1932 : 1^{er} accélérateur de particules



- 1950-1970 : D. de centaines de nouvelles particules "élémentaires"
 - 1960-2000 : Postulat puis preuve de l'existence des quarks
 - 1937, 1976 : D. des leptons μ et τ
 - 2012 : D. du boson de Higgs

D'autres particules sont prédictes, mais pas (encore) observées⁴ ...



³CEA, Les Savanturiers n°12

⁴Wikipedia : Liste de particules

De quoi est fait l'Univers ? La conception moderne

Qu'est ce qu'une particule    ? Pas une bille ! On dit que c'est l'excitation quantifiée d'un champ ... mais c'est un peu compliqué⁴ !

Comment interagissent elles ? Via 4 interactions fondamentales (gravitationnelle, électromagnétique, nucléaire faible et forte) donnant lieu à un grand nombre de processus :

$$e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma , \quad n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e , \quad \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu , \quad \dots$$

But du jeu : découvrir les règles qui gouvernent ces processus.

Exemple : l'énergie peut changer de forme mais doit se conserver

électrique → thermique



wikipedia.fr

cinétique → électrique

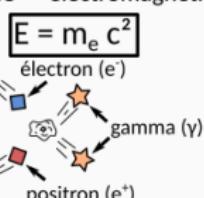


wikipedia.fr

chimique (potion) → cinétique



masse → électromagnétique



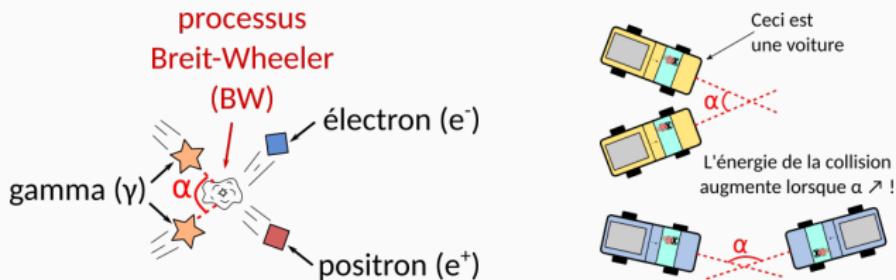
Autre règle : charge électrique totale avant = charge totale après

⁴A. Hobson, *There are no particles, there are only fields*, AJP, 2013

**Transformer la lumière en
matière.**

Transformer la lumière en matière. Le processus Breit-Wheeler.

1934 : G. Breit & J. Wheeler prédisent le processus $\gamma\gamma \rightarrow e^-e^+$ soit la création de matière (leptons) à partir de lumière (photons).



$$\text{Condition de création : } 2E_{\gamma 1}E_{\gamma 2}(1 - \cos \alpha) \geq (2m_e c^2)^2$$

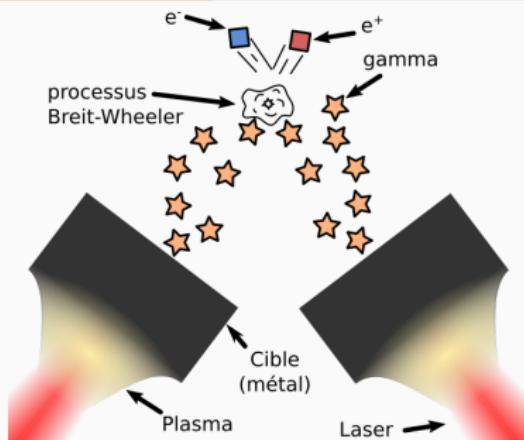
Ce processus, assez "simple" théoriquement n'a **jamais été observé** !

Pourquoi ? Il n'existe pas de sources de photons γ adéquate (énergie et nombre de photons).

Objectif : Produire une telle source en optimisant l'énergie des γ , leur nombre et leur angle de collision.

