



# (dis)cours sur la detection en physique des particules, nucléaires et astro-particules

Philippe Schune  
IRFU – DPhP  
CEA - Saclay et université Paris-Saclay  
*philippe.schune@cea.fr*



## Plan :

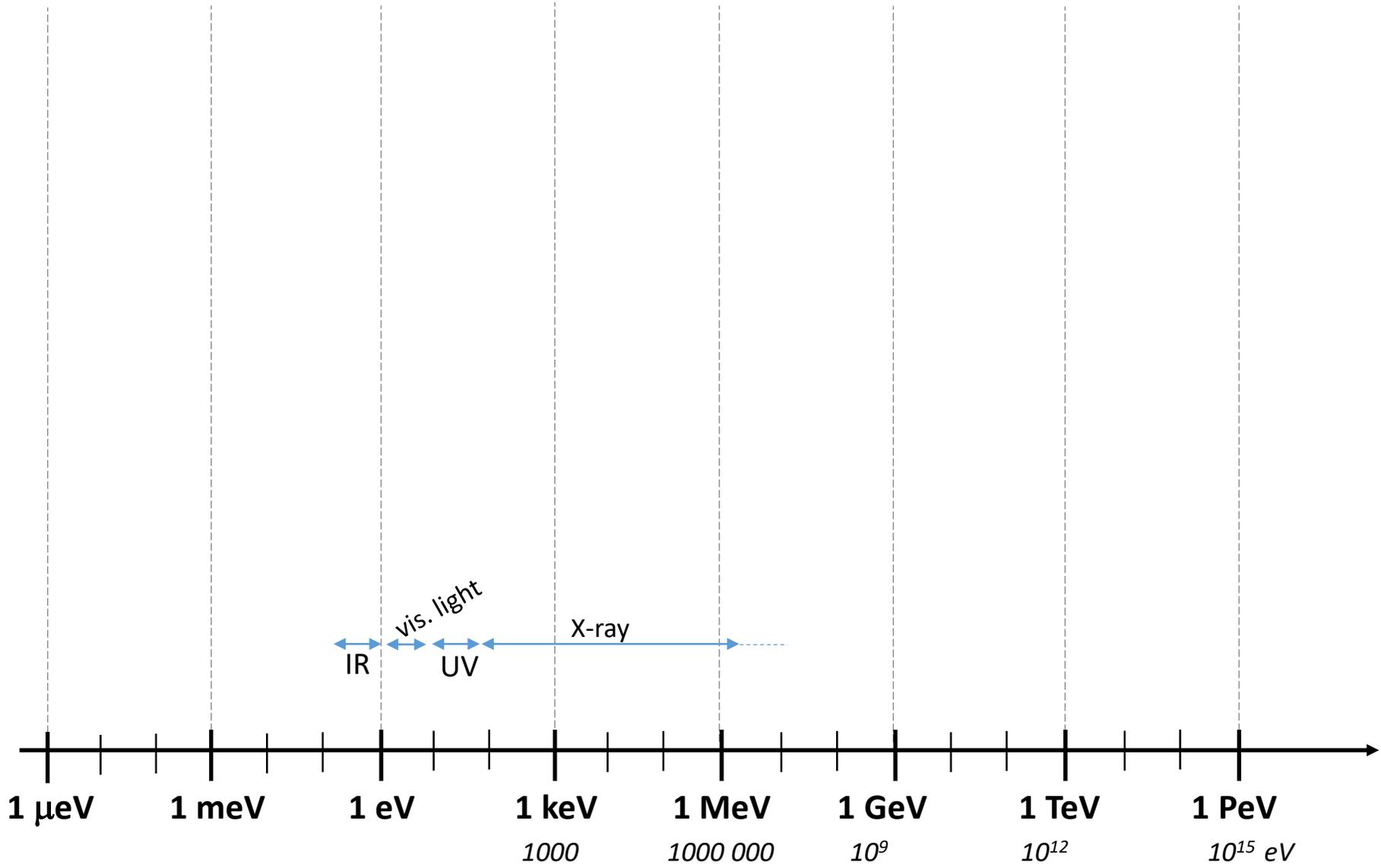
Vocabulaire  
spécifique... ☹️

- 1) Interactions fondamentales et détecteurs  
élémentaires (*pas tous*)
- 2) Multi – détecteurs (*pas tous*)
- 3) Comment les tester, les calibrer (*aussi voir 4*)
- 4) (un) exemple d'une chaîne de lecture

Echelles d'énergie typiques (de nos domaines)

Quelques exemples de longueur de pénétration de certains rayonnements dans la matière (demain)

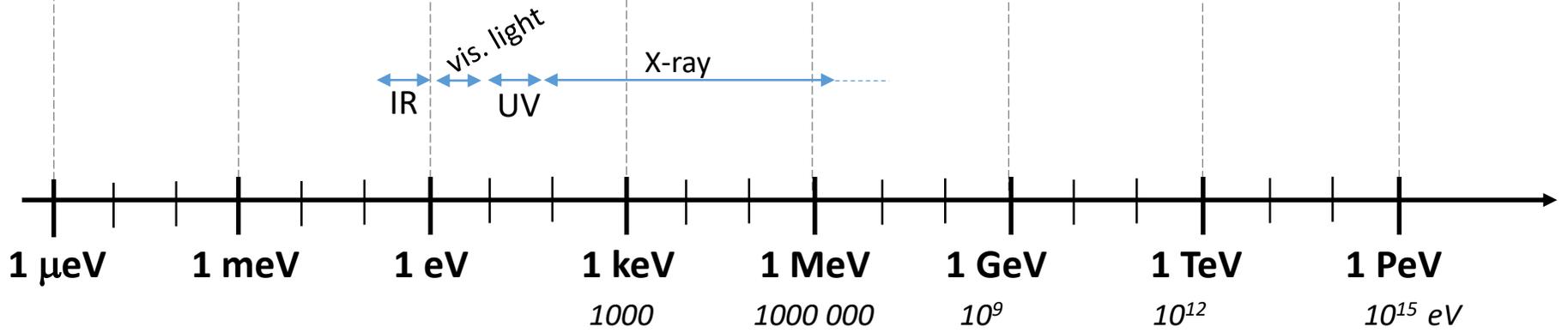
# Typical energies of different physics phenomena



$1 \text{ eV} \sim 10^4 \text{ K}$   
 $1 \text{ J} \sim 6.10^{18} \text{ eV}$   
 $1 \text{ mole} \sim 6.10^{23}$   
 $1 \text{ J} \Leftrightarrow 1 \text{ kg} + h=10 \text{ cm}$   
 $1 \text{ kJ/mol} \sim 10 \text{ meV/atom. bond}$

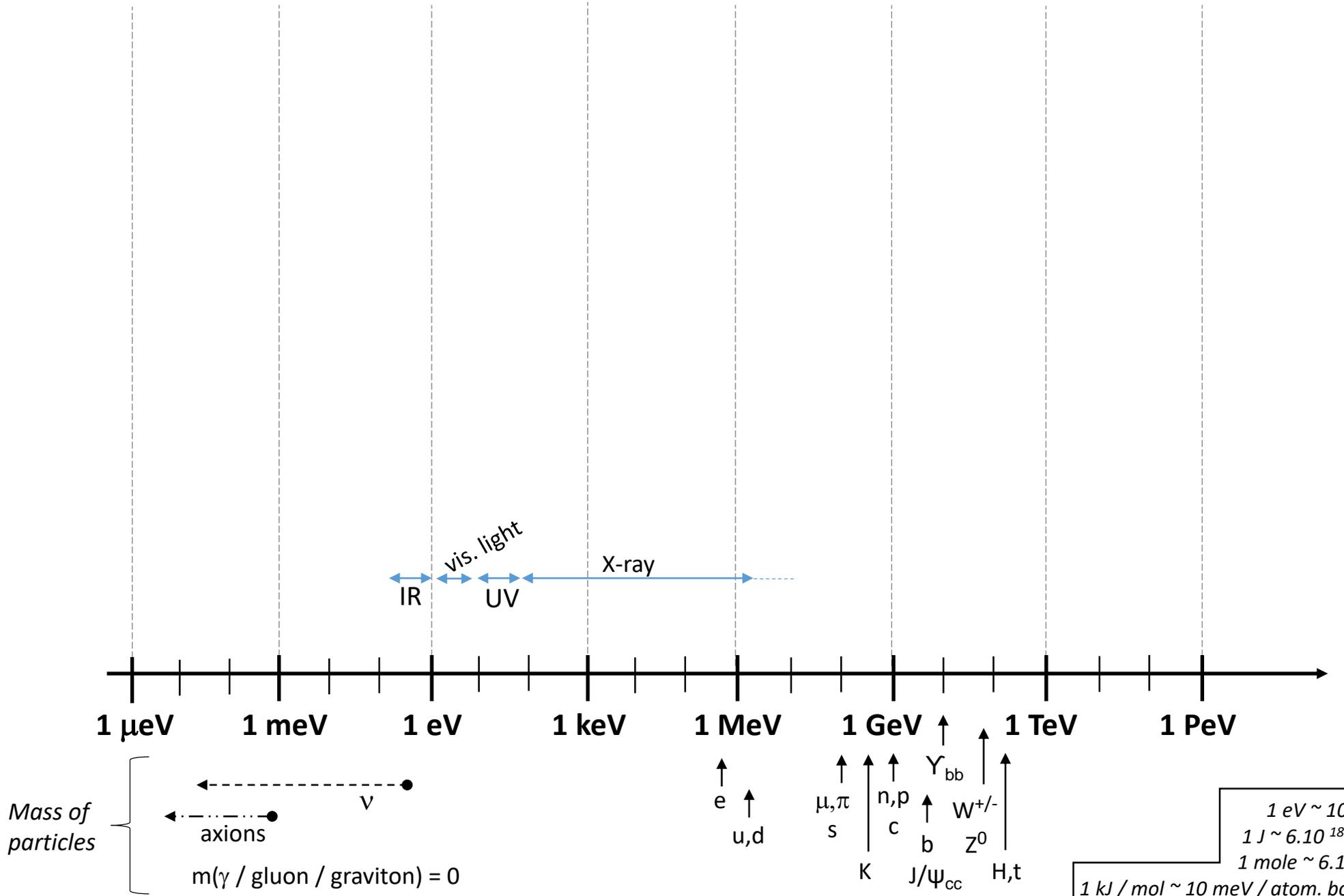
# Typical energies of different physics phenomena

(1896)

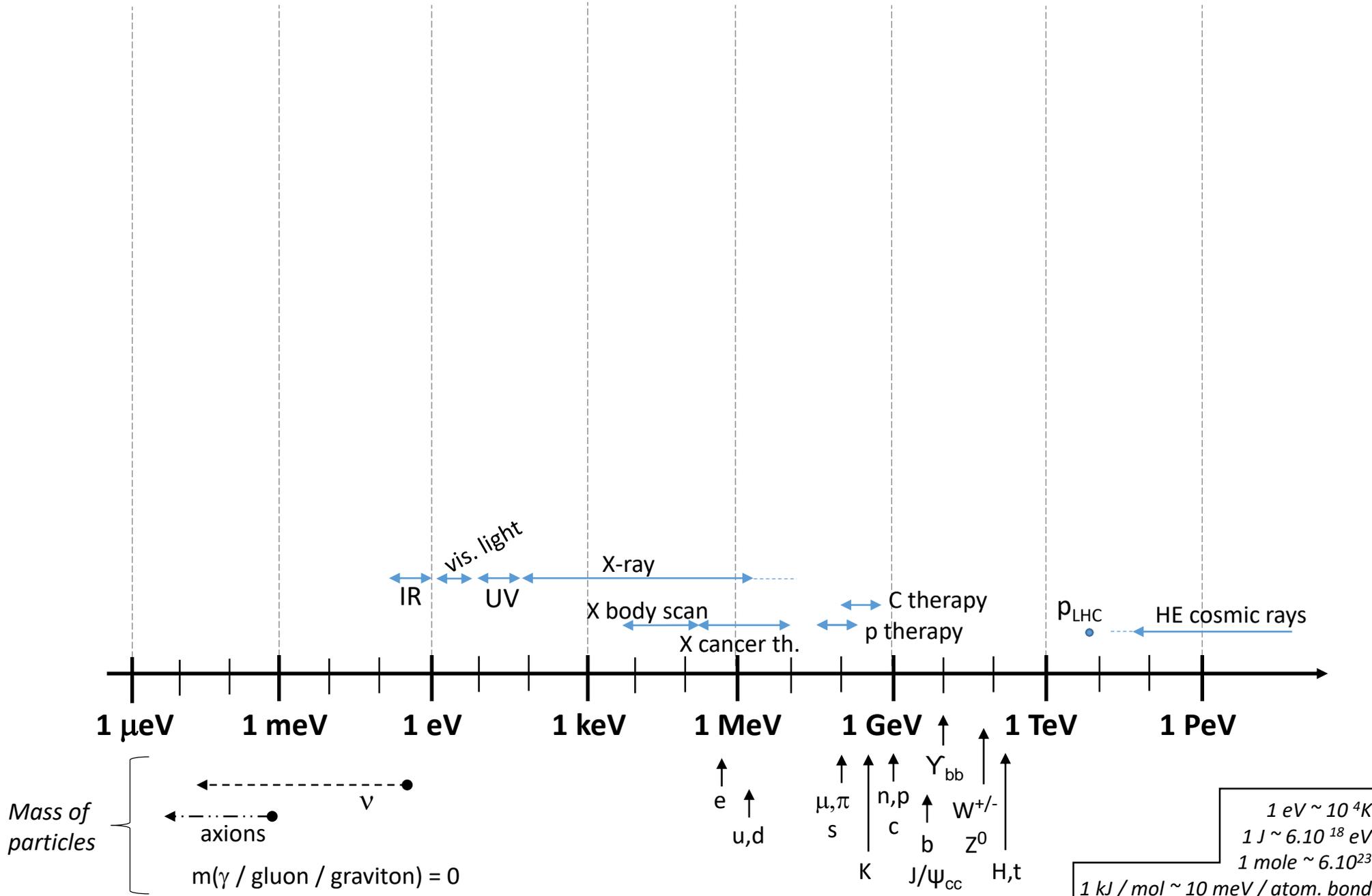


$1 \text{ eV} \sim 10^4 \text{ K}$   
 $1 \text{ J} \sim 6.10^{18} \text{ eV}$   
 $1 \text{ mole} \sim 6.10^{23}$   
 $1 \text{ kJ/mol} \sim 10 \text{ meV/atom. bond}$

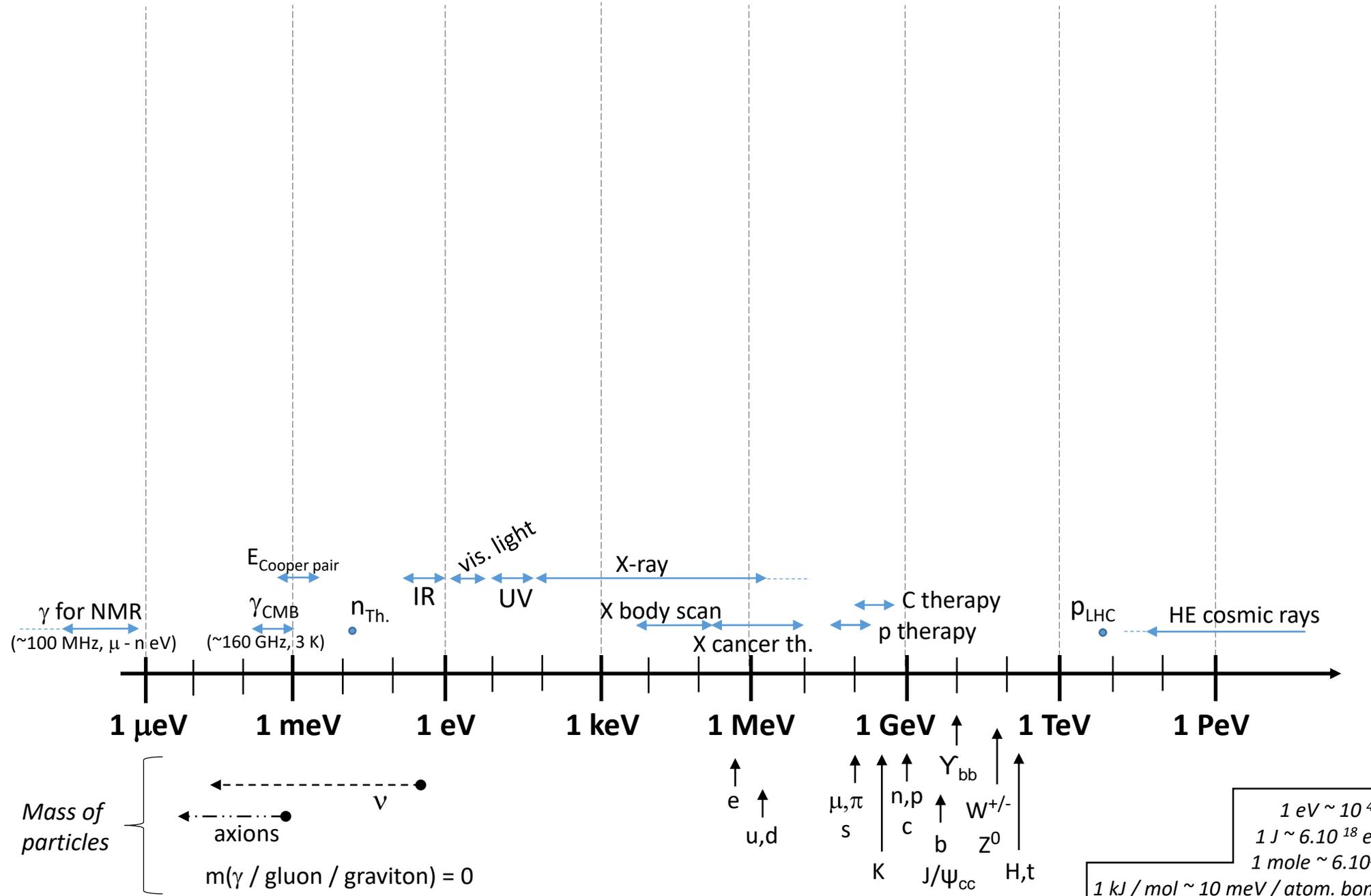
# Typical energies of different physics phenomena



