LE NEUTRINO

Paolo Strolin
avec la collaboration de
Catello Ingenito et Laura Strolin

- **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
(Paléolitique)

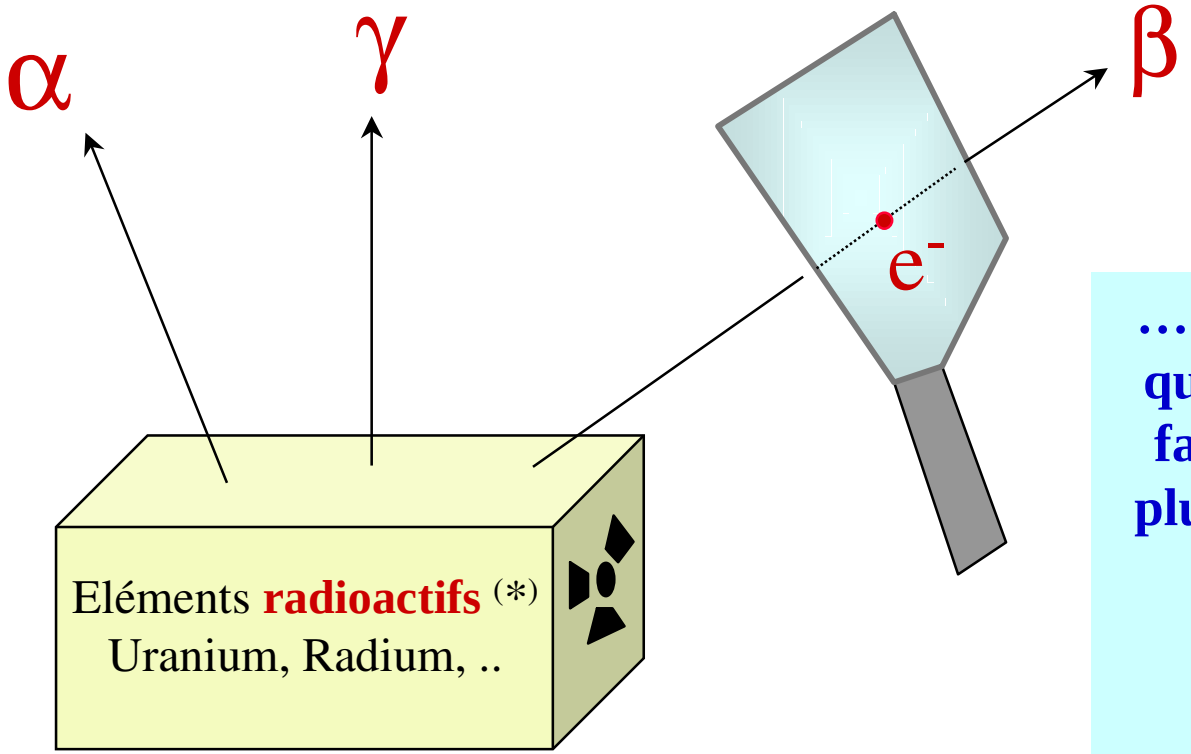
En l'absence d'écriture, les images parlent

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

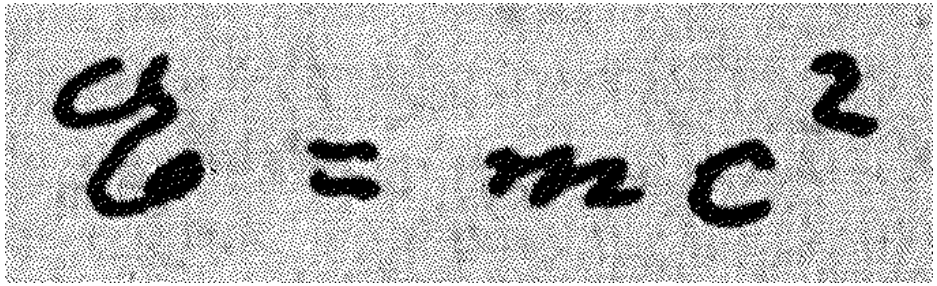
ν

(*) Copyright Marie Curie

Apparemment

~~**Rien ne se perd,**~~
~~**rien ne se crée.**~~

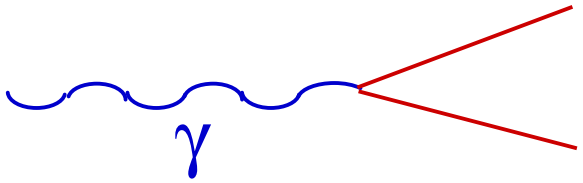
Mais depuis 1905 (Einstein)



énergie ⇌ **matière**

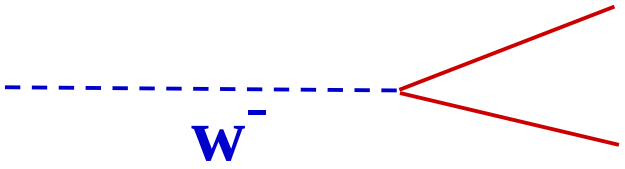
Plus précisément:

Energie ⇄ **matière + anti-matière** *



e⁻ électron

e⁺ positon (anti-électron)



e⁻ électron

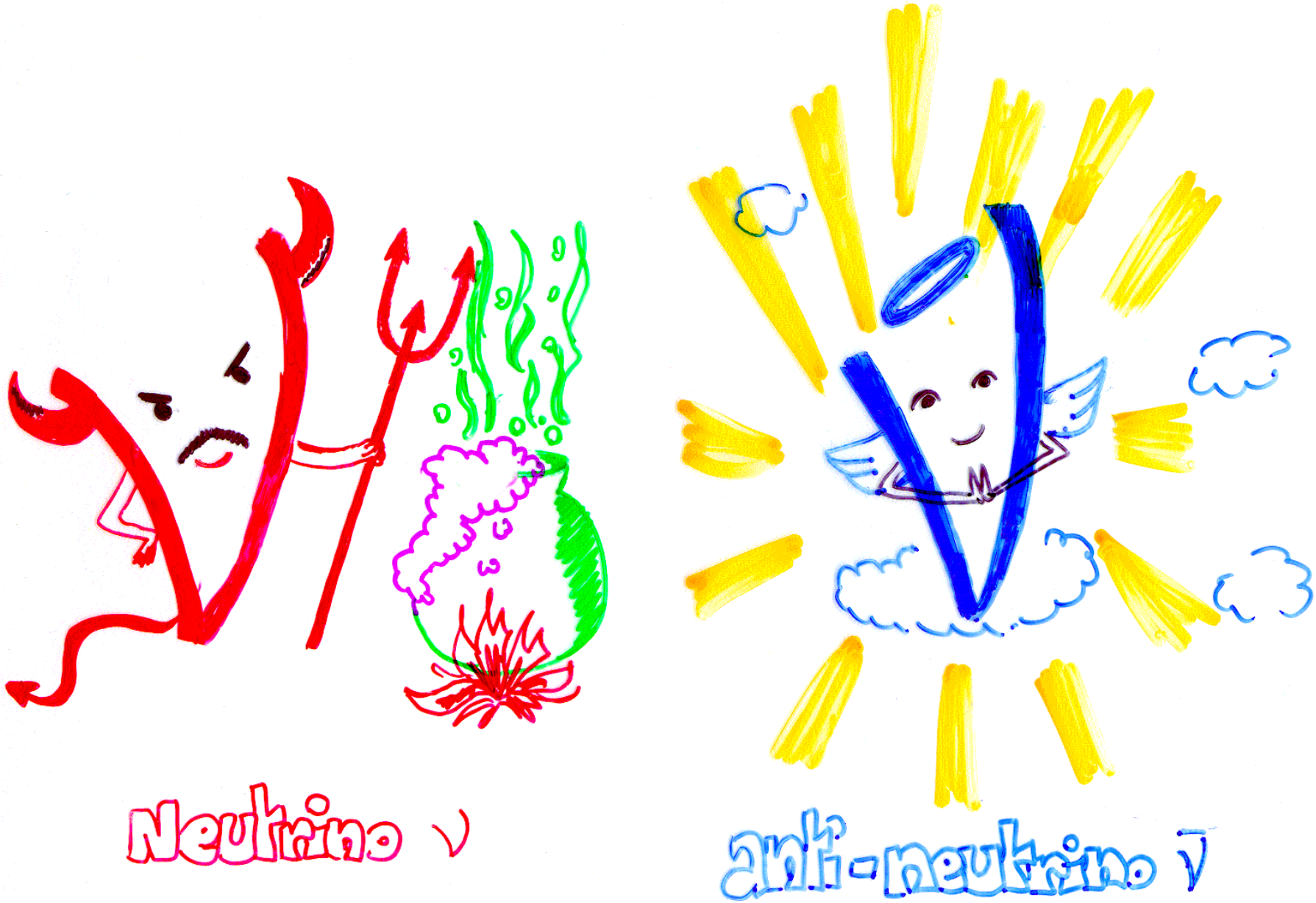
$\bar{\nu}$ anti-neutrino

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

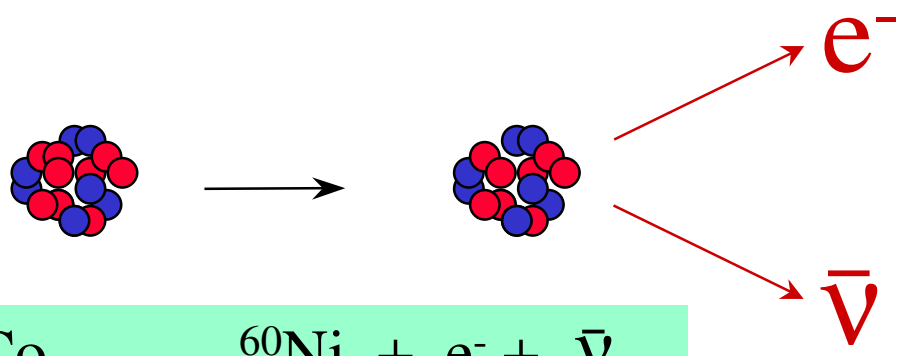
"rien ne se perd, rien ne se crée"

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

Et alors ...