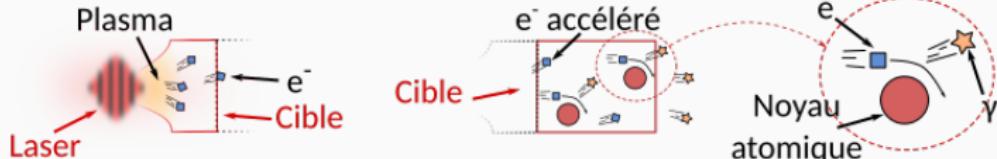
Transformer la lumière en matière. Principe de l'expérience

On cherche à faire collisionner deux faisceaux de photons γ pour produire des paires $e^- e^+$ via le processus Breit-Wheeler.



Comment produire ces photons gamma ?

Des e^- sont accélérés ... ils se propagent ... et créent
par laser ... dans la cible ... des gamma.



Ces mécanismes sont connus mais pas optimisés !

Transformer la lumière en matière. Détection et difficultés ...

Objectif de ma thèse : Optimiser différents paramètres pour pouvoir observer ce processus pour la 1^{ère} fois !

Problème :

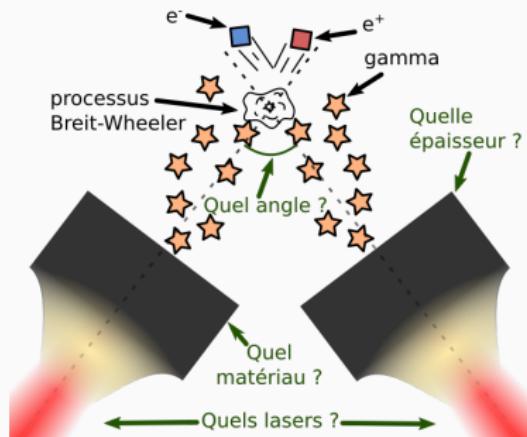
La probabilité de créer une paire e^-e^+ est faible.

Estimation :

Pour produire **une** paire e^-e^+ /tir il faut $\sim 10^{12}$ photons par source (en moyenne, ).

Solution envisagée :

Utiliser un laser haute cadence pour diminuer le nombre de γ /tir



Les e^+ produits (en nombre très faible) devront ensuite être détectés malgré des conditions environnementales compliquées (lumière laser, photons γ , e^+ produits par d'autres processus, ...)

Concrètement, on fait quoi ?

Concrètement, on fait quoi ? La vie de labo

Trois outils fondamentaux du théoricien-numéricien :



On réfléchit, on fait des calculs, on discute, on écrit des articles dans des revues spécialisées et on participe à des conférences.

PHYSICAL REVIEW E 93, 013201 (2016)

Pair creation in collision of γ -ray beams produced with high-intensity lasers

X. Ribeyre,^a E. d'Humières,^a O. Jansen,^a S. Jequier,^a and V. T. Tikhonchuk^b

^aUnité Bordeaux-CNRS-CEA, Centre Lasers Intenses et Applications, UMR 5107, 33405 Talence, France

^bUnité Bordeaux-CNRS-CEA, Centre Lasers Intenses et Applications, UMR 5107, 33405 Talence, France

(Received 17 April 2015; published 7 January 2016)

Direct production of electron–positron pairs in two-photon collisions, the Breit–Wheeler process, is one of the basic processes in the universe. It is not observed in the laboratory because of the absence of the intense γ -ray sources. Laser-induced synchrotron source emission may open a way to observe this process. The feasibility of an experimental setup using a MeV photon source is studied in this paper. We compare several γ -ray sources and estimate the expected number of electron–positron pairs and competing processes by using numerical simulators including quantum electrodynamic effects.

