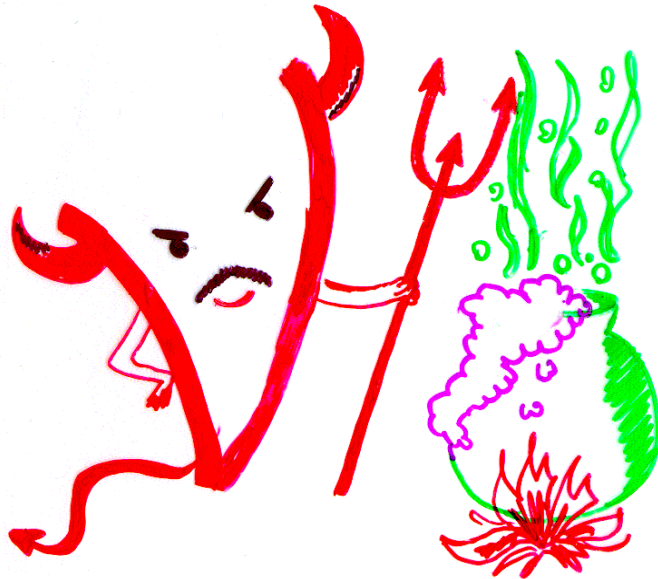


LE NEUTRINO

Paolo Strolin
avec la collaboration de
Catello Ingenito et Laura Strolin



Neutrino ✓

- **Préhistoire**
- **Histoire**
- **Ça sert à quoi ?**
- **Enigmes** { **Physique**
Astrophysique
Cosmologie

- Bibliographie**
- A. Ereditato, V. Palladino et P.S.- ***L'énigme des neutrinos*** - Sapere (Février 96)
 - L.M.Krauss - ***La Matière Obscure***- Le Scienze (Février 87)
 - J. Bahcall - ***Neutrinos solaires*** - Le Scienze (Octobre 69)
 - J. Bahcall - ***Le Problème des neutrinos solaires*** - Le Scienze (Juillet 90)

Version française par Jean Dupraz, Jean Paul Fabre et Christiane Gentet

Préhistoire

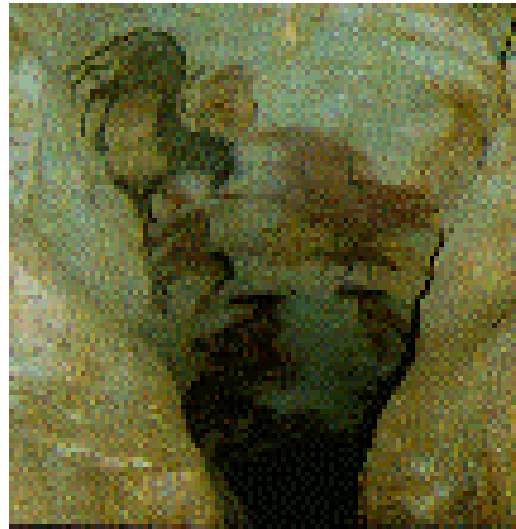
(Paléolithique)

*En l'absence
d'écriture, les images
parlent*



Rouffignac (France)
Grotte des cent mammouths
(Ere géologique Pléistocène)

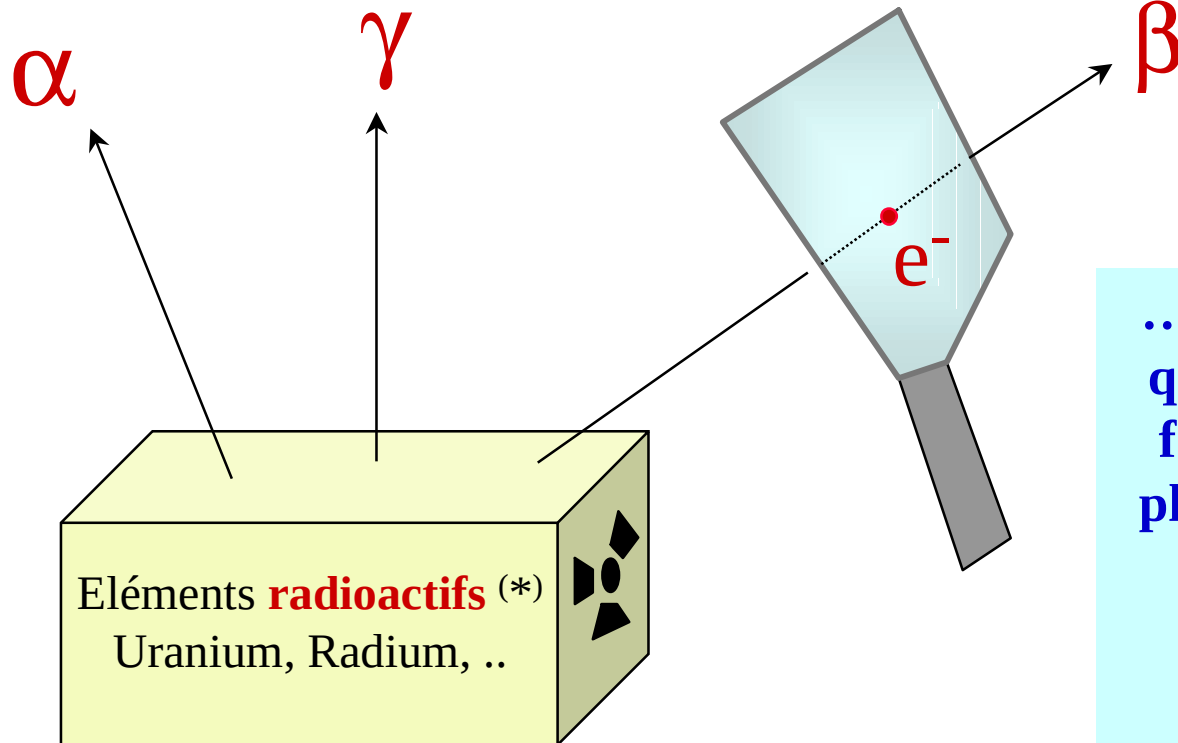
Lascaux (France)
~ 15000 Avant Jésus Christ
Homme et auroch →





BECQUEREL 1896

DECOUVERTE DE LA RADIOACTIVITE
NATURELLE



... on a découvert plus tard
que les “rayons β ” sont, en
fait, des électrons. Encore
plus tard, on a constaté que
chaque électron émis

e^-

était accompagné d'un
neutrino

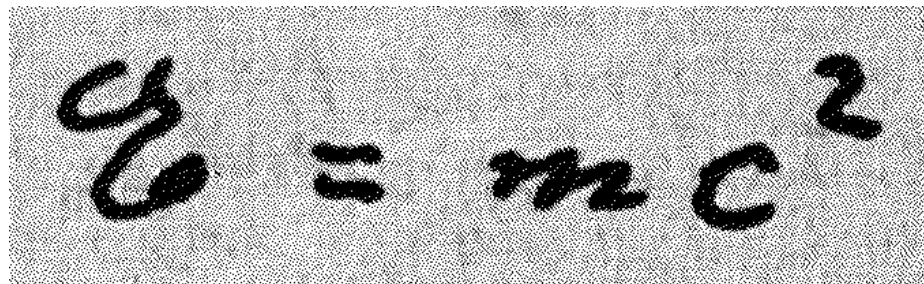
ν

(*) Copyright Marie Curie

Apparemment

~~Rien ne se perd,
rien ne se crée.~~

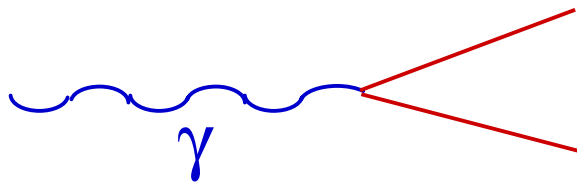
Mais depuis 1905 (Einstein)

A photograph of a piece of paper with the equation $E = mc^2$ handwritten in black ink. The paper has a textured, slightly grainy appearance.

énergie $\rightleftharpoons$ matière

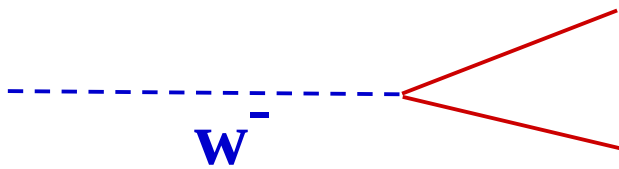
Plus précisément:

Energie $\rightleftharpoons$ **matière + anti-matière** *



e^- électron

e^+ positon (anti-électron)



e^- électron

$\bar{\nu}$ anti-neutrino

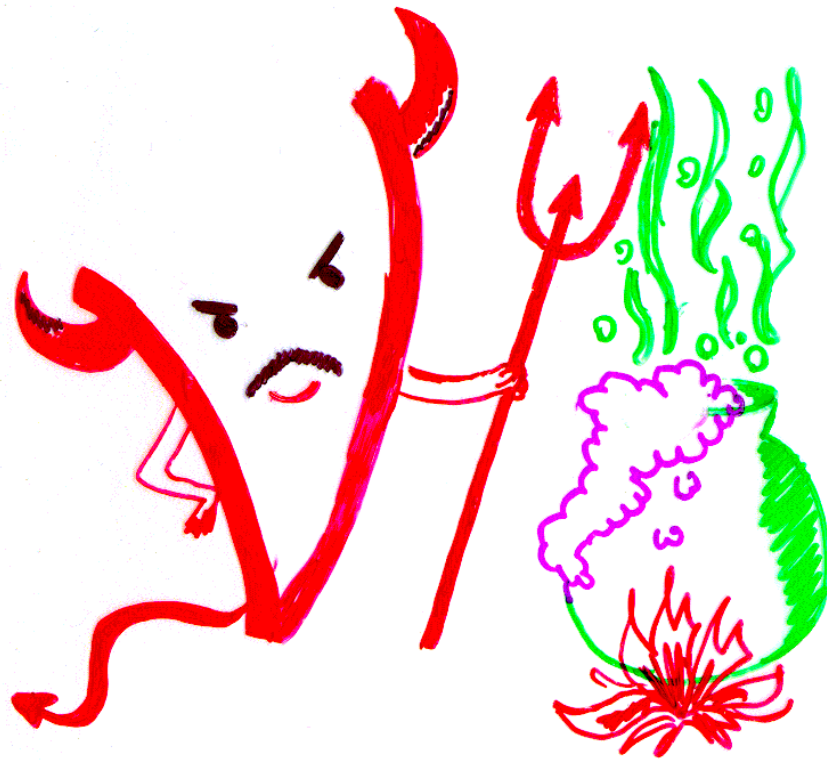


Si l'on compte dans le bilan énergie , matière et anti-matière ,
à nouveau

“rien ne se perd, rien ne se crée”

* Antimatière : Equation de Dirac 1928 , découverte du positon e^+ par Anderson 1932

Et alors ...