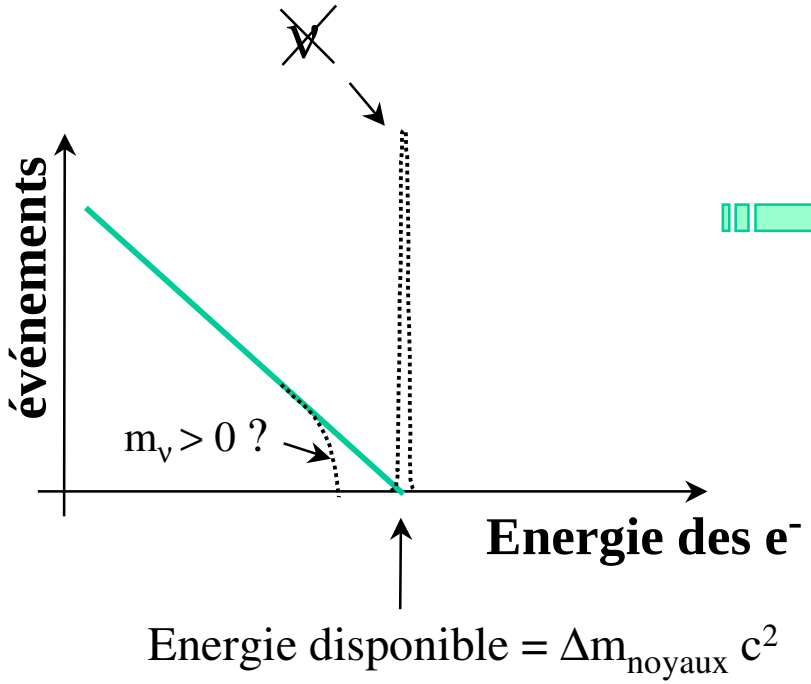
Désintégration nucléaire β



$^{60}Co \longrightarrow {}^{60}Ni + e^- + \bar{\nu}$

$n \longrightarrow p + e^- + \bar{\nu}$ (F. Perrin 1933)

$d \longrightarrow u + e^- + \nu$ (Modèle des Quarks, 1964)



HYPOTHESE DE PAULI
(1930)

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

“ESSAI DE THEORIE DES RAYONS β”

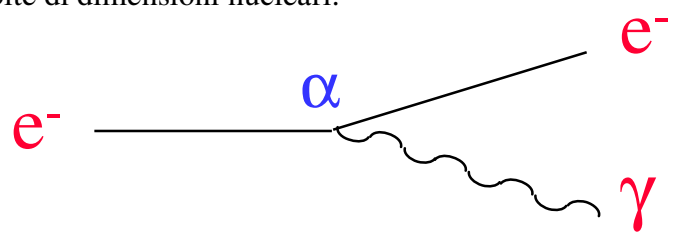
Enrico Fermi (1934)

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.*

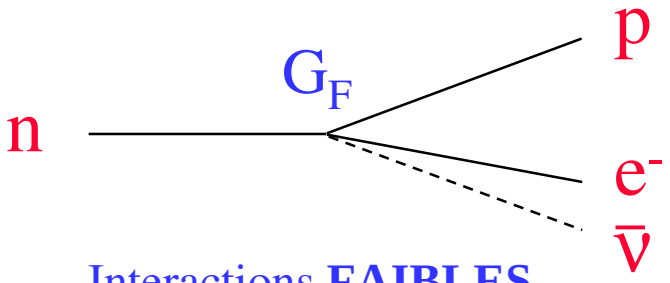
Ipotesi Fondamentale della teoria

§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.



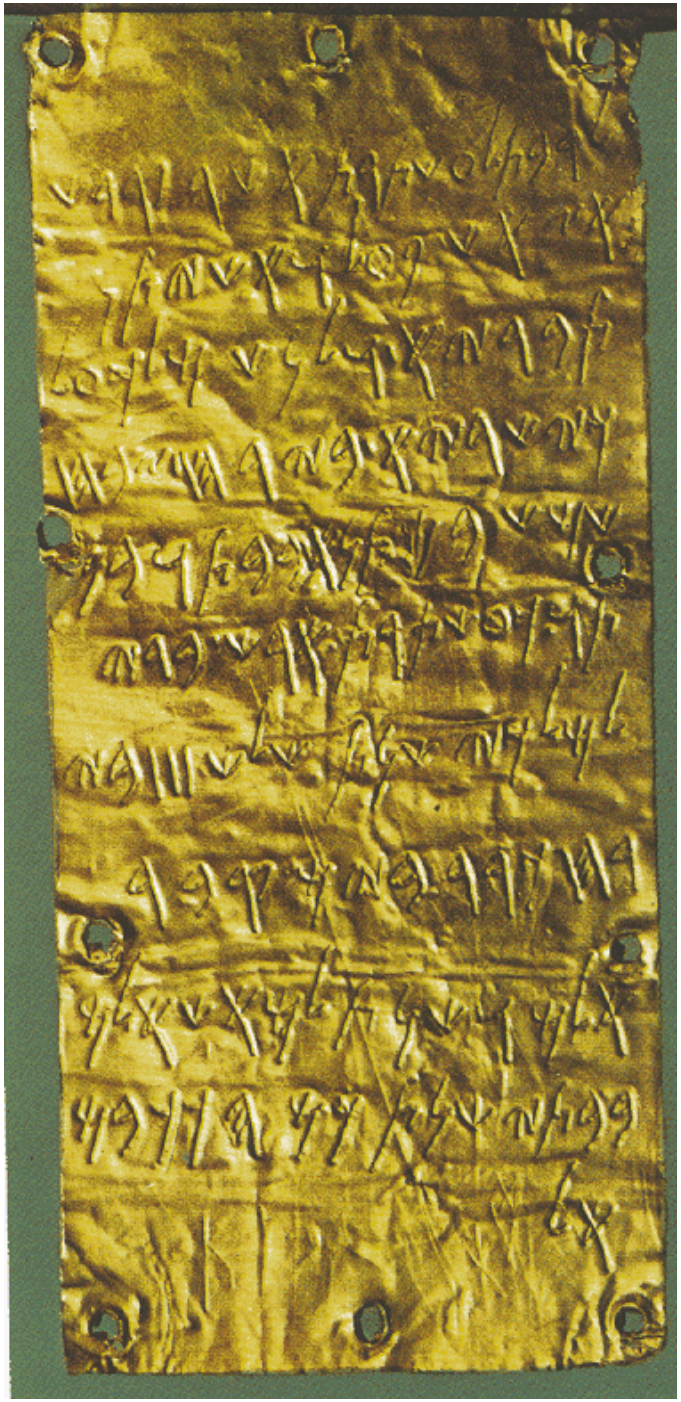
Interactions **ELECTRO-MAGNETIQUES**



Interactions **FAIBLES**

$G_F << \alpha$ (constantes liées à la probabilité)

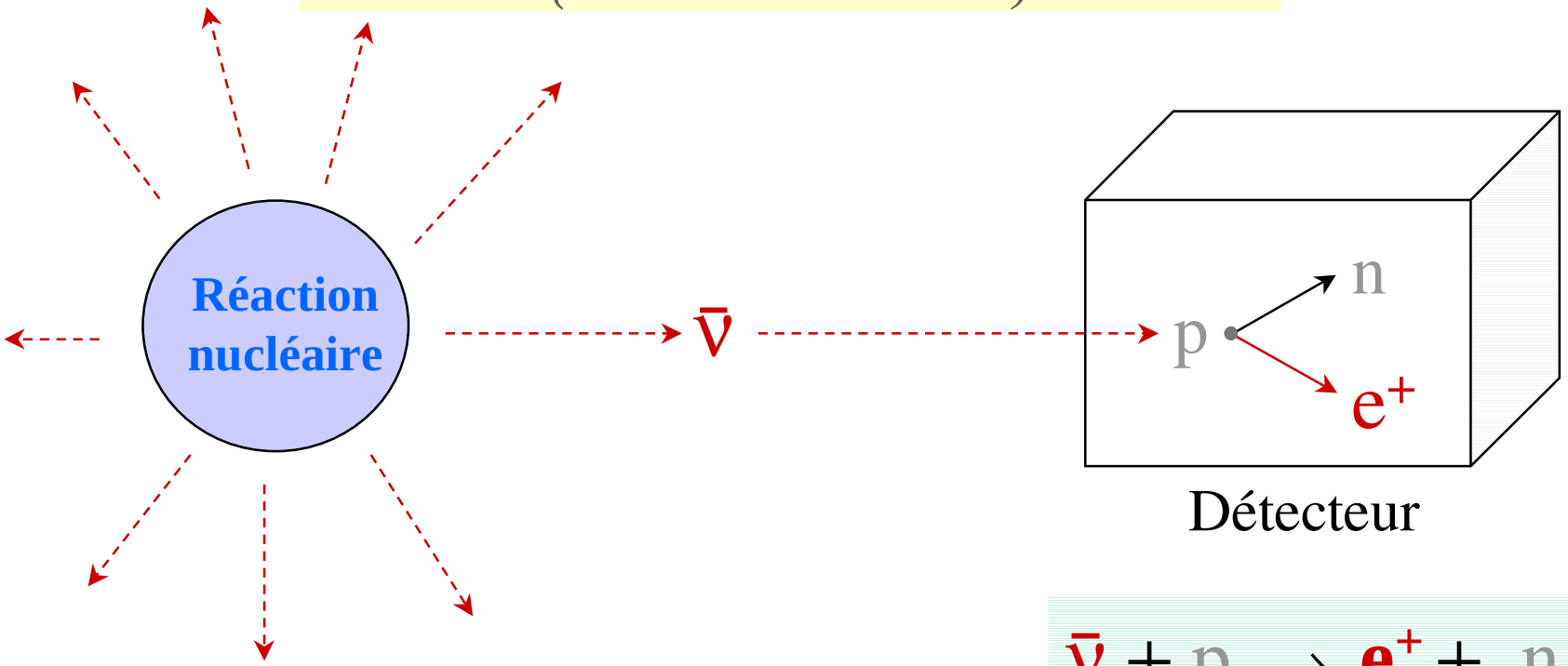
Et, avec l'écriture, la préhistoire se termine ...