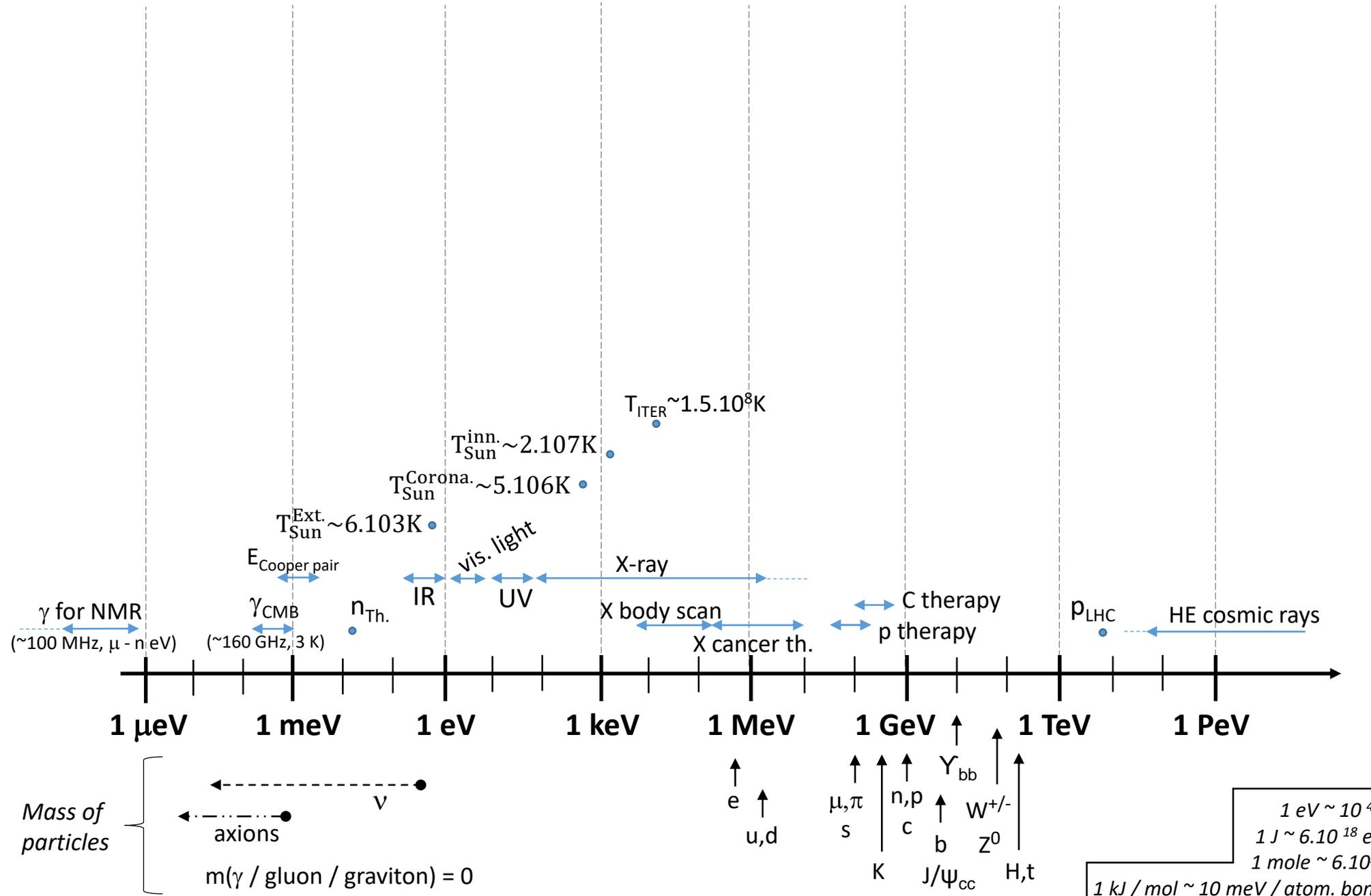
# Typical energies of different physics phenomena



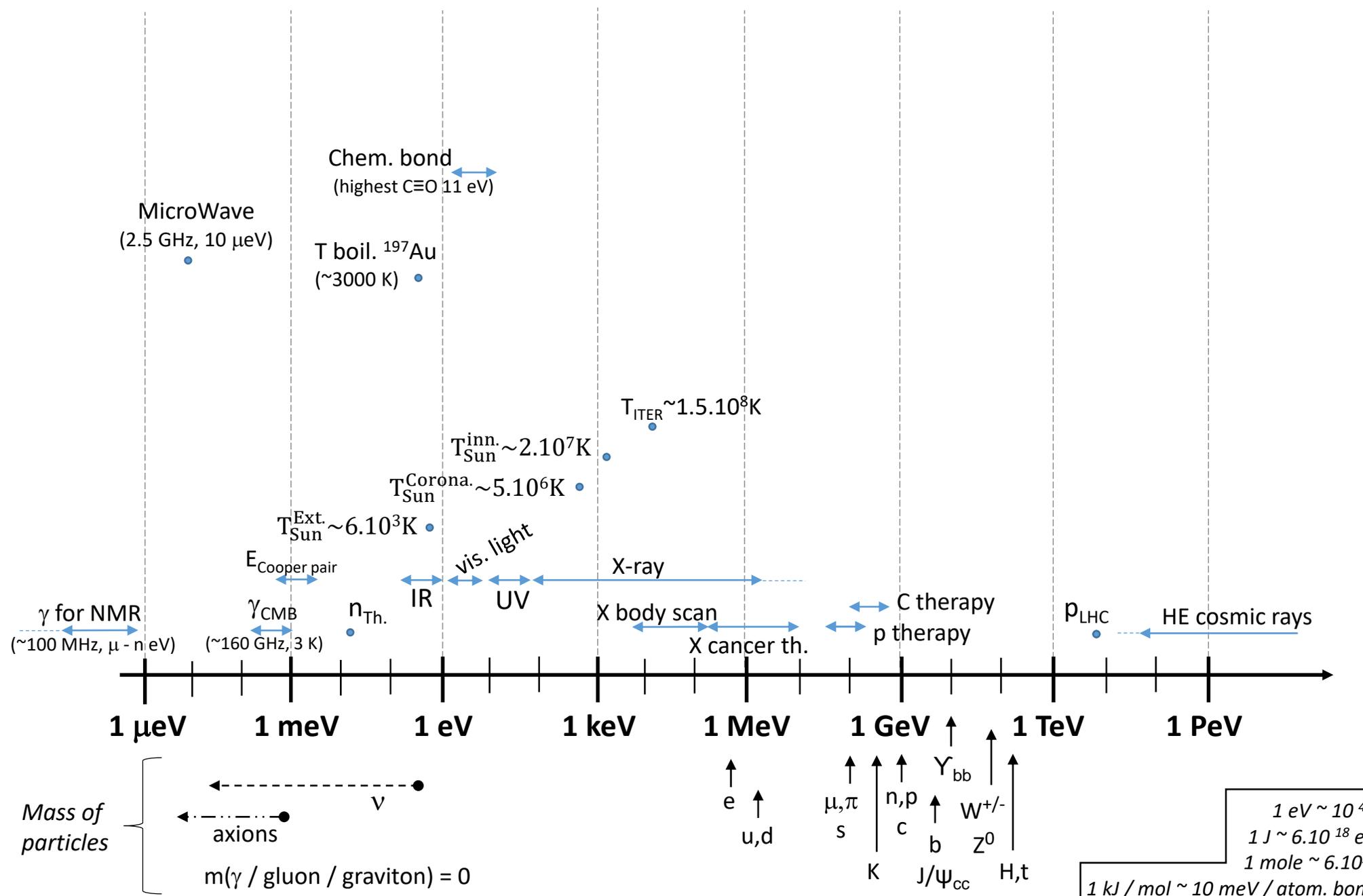
# Typical energies of different physics phenomena



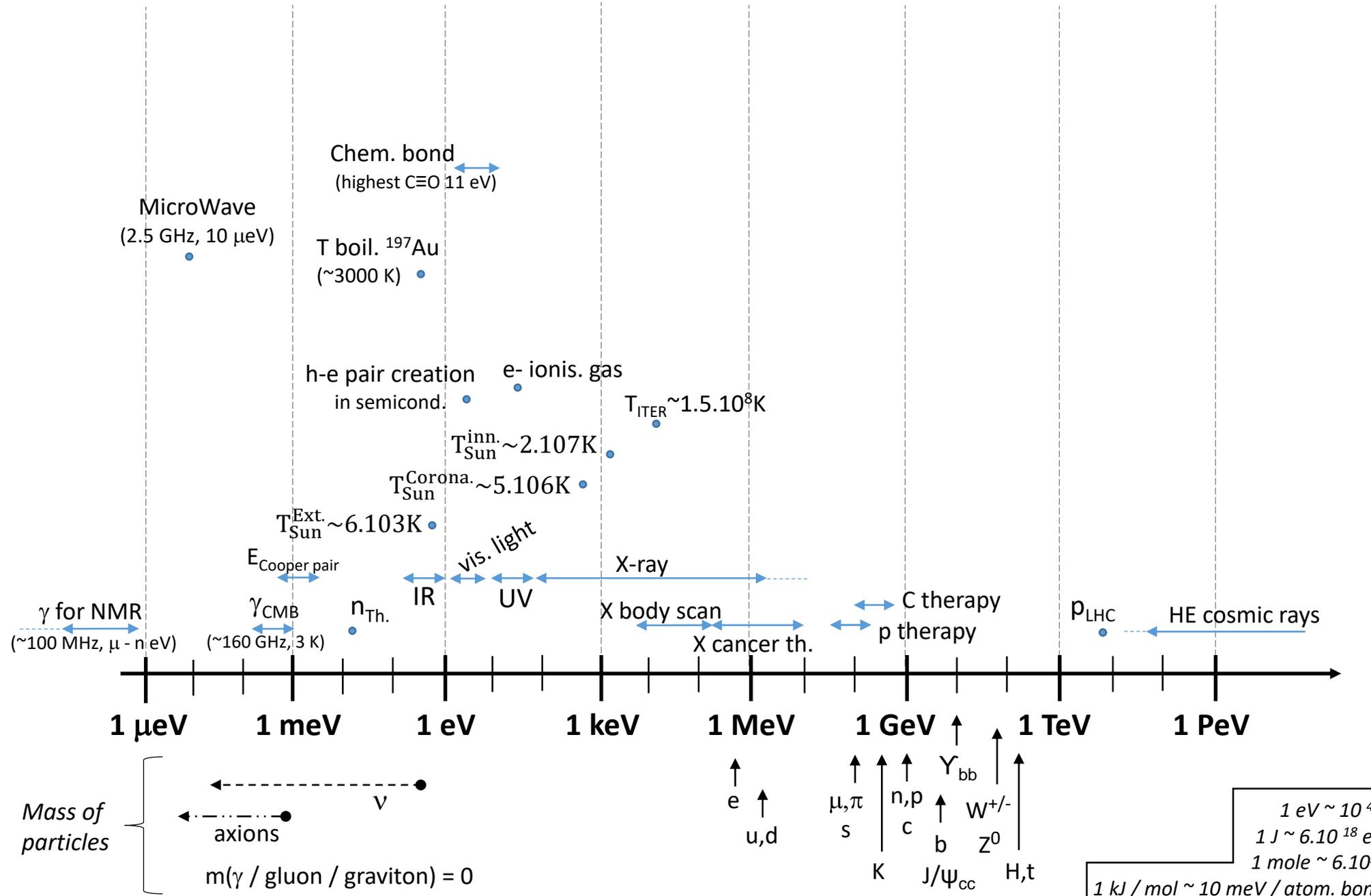
# Typical energies of different physics phenomena



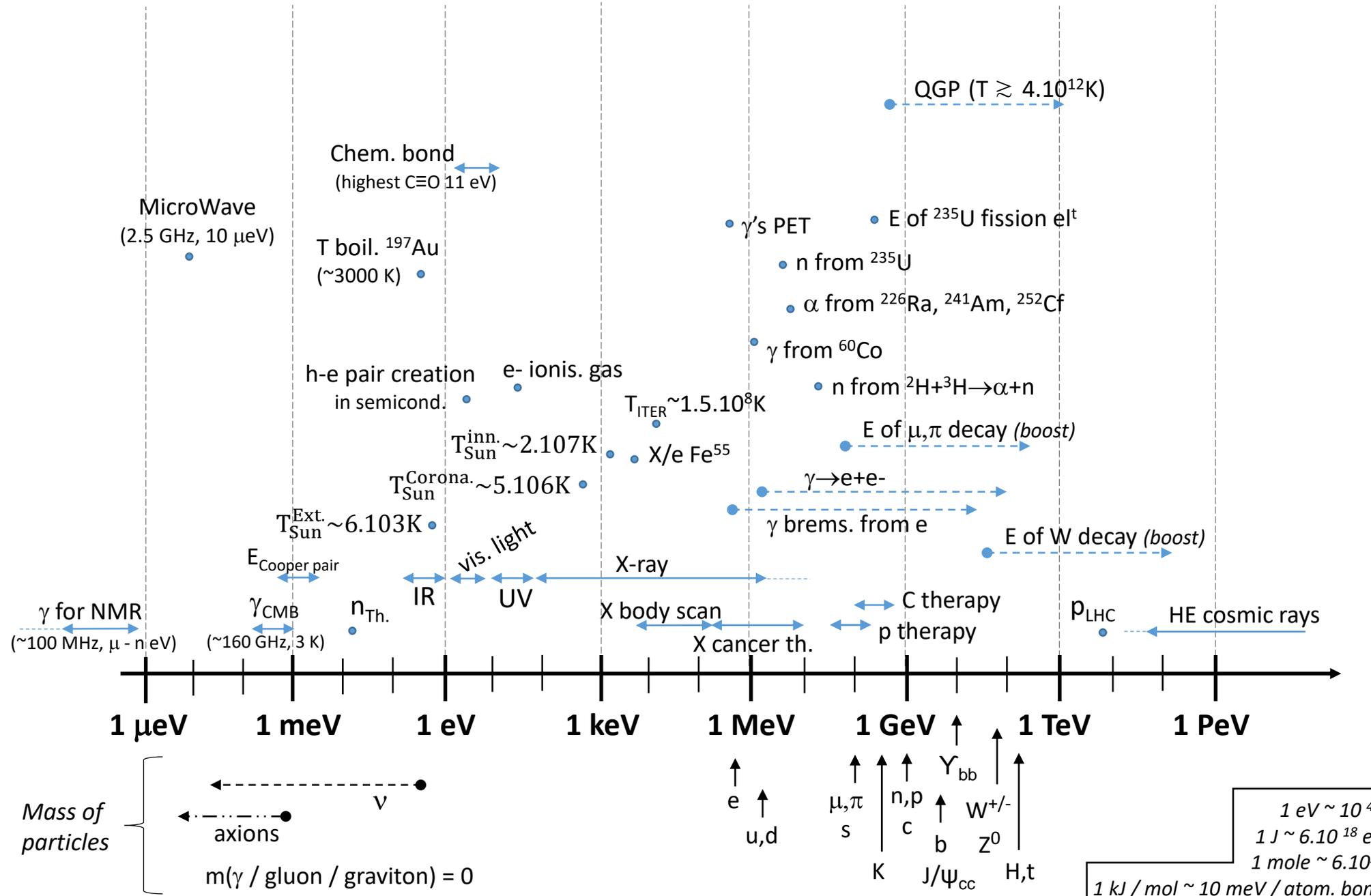
# Typical energies of different physics phenomena



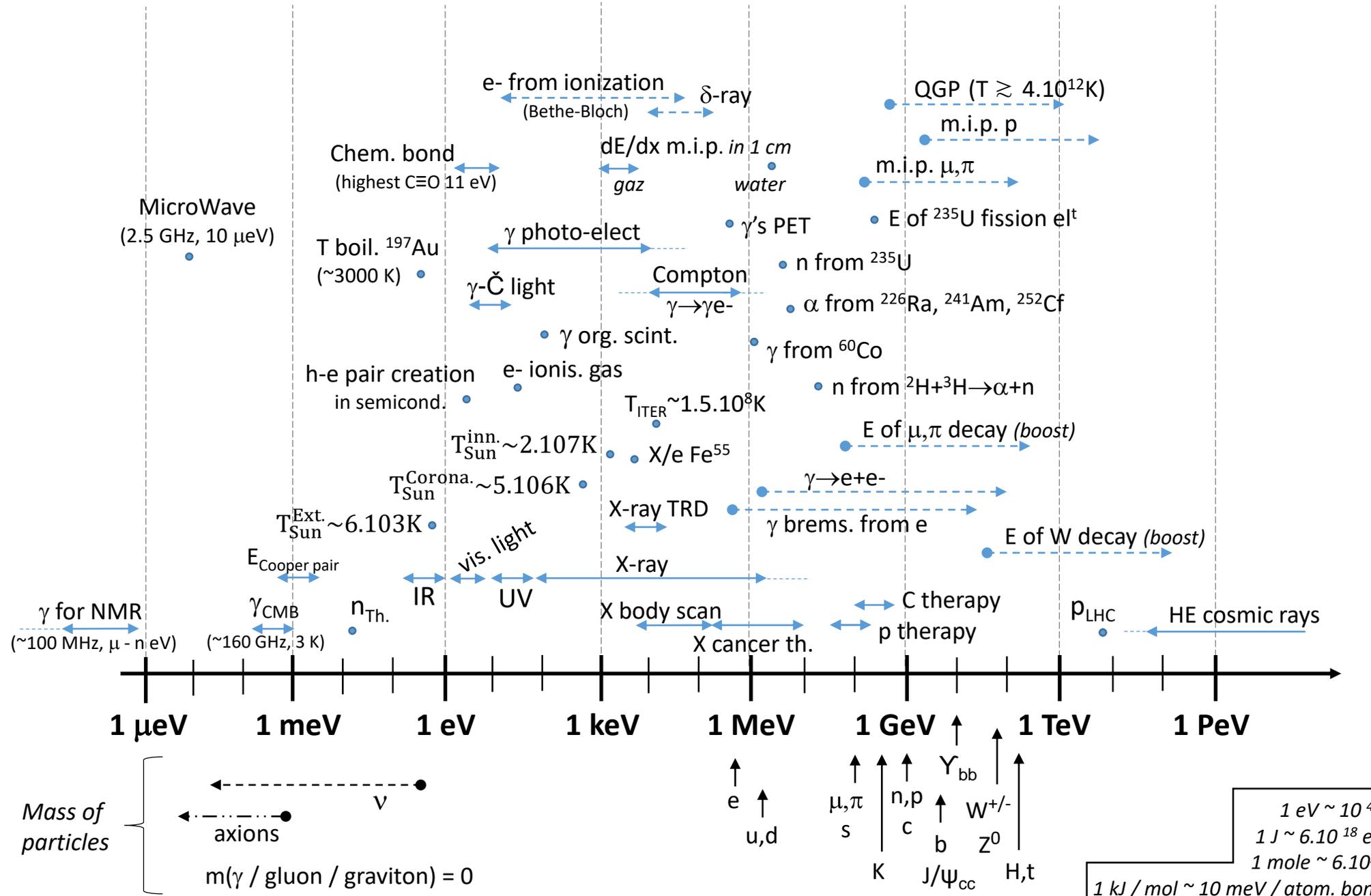
# Typical energies of different physics phenomena