DOI: 10.1103/PhysRevE.93.013201

Effect of differential cross section in Breit–Wheeler pair production

X. Ribeyre,^a E. d'Humières,^a S. Jequier and V. T. Tikhonchuk^b

^aUnité Bordeaux-CNRS-CEA, Centre Lasers Intenses et Applications, UMR 5107, 33405 Talence, France

E-mail: xavier.ribeyre@bordeaux.fr

Received 21 May 2016; revised 4 July 2016

Published 27 August 2016

Abstract

The possibility of achieving a pair beaming in the Breit–Wheeler (BW) electron–positron pair production is investigated in this paper. We examine the effect of the BW differential cross section on the pair's angular and energy distributions. Although this study is relevant for laser induced intense particle-ray source creation experiments, we apply this pair beaming effect in an astrophysical context, in particular for extra galactic jets (EGJ).

Keywords: gamma-ray sources, Breit–Wheeler process, pair electron–positron, active galactic nuclei

(Some figures may appear in colour only in the online journal)

Electron–positron pairs beaming in the Breit–Wheeler process

X. Ribeyre, E. d'Humières, O. Jansen, S. Jequier and V. T. Tikhonchuk^b

^aUnité Bordeaux-CNRS-CEA, Centre Lasers Intenses et Applications, UMR 5107, 33405 Talence, France

E-mail: xavier.ribeyre@bordeaux.fr

Received 1 July 2016; revised 2 September 2016

Accepted for publication 16 September 2016

Published 27 October 2016

Abstract

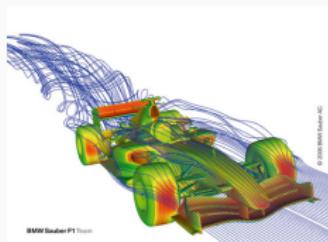
The pair creation process from the Breit–Wheeler process is one of the basic processes in the universe. Laser-induced intense γ -ray sources will allow a direct observation of this process in the laboratory for the first time. In this paper we demonstrate the effect of pair beaming in the collision of two photon beams which may facilitate the experimental observation of the Breit–Wheeler process.

Keywords: gamma-ray sources, Breit–Wheeler process, pair electron–positron

Concrètement, on fait quoi ? Notre chaîne de calcul

Faire des expériences à l'aveugle coûte cher !

Solution pour optimiser : réflexions théoriques + simulations numériques



Exemple de
simulation numérique
(réduction des coûts)

My work

Physics	Codes	Description
Pre-pulse interaction Plasma formation	FLASH ^[1] Plasma Target Pre-pulse	Hydrodynamics code Input : Laser ASE level Output : Target profiles (density, velocity, ...)
Main pulse interaction e^- acceleration	Smilei ^[2] Plasma Target Laser	Particle-In-Cell code Input : Target profiles Output : e^- phase space
e^- propagation Brem γ production BH $e^- e^+$ production	Geant4 ^[3] Brem γ Converter Nuclei BH $e^- e^+$	Monte Carlo code Input : e^- phase space Output : e^- , Brem γ and BH e^+ phase space
$\gamma \gamma$ collision LBW $e^- e^+$ production	TRILENS ^[4] γ beam LBW $e^- e^+$	Monte Carlo "Tree" code Input : γ phase space Output : LBW $e^- e^+$ phase space
e^+ detection Noise estimation	Geant4	Monte Carlo code Input : LBW + BH $e^- e^+$, e^- and γ phase space Output : e^+ spectra on detector, S/N ratio

[1] <http://flash.uchicago.edu/>

[3] <http://geant4.web.cern.ch>

[2] <https://smileipic.github.io/Smilei/>

[4] O. Jansen et al., Journal of Comp. Phys., 2018

Concrètement, on fait quoi ? On en est où ?

Fait :

- Chaîne de calcul (quasi) fonctionnelle
- Optimisation théorique de l'énergie optimum des γ

En cours :

- Optimisation théorique de l'angle optimum entre les γ
- Estimations du nb. de e^-e^+ pour n'importe quelle sources γ

À faire :

- Utiliser la chaîne de calcul pour avoir des résultats plus précis
- Déterminer quels paramètres lasers et cible permettent d'obtenir la source γ optimale
- Expériences prévues sur le laser APOLLON (collaboration) !