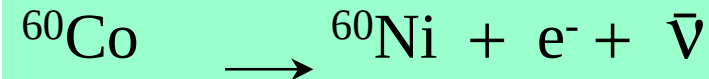
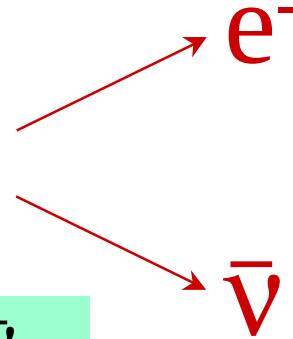
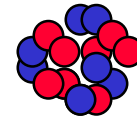
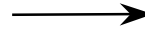
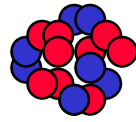


Neutrino ν



anti-neutrino $\bar{\nu}$

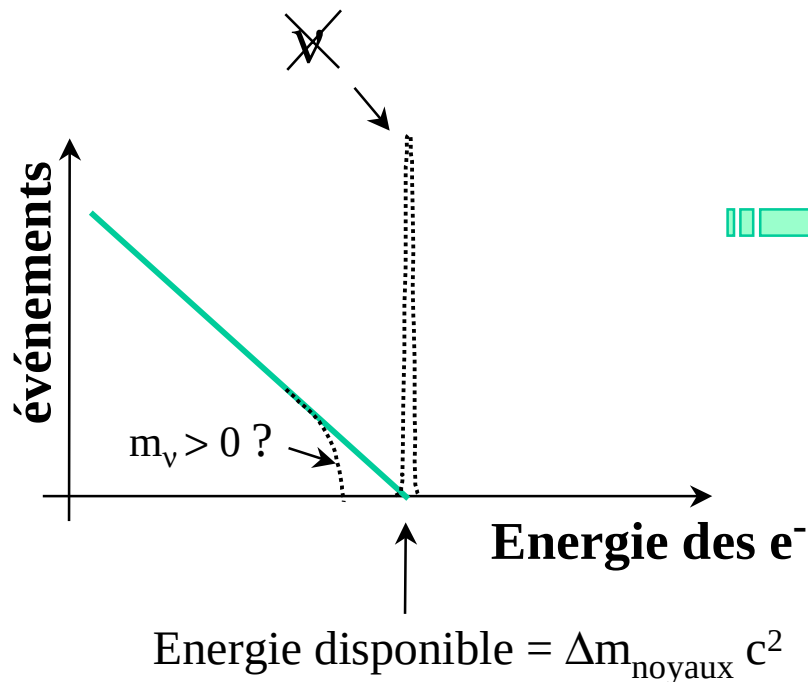
Désintégration nucléaire β



(F. Perrin 1933)



(Modèle des Quarks, 1964)



HYPOTHESE DE PAULI (1930)

- $E_e < E_{\text{disponible}}$
→ par conséquent une particule neutre et invisible "vole" de l'énergie → ν
- $E_e \leq E_{\text{disponible}} \rightarrow m_\nu \sim 0$

“ESSAI DE THEORIE DES RAYONS β ”

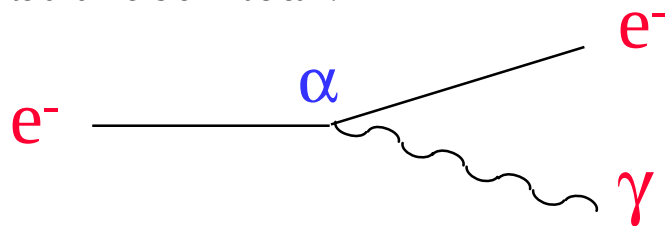
Enrico Fermi (1934)

Sunto - Si propone una teoria quantitativa dell'emissione dei raggi β in cui si ammette l'esistenza del <neutrino> e si tratta l'emissione degli elettroni e dei neutrini da un nucleo all'atto della disintegrazione β con un procedimento simile a quello seguito nella teoria dell'irradiazione per descrivere l'emissione di un quanto di luce da un atomo eccitato. Vengono dedotte delle formule per la vita media e per la forma dello spettro continuo dei raggi β , e le si confrontano con i dati sperimentali.

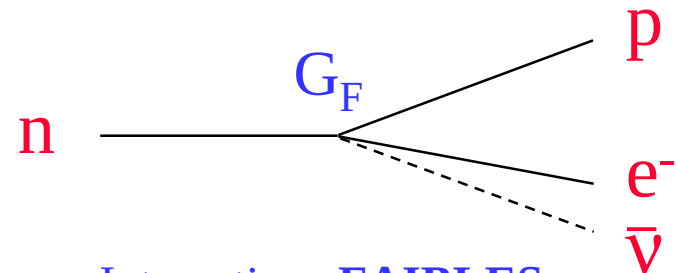
Ipotesi Fondamentale della teoria

§1 Nel tentativo di costruire una teoria degli elettroni nucleari e dell'emissione dei raggi β , si incontrano, come è noto due difficoltà principali. La prima dipende dal fatto che i raggi β primari vengono emessi dai nuclei con una distribuzione continua di velocità. Se non si vuole abbandonare il principio della conservazione dell'energia, si deve ammettere perciò che una frazione dell'energia che si libera nel processo di disintegrazione β sfugga alle nostre attuali possibilità di osservazione. Secondo la proposta di Pauli si può, ad esempio, ammettere l'esistenza di una nuova particella, il così detto <neutrino> avente carica elettrica nulla e massa dell'ordine di grandezza di quella dell'elettrone o minore. Si ammette poi che in ogni processo β vengano emessi simultaneamente un elettrone, che si osserva come raggio β , e un neutrino che sfugge all'osservazione portando seco una parte dell'energia. Nella presente teoria ci baseremo sopra l'ipotesi del neutrino.

Una seconda difficoltà per la teoria degli elettroni nucleari, dipende dal fatto che le attuali teorie relativistiche delle particelle leggere (elettroni o neutrini) non danno una soddisfacente spiegazione della possibilità che tali particelle vengano legate in orbite di dimensioni nucleari.



Interactions **ELECTRO-MAGNETIQUES**



Interactions **FAIBLES**
 $G_F \ll \alpha$ (constantes liées à la probabilité)

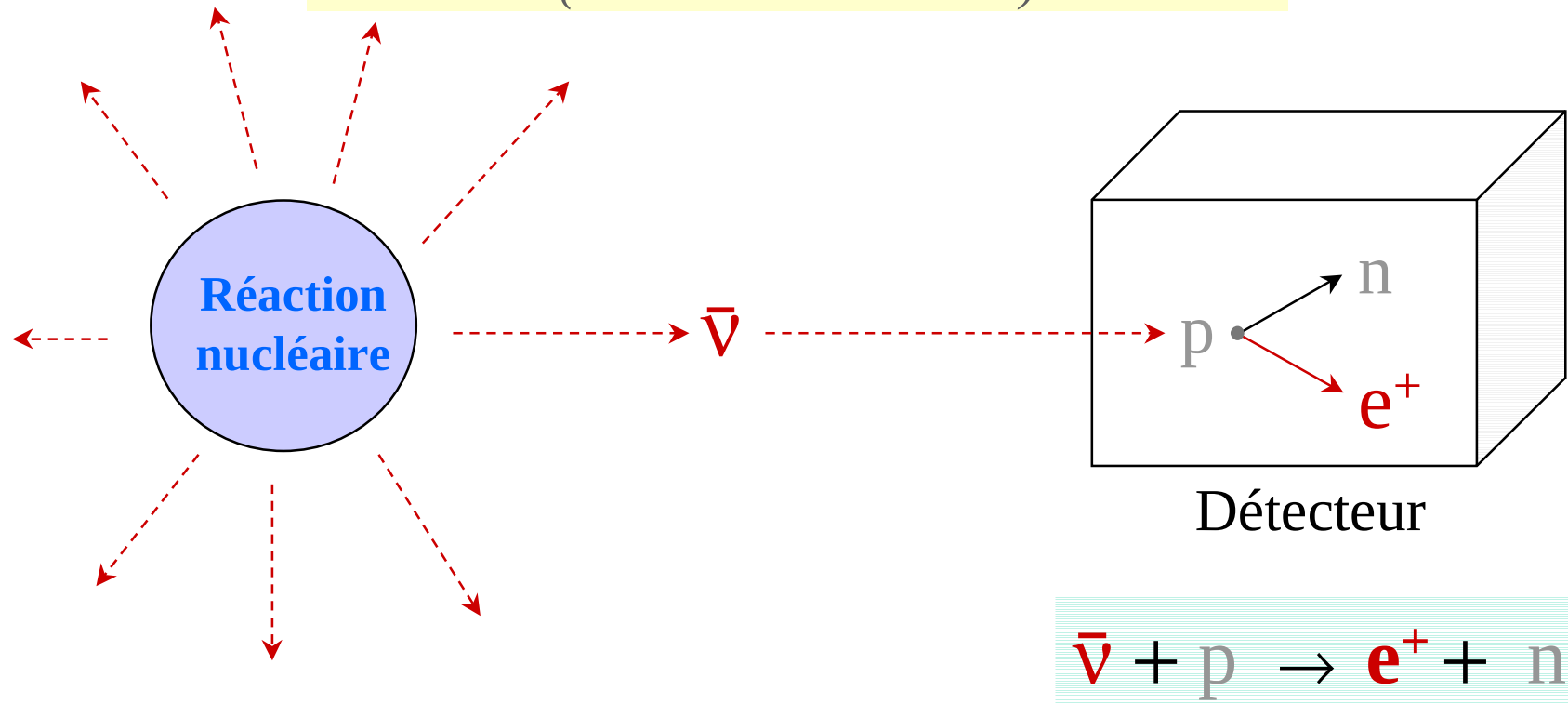
**Et, avec
l'écriture, la
préhistoire se
termine ...**

Inscriptions phéniciennes sur feuille d'or
Pyrgi (Latium)



“Découverte” des $\bar{\nu}$

(Reines et Cowan 1956)



n (neutre) et p (au repos) sont invisibles

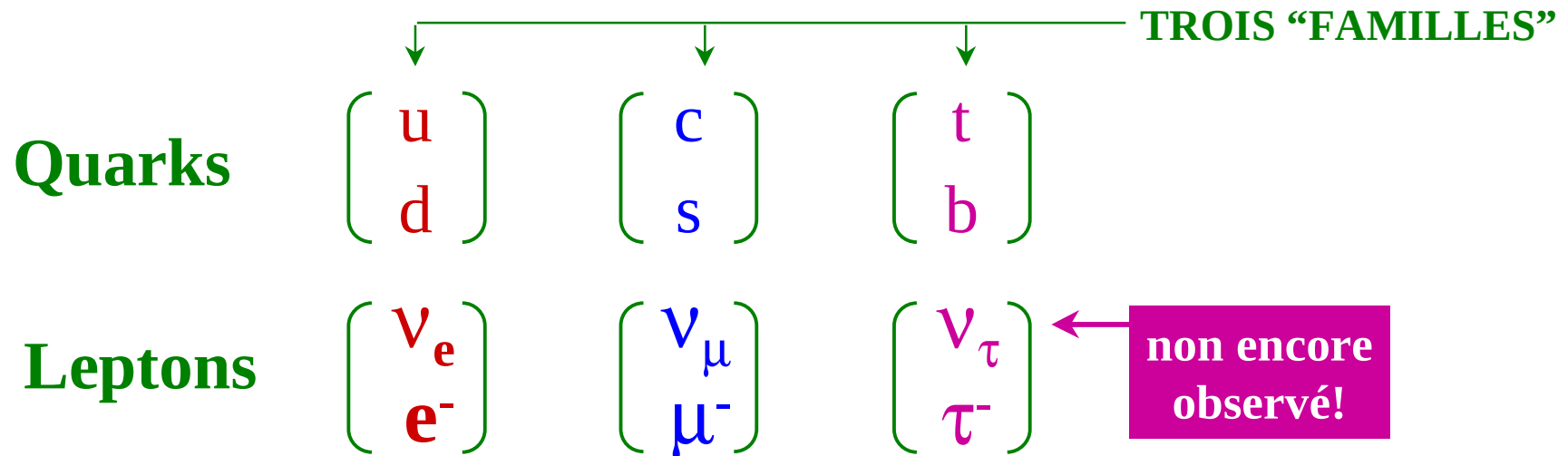
Observation, dans le détecteur, de l'interaction (faible !) des neutrinos avec la matière” :

“écriture” des neutrinos !