# Typical energies of different physics phenomena



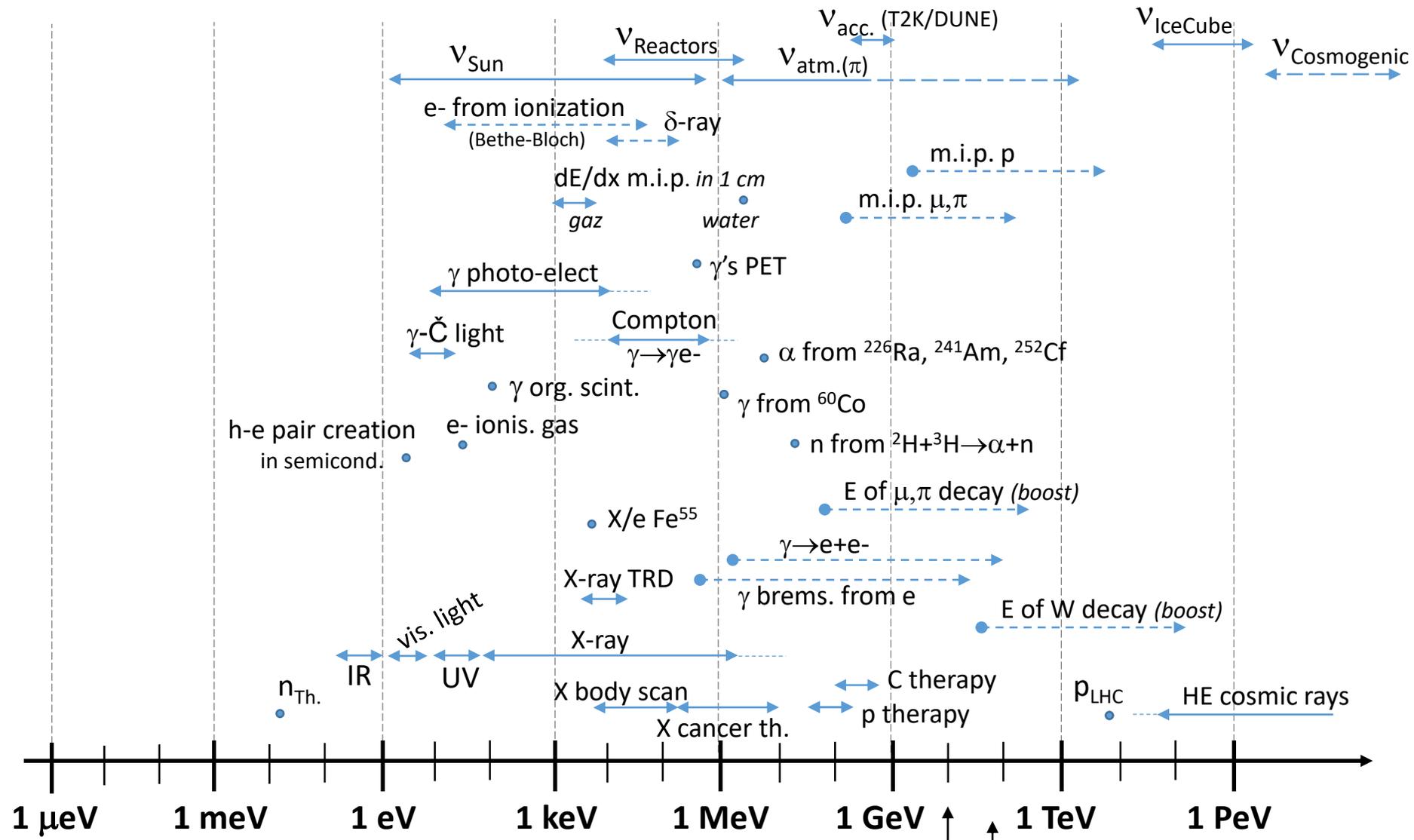
# Typical energies of different physics phenomena





# Typical energies of different physics phenomena

Ph.S. - 11/2024



Mass of particles

- axions
- $m(\gamma / \text{gluon} / \text{graviton}) = 0$
- $\nu$

$e$   
 $u, d$   
 $\mu, \pi$   
 $s$   
 $n, p$   
 $c$   
 $b$   
 $J/\psi_{cc}$   
 $W^{+/-}$   
 $Z^0$   
 $H, t$

$1 \text{ eV} \sim 10^4 \text{ K}$   
 $1 \text{ J} \sim 6.10^{18} \text{ eV}$   
 $1 \text{ mole} \sim 6.10^{23}$   
 $1 \text{ kJ/mol} \sim 10 \text{ meV/atom. bond}$

Listes de questions que vous  
pourriez vous poser...

Comment exploiter au mieux le canal  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 \text{ muons}$  (ex. ATLAS) ?  
(higgs)

Comment faire un *trigger* pour détecter des *gerbes cosmiques* (ex. HESS ou CTA) ?

Comment construire un multi-détecteur auprès d'un accélérateur (*ID*, *calorimètre*, *muon tracker*) ?

Comment fonctionne tel élément du détecteur ?

Quel(s) biais est-ce que je risque d'avoir dans mon analyse compte tenu du/des détecteur/s que j'utilise ?

.../...

# Bibliography

→ Particle Data Group (tables, figures, etc.)  
accessible from: <http://pdg.lbl.gov>

- • Claus Grupen, Particle Detectors (Cambridge University Press, 1996)
- Robert S. Gilmore, Single particle detection and measurement (Taylor & Francis, 1992)
- • Walter Blum and Luigi Rolandi, Particle detection with drift chambers (Springer-Verlag, 1994)
- Instrumentation in high energy physics (World Scientific, ed. F.Sauli, 1992)
- • Experimental techniques in high-energy nuclear and particle physics (World Scientific, ed. Th.Ferbel, 1991)
- Konrad Kleinknecht, Detectors for particle radiation (Cambridge Univ. Press, 1986)
- • W.R. Leo, Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments (Springer, 1994)
- Spark, streamer, proportional and drift chambers, Peter Rice-Evans (Richelieu Press, 1974)
- Review of Particle Physics (~~European~~ China Physical Journal)
- Revue Nuclear Instruments and Methods
- ATLAS TDR (from 1999 to 2003), ATLAS internal notes (<http://www.cern.ch>)
- • Resistive Gaseous Detectors, *Designs, Performance, and Perspectives*, 2018 (Wiley-VCH)  
Marcello Abbrescia, Vladimir Peskov, and Paulo Fonte

# Découverte du positon $e^+$ à partir des cosmiques

1932 C.D. Anderson :  
Particule avec une courbure  
positive au minimum d'ionisation  
(taille des bulles)

Longueur de la trace incompatible  
avec un proton dans l'air, masse  
incompatible avec un proton

Perte d'énergie dans  
6 mm de Pb : compatible avec  
celle d'un électron



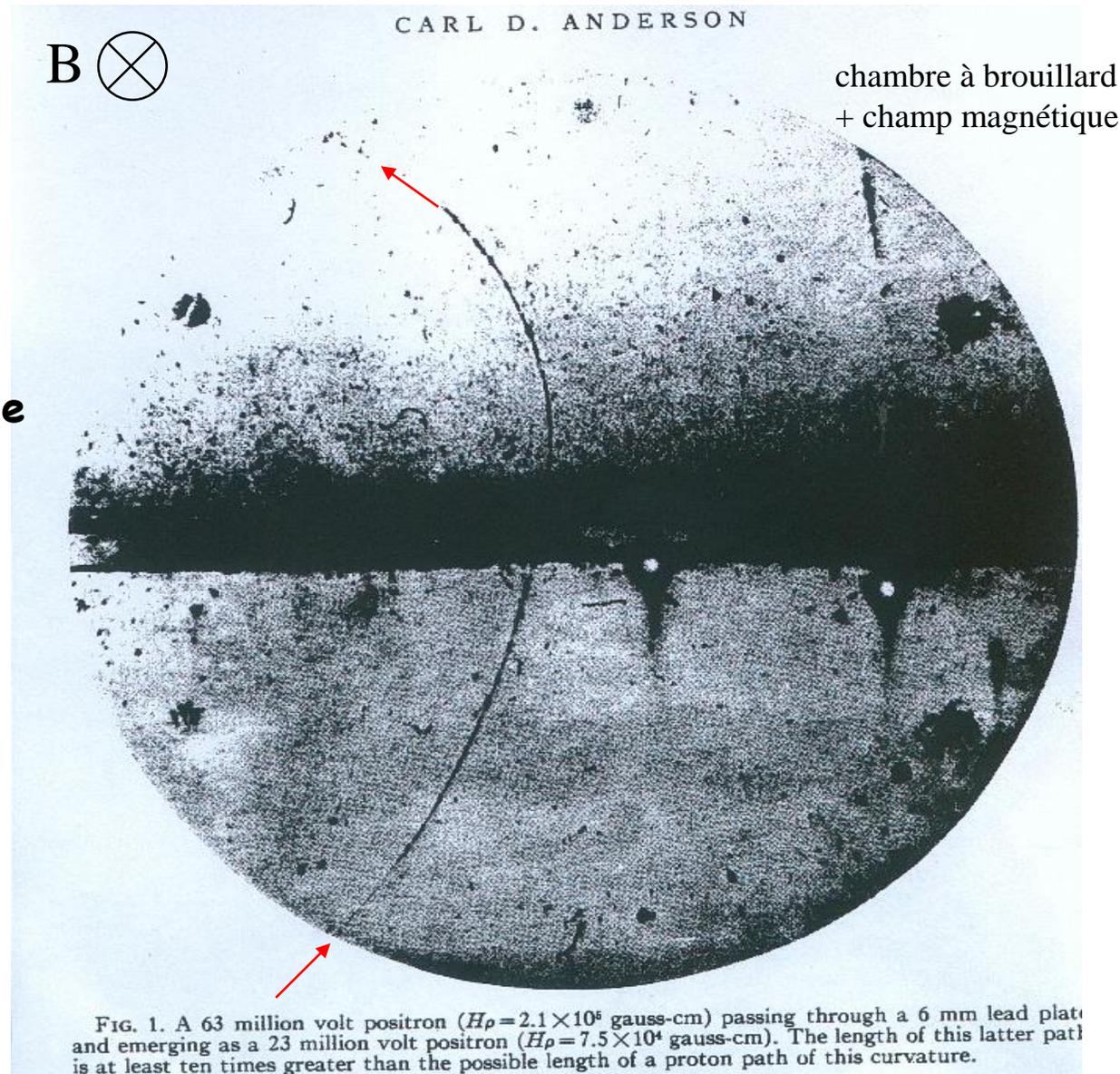
# Découverte du positon $e^+$ à partir des cosmiques

1932 C.D. Anderson :  
Particule avec une courbure  
positive au minimum d'ionisation  
(taille des bulles)

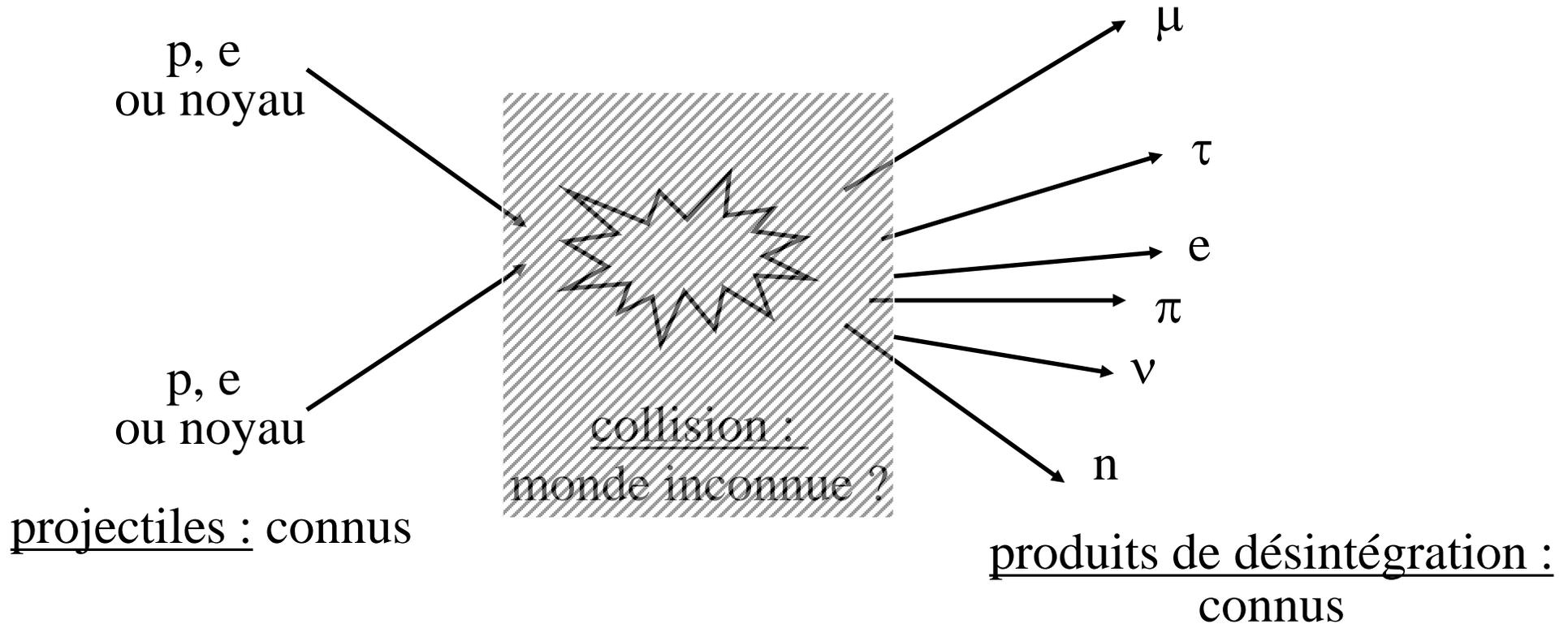
Longueur de la trace incompatible  
avec un proton dans l'air, masse  
incompatible avec un proton

Perte d'énergie dans  
6 mm de Pb : compatible avec  
celle d'un électron

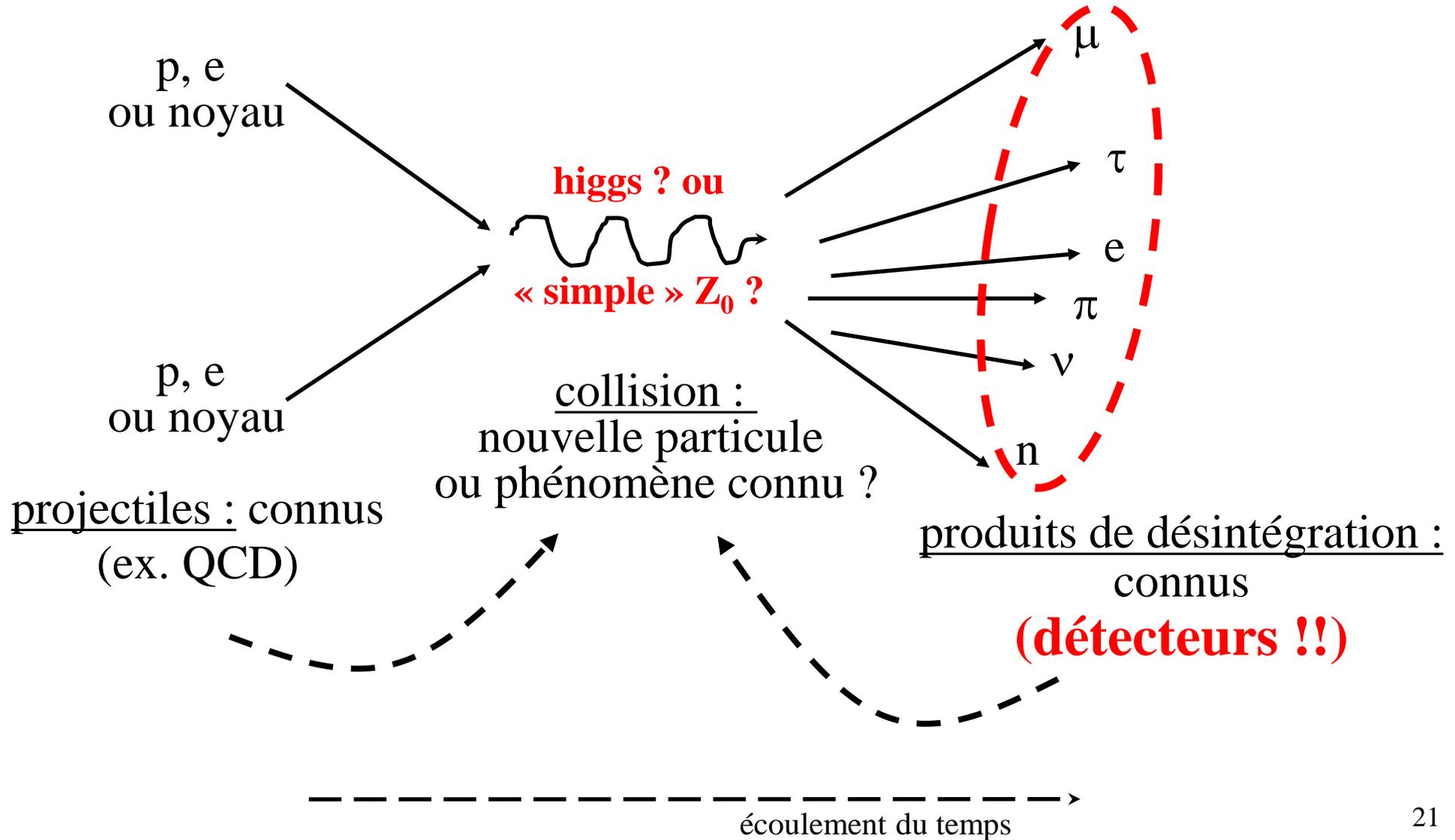
**Hypothèse (découverte !) :**  
**particule de masse  $\sim m_e$**   
**et charge +1, le positon**



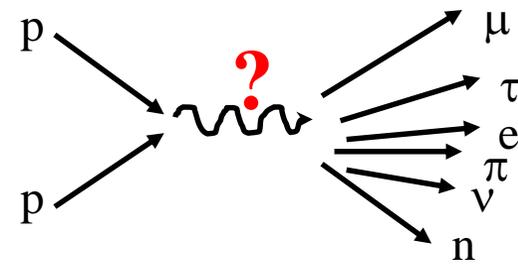
# Problématique actuelle (simplifiée)



# Problématique actuelle (simplifiée)



Le but : tester la validité d'une théorie. Exemple d'une analyse.



**Je voudrai (par exemple) trouver le Higgs dans son mode de désintégration :**

$$p + p \rightarrow H \rightarrow Z^0 Z^{0*} \rightarrow e^+ e^- \mu^+ \mu^- \quad (\text{en réalité } p+p \rightarrow H + \dots \rightarrow ZZ+\dots \rightarrow ee\mu\mu+\dots)$$

(higgs)

Il me faut calculer :

$$m_H^2 = (E_{Z^0} + E_{Z^{0*}})^2 - (\vec{p}_{Z^0} + \vec{p}_{Z^{0*}})^2$$

Mais avant, pour chaque  $Z^0$  il faut calculer (ex. pour le  $Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ ) :

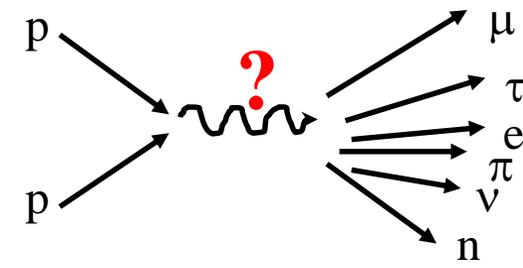
$$m_{Z^0}^2 = (E_{\mu^+} + E_{\mu^-})^2 - (\vec{p}_{\mu^+} + \vec{p}_{\mu^-})^2$$

Même chose si on s'intéresse au mode :  $H \rightarrow \gamma\gamma$

Il faut dans tous les cas mesurer :

$E_{\mu^+}$ ,  $E_{\mu^-}$ , les impulsions spatiales (i.e. les traces et leurs angles)...