Inscriptions phéniciennes sur feuille d'or
Pyrgi (Latium)

“Découverte” des ν

(Reines et Cowan 1956)



$$\bar{\nu} + p \rightarrow e^+ + n$$

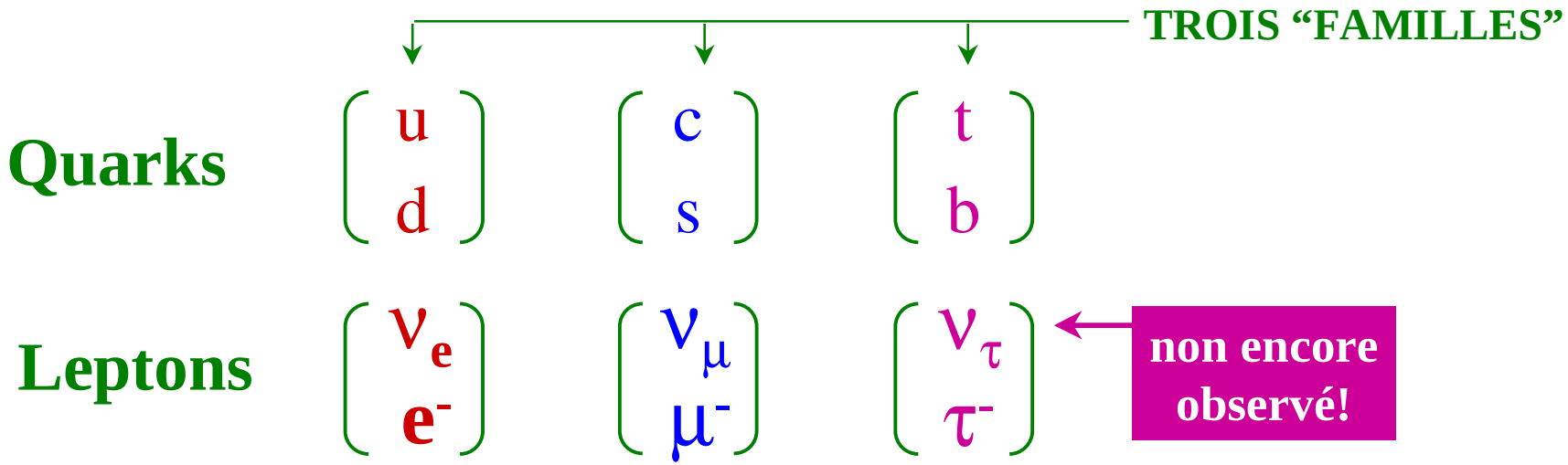
n (neutre) et **p** (au repos) sont invisibles

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

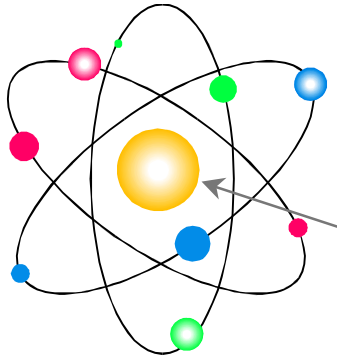
la “section efficace” σ

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

Diamètre de l’atome ~ 10^{-8} cm

ν

σ ~ 10^{-38} cm^2



Diamètre du nucléon ~ 10^{-13} cm

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^{o}	10^{-6}
Gravitationelle	**?**	10^{-40}

… agissent sur

Quarks	**Forte** (+ e.m. + faible)
e^- , μ^- , τ^-	**e.m.** (+ faible)
Neutrinos	**faible**

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*

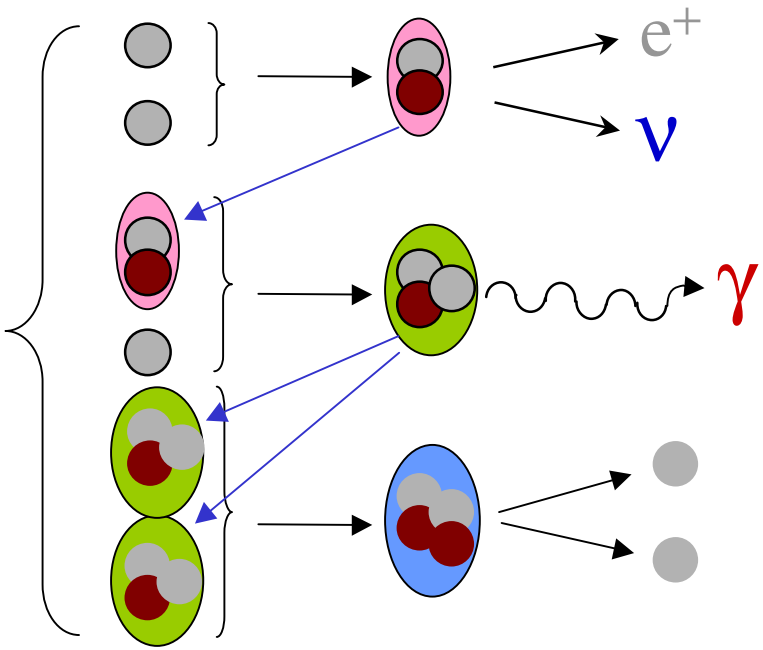
Michelangelo Merisi, dit le Caravage (1573-1610)
Corbeille de fruits (1590?), Pinacothèque Ambrosiana (Milan)

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 :**

"Cycle p-p"

- proton
- neutron



$p + p \rightarrow d + e^+ + \nu$

$d + p \rightarrow {}^3He + \gamma$

${}^3He + {}^3He \rightarrow {}^4He + 2p$

En définitive → $p + p \rightarrow {}^4He + \nu + \gamma$

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

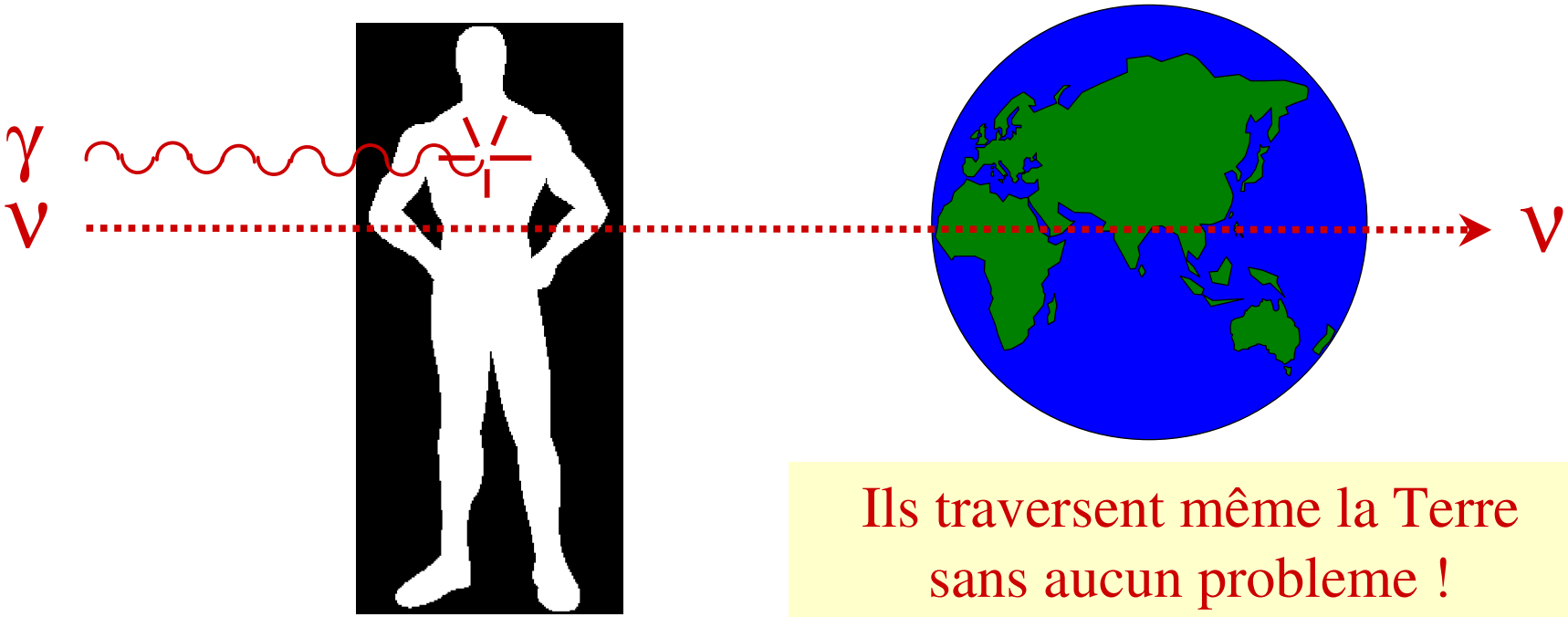
~ $\mathbf{10^{11}}$ ν / cm^2 sec !

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 probleme !

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

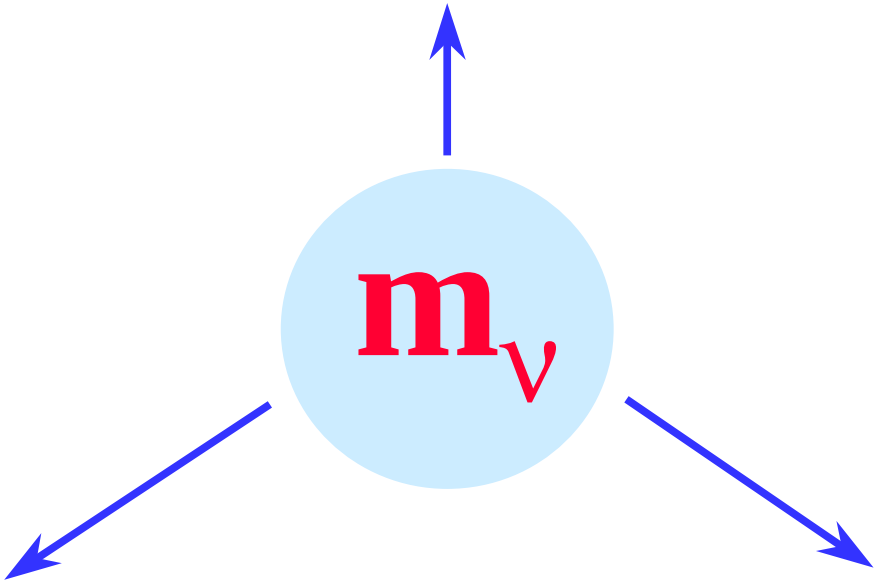
Expériences difficiles

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



ASTROPHYSIQUE

COSMOLOGIE

$m_\nu > 0$?