Après tant de fascinantes recherches...



L'Olympe d'aujourd'hui (*) pour les
PARTICULES ELEMENTAIRES



n.b. - Aujourd'hui on distingue ν_e , ν_μ , ν_τ

ν : un membre SPECIAL ET TRES IMPORTANT

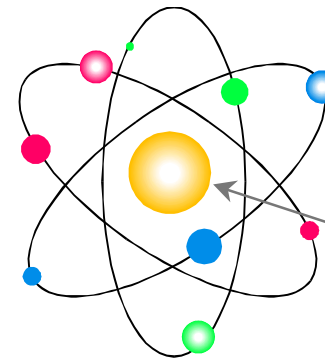
(*) Dans le futur, considérera t-on encore ces particules comme élémentaires, ou découvrira t-on une structure plus profonde ?

Pour les particules élémentaires

la “section efficace” σ

remplace les “dimensions” usuelles (πr^2 pour une balle)

Diamètre de l'atome $\sim 10^{-8}$ cm



Diamètre du
nucléon
 $\sim 10^{-13}$ cm

$$\nu$$
$$\sigma \sim 10^{-38} \text{ cm}^2$$

ν : très petite probabilité d'interagir avec la matière

“Interaction Faible”

Les Interactions Fondamentales

Récente
Unification
Electro-faible

	Médiateur	Intensité relative
Forte (nucléaire)	gluons	1
Electro-magnétique	γ	10^{-2}
Faible	$W^{\pm}, Z^0$	10^{-6}
Gravitationnelle	?	10^{-40}

... agissent sur

Quarks	Forte (+ e.m. + faible)
e^{-}, μ^{-}, τ^{-}	e.m. (+ faible)
Neutrinos	<u>faible</u>



Interaction purement faible des neutrinos

- ➡ “Table périodique” des particules élémentaires : “familles”
- ➡ Première confirmation expérimentale de l’Unification Electro-faible (1973)
..... ➡ $W^{\pm}$ e Z^0 (CERN 1983)

A quoi
servent les
neutrinos ?

.... à
produire des
fruits,
à nous
“chauffer” !

*S'ils n'existaient
pas, le Soleil ne
chaufferait pas la
Terre*

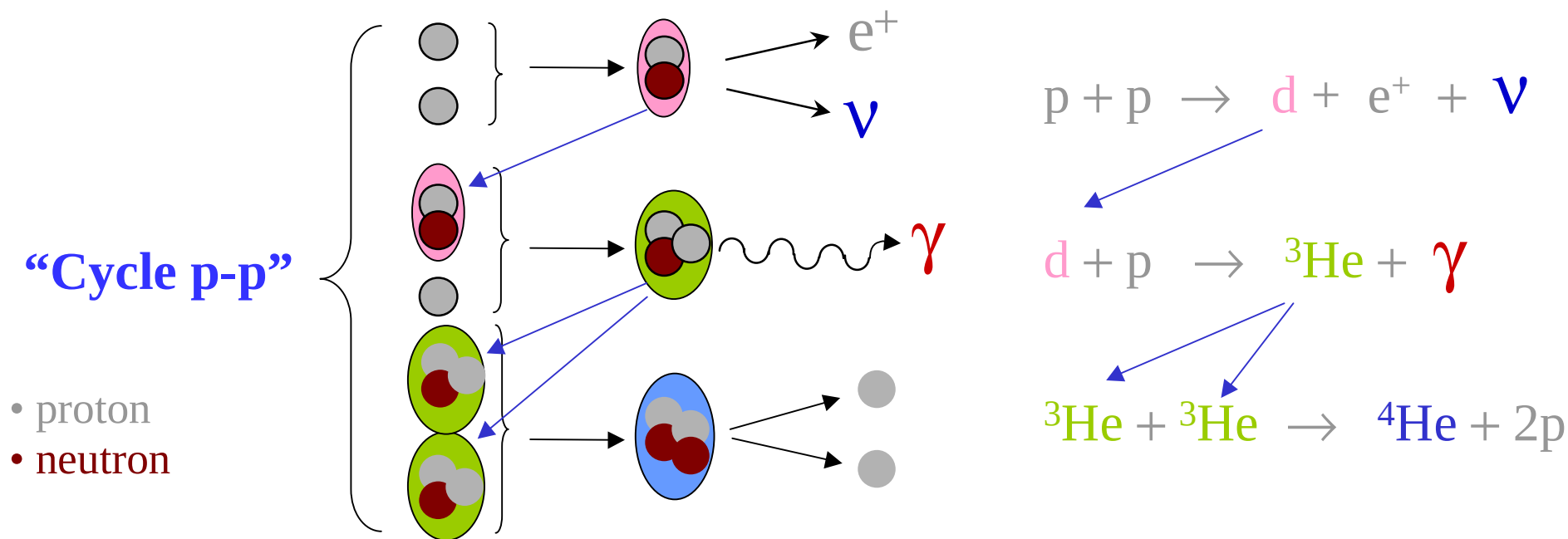


Michelangelo Merisi, dit le Caravage (1573-1610)
Corbeille de fruits (1590?), Pinacothèque Ambrosiana (Milan)

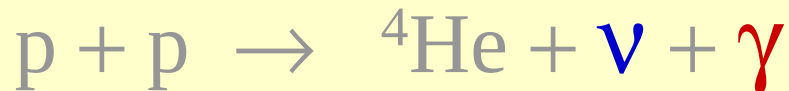
L'énorme énergie générée par les étoiles (le soleil en particulier) ne peut pas provenir de réactions chimiques

(Eddington , 1920 !)

Elle provient de réactions de **FUSION NUCLEAIRE** :



En définitive



Lumière et chaleur !



Les γ constituent la radiation e.m. qui nous éclaire et nous chauffe!

Les ν accompagnent nécessairement les γ .
Ils sont également
abondants
mais invisibles

Sur la Terre
 $\sim 10^{11} \nu / \text{cm}^2 \text{ sec} !$

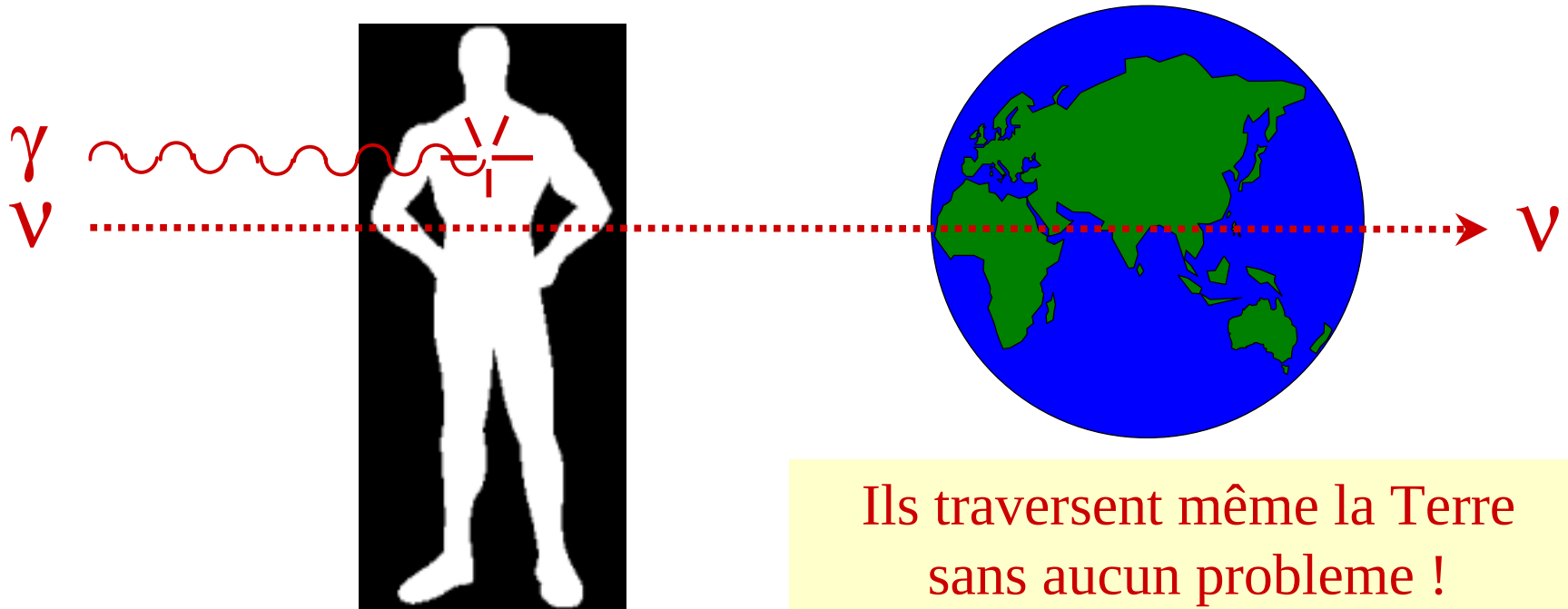
Pourquoi

les radiations e.m. (lumière i.r., visible, u.v.) nous chauffent , mais pas les ν ?

Parce que

Les radiations e.m. γ interagissent avec notre corps et y déposent leur énergie (chaleur)

Les neutrinos ν sont extrêmement pénétrants : ils le traversent sans interagir, ils n'y déposent pas d'énergie !



Ils traversent même la Terre sans aucun problème !

Et
maintenant
on en vient
aux énigmes

Juan Miró (1893-1988)

Le bel oiseau déchiffrant l'inconnu
au couple d'amoureux

Museum of Modern Art (New York)



La probabilité d'interaction des ν dans les appareils expérimentaux (“détecteurs”) est très faible

Expériences difficiles

Aspects encore mystérieux des ν

charge électrique	0
moment angulaire du “spin”	1 / 2
interaction	faible
masse	?
autres propriétés	?
$\nu \neq \bar{\nu}$ (Majorana)	?