## Exemple d'une analyse : conséquences



### On a donc besoin d'un détecteur capable :

De mesurer l'**énergie** de ces particules

De mesurer le point de passage de ces particules (mesurer les **traces**)

De mesurer la **direction** de ces particules

D'**identifier** ces particules (charge et hyp. de masse)

Et ceci même si il y a d'autres particules mélangées/superposées à ces traces (**bruit de fond**). Il faut autant que possible de la **redondance** dans ces mesures et il faut aussi éviter que les détecteurs « n'interfèrent » entre eux (la mesure intéressante est celle au point de collision/vertex).

Tout ceci constitue le « cahier des charges » d'un détecteur/d'un appareillage auprès d'un accélérateur (le LHC dans l'exemple précédant).

# Quelles particules va-t-on voir dans notre détecteur ? (1)

Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
SAVEUR	masse GeV/c <sup>2</sup>	Charge élecriq.	SAVEUR	masse GeV/c <sup>2</sup>	Charge élecriq.
$\nu_e$ neutrino électron.	$<1 \times 10^{-8}$	0	<b>u</b> up	0.003	2/3
<b>e</b> électron	0.000511	-1	<b>d</b> down	0.006	-1/3
$\nu_\mu$ neutrino muon	$<0.0002$	0	<b>c</b> charm	1.3	2/3
<b><math>\mu</math></b> muon	0.106	-1	<b>s</b> strange	0.1	-1/3
$\nu_\tau$ neutrino tau	$<0.02$	0	<b>t</b> top	175	2/3
<b><math>\tau</math></b> tau	1.7771	-1	<b>b</b> bottom	4.3	-1/3

$Z^0$ ,  $W^{+/-}$ , H se désintègrent avant d'atteindre la partie active du détecteur

Invisible : jets

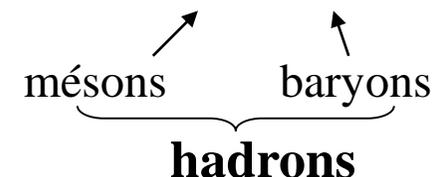
force électrofaible spin = 1			interaction forte spin = 1		
Nom	Masse GeV/c <sup>2</sup>	charge élecriq.	Nom	Masse GeV/c <sup>2</sup>	charge élecriq.
$\gamma$ photon	0	0	<b>g</b> gluon	0	0
<b><math>W^-</math></b>	80.4	-1			
<b><math>W^+</math></b>	80.4	+1			
<b><math>Z^0</math></b>	91.187	0			

+ Higgs ?

+ partenaires Super-Symétriques ?

On ne voit les  $\nu_{e,u,\tau}$  que dans un détecteur conçu pour cela. probabilité d'interaction  $P_{Int}$  avec la matière très faible :  $P_{Int}(\nu_e \text{ de } 1 \text{ MeV}) \sim 1$  dans une année-lumière d'eau !

Les quarks seuls sont invisibles dans le détecteur : (jets)  
On ne voit que des « ensembles » de quarks :  $q\bar{q}$  ou  $qqq$   
Exemples :  $\pi^{+/-}$ , p, n,  $K^{+/-}$ , etc...



## Quelles particules va-t-on voir dans notre détecteur ? (2)

Finalement on ne mesurera les propriétés cinématiques et physiques (que) des particules suivantes :

$e^+$ ,  $e^-$ ,  $\gamma$

proton (quarks de valence : uud + g +...)

neutron (udd+g+...)

$\mu^+$ ,  $\mu^-$  : si *boost de Lorentz* ( $\gamma\beta c\tau$ ) suffisant !

$\pi^+$ ,  $\pi^-$  : si boost de Lorentz suffisant !

$K^+$ ,  $K^-$  : si boost de Lorentz suffisant ( $\neq$  dans la queue des *gerbes hadroniques*)

Cas particulier :  $\nu$  « vu » par son *énergie manquante*  $E$

(pour une exp. en *mode collisionneur*)

et aussi (dans les exp. de phys. nucléaire) : n,  $\alpha$ (He<sup>2+</sup>),  $\beta^{+/-}$ (e<sup>+/-</sup>) (ces deux dernières sont très ionisantes => faible parcours)  
+ noyaux plus lourds (auprès d'accélérateur de noyaux)

**Et c'est tout... Toutes les autres particules sont reconstruites via leurs produits de désintégrations :**

$\tau$ ,  $Z^0$ ,  $W^{+/-}$ , Higgs, etc...

$\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$  ( $\pi^0 = (u\bar{u} - d\bar{d})/\sqrt{2}$ )

Baryons et mésons (particules de beauté, charmées, etc...)

boule de glue (ggg) ? penta-quarks (qqqq $\bar{q}$ ) ?

Cas particulier : les *jets* de particules ; issues de quark/gluon se « rhabillant » après l'interaction primaire. 25

## Interactions particules - matières

Particules sont regroupées en 5 catégories :

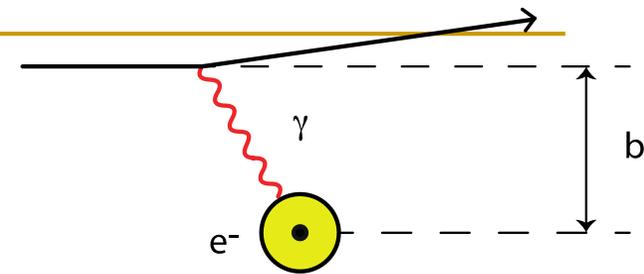
- Particules chargées « lourdes » ( $\gg m_e$ ), i.e. toutes sauf
- $e^+$  /  $e^-$
- Photon/gamma
- Neutron
- Neutrino

Selon le type, il y aura des interactions, appelées ionisations (**Bethe-Bloch**) et d'autres processus radiatifs (**bremsstrahlung, création de paire, Compton**) à « haute » énergie, et aussi par : **effet photo-électrique, radiation de transition, effet Cerenkov...**

Enfin pour les hadrons, il y a en plus des processus durs dit « **hadroniques** » (*qui peuvent se superposer à Bethe-Bloch*).

# Particules lourdes

## Pertes par ionisation, le $dE/dx$



- La Mécanique Quantique relativiste permet d'obtenir la **formule de Bethe - Bloch** fct de charge  $z$  et vitesse  $\beta$  :

$$\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = -4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[ \ln \left( \frac{2 m_e c^2 \gamma^2 \beta^2}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} - \frac{C}{Z} \right]$$

- $N_A$  : mol<sup>-1</sup>,  $r_e$  : cm,  $m_e c^2$  : MeV,  $A$  : g/mol  $\Rightarrow$  unité = **MeV/(g/cm<sup>2</sup>)**

- Domaine de validité :

- Dès que la particule incidente a une vitesse  $>$  vitesse des électrons atomiques

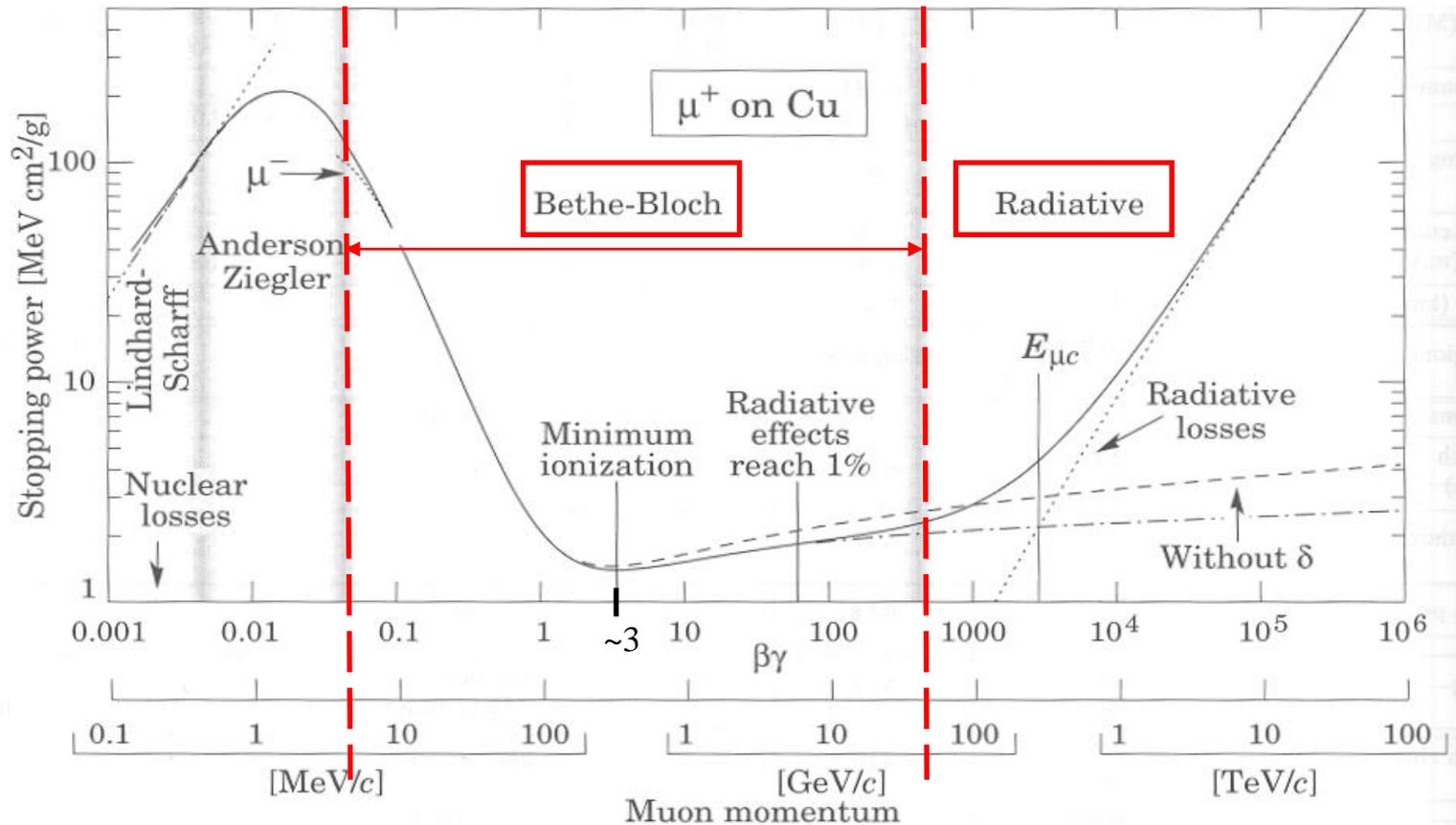
$$\beta_{min} = \frac{v}{c} \approx 0.01$$

- Tant qu'un autre phénomène (le **rayonnement de freinage**) ne domine pas :

- Typiquement, ok pour des muons une énergie  **$E < 200$  GeV**  
(limite encore plus élevée pour particules plus lourdes)

# Interactions particules-matière $dE/dx$ (exemple du muon)

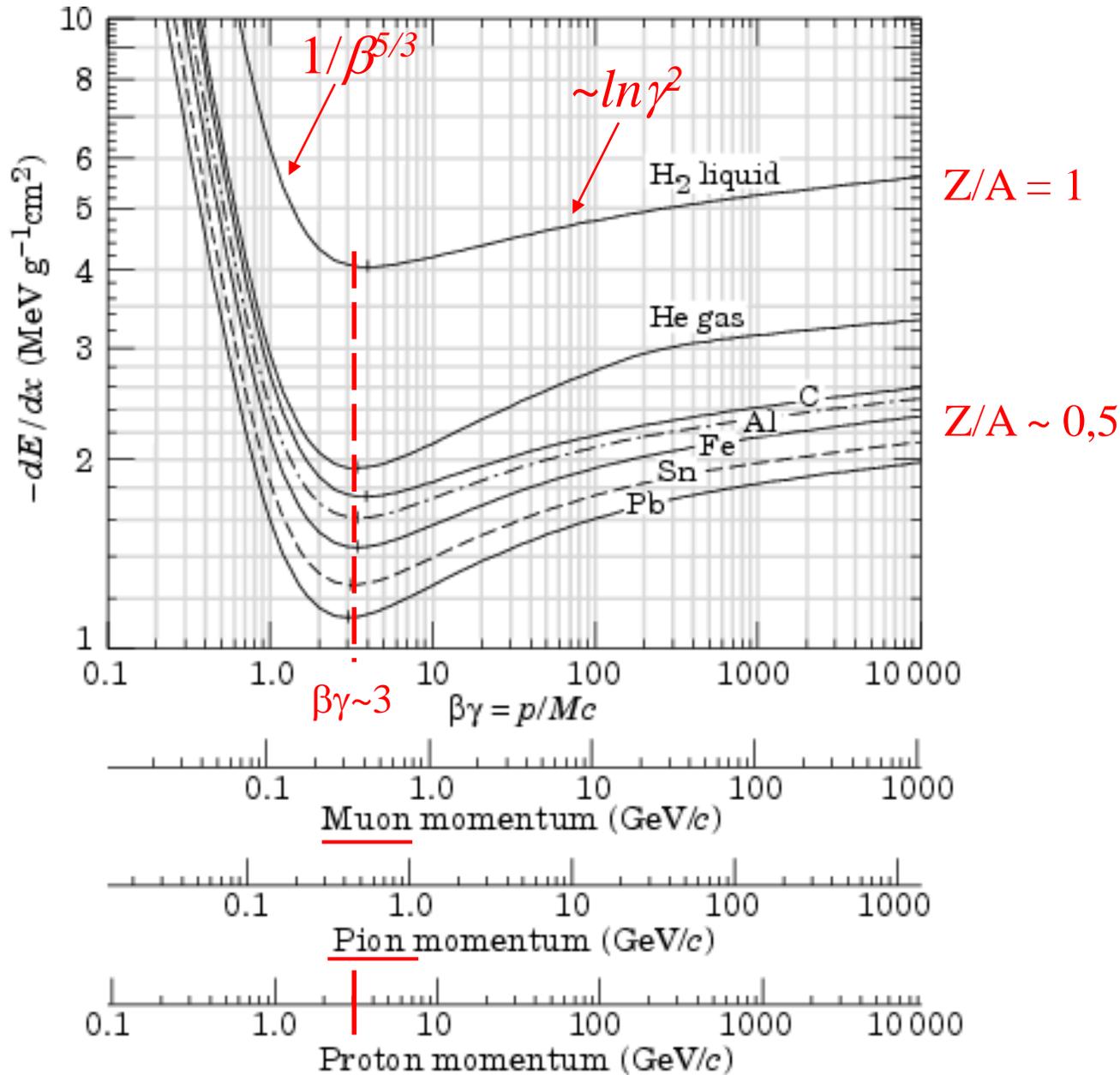
$dE/dx$



Pertes par ionisation (Bethe-Bloch) dominante à basse énergie puis c'est au tour du rayonnement de freinage (à très haute énergie pour le muon :  $E > 100 \text{ GeV}$ ).

Pour les  $\mu$ , lorsque  $E^\mu = E_c^\mu \sim \frac{8000}{(Z+2)^{0.88}} \text{ GeV}$  alors les pertes par  $\Delta E(\text{ionisation, excitation}) \simeq \Delta E(\text{brem})$

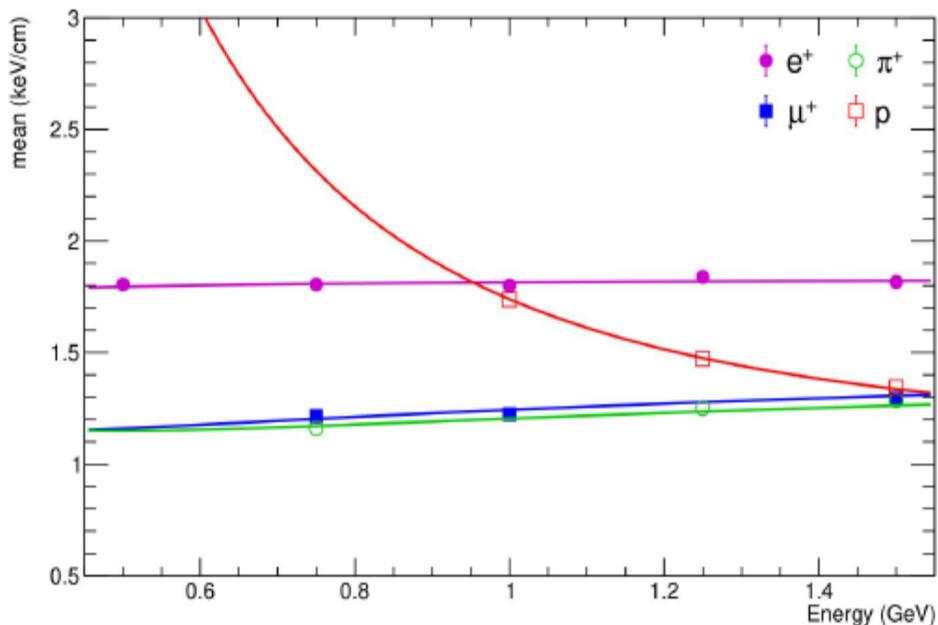
# Interactions particules-matière (exemple des $\pi$ , $p$ et $\mu$ )



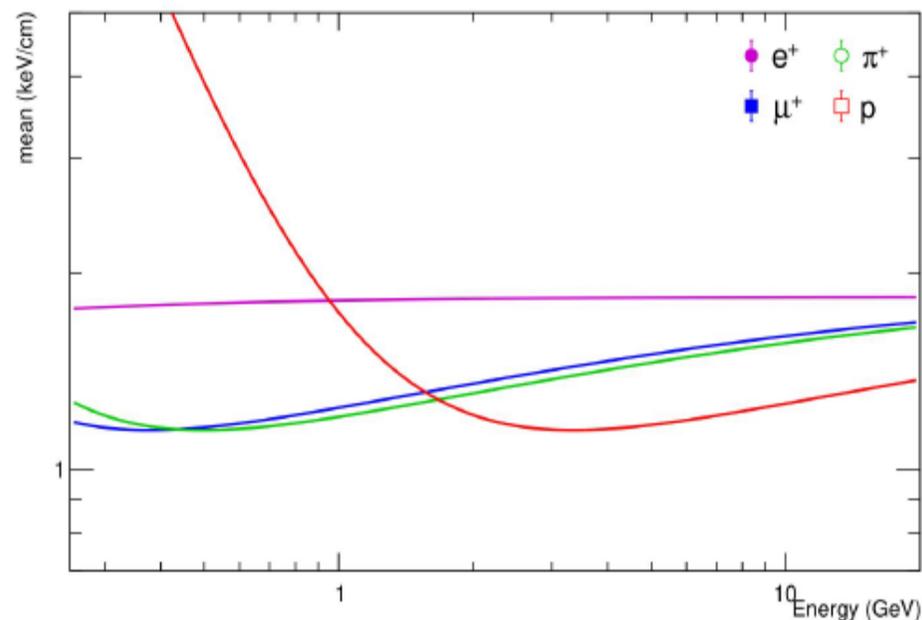
Pour les  $p$  et les  $\pi$  il faut aussi considérer les *interactions fortes* avec la matière. Celles-ci sont non négligeables à plus haute énergie et expliquent la formation de *gerbes*.