Perspectives (pour les prochains) : Faire la manip les premiers ! Puis étudier ce processus plus finement, dans des conditions plus exotiques ou proches de situations astrophysiques ...

Des questions ?

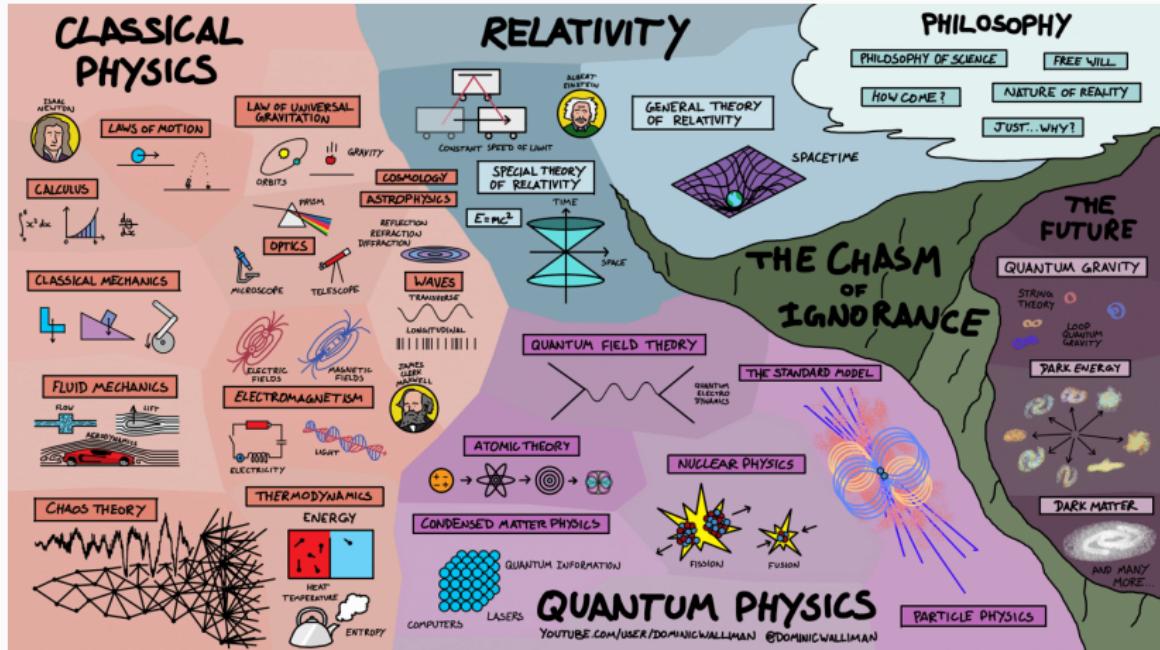
Cette présentation est disponible sur :

github.com/lesnat/Presentations

Conseil de lecture :