L'enigme m_ν et ses implications :

PHYSIQUE DES PARTICULES

The diagram features a central light blue circle containing the text m_ν in red. Three blue arrows originate from this circle: one points vertically upwards towards the 'PHYSIQUE DES PARTICULES' box, one points diagonally down and to the left towards the 'ASTROPHYSIQUE' box, and one points diagonally down and to the right towards the 'COSMOLOGIE' box.

m_ν

ASTROPHYSIQUE

COSMOLOGIE

$$m_\nu > 0 ?$$

PHYSIQUE

- Les théories d'aujourd'hui supposent $m_\nu = 0$
(les interactions des neutrinos ne montrent aucun effet imputable à leur masse)
- Mais aucune raison fondamentale justifie $m_\nu = 0$
- Si $m_\nu > 0 \rightarrow$ nouvelles perspectives pour la Physique

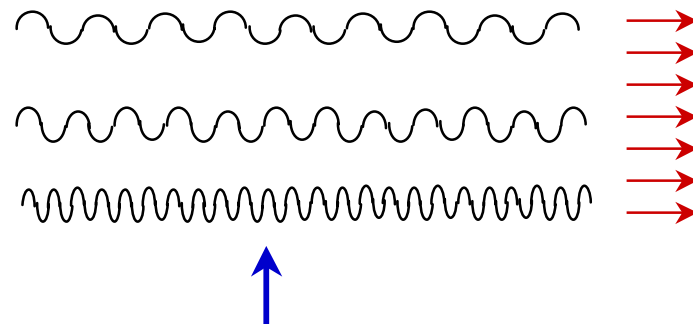
ASTROPHYSIQUE

- Par l'abondance des ν , la “Matière Obscure” de l'univers est-elle en partie attribuable à $m_\nu > 0$?

COSMOLOGIE

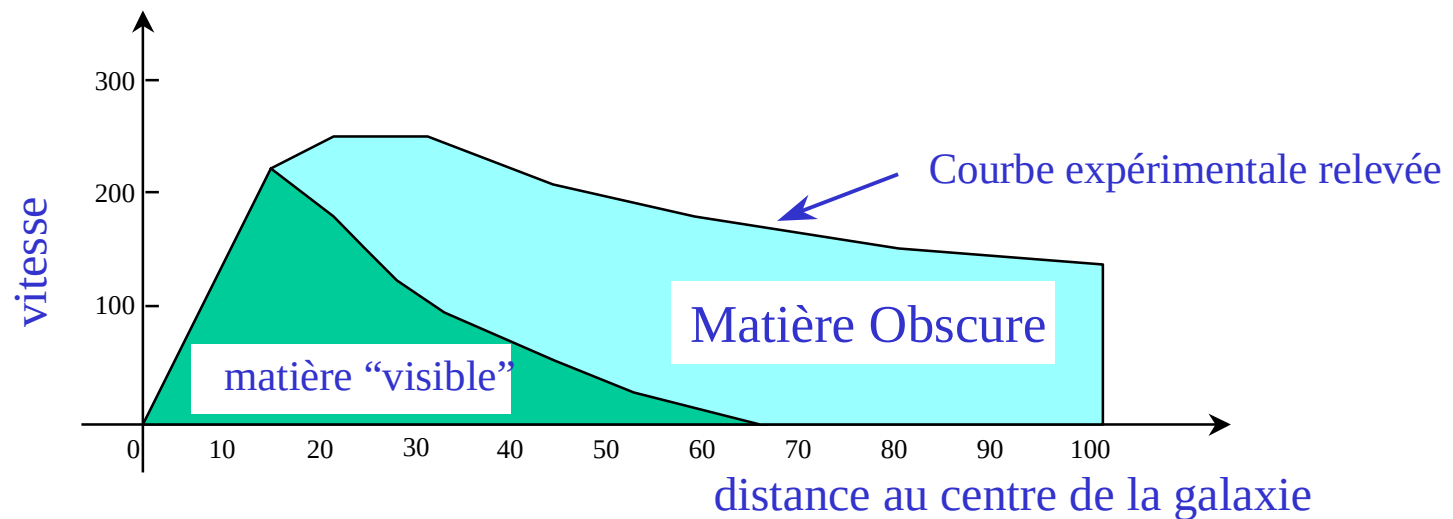
- Théorie du “Big Bang” : l'univers s'étendra-t-il indéfiniment ?
- La Matière obscure existe-t-elle en quantité suffisante pour freiner l'expansion de l'univers ?

La Matière Obscure



Radiation e.m.
(lumière, rayons X, ..)
vers la Terre

mesure de la vitesse des objets lumineux au moyen de l' **"Effet Doppler"**



La masse de la matière visible n'est que $\sim 10\%$ de la masse totale !

Matière connue dans l'Univers

Matière “visible”

(émet des radiations e.m. : lumière i.r., visible, u.v., micro-onde, rayons X)

Photons “reliques” du Big-Bang

($\sim 400/\text{cm}^3$ à 2,7 °K - Arno et Penzias 1965)

Neutrinos “reliques” du Big-Bang

(également $\sim 400/\text{cm}^3$, masse inconnue)

Et la matière non détectée (obscur) ?

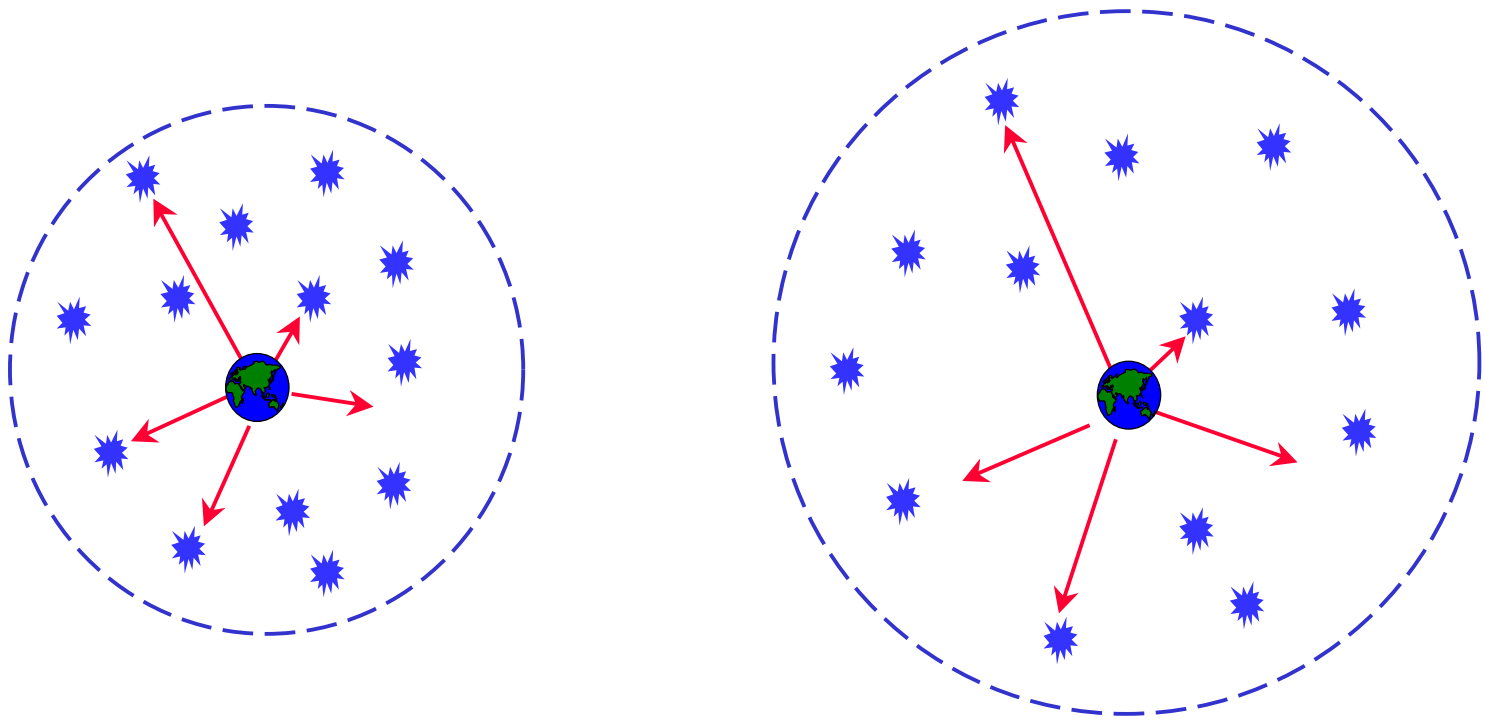
- vient-elle en partie de $m_\nu > 0$?
- particules élémentaires encore ignorées ?
- corps macroscopiques ?
- ...?

L'hypothèse $m_\nu > 0$
ne demande pas de
nouvelles “inventions”

L'univers en expansion : Big Bang

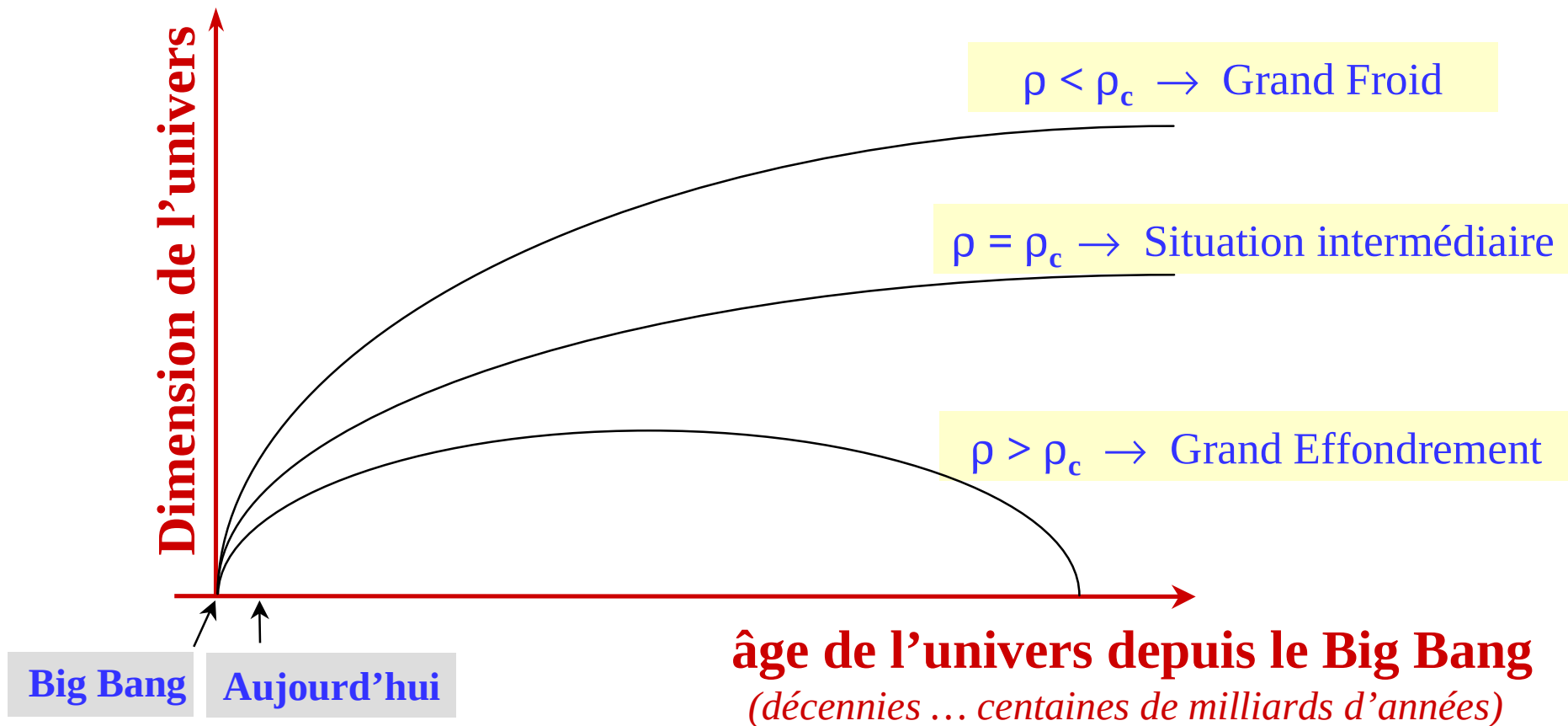
Loi de Hubble, 1929 :

plus les étoiles sont distantes les unes des autres, plus elles s'éloignent rapidement.