PHYSIQUE

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

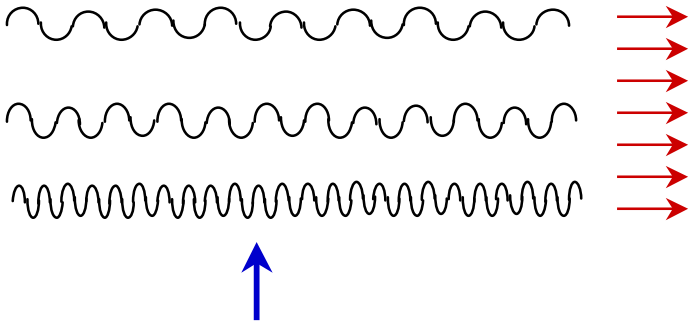
ASTROPHYSIQUE

- Par l'abondance des ν, la "Matière Obscure" de l'univers est- elle en partie attribuable à $\mathbf{m_\nu > 0}$ **?**

COSMOLOGIE

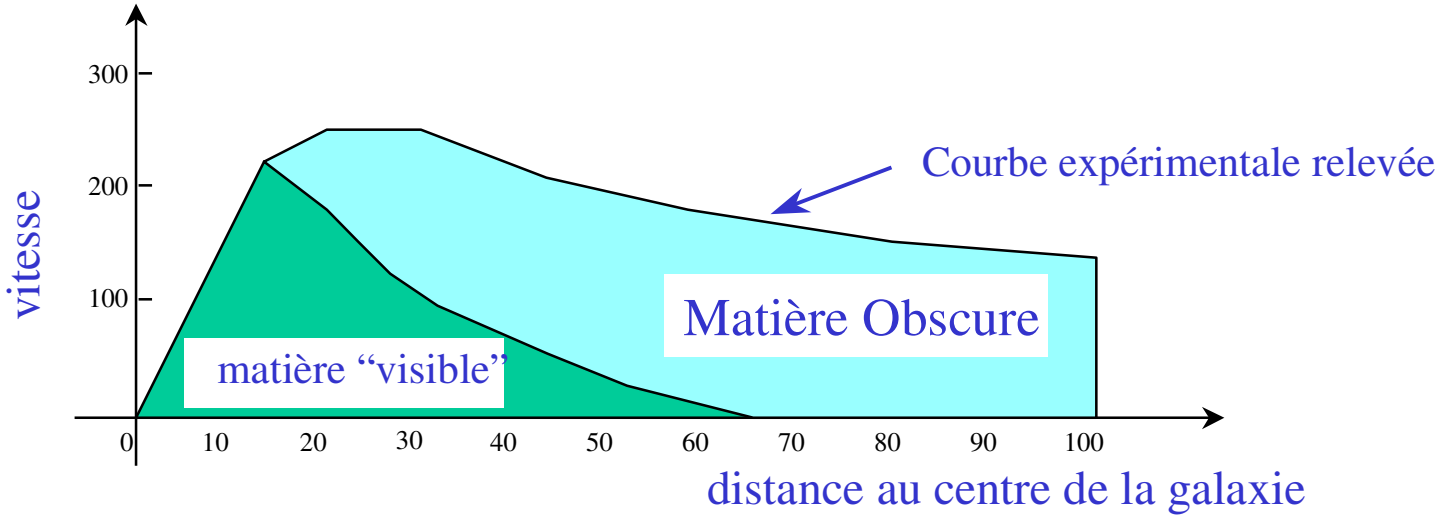
- Théorie du "Big Bang" : l'univers s'étendra t'il indéfiniment ?
- La Matière obscure existe t-elle en quantité suffisante pour freiner l 'expansion de l 'univers?

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 ~ 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

(~ 400/cm^3 à 2,7 °K - Arno et Penzias 1965)

Neutrinos "**reliques**" du Big-Bang

(également ~ 400/cm^3 , **masse inconnue**)

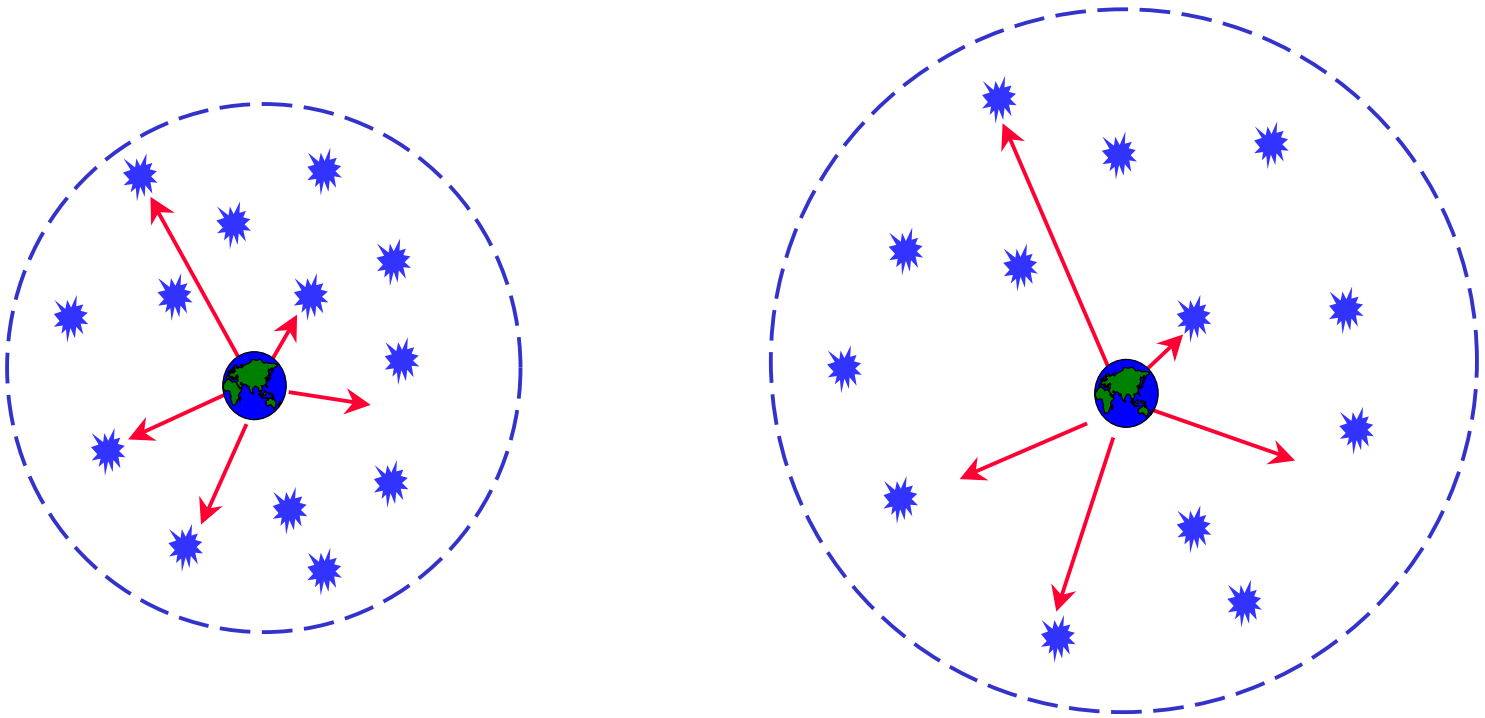
Et la matière non détectée (obscure) ?

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

L'hypothèse $\mathbf{m_\nu > 0}$ ne demande pas de nouvelles "inventions"

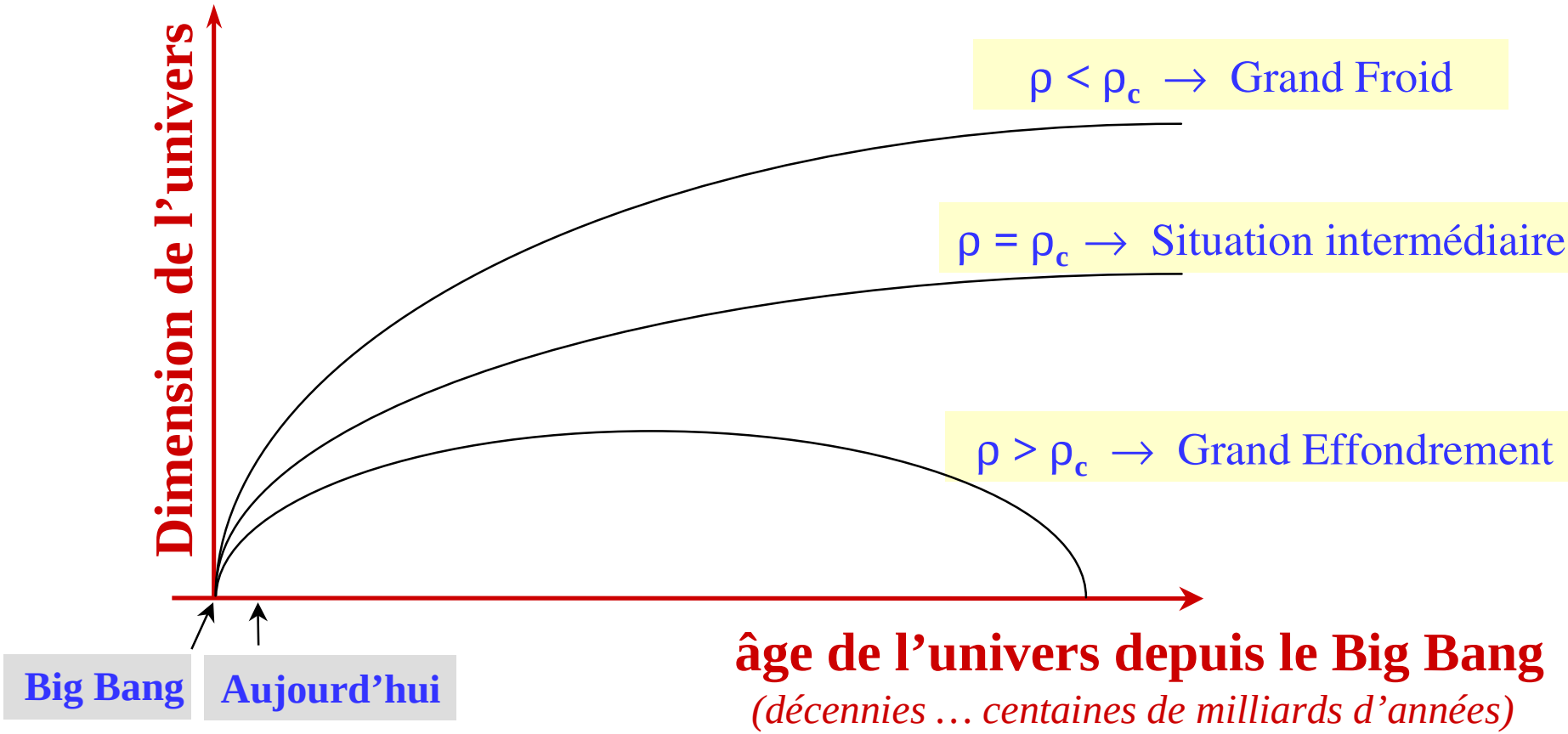
L’univers en expansion : Big Bang

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: $\rho \leftrightarrow \rho_c$?

Einstein : Relativité Générale 1916, Relativité Générale et Cosmologie 1917; **Friedmann** 1922

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 → sensibilité et clarté

Expériences difficiles

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

Si ν_τ observé : double intérêt !