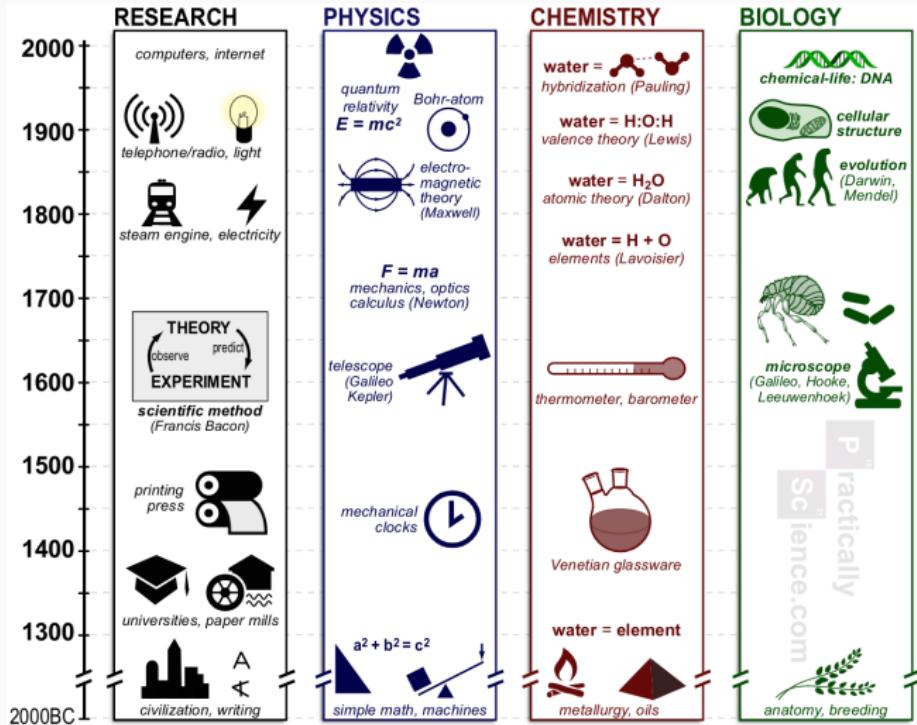
R. Feynman, Lumière et matière, une étrange histoire.

Les domaines de la physique



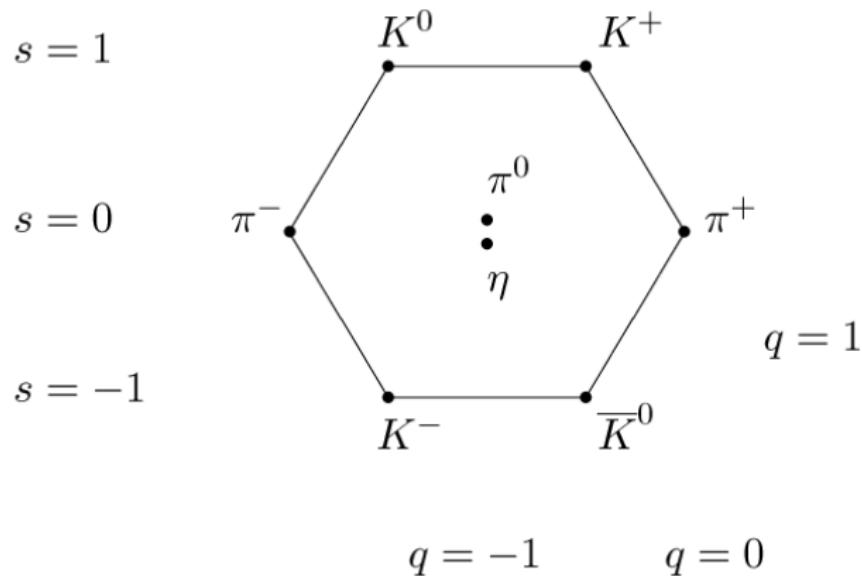
<https://www.youtube.com/user/dominicwalliman/>

Histoire de la physique



<https://www.practicallyscience.com/category/timelines/>

La prédition des quarks

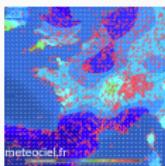


C'est quoi un champ quantique ?

Qu'est ce qu'un champ ? Une quantité définie en tout point



Champ de température



Champ de vitesse

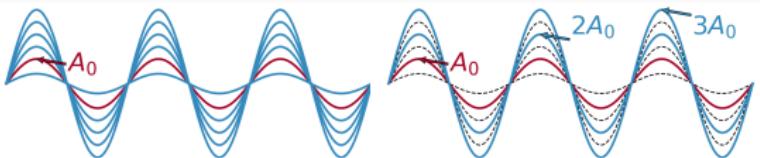


Champ de hauteur

Ca veut dire quoi quantique ? Les amplitudes ne sont pas toutes permises



Champ de hauteur



Classique : toutes amplitudes permises

Quantique : amplitudes définies (quantifiées)

Une particule est une "vague" (d'"amplitude" quantifiée) dans le champ de cette particule (propriété de l'espace). Tout est champ quantique⁵ ?