Il semble que les étoiles s'éloignent de "nous" : en réalité, tout l'univers se dilate.

“Grand Effondrement” ou “Grand Froid” ?



La matière obscure influe sur la densité moyenne: $\rho \leftrightarrow \rho_c$?

A la recherche de m_γ

La méthode de recherche la plus sensible : détection d'un effet
découlant de $m_\nu > 0$:

“oscillation des neutrinos”



les ν ne conservent pas leur identité

Par exemple : production de ν_μ
à distance, détection de ν_μ et ν_τ !

Méthodes d'observation

Disparition du ν_μ

flux perdu - flux observé

Apparition du ν_τ

avec une expérience idéale, la détection d'un
seul ν_τ est suffisante $\rightarrow$ sensibilité et clarté

Expériences difficiles

- ν_τ n'a jamais encore été observé
- estimation m_ν

Si ν_τ observé : double intérêt !

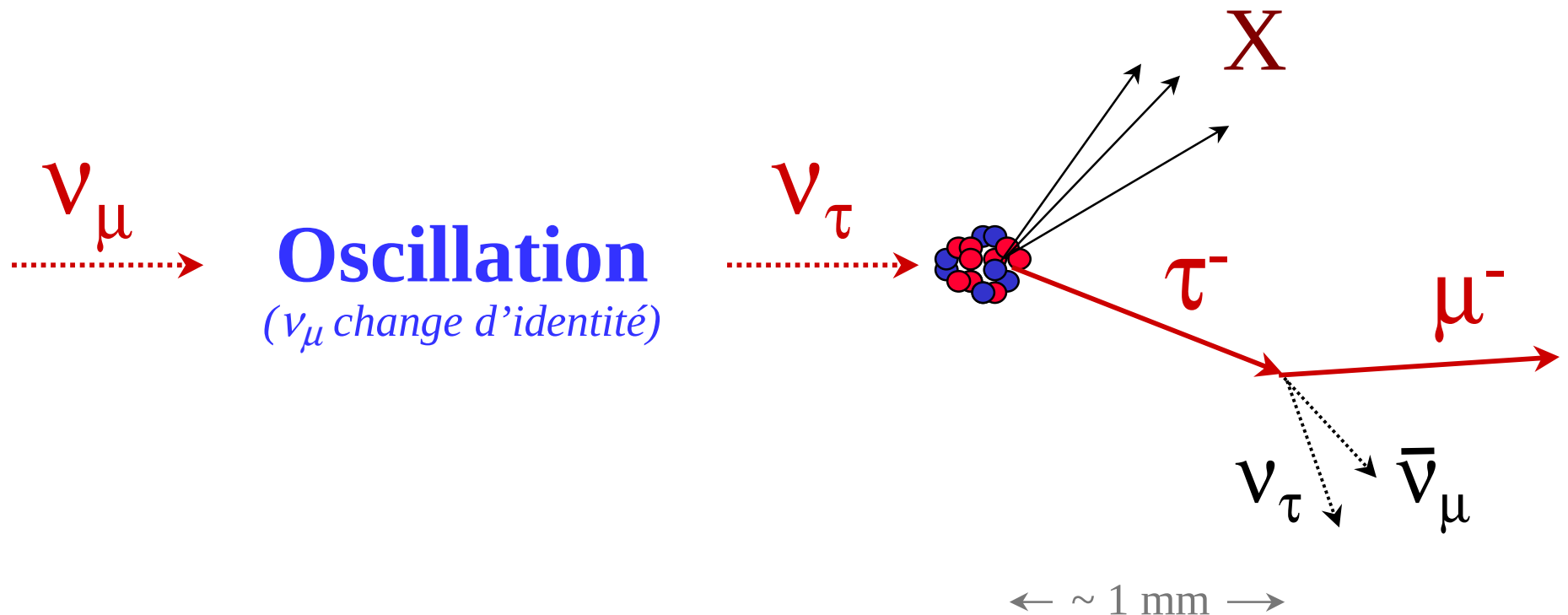


CHORUS

Cern **H**ybrid **O**scillation **R**esearch apparatus

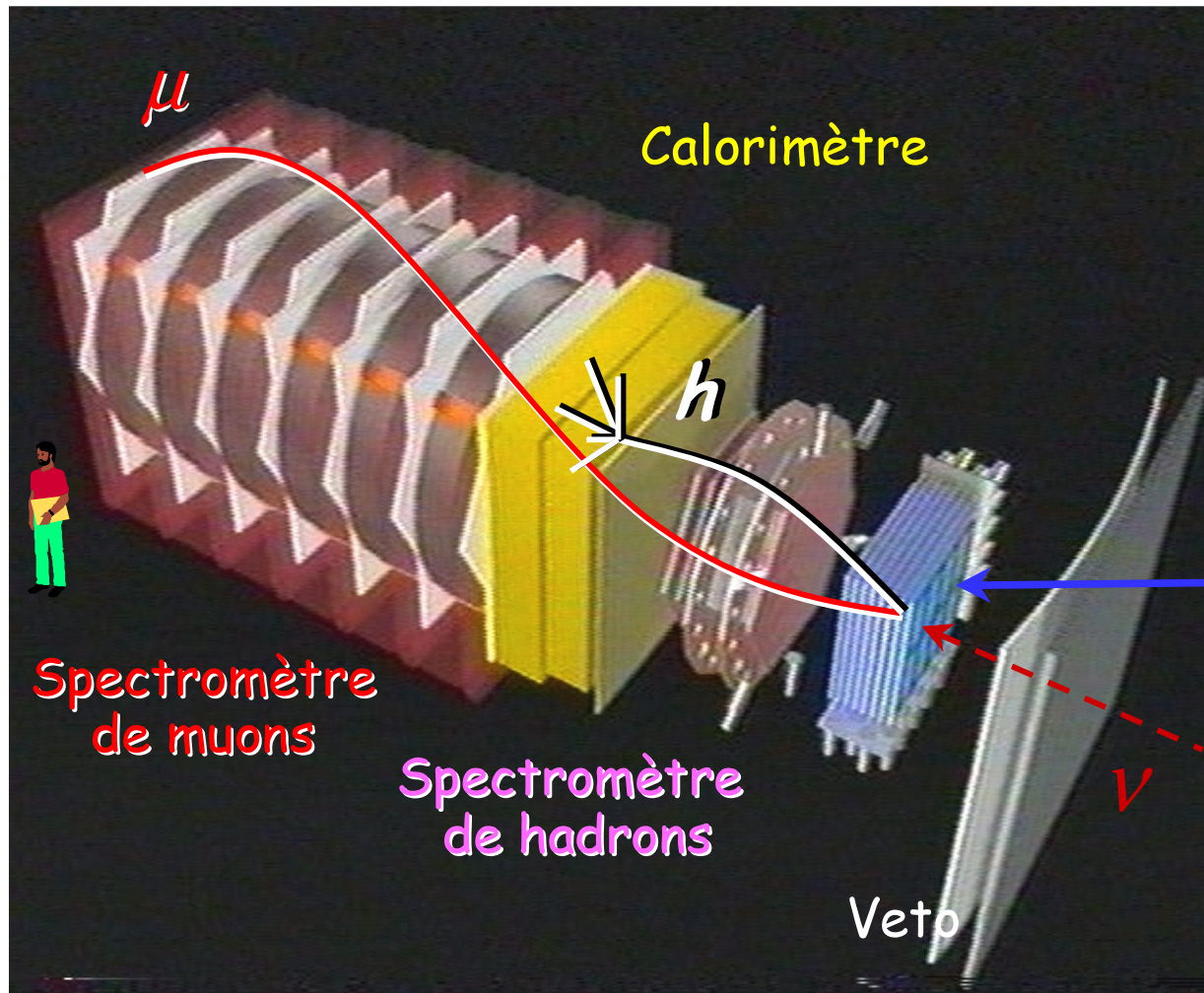
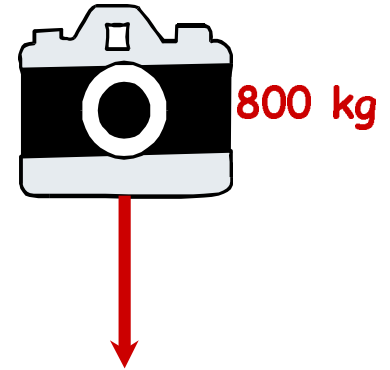
Recherche des oscillations $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$

- Apparition des ν_τ dans un faisceau de ν_μ
- Détection des τ produits par l'interaction des ν_τ



CHORUS

Une "caméra" très spéciale pour micro-images d'interactions de ν produits par des accélérateurs !