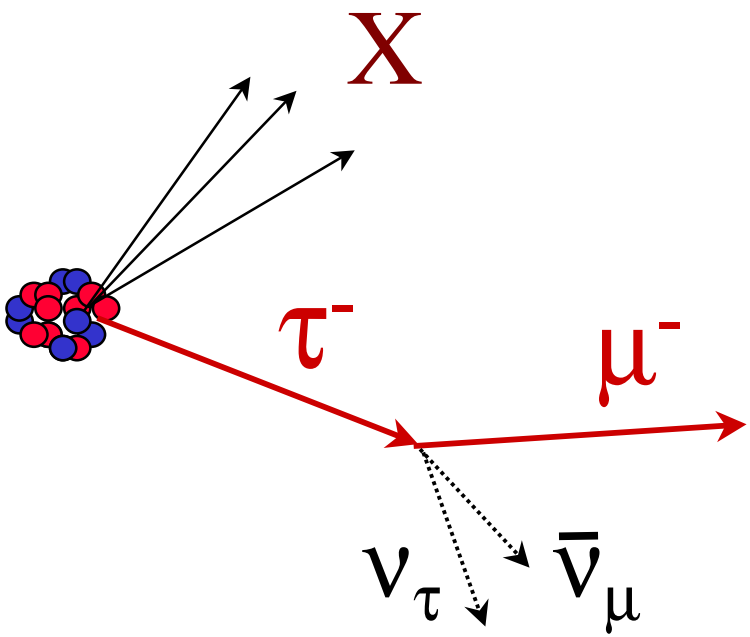
CHORUS

Cern **H**ybrid **O**scillation **R**esearch apparat**US**

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

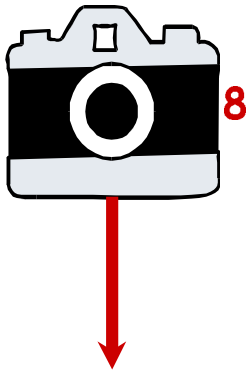
ν_μ ⋯⋯→ **Oscillation** *(ν_μ change d'identité)* ν_τ ⋯⋯→

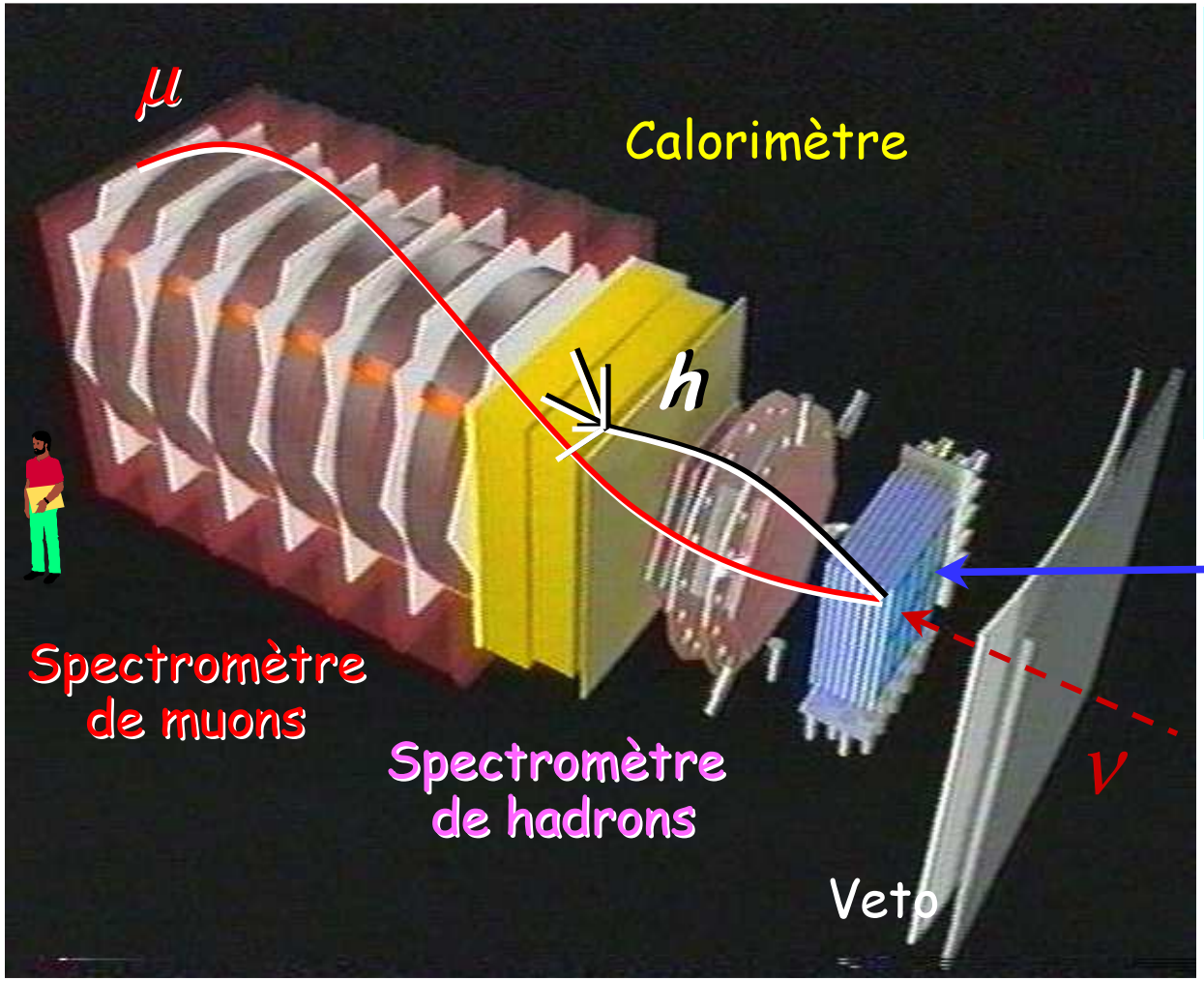


← ~ 1 mm →

CHORUS

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





Détecteurs "électroniques"

→ localisent les traces dans les emulsions

→ identifient les particules

→ mesurent l'énergie

Fibres optiques scintillantes et autres techniques

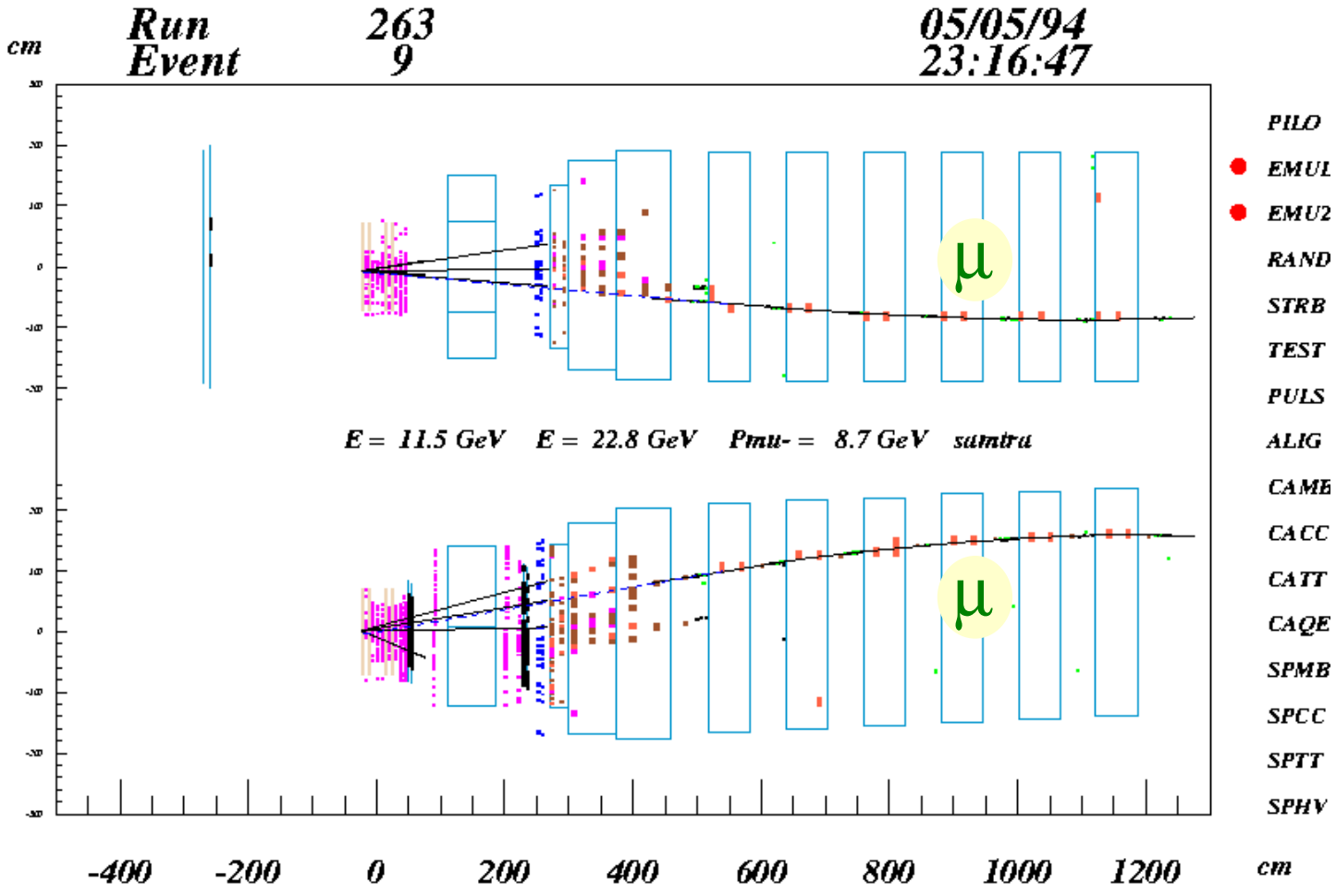
Evénement reconstruit par les détecteurs électroniques