⁵A. Hobson, There are no particles, there are only fields

Transformer la lumière en matière. Sources γ existantes.

Photons laser optique : Nombre OK mais énergie 10^6 fois trop faible.

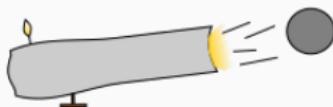
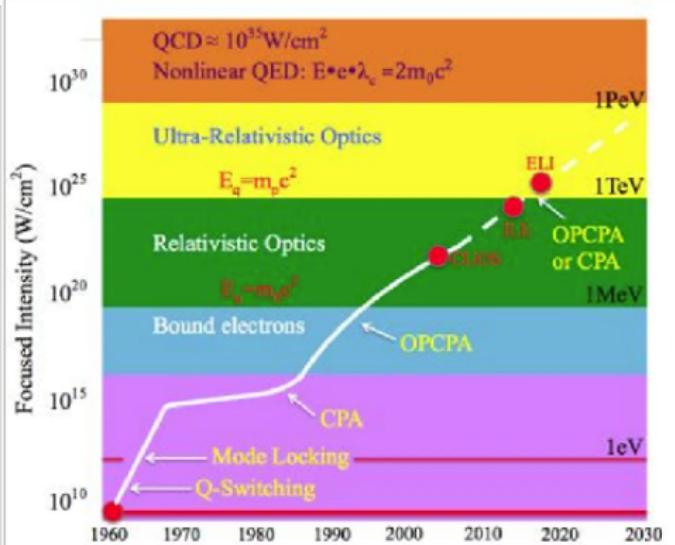
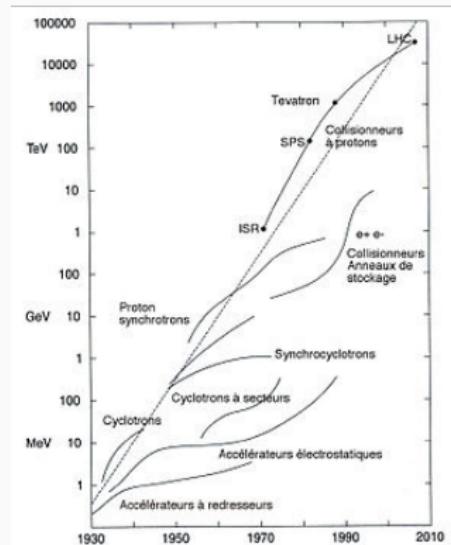
Laser γ : Beaucoup de recherches dans les années 70, mais au point mort.

Sources astrophysiques : Nombre trop faible et non-prédictible.