Détecteurs "électroniques"

- localisent les traces dans les émulsions
- identifient les particules
- mesurent l'énergie

Fibres optiques scintillantes et autres techniques



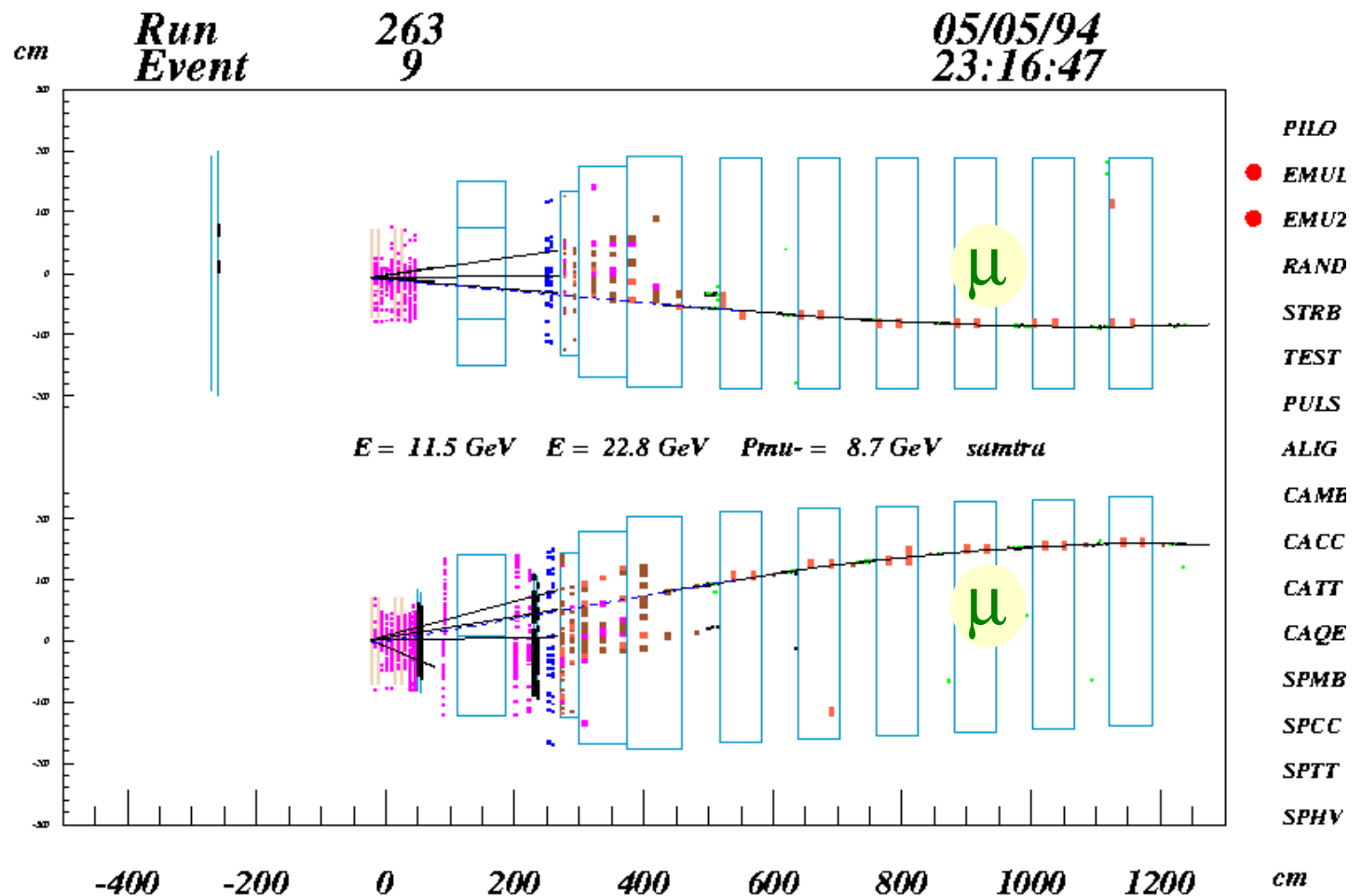
Événement reconstruit par les détecteurs électroniques

- Événement avec un μ dans l'état final
- Signal des différents détecteurs et reconstruction des traces
- Mesure des variables cinématiques, telle que l'énergie

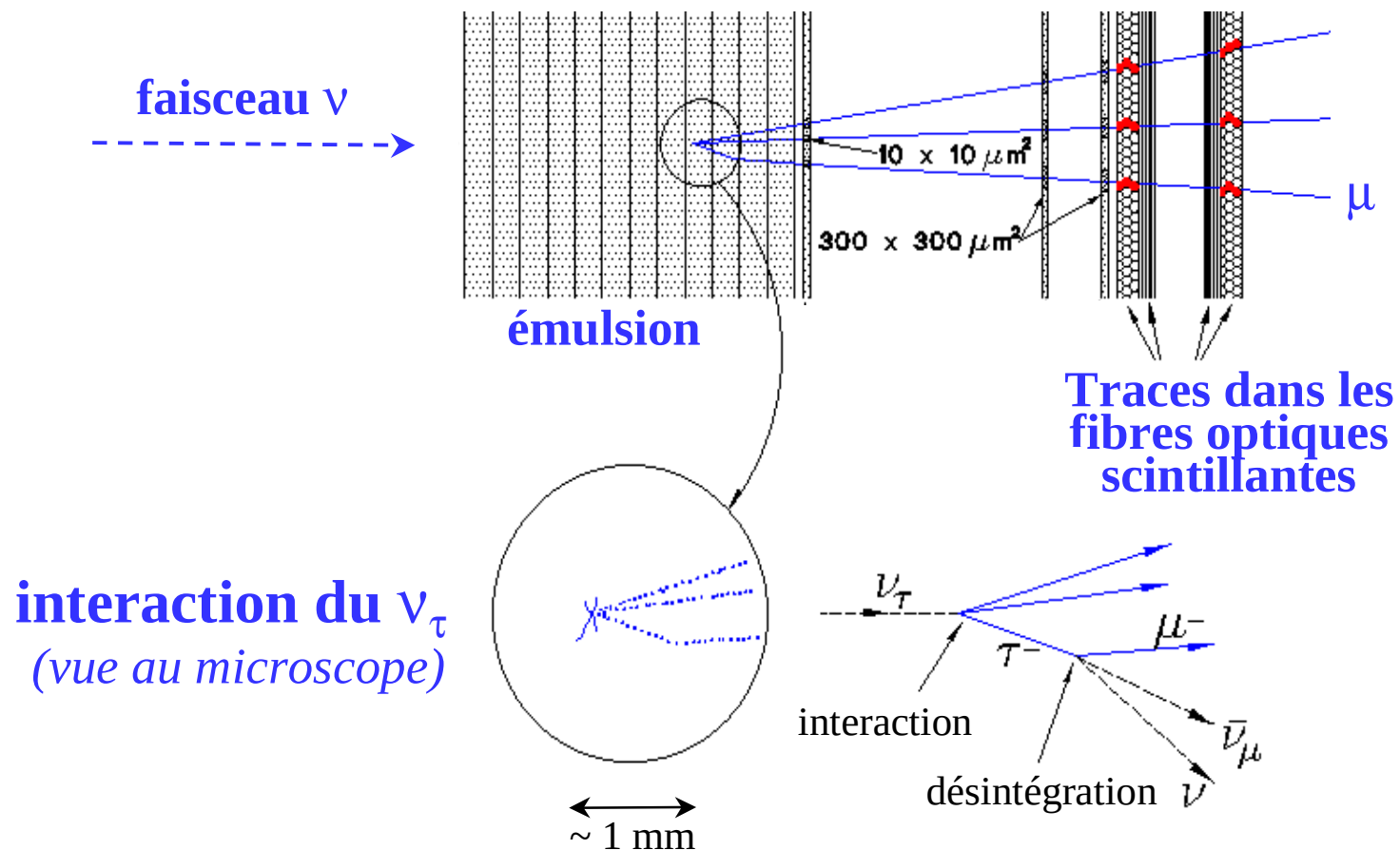
CHORUS

Vue d'en
haut

Vue de
côté



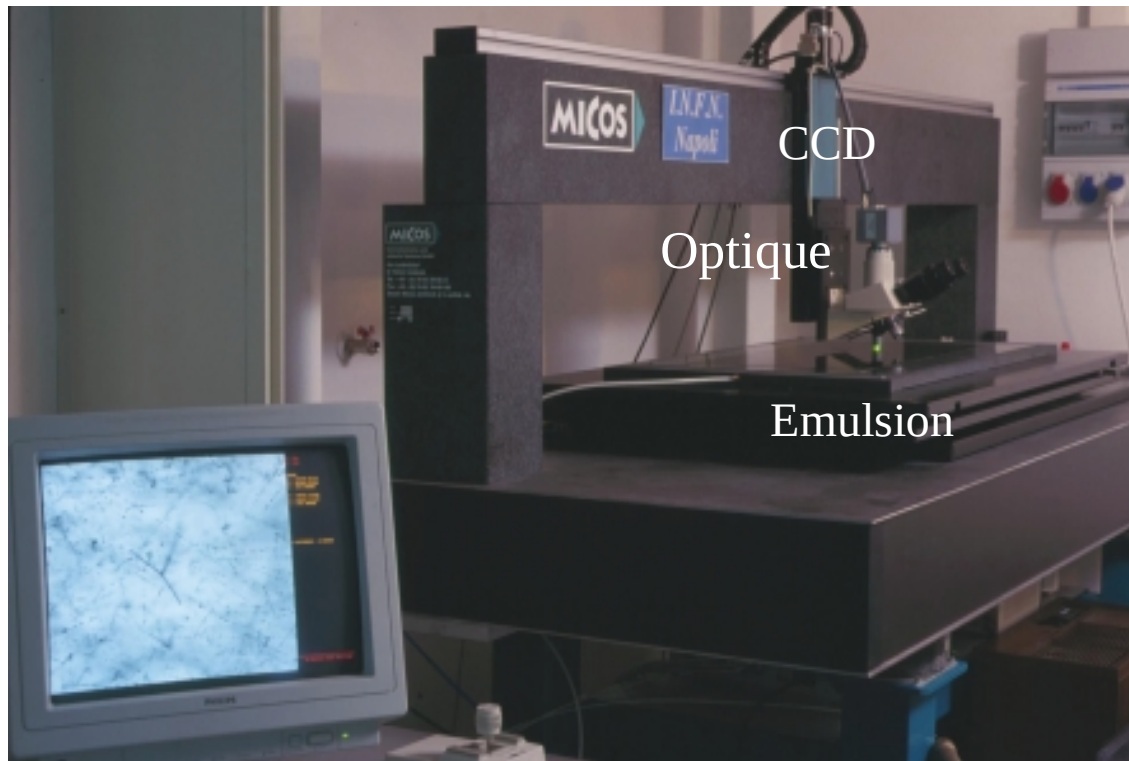
Le “coeur” de CHORUS



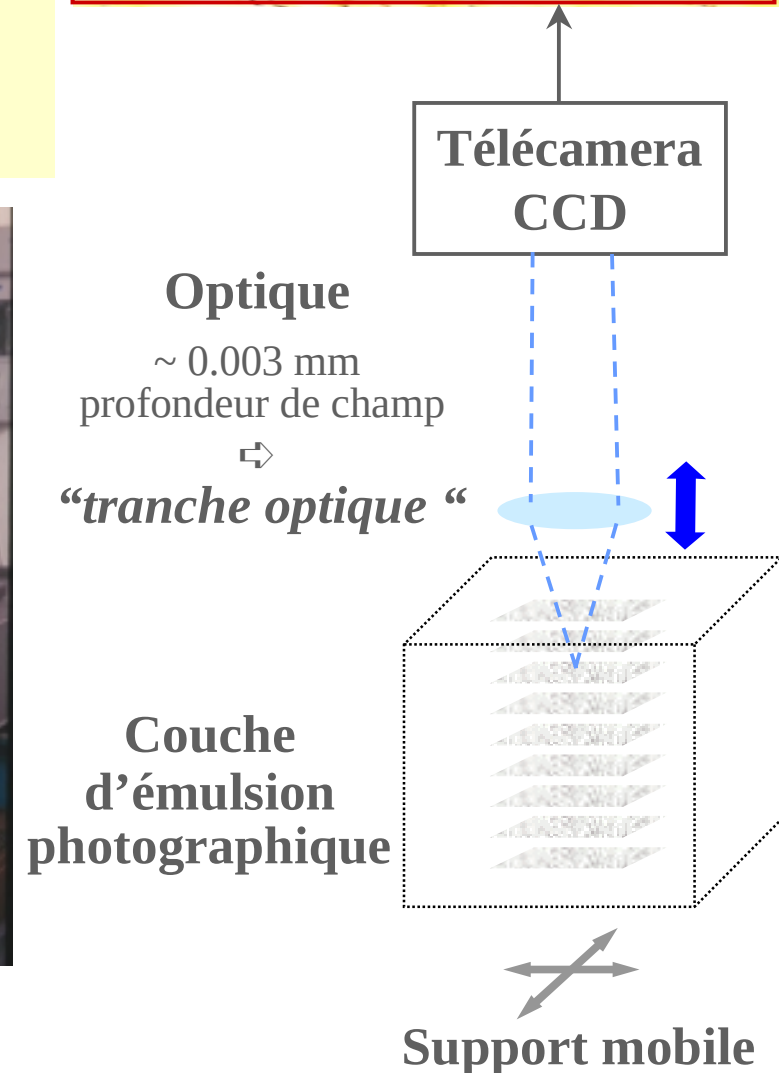
Les traces dans les fibres scintillantes indiquent les régions à analyser
dans l'émulsion photographique
(avec des microscopes automatiques contrôlés par ordinateur)