## Bethe-Bloch curve with 4 detectors (CERN22)

Mean vs energy with XP method



Bethe-Bloch for different particles



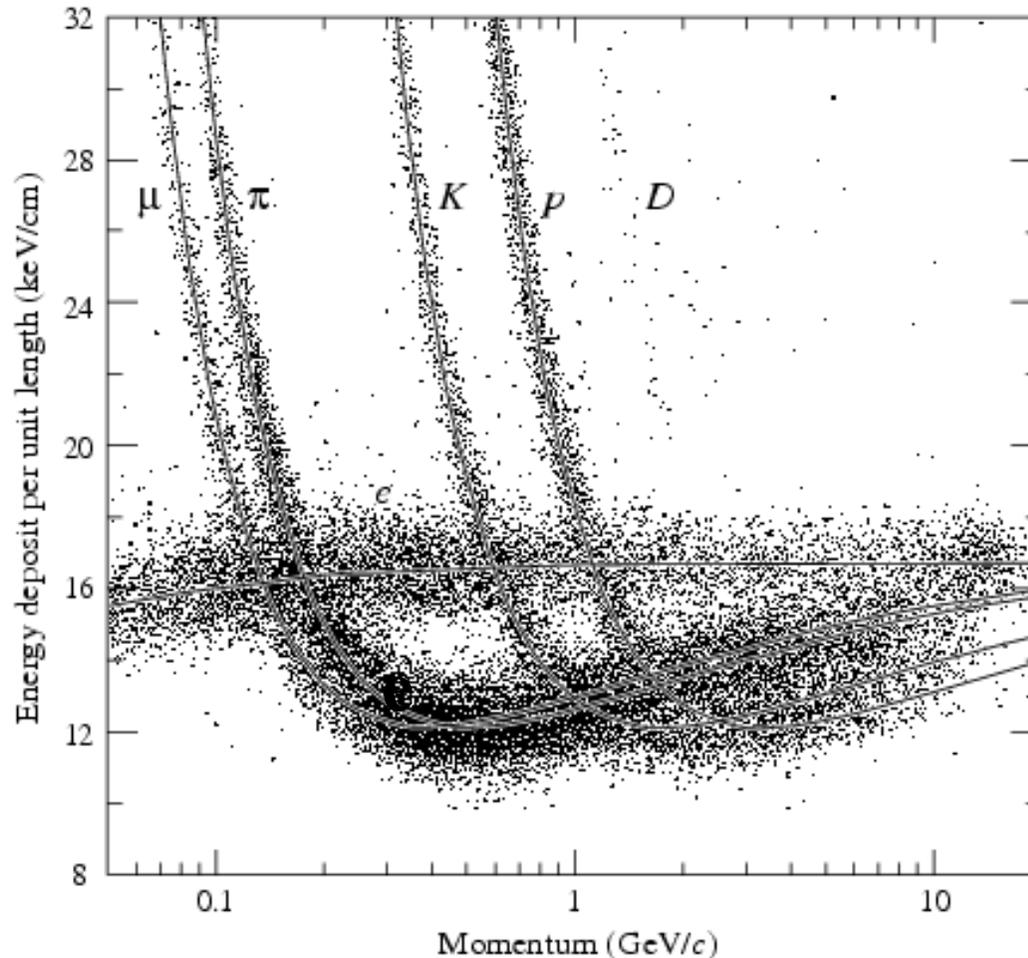
$$\left\langle -\frac{dE}{dx} \right\rangle = \frac{P1}{\beta^{P4}} \left[ P2 - \beta^{P4} - \ln \left( P3 + [\beta\gamma]^{P5} \right) \right]$$

<https://doi.org/10.1007/978-3-540-76684-1>

- Particles datasets are coherent with each other
- Values (keV/cm) & fit extrapolation match expectations

# dE/dx dans la pratique...

(ici dans gaz)



**Figure 28.5:** PEP4/9-TPC energy-deposit measurements (185 samples @8.5 atm Ar-CH<sub>4</sub> 80-20%) in multihadron events. The electrons reach a Fermi plateau value of 1.4 times the most probably energy deposit at minimum ionization. Muons from pion decays are separated from pions at low momentum;  $\pi/K$  are separated over all momenta except in the cross-over region. (Low-momentum protons and deuterons originate from hadron-nucleus collisions in inner materials such as the beam pipe.)

## Pas discuté :

- Fluctuation en fct de l'épaisseur traversée
- Les fluctuations ne sont pas gaussiennes, mais *Landau*, ie large fluctuations vers les hauts dépôts d'énergie (*plusieurs fois la valeur la + probable*)

Certaines ionisations peuvent être « durs » et amener à la création de **delta-ray**.

# Longueur de pénétration dans la matière

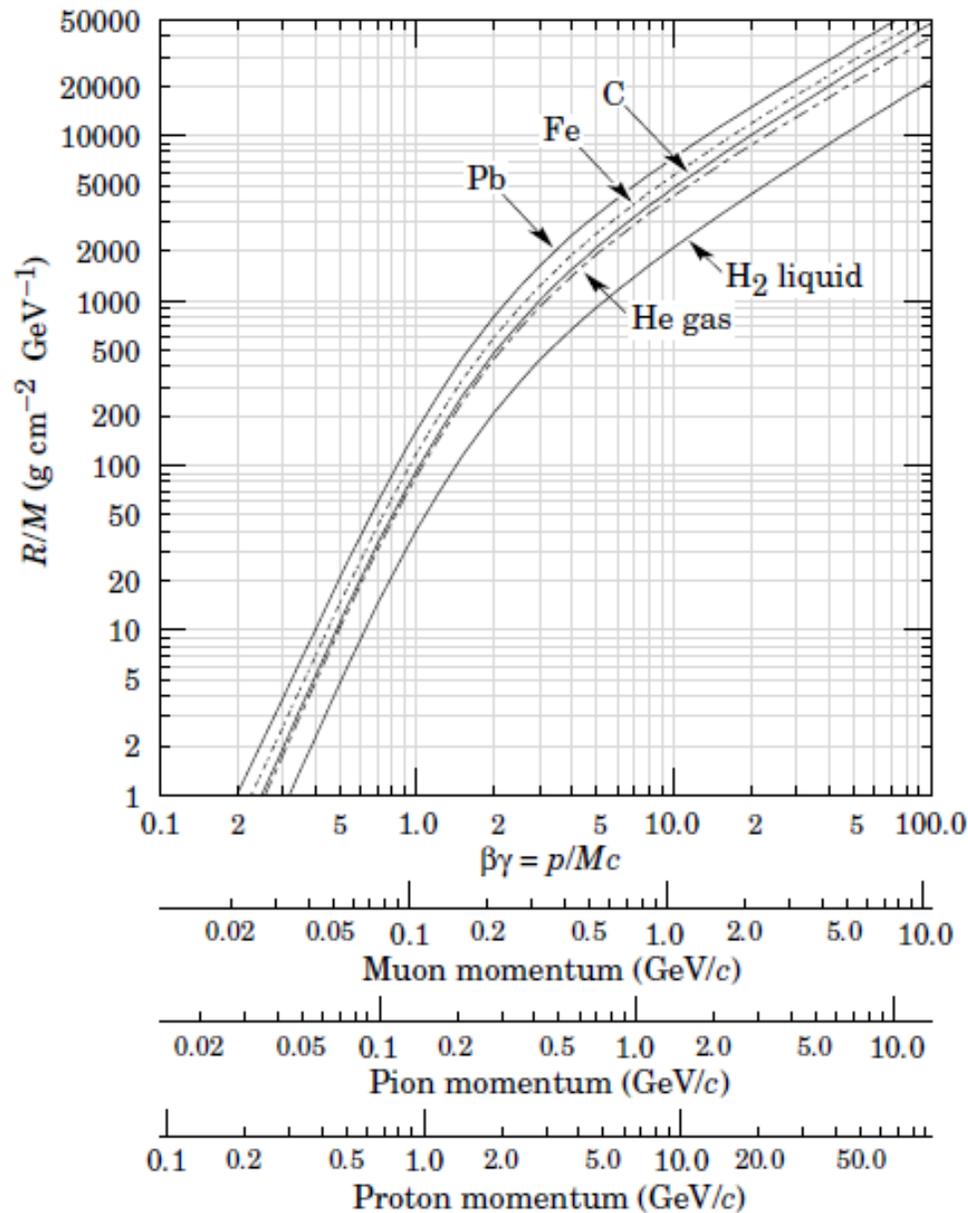


Figure 30.4: Range of heavy charged particles in liquid (bubble chamber) hydrogen, helium gas, carbon, iron, and lead. For example: For a  $K^+$  whose momentum is 700 MeV/c,  $\beta\gamma = 1.42$ . For lead we read  $R/M \approx 396$ , and so the range is  $195 \text{ g cm}^{-2}$ .

$\rho(\text{Pb}) \sim 11 \text{ g/cm}^3$   
 $\Rightarrow 17 \text{ cm}$

# Electrons/positrons

## Pertes par ionisation, $dE/dx$

- La formule de Bethe-Bloch doit être modifiée car la particule incidente est « la même » que l'électron atomique. Après calculs, on obtient :

$$\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = -K \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \ln \left( \frac{m_e c^2 \gamma \beta \sqrt{\gamma - 1}}{I \sqrt{2}} \right) + F(\gamma) \right]$$

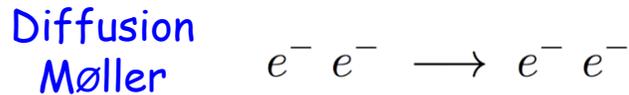
- où :
$$\begin{cases} F(\gamma) = \frac{1 - \beta^2}{2} - \frac{2\gamma - 1}{2\gamma^2} \ln(2) + \frac{1}{16} \left( \frac{\gamma - 1}{\gamma^2} \right)^2 & \text{for electrons} \\ F(\gamma) = -\frac{\beta^2}{24} \left( 23 + \frac{14}{\gamma + 1} + \frac{10}{(\gamma + 1)^2} + \frac{4}{(\gamma + 1)^3} \right) & \text{for positrons} \end{cases}$$

- Remarque : il est « évident » d'après la Mécanique Quantique que les cas des électrons et des positrons incidents doivent être différents (problème des particules identiques)

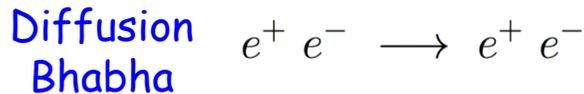
# Electrons/positrons

- En plus de l'ionisation, il faut parfois prendre en compte d'autres effets :

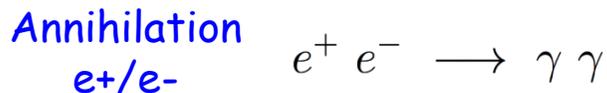
- La diffusion Møller (grands transferts d'énergie aux e- atomiques par des e-)



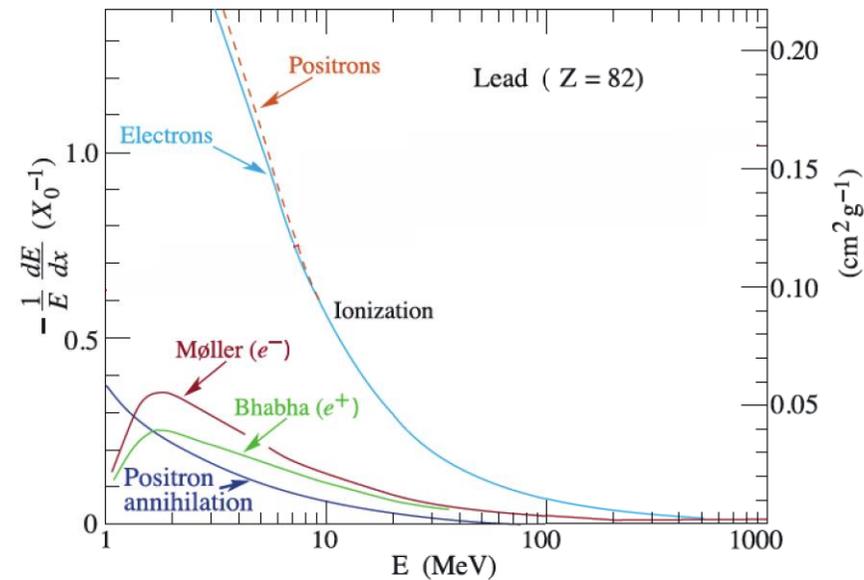
- La diffusion e-/e+ est donnée par :



- L'annihilation e-/e+ :



PDG



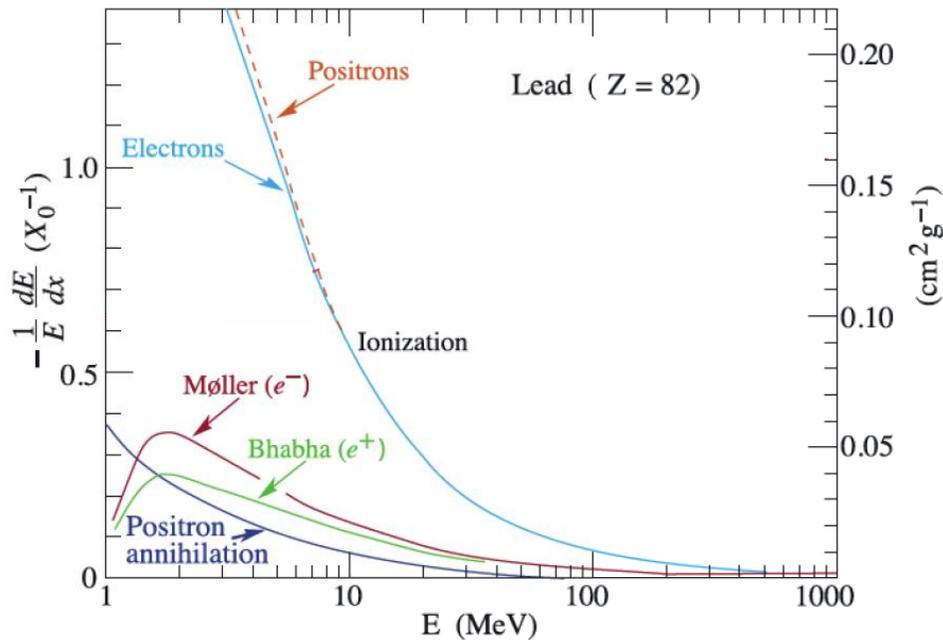
$dE/dx$  pour des électrons et des positrons dans du plomb

# Electrons/positrons

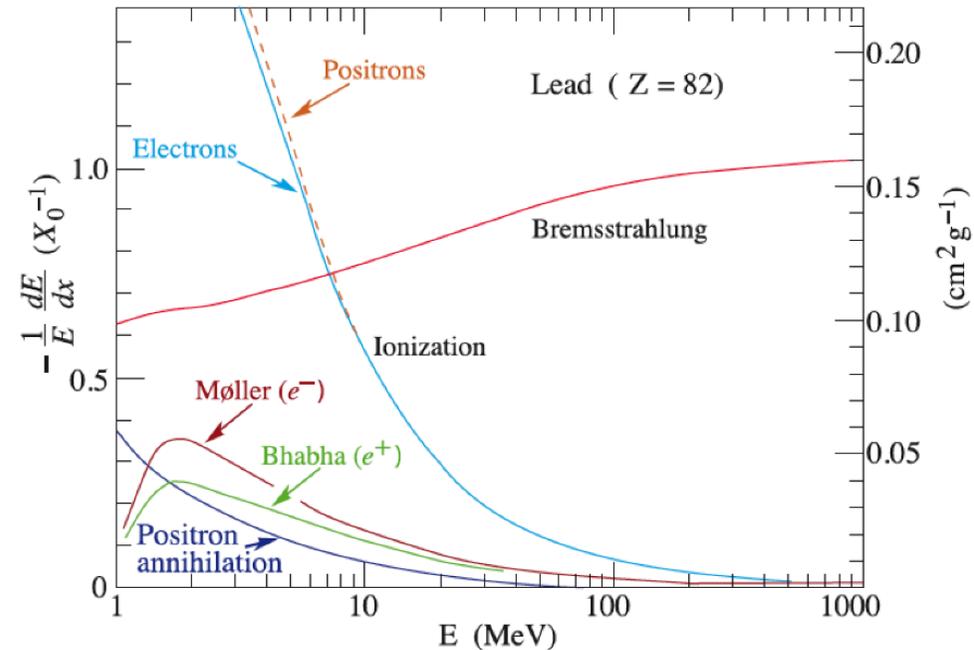
- En fait, pour des  $e^-/e^+$ , il faut aussi considérer un mécanisme + dur :

$dE/dx$  pour des électrons et des positrons dans du plomb

PDG



Version modifiée de B-B pour les hadrons/muons

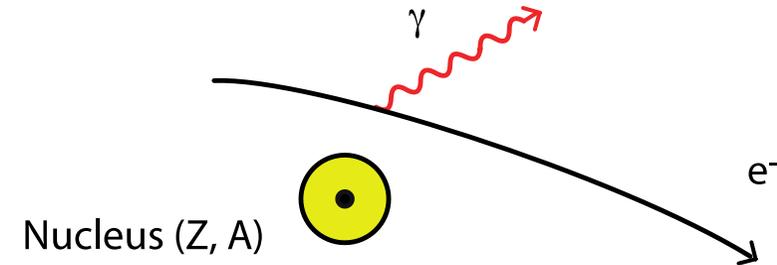


La véritable courbe du PDG

# Electrons/positrons

## Un nouveau mécanisme

- Un électron (ou un positron) va rayonner un photon réel dans le champ coulombien d'un noyau : **Bremsstrahlung** ou **rayonnement de freinage**



- Pour des  $e^\pm$ , on montre que :

$$X_0 = \frac{A}{4 \alpha N_A Z^2 r_e^2 \ln \left( \frac{138}{Z^{1/3}} \right)}$$

- Après 1  $X_0$ , il reste 1/e de son énergie avec
- **longueur de radiation**  $X_0$  (g/cm<sup>2</sup>)
- dE/dx proportionnel à  $E$  : domine à haute énergie

Attention l'importance de ce rayonnement dépend de la **quantité de matière traversée !**