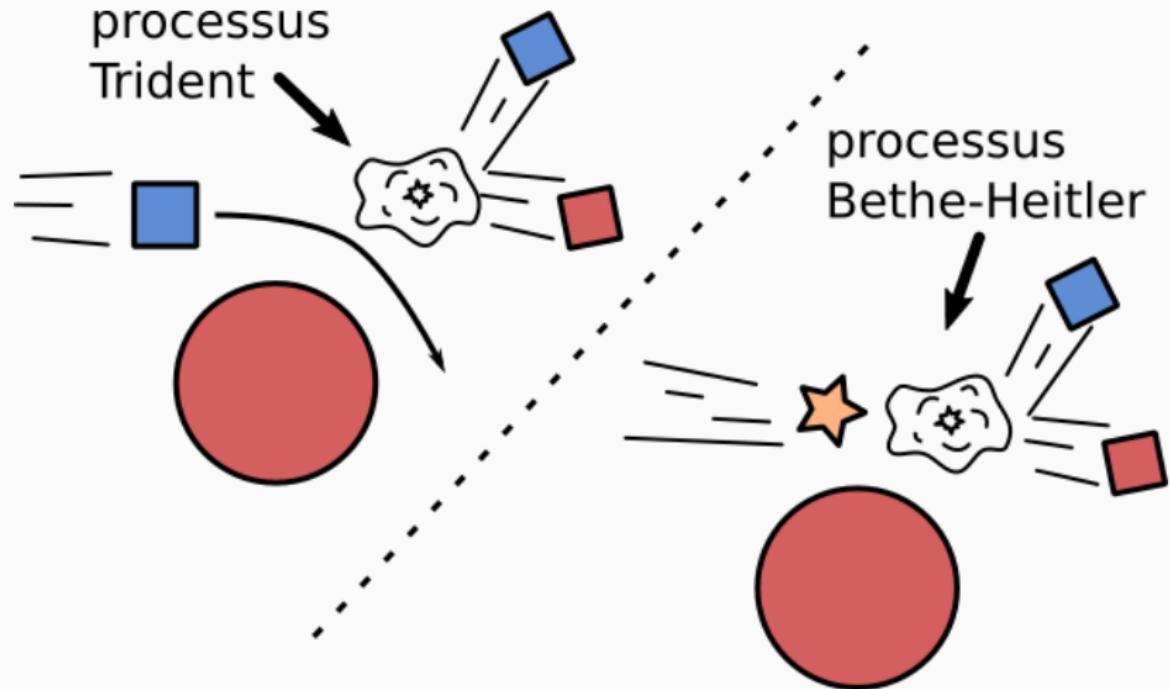
Source radioactive : Utilisé dans l'industrie, énergie OK mais nombre trop faible ($\sim 10^{13}/s/g$, non directionnel).

Accélérateur de particules : Photons = charge électrique nulle !

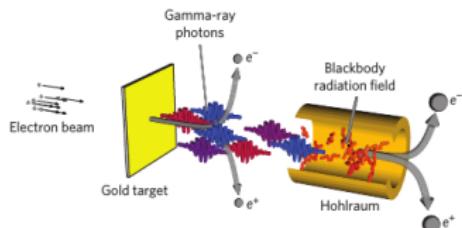
Accélérateur vs laser



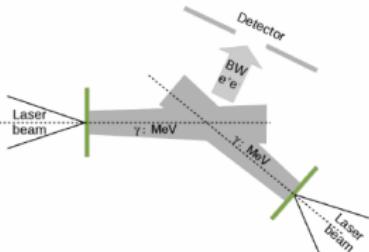
Les sources de bruit !



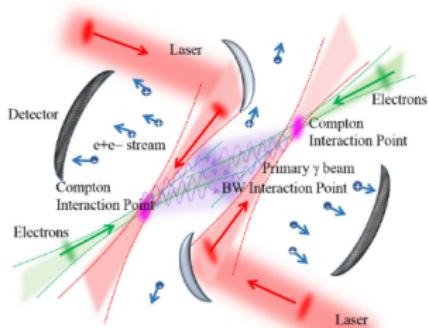
La concurrence



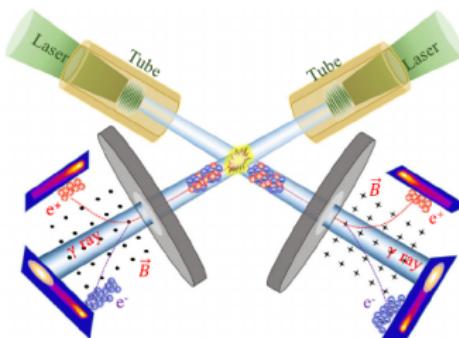
Pike et al, Nature Photonics 2014



Ribeyre et al, Physical Review E 2016



Drebort et al, Phys. Rev. Accel. Beams 2017



Yu et al, Physical Review E 2019

Section efficace LBW