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

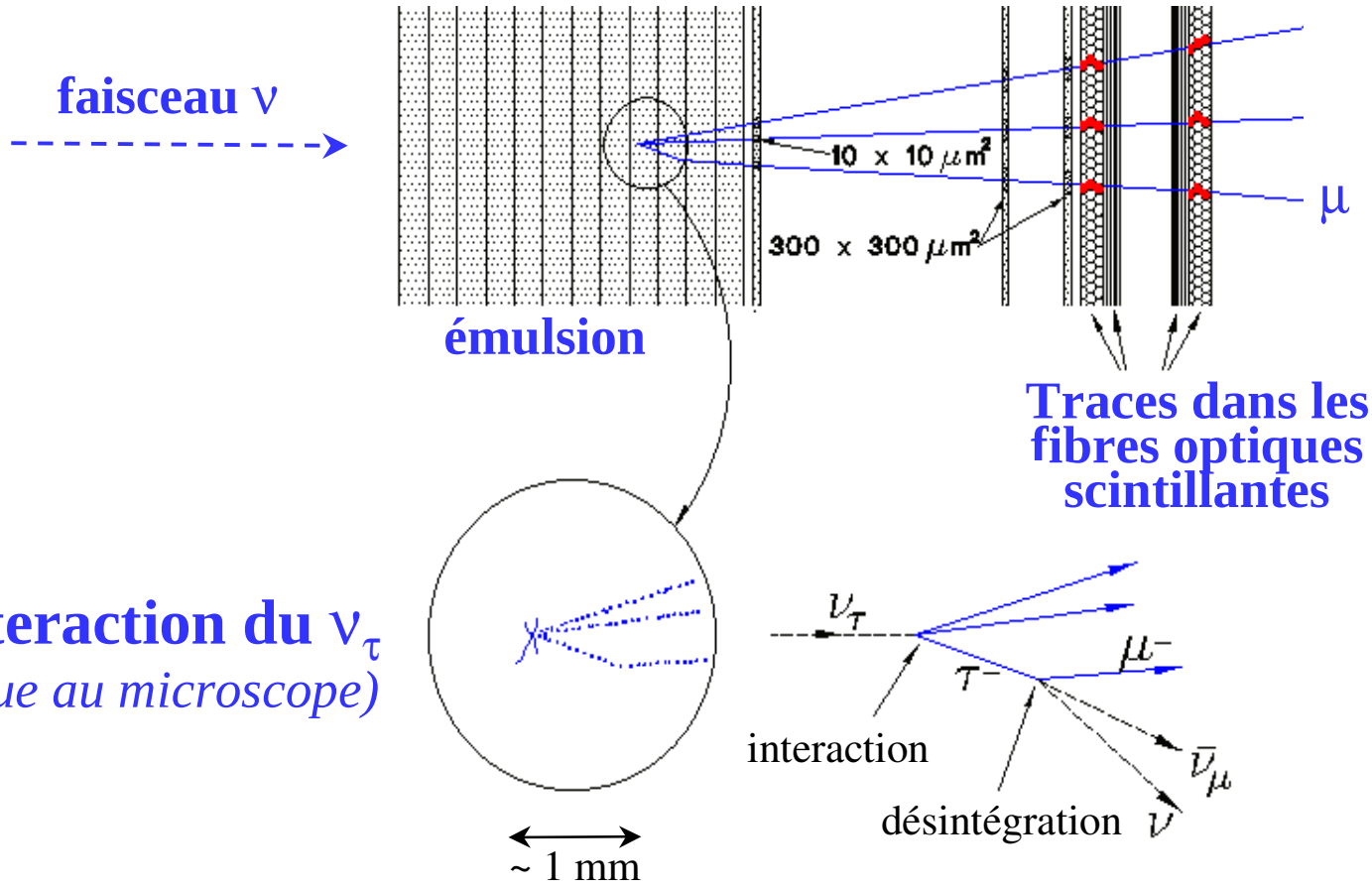
CHORUS

Vue d'en haut

Vue de côté



Le “coeur” de CHORUS

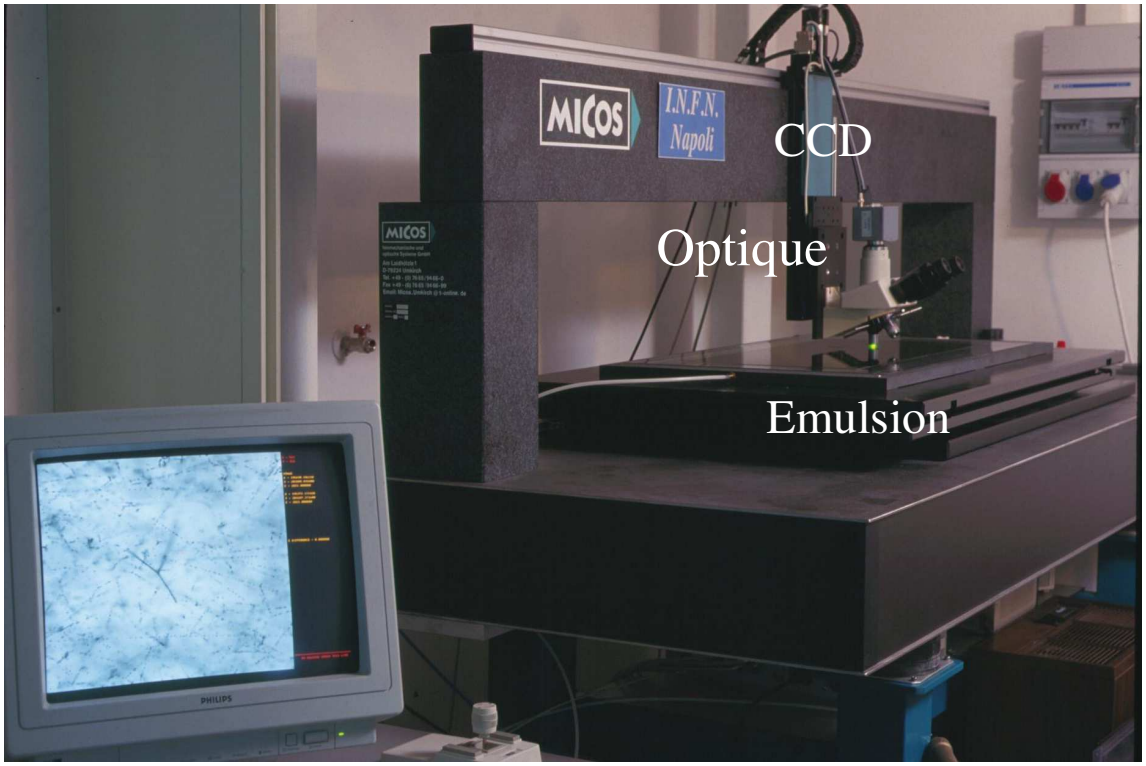


Les traces dans les fibres scintillantes indiquent les régions à analyser dans l’émulsion photographique

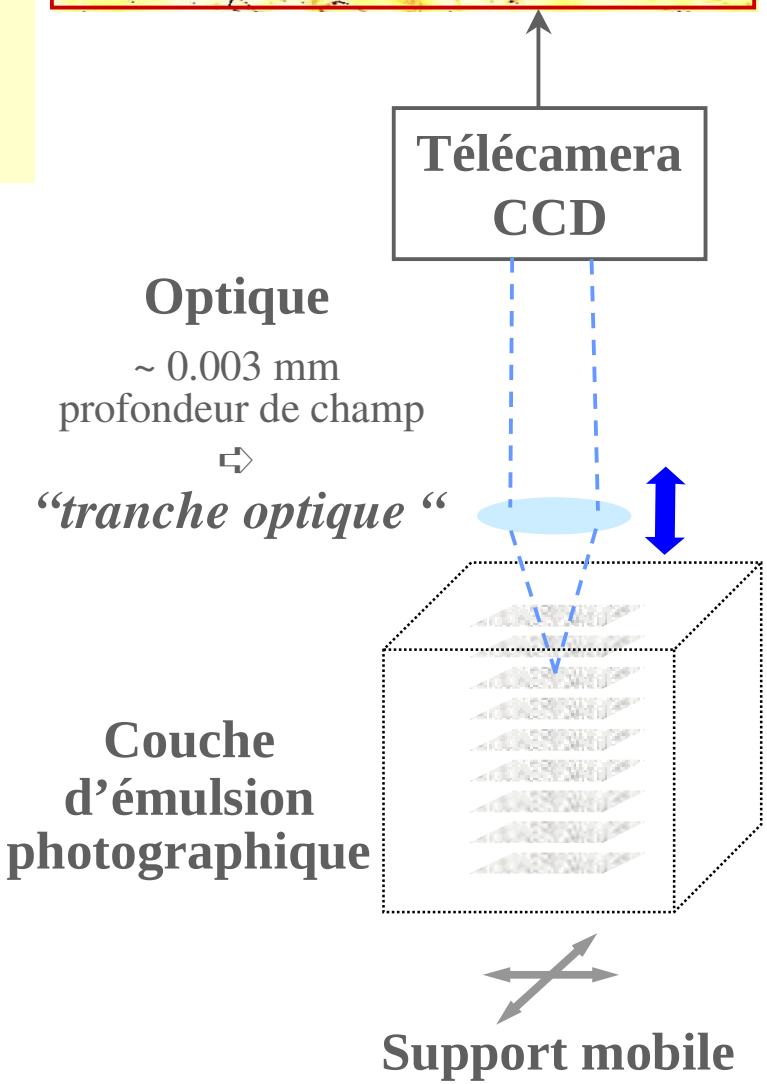
(avec des microscopes automatiques contrôlés par ordinateur)

Microscope pour analyser automatiquement les images en trois dimensions

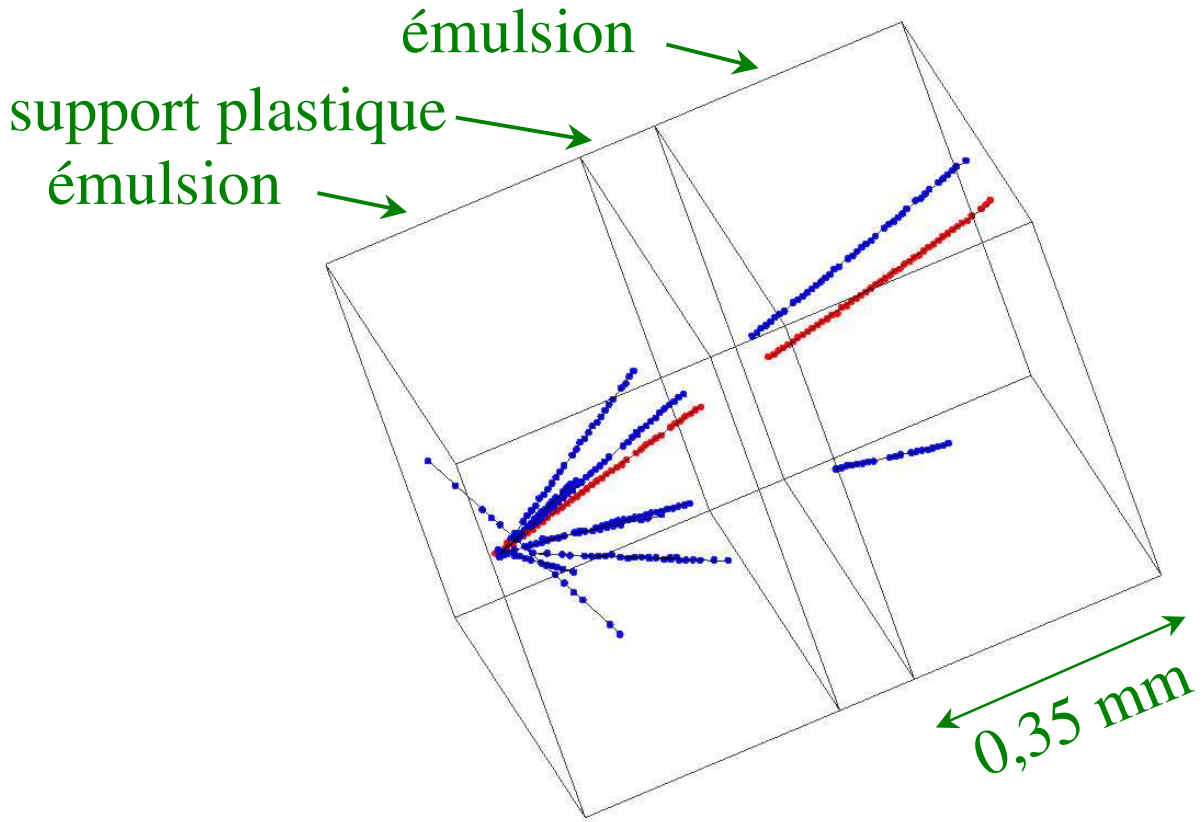
Entièrement controlé par ordinateur
Application également pour d'autres domaines :
ex. biophysique