*Peut être négligeable dans un détecteur gazeux ( $x \sim 1\% X_0$ )*

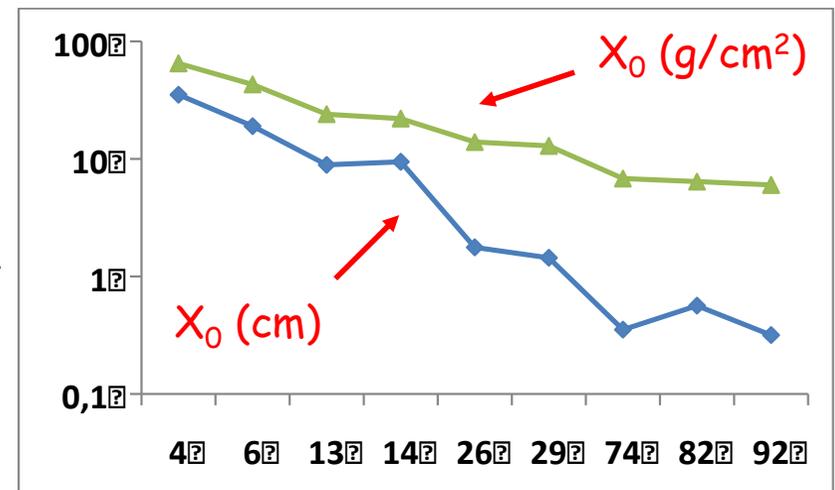
# Quelques valeurs de $X_0$

## Electrons/positrons

	Z	A	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$X_0$ (g/cm <sup>2</sup> )
Hydrogène (H <sub>2</sub> )	1	1.01	0.0899 (g/l)	63
Hélium (He)	2	4.00	0.1786 (g/l)	94
Azote (N <sub>2</sub> )	7	14.01	1.25 (g/l)	38
Oxygène (O <sub>2</sub> )	8	16.00	1.428 (g/l)	34
Beryllium (Be)	4	9.01	1.848	65
Carbone (C)	6	12.01	2.265	43
Aluminium (Al)	13	26.98	2.7	24
Silicium (Si)	14	28.09	2.33	22
Fer (Fe)	26	55.85	7.87	13.9
Cuivre (Cu)	29	63.55	8.96	12.9
Tungstène (W)	74	183.85	19.3	6.8
Plomb (Pb)	82	207.19	11.35	6.4
Uranium (U)	92	238.03	18.95	6

$$X_0 [g/cm^2] = \rho [g/cm^3] X_0 [cm]$$

Gaz

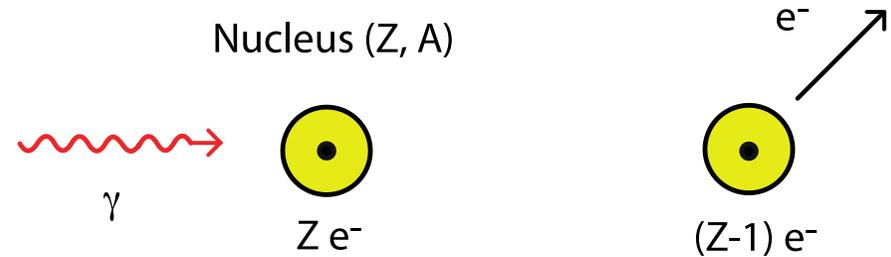


$X_0$  versus Z pour  
les solides

Air ( $\rho \sim 1,2$ ) et  $X_0 \sim 36$  g/cm<sup>2</sup>  $\Rightarrow$  300 m

# Photons

## Effet photoélectrique



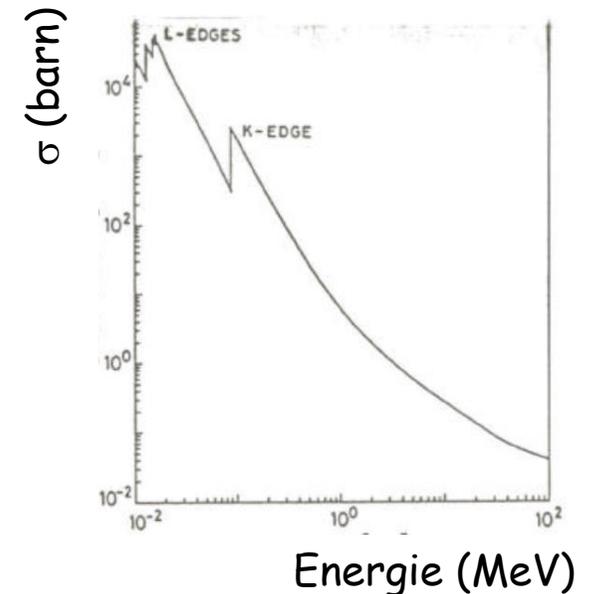
- Mécanisme :  $\gamma + \text{atome} \rightarrow \text{atome}^+ + e^-$ 
  - Concerne principalement les  $e^-$  de la couche K

- Section efficace

$$\sigma_{Photo} \approx 4\sqrt{2}\alpha^4 Z^5 \left(\frac{m_e c^2}{E_\gamma}\right)^{7/2} \sigma_{Th}$$

Section efficace  
Thomson

$$\sigma_{Th} = \frac{8}{3}\pi r_e^2 \approx 665 \text{ mb}$$

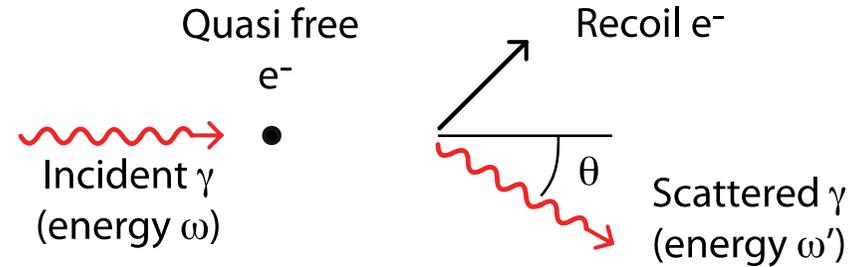


- Rappel : 1 barn =  $10^{-24} \text{ cm}^2$

# Photons

## Diffusion Compton

- Mécanisme :  $\gamma + e \rightarrow \gamma' + e'$ 
  - Diffusion d'un photon sur un  $e^-$  quasiment libre



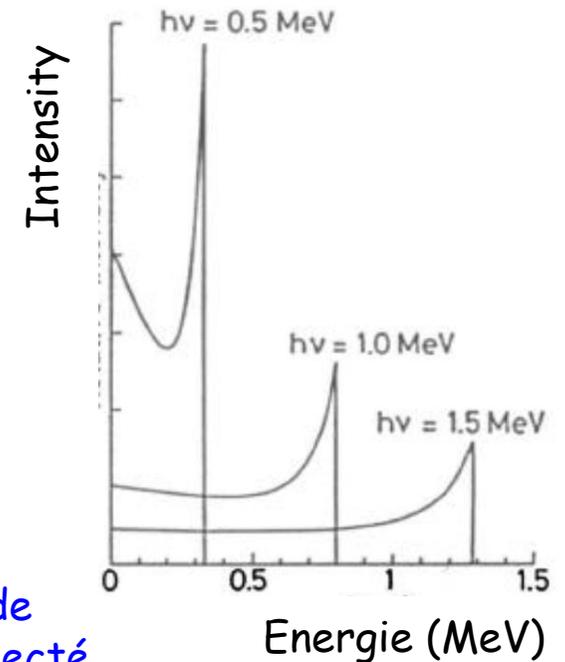
- Energie :

$$E'_{\gamma} = \frac{E_{\gamma}}{1 + \epsilon (1 - \cos(\theta_{\gamma}))} \quad \epsilon = \frac{E_{\gamma}}{m_e c^2}$$

- Section efficace :

$$S_c^e \gg \frac{\ln(e)}{e} \quad \text{et} \quad S_c^{\text{atome}} \gg Z S_c^e$$

- Décroît quand l'énergie du photon augmente



Energie de l'électron éjecté

# Photons

## Création de paires

- Mécanisme :  $\gamma + \text{noyau} \rightarrow e^- + e^+ + \text{noyau}$
- Se produit dans le champ coulombien d'un noyau uniquement si

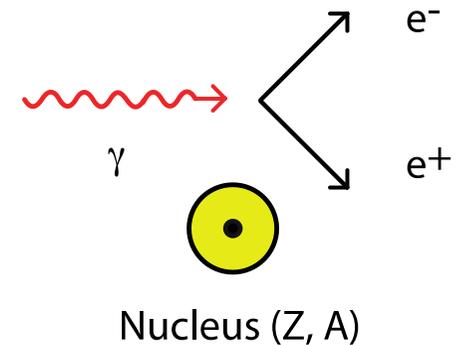
$$E_\gamma > 2 m_e c^2 \approx 1 \text{ MeV}$$

- Section efficace à haute énergie ( $\text{cm}^2/\text{atome}$ ) :

$$\sigma_{\text{Paire}} \approx \frac{7}{9} \frac{A}{N_A} \frac{1}{X_0}$$

← Indépendant de l'énergie

En moyenne, un  $\gamma$  de haute énergie se convertira en une paire  $e^+e^-$  après  $9/7 X_0$



# Photons

- On écrira :

$$I(x) = I_0 \exp(-m x)$$

↖ Epaisseur  
(g/cm<sup>2</sup>)

avec :

$$\mu = \mu_{photo} + \mu_{Compton} + \mu_{paire} + \dots$$

↖ Coefficient d'atténuation  
(cm<sup>2</sup>/g)

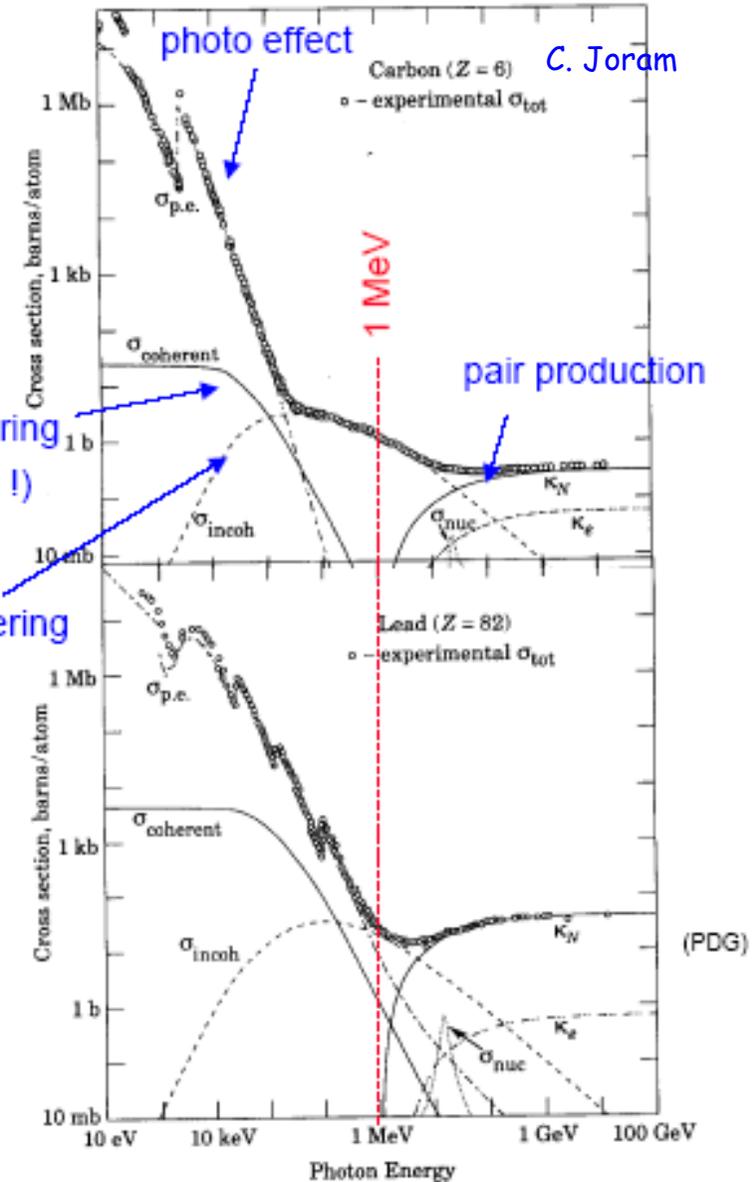
$$m_i = \frac{N_A}{A} S_i$$

Carbone  
(Z = 6)

Rayleigh scattering  
(no energy loss !)

Compton scattering

Plomb  
(Z = 82)



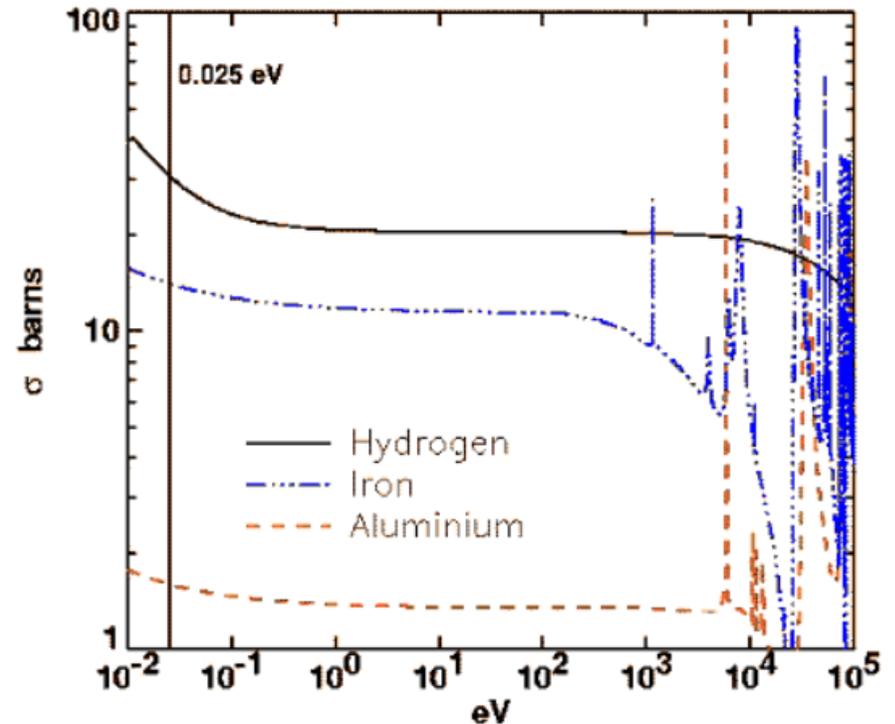
Section efficace en fonction de l'énergie du photon incident

# Neutrons

Table 12-1. Average number of collisions required to reduce a neutron's energy from 2 MeV to 0.025 eV by elastic scattering

Element	Atomic Weight	Number of Collisions
Hydrogen	1	27
Deuterium	2	31
Helium	4	48
Beryllium	9	92
Carbon	12	119
Uranium	238	2175

## Neutron Cross Sections

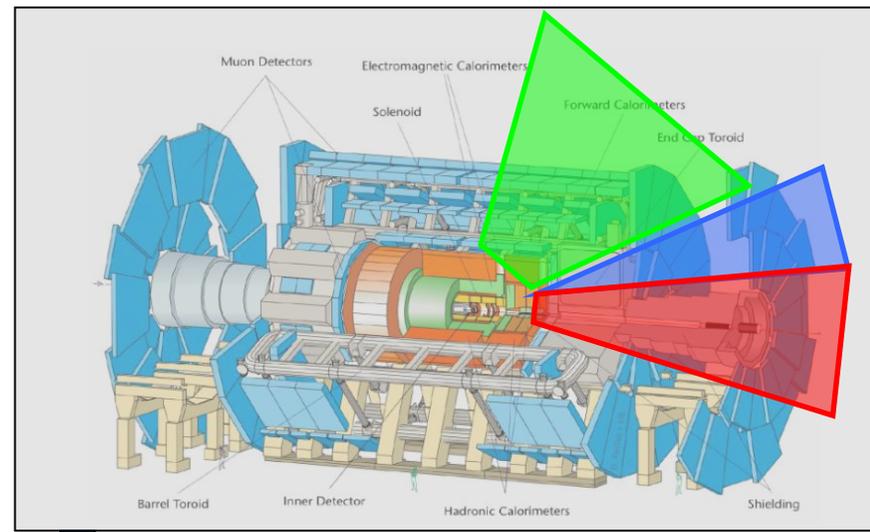


Capture may be increased at some energy due to resonance effect in the total cross section...

# Bruit de fond **neutrons** dans caverne ATLAS

Background comes from residues of p-p interactions (through spallation process) :

- Huge production of *neutrons*, thus creating  $\gamma$ , thus creating  $e$ , etc...
- Also at higher energy,  $n$  and  $\gamma$  create ionizing particle (mainly:  $p$ ,  $e^+$ ,  $e^-$ )
- Direct background:  $\mu$  and punchthrough (smaller)



Neutron “gas” in the cavern  
(-> therm. of neutrons)

$$\varepsilon_n^{\text{hit}} \sim 10^{-4} \text{ à } 10^{-3}$$

$$\varepsilon_\gamma^{\text{hit}} \sim 4-8 \cdot 10^{-3}$$

Soit **50 à >100 kHz** dans dét. gazeux du spectromètre à muon (asynchrone avec le LHC)

10 kHz/cm<sup>2</sup>

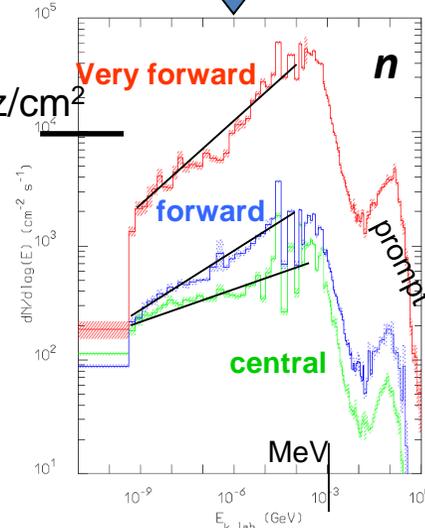


Figure 5-67 The expected neutron flux as a function of neutron energy in different rapidity regions of the muon spectrometer (top curve:  $2.3 < \eta < 2.7$ , middle curve:  $1.4 < \eta < 2.3$  and bottom curve:  $\eta < 1.4$ ).

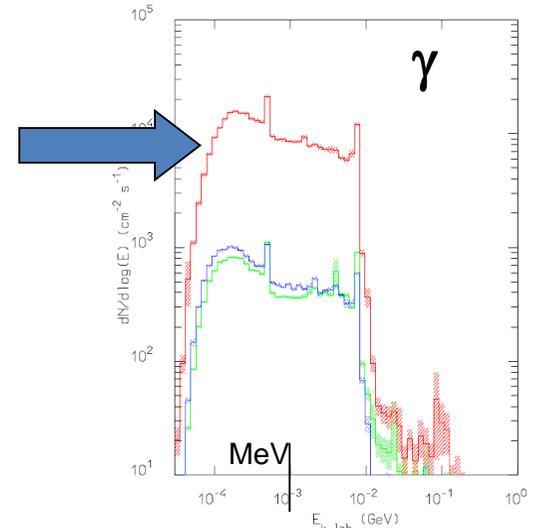


Figure 5-66 The expected photon flux as a function of photon energy in different rapidity regions of the muon spectrometer (top curve:  $2.3 < \eta < 2.7$ , middle curve:  $1.4 < \eta < 2.3$  and bottom curve:  $\eta < 1.4$ ).

# Neutrinos

- Les neutrinos ne sont sensibles qu'à l'interaction faible
  - Les sections efficaces sont très petites
- Pour les détecter, il faut les faire interagir :

$$\begin{cases} \nu_\ell + n \longrightarrow \ell^- + p & \text{avec } \ell^- = e^-, \mu^-, \tau^- \\ \bar{\nu}_\ell + p \longrightarrow \ell^+ + n & \text{avec } \ell^+ = e^+, \mu^+, \tau^+ \end{cases}$$

- Typiquement, les efficacités de détection sont de l'ordre de  $10^{-17}$  dans 1 m de fer
  - Les détecteurs spécialisés pour les neutrinos doivent être énormes : tonne ou 10 ou 100 kt ! (HK: 250 kt, diam. 70m, H 70m)

Quelle épaisseur de Fe pour l'arrêter ?

$> 1$  a.lumière de Fe

## Exemples

- Combien d'énergie est déposée par un muon de 10 GeV dans une raquette de scintillateur d'épaisseur 1 cm ?
- Combien d'énergie est perdue par un muon de 10 GeV dans un détecteur gazeux de 1 cm d'épaisseur ?
- Combien de mètres de béton faut-il pour arrêter un faisceau de protons de 450 GeV ?
- Combien d'air faut-il pour arrêter une particule  $\alpha$  de 30 MeV ?