Microscope pour analyser automatiquement les images en trois dimensions

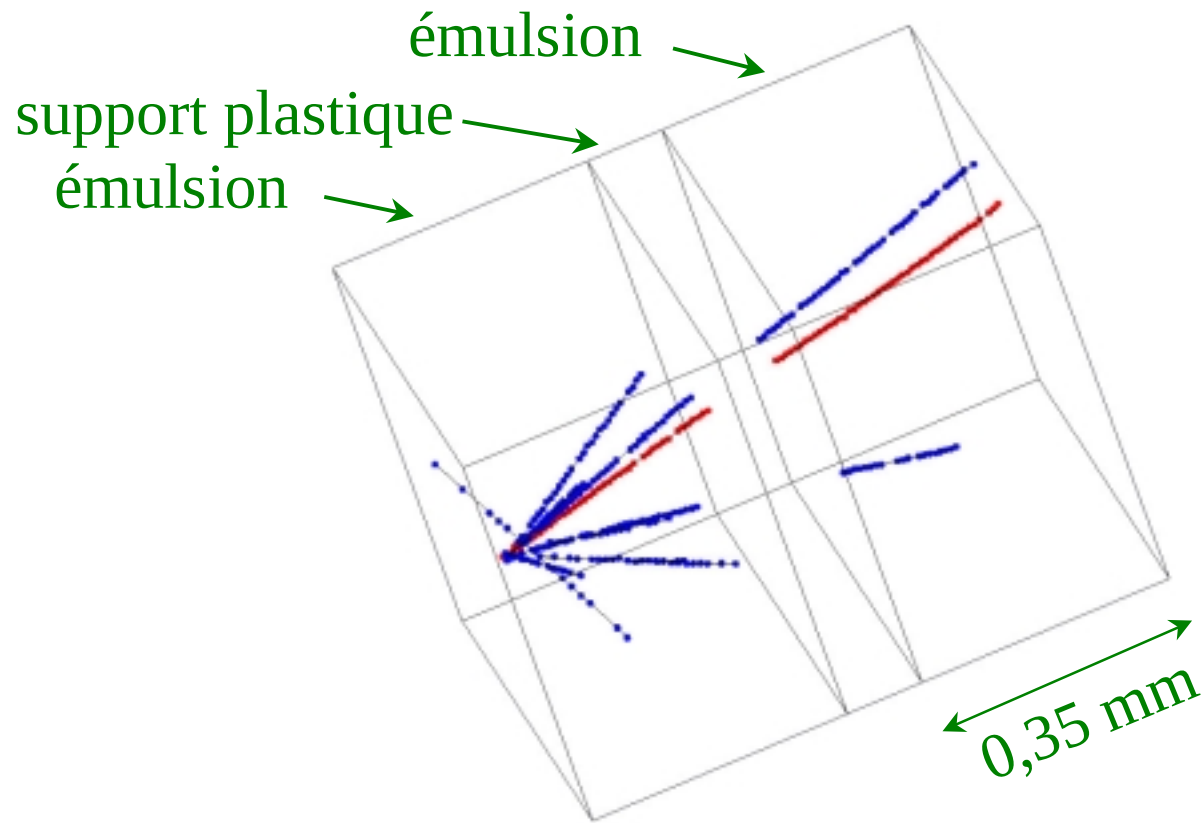
*Entièrement contrôlé par ordinateur
Application également pour d'autres domaines :
ex. biophysique*



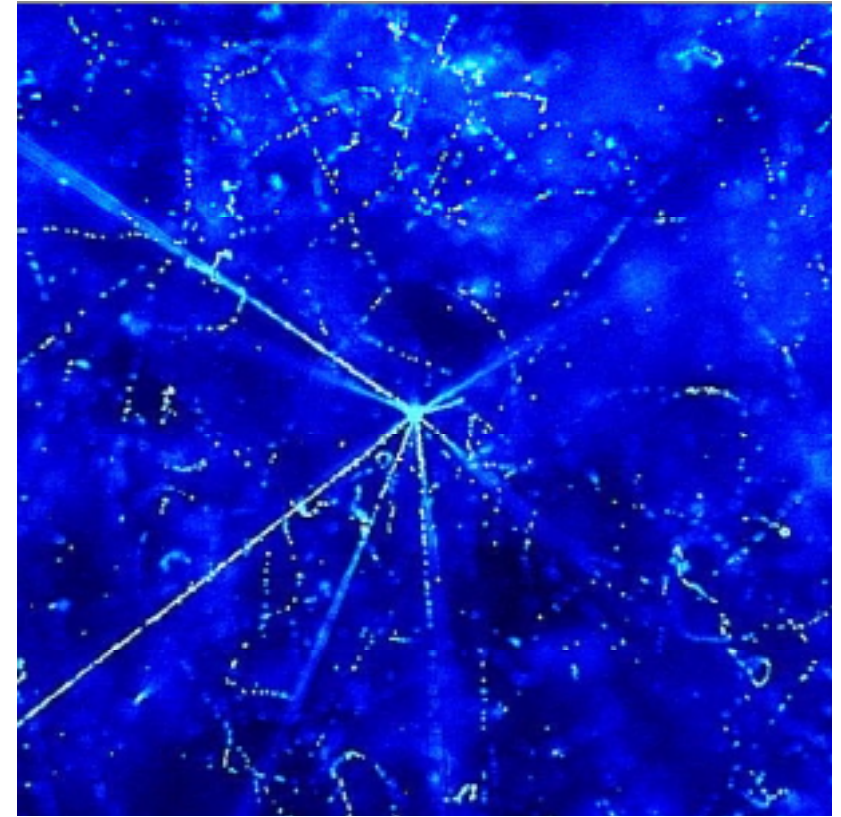
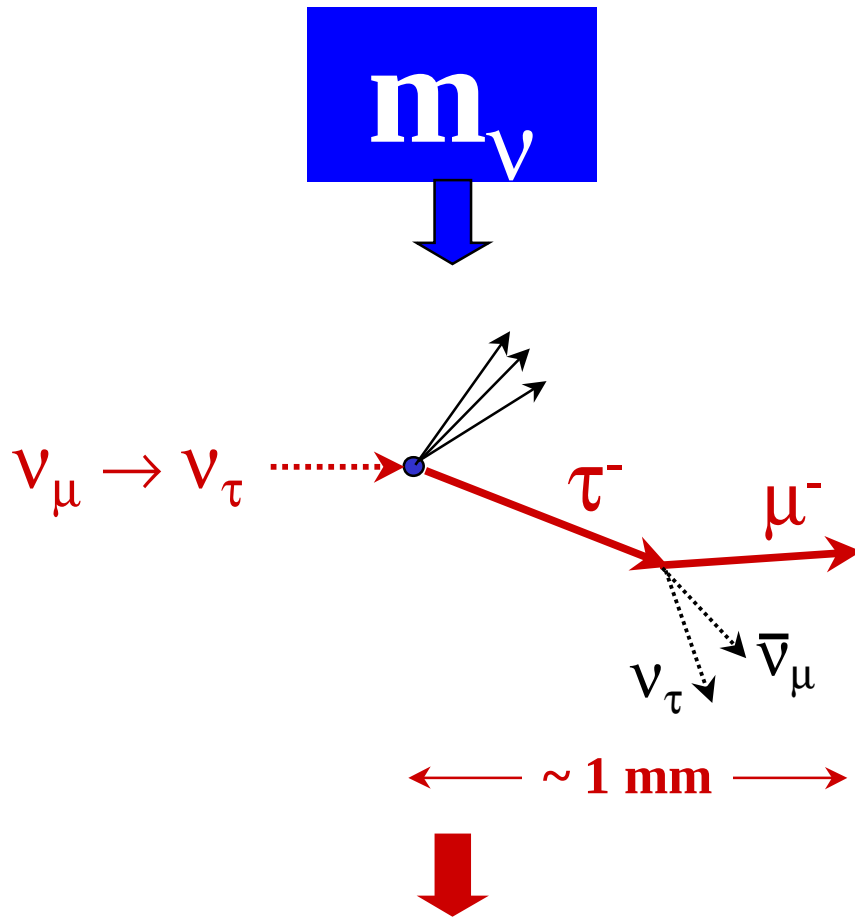
**Interaction des V_τ visualisée
en 3 dimensions, en faisant
des séries d'images
“en tranches”**



Événement, dans l'émulsion, puis reconstruit en trois dimensions par ordinateur



Visualisation par ordinateur des trajectoires de particules dans deux couches d'émulsions disposées de part et d'autre d'un support plastique