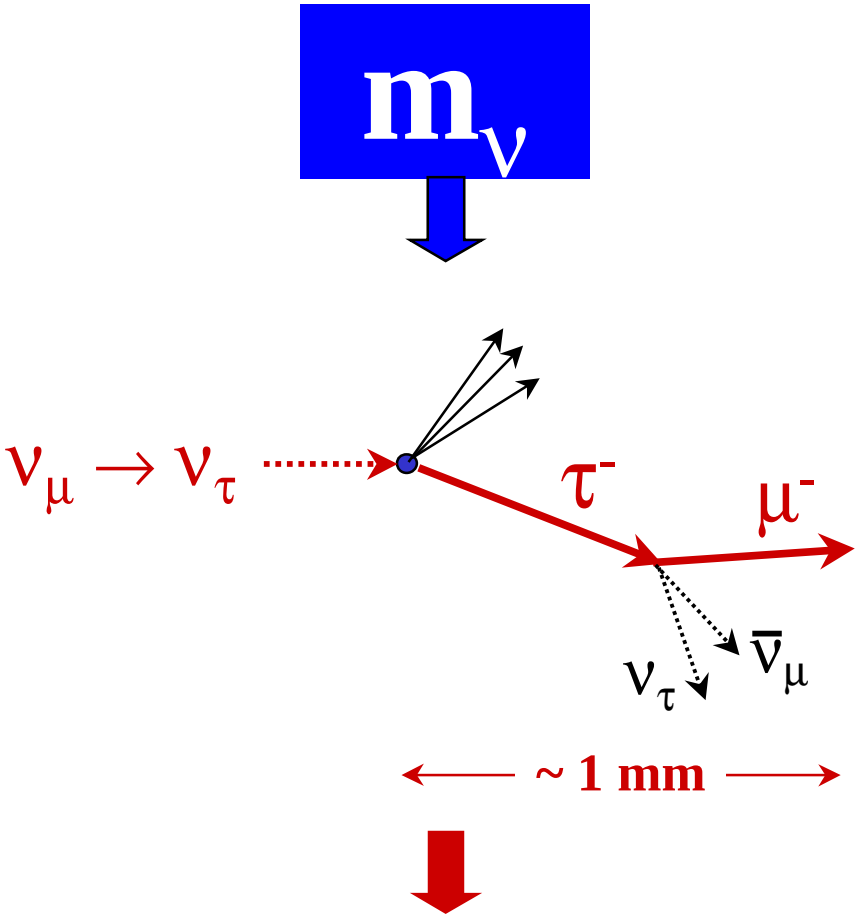
Interaction des ν_τ visualisée en 3 dimensions, en faisant des séries d'images "en tranches "