# Réponses

ORDRE DE GRANDEUR

- Un muon de 10 GeV est quasiment au minimum d'ionisation.  
Pour du scintillateur,  $\rho \sim 1$  (PDG : 1,032).  
Donc  $dE/dx = 1\text{cm} \times 1 \times 2 = 2 \text{ MeV}$
- La densité,  $\rho$ , du gaz est de l'ordre de 0.001 .  
Donc  $dE/dx = 1 \times 0,001 \times 2 = 2 \text{ keV}$

Attention les interactions nucléaires, gouvernées par  $\lambda_1$  ont été négligées !

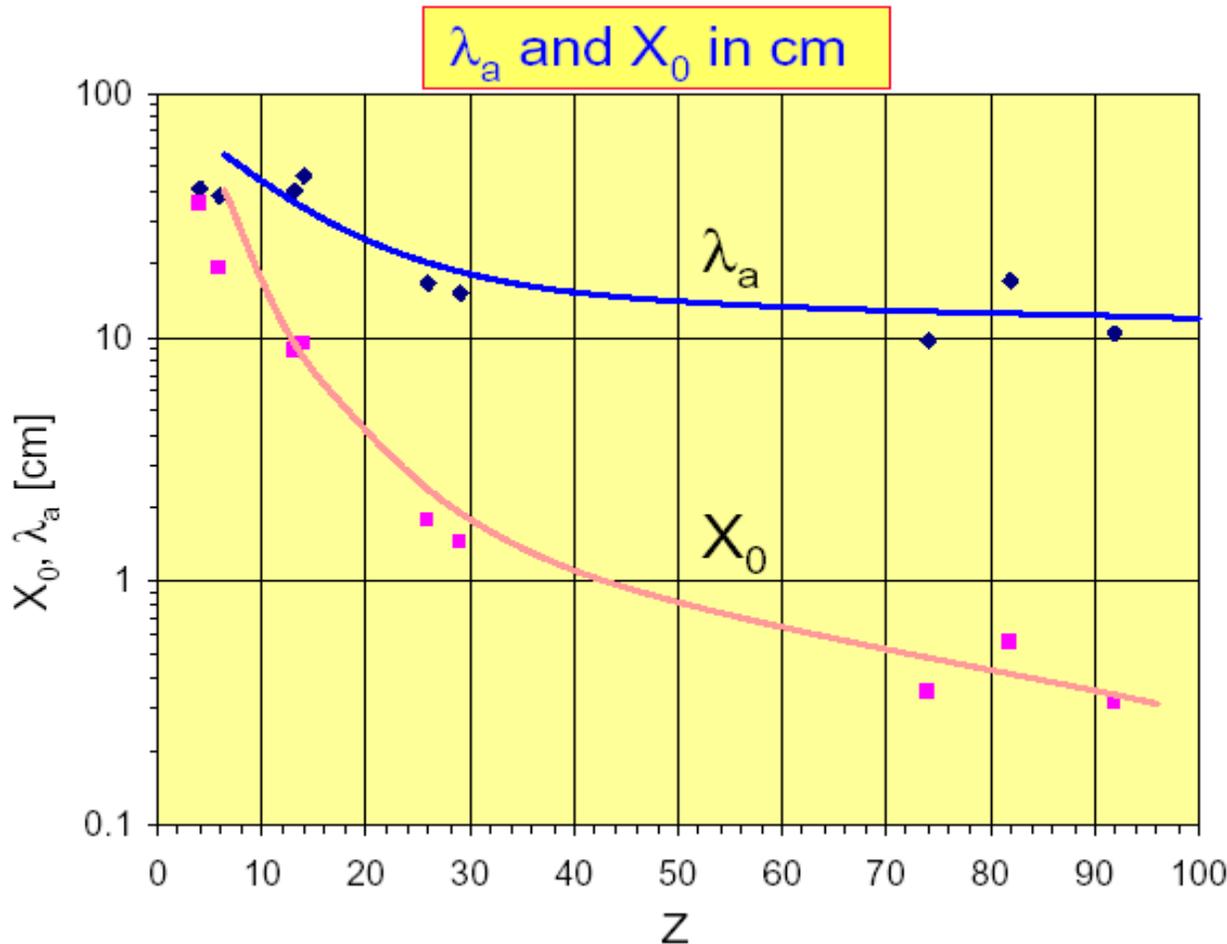
Des protons de 450 GeV sont au minimum d'ionisation. La densité du béton est de 2,5 . Il faut donc  $450\,000/2/2,5 = 900$  m de béton  
En réalité, avec la **production de jet/gerbe**, il faut quelques mètres !  
(processus **hadronique** dur – *pas encore explicité*)

- Une particule  $\alpha$  de 30 MeV est en-dessous du minimum d'ionisation :  
 $\beta = p/m \approx 0.01$  ( $m_\alpha \approx 4 \text{ u.m.a.} \approx 3700 \text{ MeV}$ )  
Donc  $dE/dx = 2 \text{ MeV cm}^2\text{g}^{-1} \times 0,01^{-5/3} \approx 4000 \text{ MeV cm}^2\text{g}^{-1}$ ,  
soit 4 MeV/cm dans l'air. Elle s'arrête en moins de 10 cm.

# Longueur de radiation vs longueur d'interaction

A hautes énergies ( $E > E_c$ ) les phénomènes de radiation peuvent être décrit par un coefficient « d'absorption » : après une traversée de matière d'épaisseur  $x$ , il reste  $e^{-x/L}$  particules initiales.  $L$  sera noté  $X_0$  pour les processus EM et  $\lambda_I$  pour les **processus hadroniques**. Unité cm ou g/cm<sup>2</sup>.

Remarque : On a toujours :  $\lambda_I > X_0$  pour  $Z > 6$ .



Unité :

$$\lambda_I \approx 35(\text{g.cm}^{-2})A^{1/3}$$

Or  $N.A = \rho \cdot N_a$  donc  $\lambda_I/\rho$  en cm varie en  $A^{-2/3}$

$$X_0 = \frac{716.4(\text{g.cm}^{-2})A}{Z(Z+1)\ln(287/\sqrt{Z})}$$

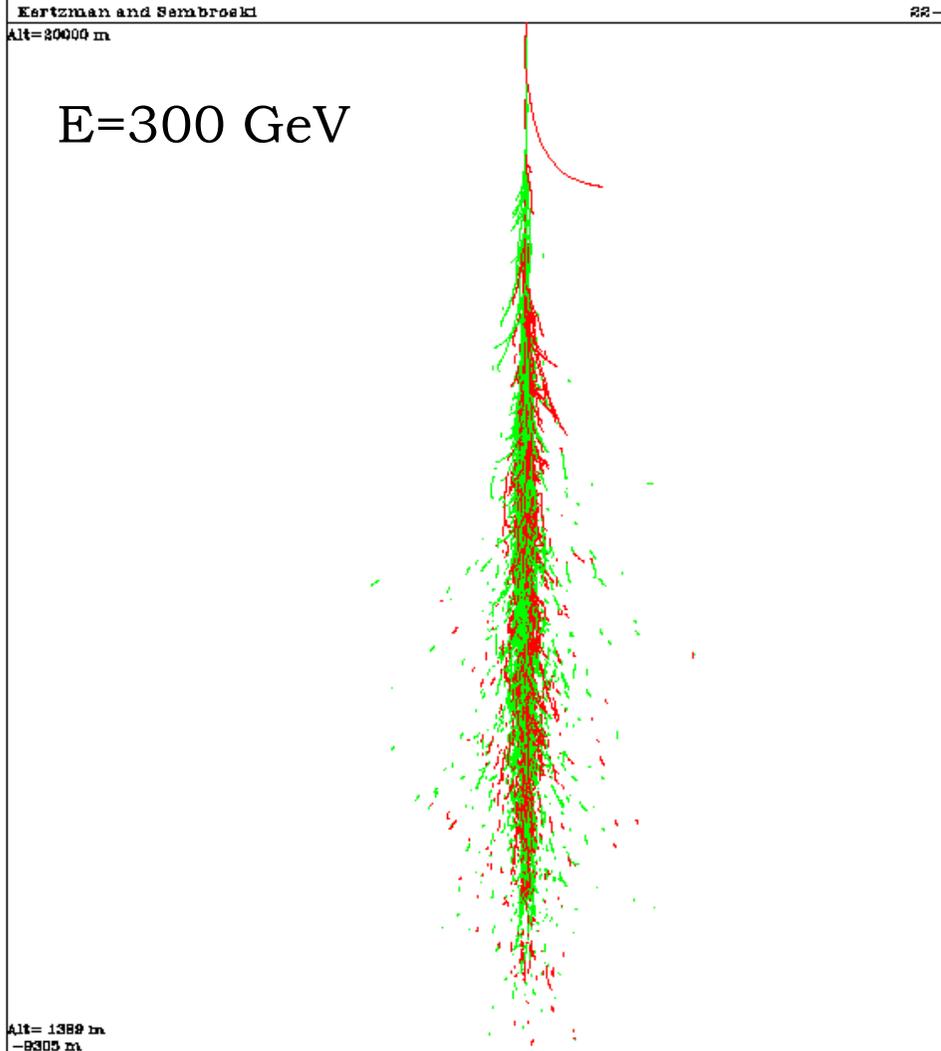
$\lambda_I > X_0$  pour  $Z > 6$  donc pour un matériau donné, on absorbe plus efficacement les électrons/photons que les hadrons.

Pour des matériaux au delà de  $Z=30$  :

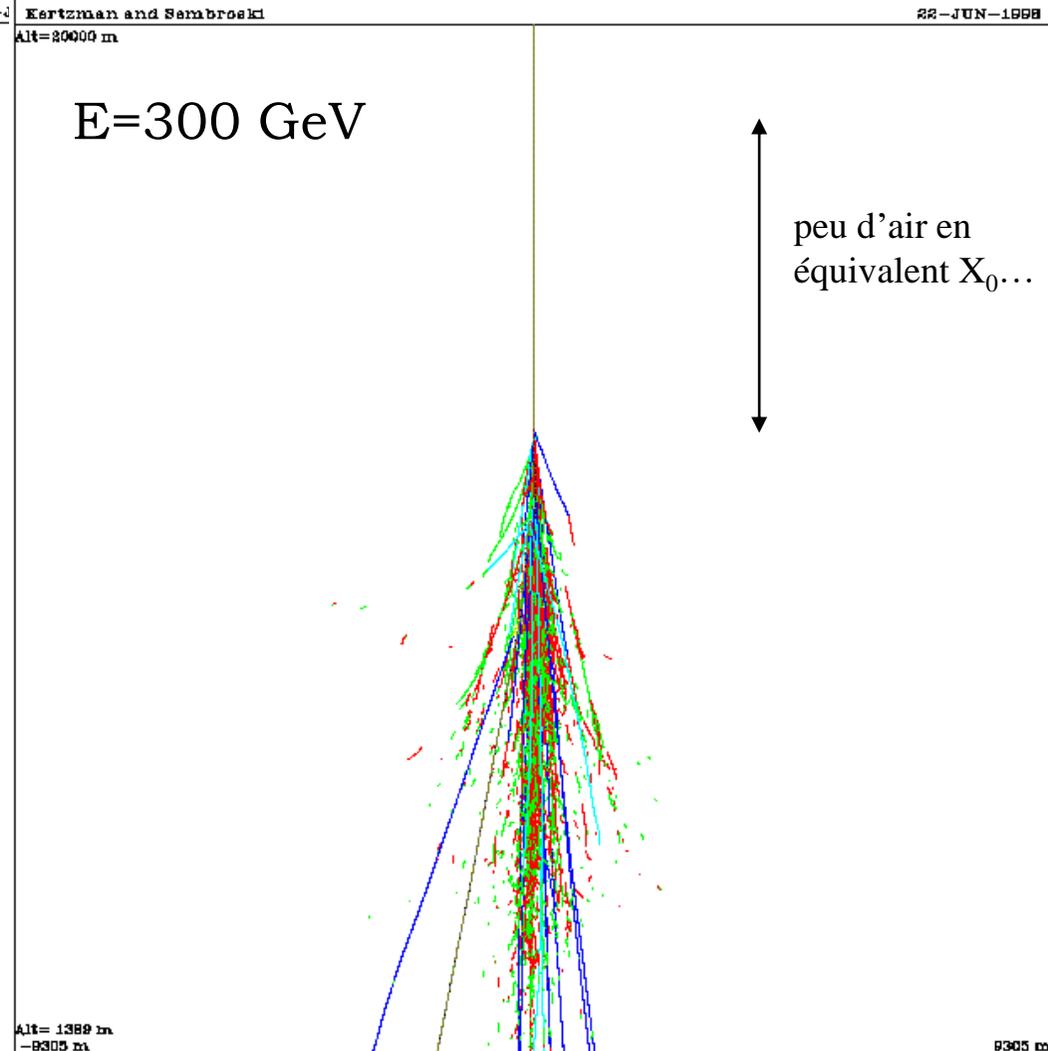
$$\lambda_I > 10 \times X_0$$

# Gerbe EM versus gerbe Had. dans l'air

gerbe électromagnétique



gerbe hadronique



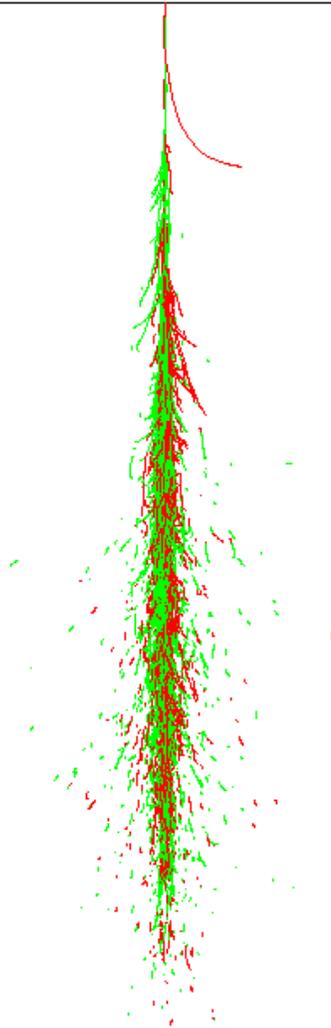
air au niveau de la mer  $\sim 23.X_0$

# Gerbe EM versus gerbe Had. dans l'air

gerbe électromagnétique

Kertzman and Sembroski  
Alt=20000 m

E=300 GeV

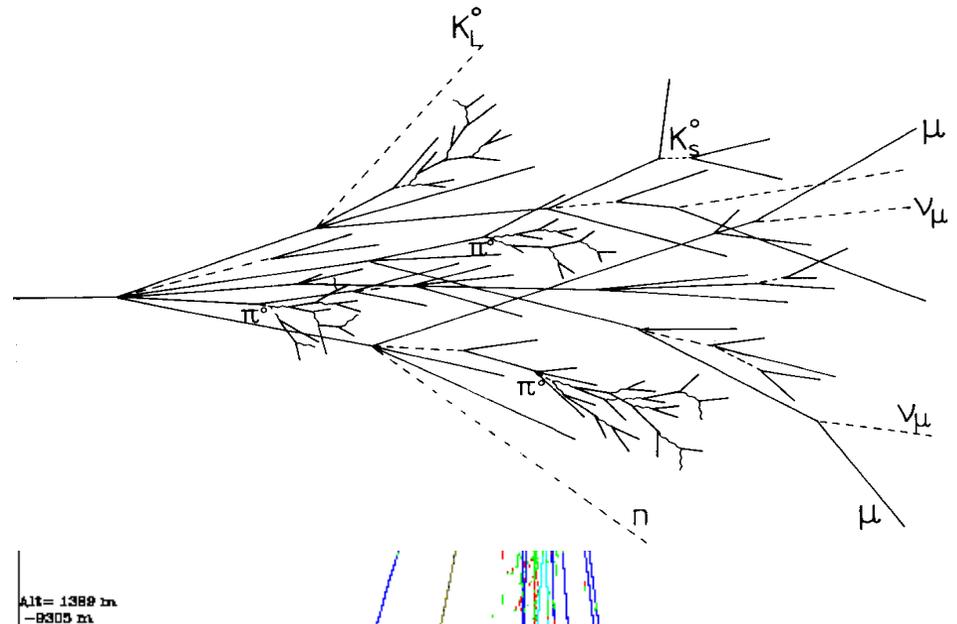


Alt= 1389 m  
-8305 m

gerbe hadronique

82-J Kertzman and Sembroski  
Alt=20000 m

E=300 GeV



↑  
peu d'air en  
équivalent  $X_0$ ...

Alt= 1389 m  
-8305 m

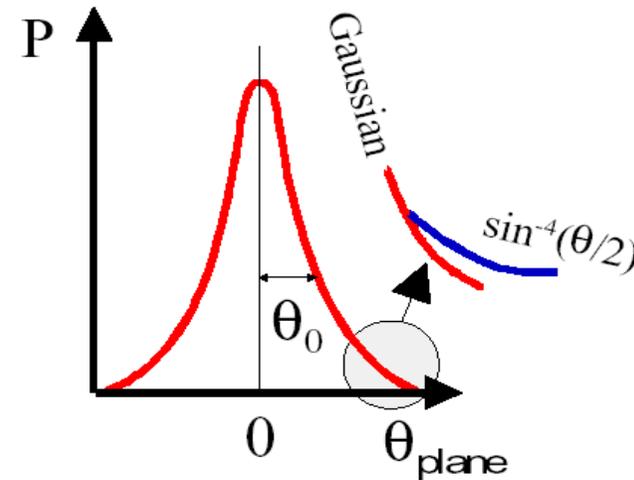
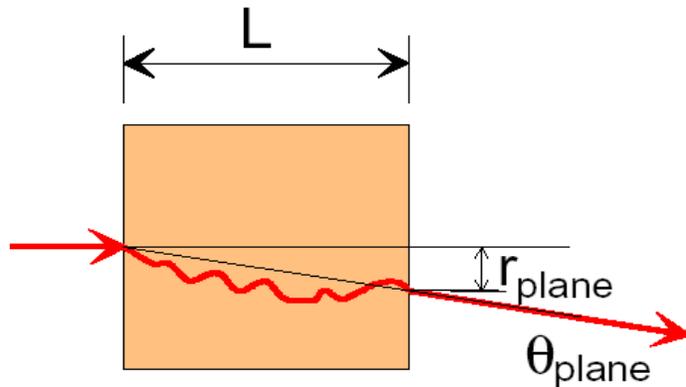
8305 m

air au niveau de la mer  $\sim 23.X_0$

# Diffusion multiple

(sur les noyaux)

- Chaque interaction a un effet sur la direction de la particule interagissant
- Transfert d'énergie sur les atomes  $\Leftrightarrow$  transfert d'impulsion  $\Leftrightarrow$  **changement de direction**
- sur grand nombre de particules, effet moyen nul, **mais pas la largeur de distribution angulaire**



$$\theta_0 = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} z \sqrt{\frac{L}{X_0}} \left\{ 1 + 0.038 \ln \left( \frac{L}{X_0} \right) \right\}$$

$$X_0 = \frac{716.4 \text{ g.cm}^{-2} A}{Z(Z+1) \ln(287/\sqrt{Z})}$$

Exemple :  $\mu$  de 14 GeV/c  $\Rightarrow \theta_0 \sim 10^{-3} \cdot \sqrt{L/X_0}$  (rad) = 1 milli-radian pour  $L=1X_0$  .

Très pénalisant à basse énergie !