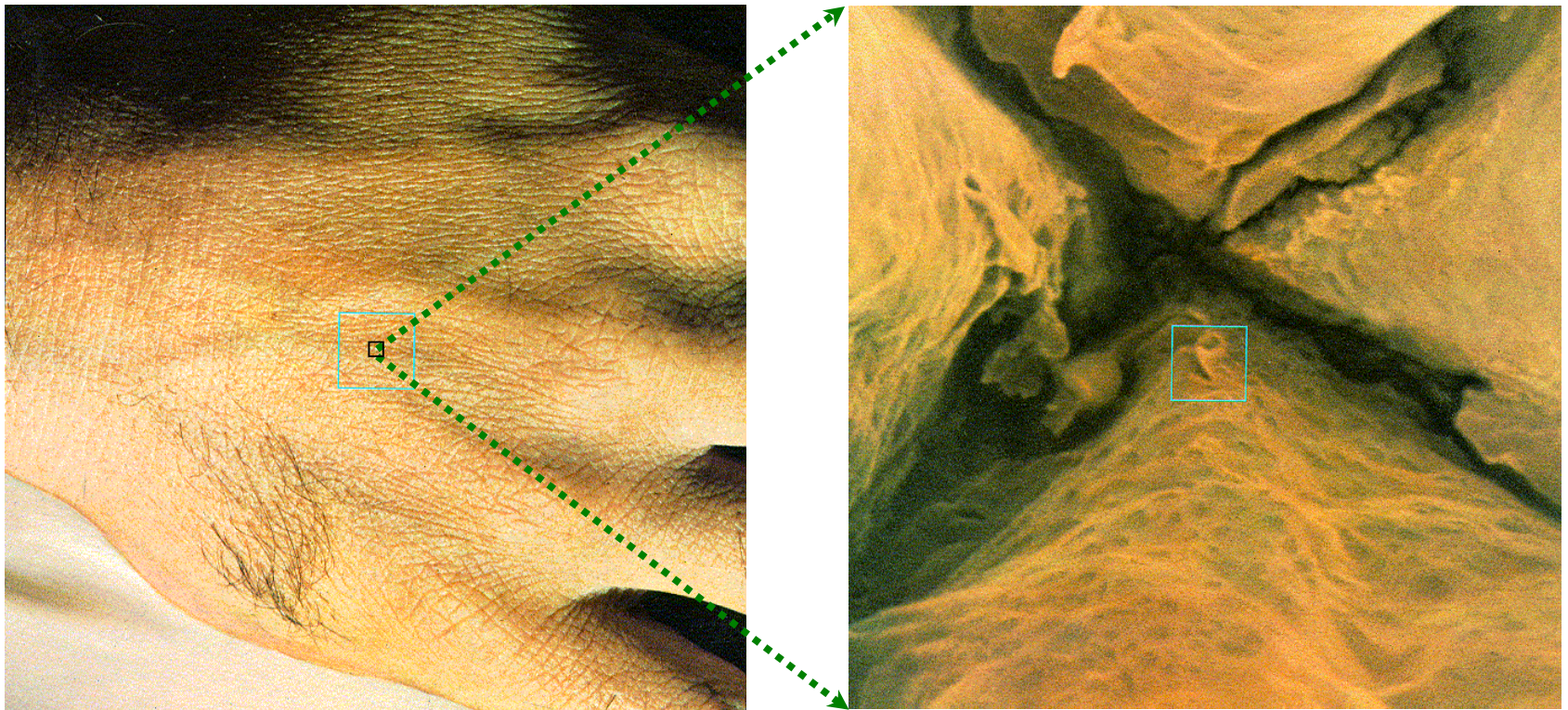
$\sim 0,1 \text{ mm}$

Trouver la trace “cassée”, résultant
de la désintégration du τ

Aiguille à chercher dans une “meule”
d’un demi million d’interactions ν_μ

Interaction des ν_μ dans les
émulsions photographiques
(une “tranche tomographique”)

Pour visualiser ce que représente 0,1 mm



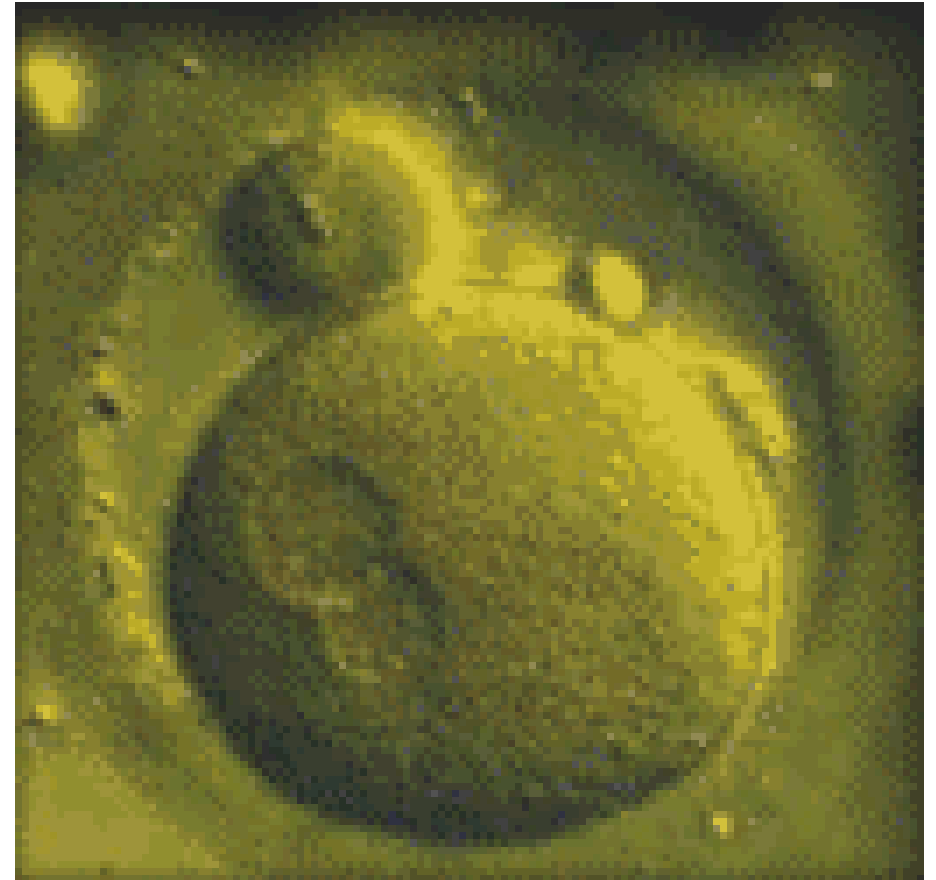
← 10 cm →

← 0,1 mm = 100 microns →

De Morrison, Morrison, Eames et Eames, *Les puissances de dix*, Broché (1998)

Ou, si vous préférez, ... ce que nous avons tous été

embryon humain ,
d'un jour

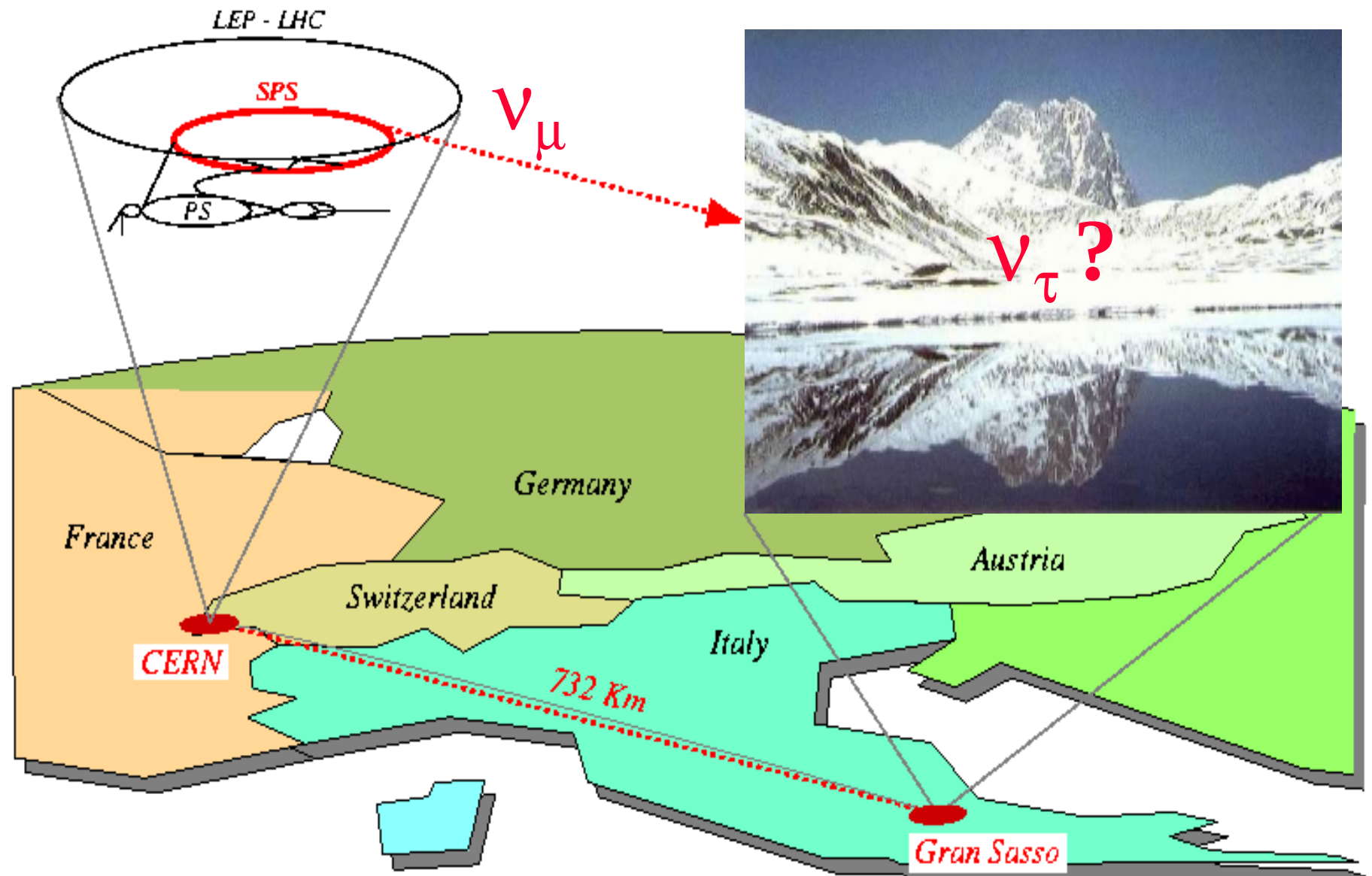


← ~ 0,1 mm →

De *The visible embryo*,
<http://www.visembryo.com/baby/index.html>

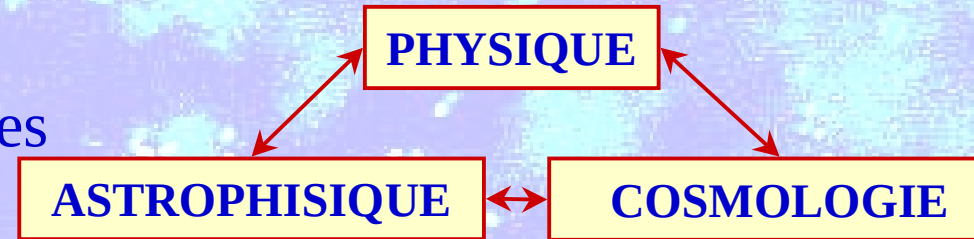
Dans quelques années ... ν depuis le CERN vers le Gran Sasso

(la probabilité d'oscillations augmente avec la distance)



... *pour conclure*

- Un très beau domaine de recherches



- Expériences difficiles et délicates



DEFI A LA PHYSIQUE EXPERIMENTALE

- Dimension “humaine”



ENGAGEMENT SUR LE PLAN INTELLECTUEL

- Pour apprendre

SYMBIOSE ENSEIGNEMENT- RECHERCHE



LICENCE - DOCTORA

- Expérience stimulante



LABORATOIRES NATIONAUX - INTERNATIONAUX

En conclusion :
....dans la vie nous
devons tous
pédaler ...