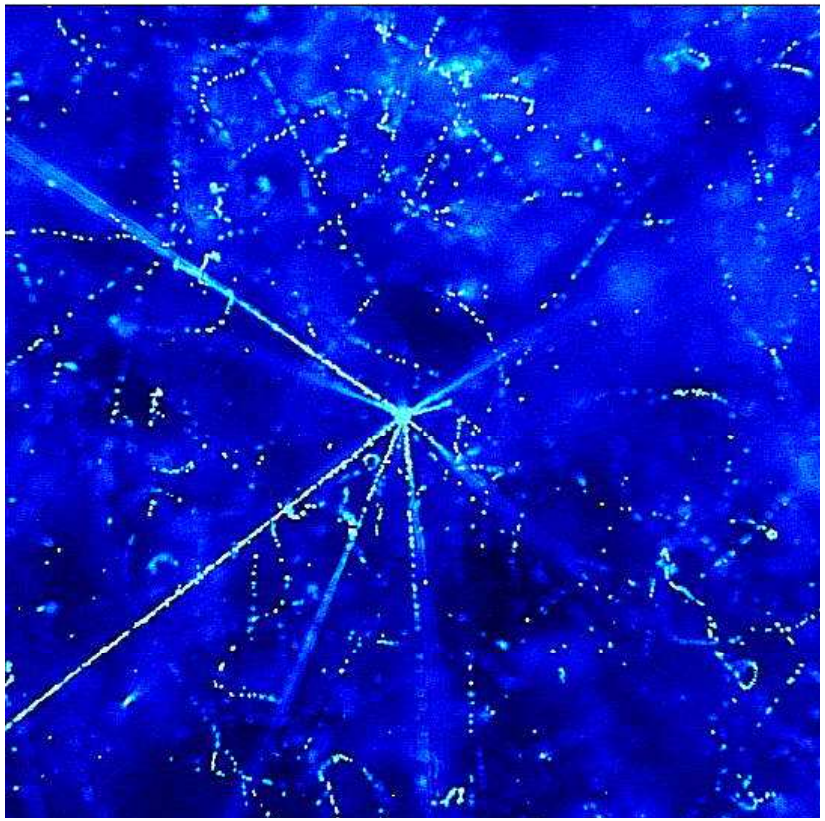


Evénement, dans l'émulsion, puis reconstruit en trois dimensions par ordinateur



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



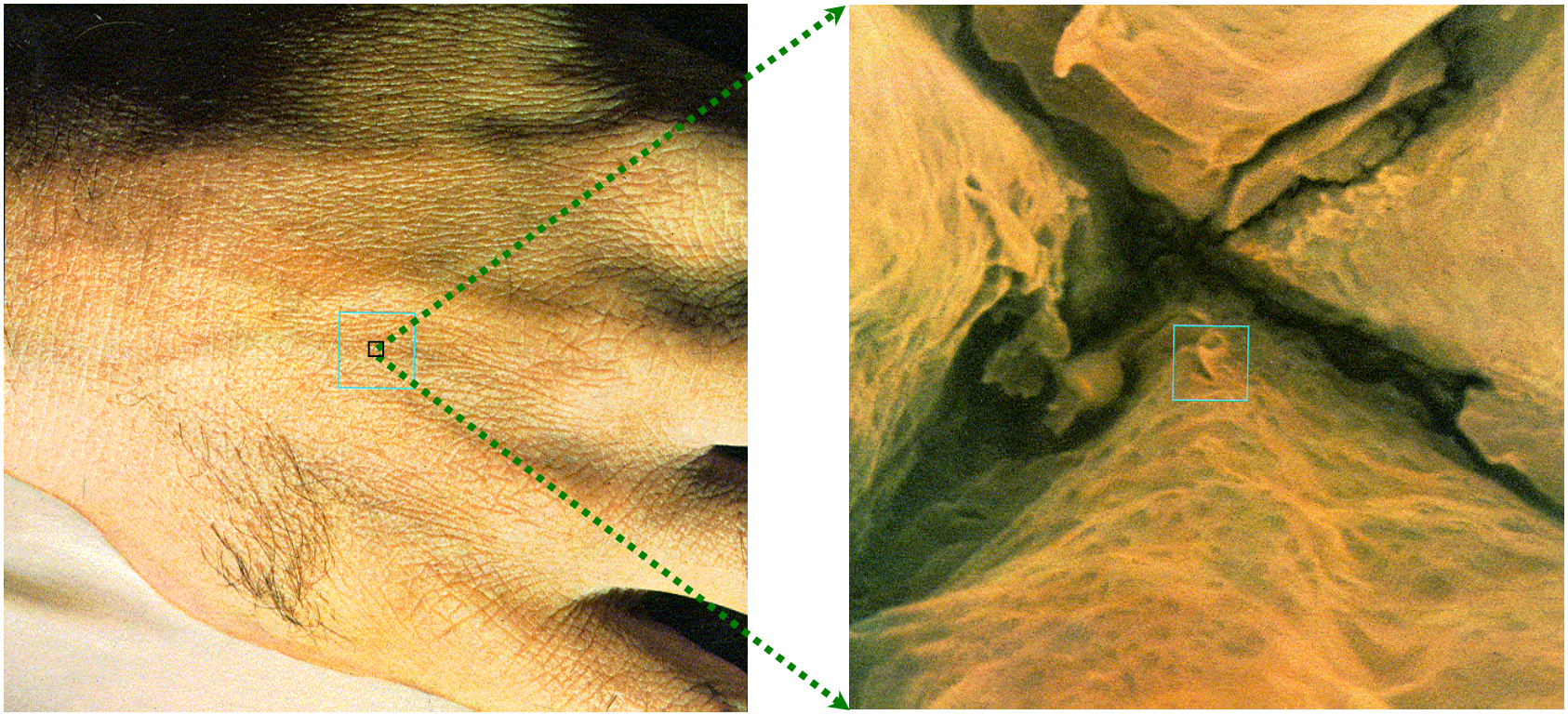


Trouver la trace "cassée", résultant de la désintégration du τ

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



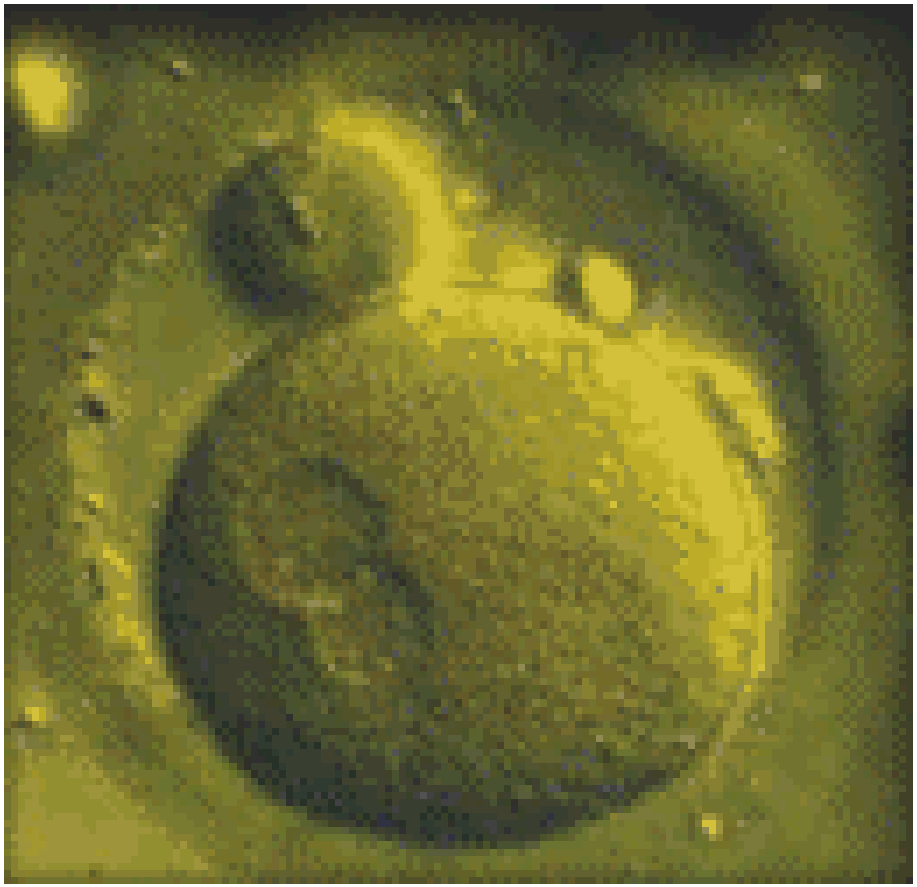
10 cm

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

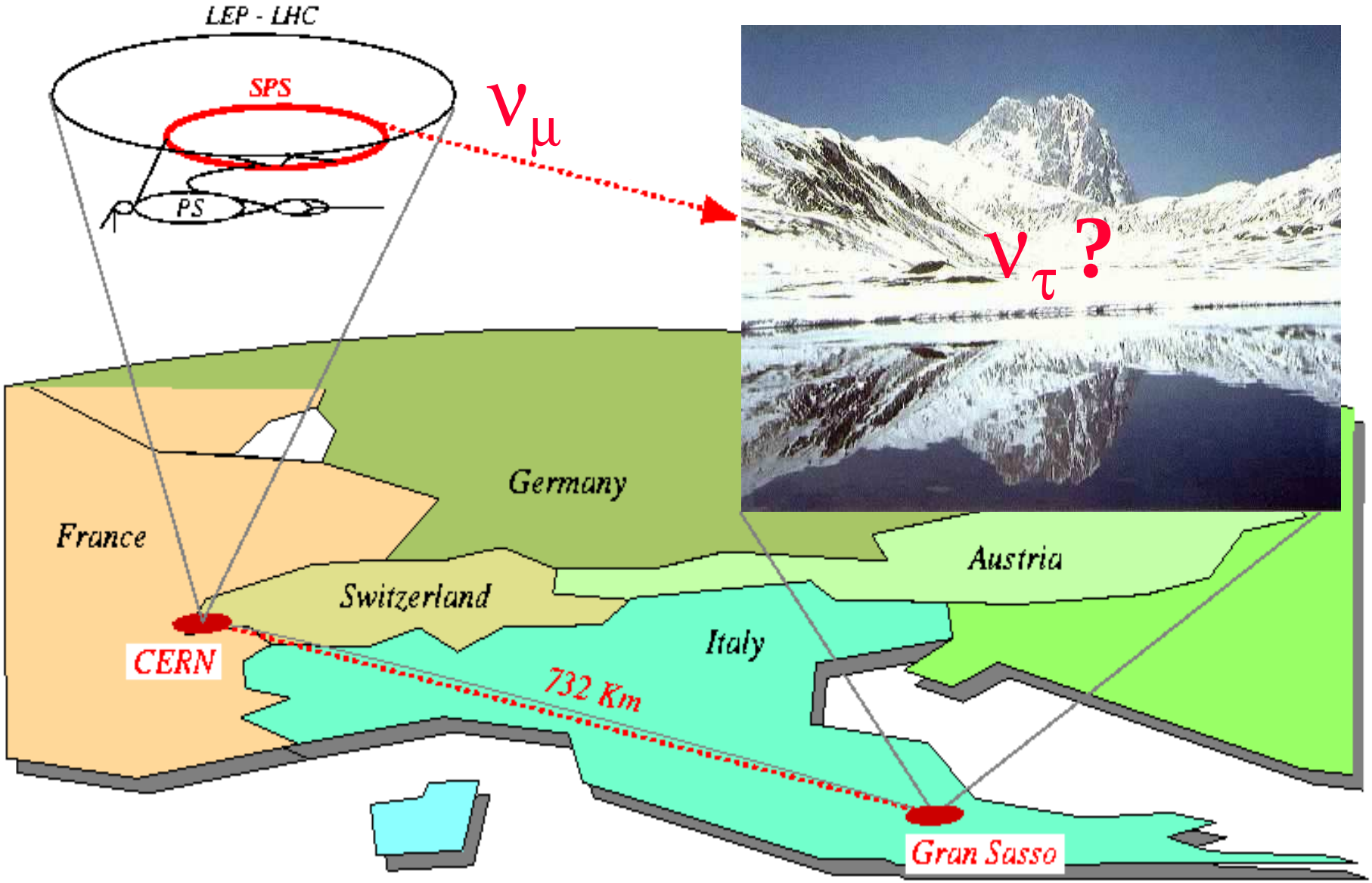


← ~ 0,1 mm →

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

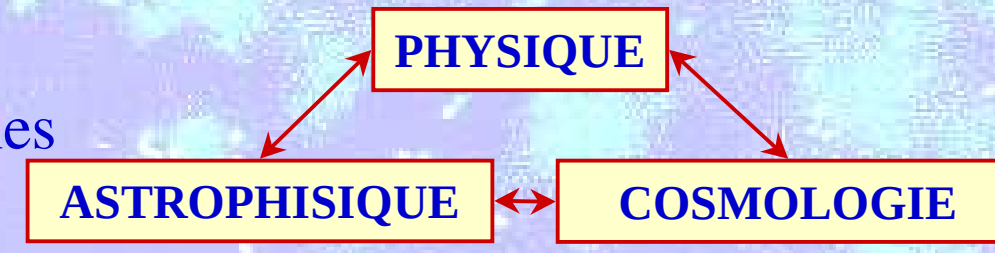
Dans quelques années … ν depuis le CERN vers le Gran Sasso

(la probabilité d'oscillations augmente avec la distance)



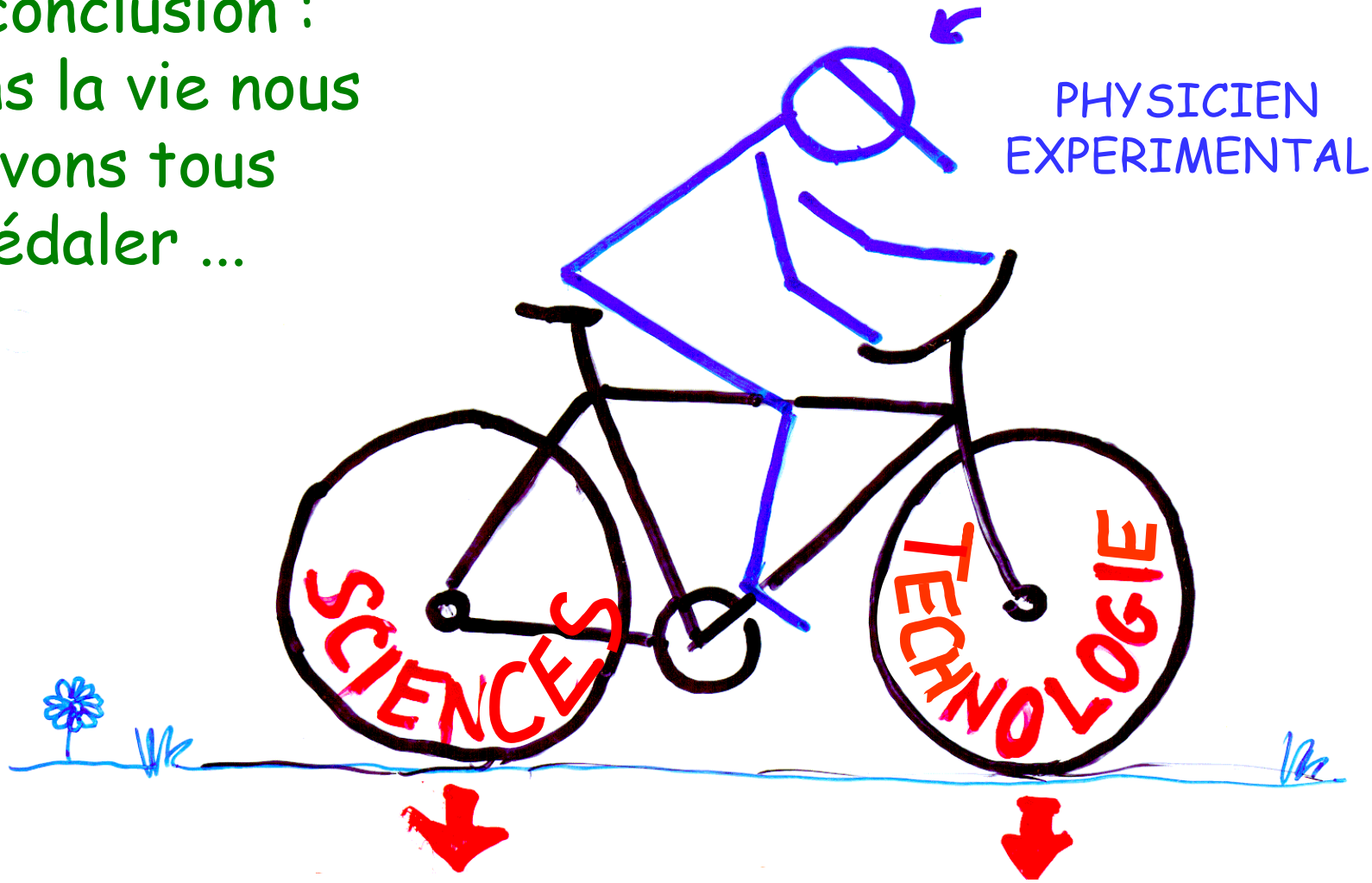
… pour conclure

- 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 …



ORGANISMES DE RECHERCHES

MONDE DE LA HAUTE TECHNOLOGIE (ELECTRONIQUE, INFORMATIQUE ……)