# Effet Cherenkov

- Un rayonnement Cherenkov est émis quand 1 part. chargée traverse un milieu diélectrique avec vitesse  $\beta$  supérieure à  $c/n$  dans le milieu :

$$\frac{v}{c} > \frac{1}{n} \implies \beta > \beta_{seuil} = \frac{1}{n}$$

- L'émission a lieu sur un cône d'angle au sommet  $\theta_c$  tel que :

$$\cos(\theta_c) = \frac{1}{n\beta}$$

- Valeurs typiques des indices des verres ou quartz :  $n \sim 1.5$ , donc la vitesse de la lumière y est  $c/n \approx 66\%$  de  $c$

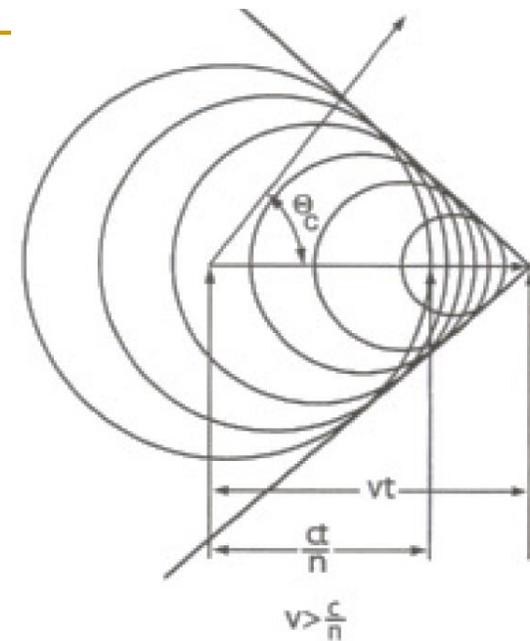
- Energie cinétique seuil :

$$E_{Th} = m c^2 \left( \sqrt{\frac{n^2}{n^2 - 1}} - 1 \right)$$

- Dans l'eau ( $n \approx 1.33$ ),  $E_{th} = 264$  keV pour  $e^\pm$  et  $486$  MeV pour  $p$

- Mécanisme : le champ  $E$  polarise le milieu. Après le passage de la particule, il revient à son état initial

- Le changement de la polarisation est une perturbation EM qui se déplace à la vitesse  $c/n$



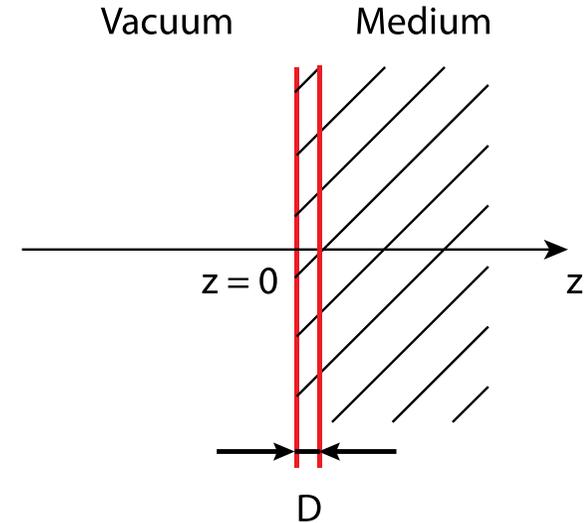
# Effet Cherenkov

- Des  $e^\pm$  de haute énergie produisent  $\approx 220$  photons/cm dans l'eau et  $\approx 30/m$  dans l'air
- Cet effet existe dans tous les milieux, mais est **négligeable devant la perte par ionisation**
- Il est utilisé pour l'identification des particules (pas pour les mesures de  $dE/dx$ )

(astronaute ?)

## Rayonnement de transition

- Un « **rayonnement de transition** » est émis lorsqu'une particule chargée traverse un milieu présentant une discontinuité de l'indice de réfraction  
(ex : vide/air - diélectrique/plastique,  $D \approx 10\text{-}30 \mu\text{m}$ )



- Quelques calculs complexes d'EM montrent que :
  - L'énergie émise à chaque transition est

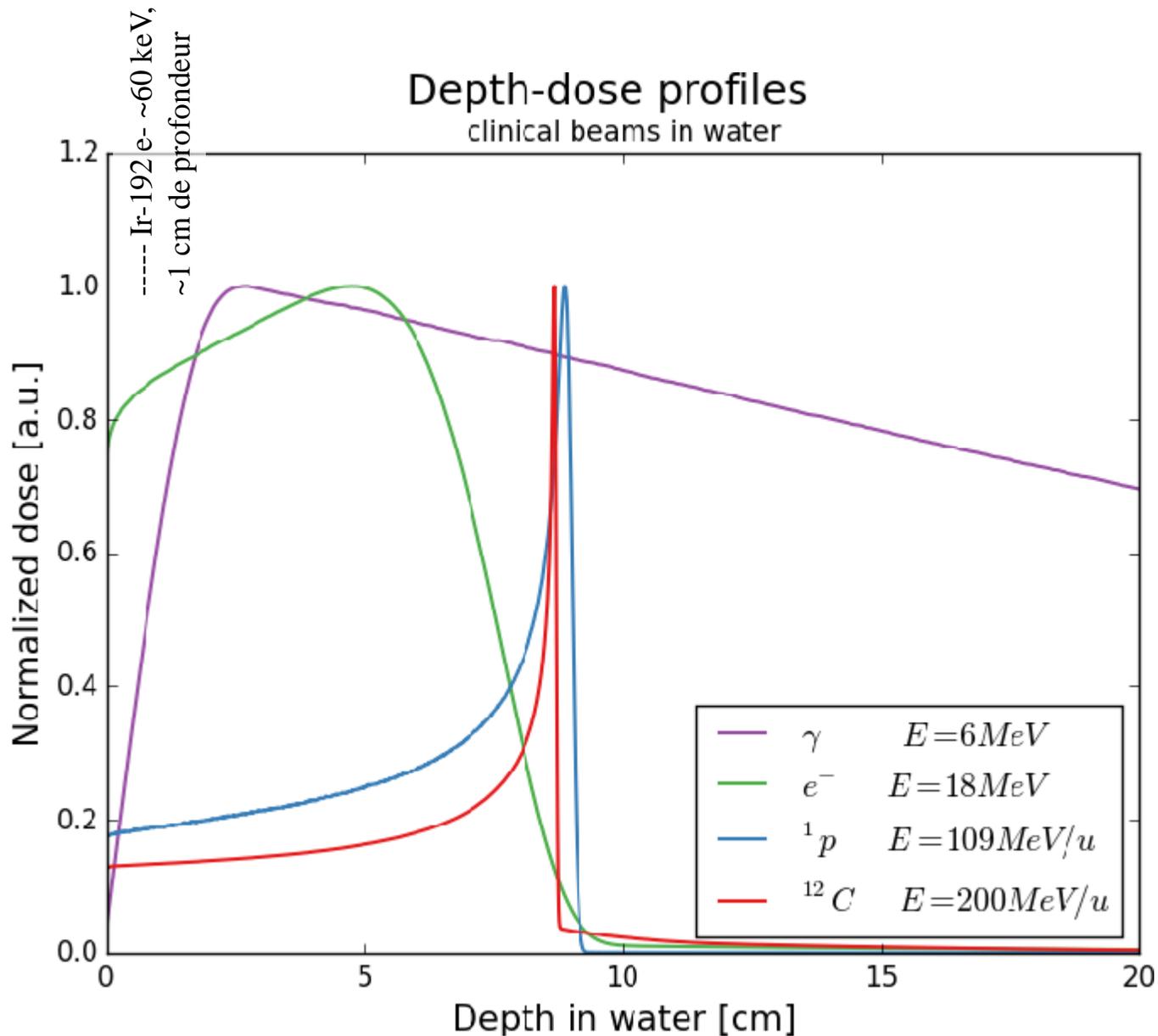
$$\mathcal{E} = \frac{\alpha Z^2 \gamma \hbar \omega_P}{3}$$

⇒ Dans la pratique, l'effet est faible ( $\hbar \omega_P \approx 10\text{-}50 \text{ eV}$ ), les  $e^\pm$  sont les seules particules qui vont émettre un rayonnement de transition (⇒ identification !)

- Le nombre de photons émis à chaque transition est très faible  $\approx 0.8 \alpha Z^2$
- Le rayonnement de l'ordre du keV est émis avec  $\theta \approx 1 / \gamma$

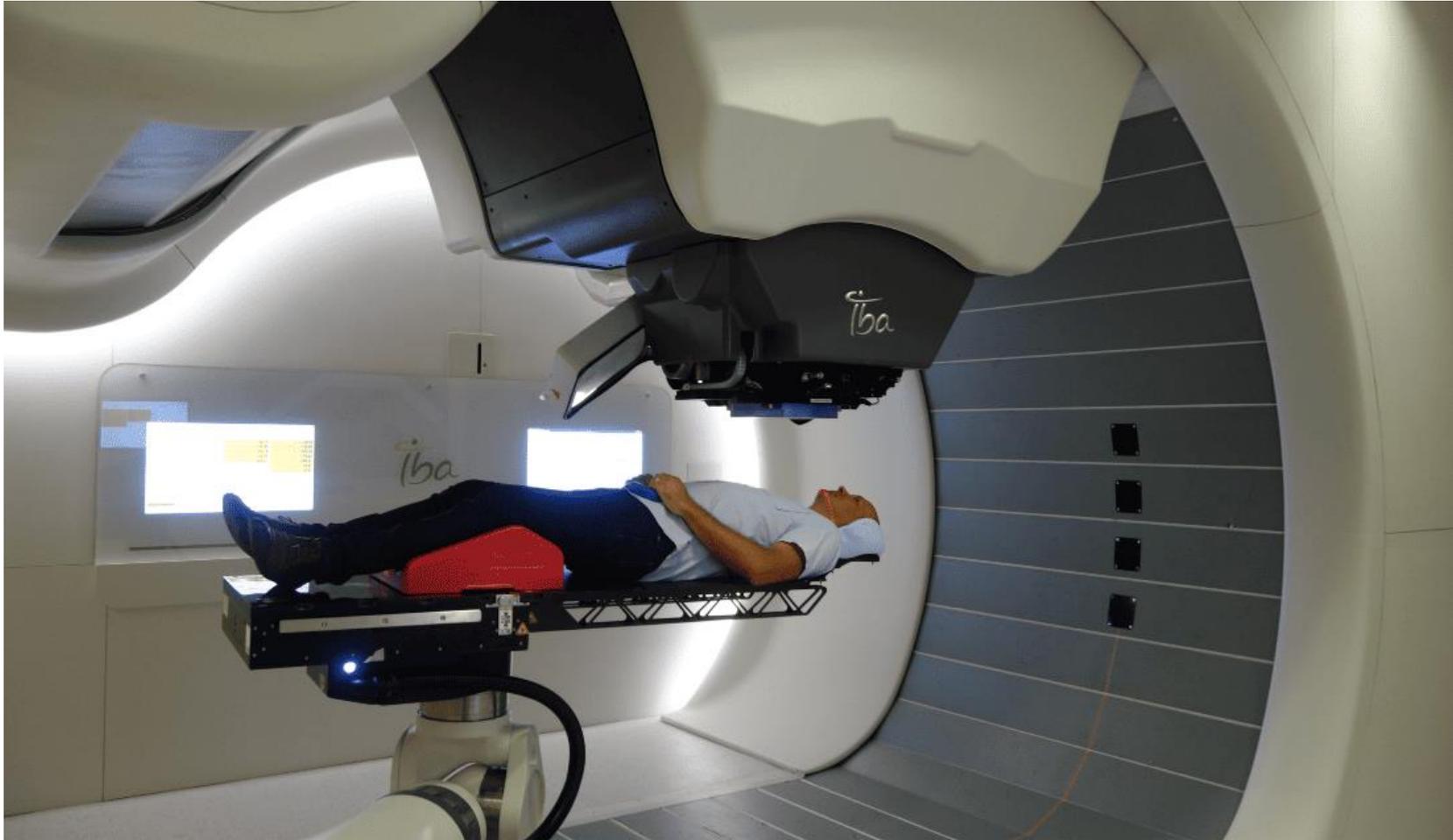
Déjà que peut-on penser faire avec tout ça...

# Pic de Bragg et applications médicales



Proton-thérapie : coût important. Pour traitement de cancers particuliers.

Proton-thérapie en France : une idée de physicien.ne.s de l'IJCLab + ...



(aussi à Nice et Caen). Prochaine étape la Carbon thérapie

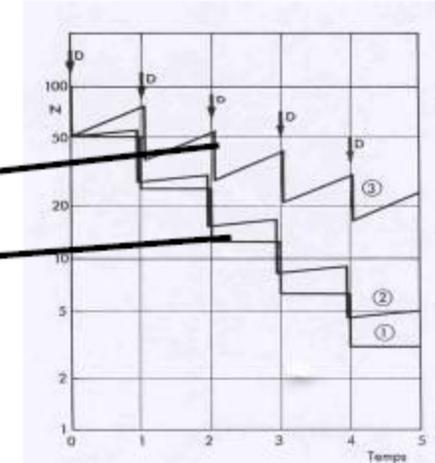
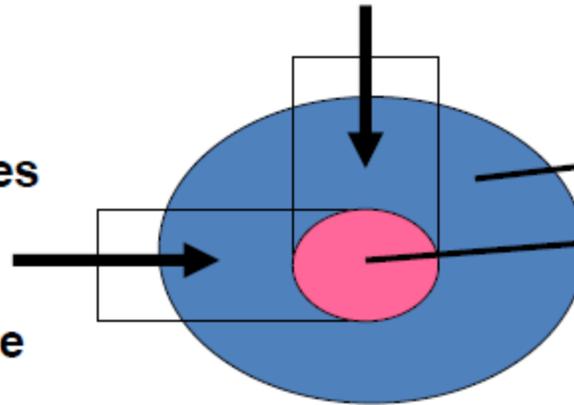
# La stratégie thérapeutique



- 1 Donner plus de dose à la tumeur qu'aux tissus sains

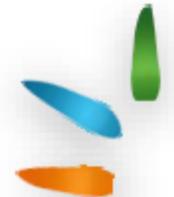
⇒ optimisation balistique

- 2 Jouer sur les mécanismes de réparation : notions de fractionnement et d'étalement (modulation de l'écart entre doses)

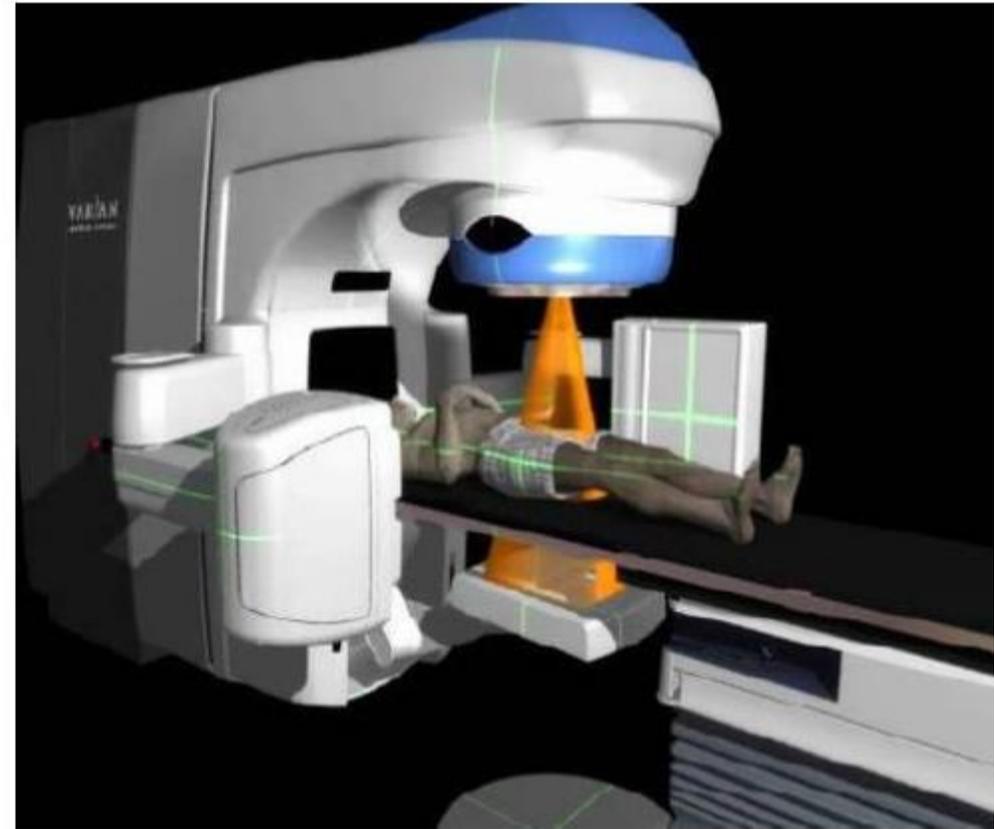
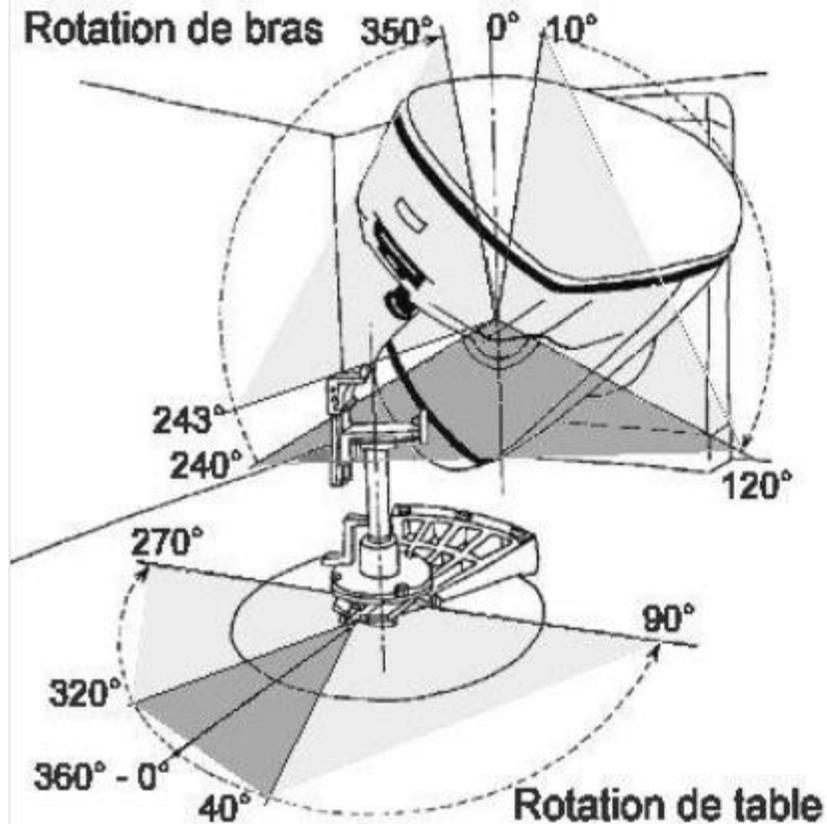


- 3 Une dose globale n'a aucune valeur sans préciser le fractionnement et l'étalement
- Ex :  $4 \times 4 \text{ Gy} = 11 \times 2 \text{ Gy}$  si  $\alpha/\beta=3$

$$(1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg})$$

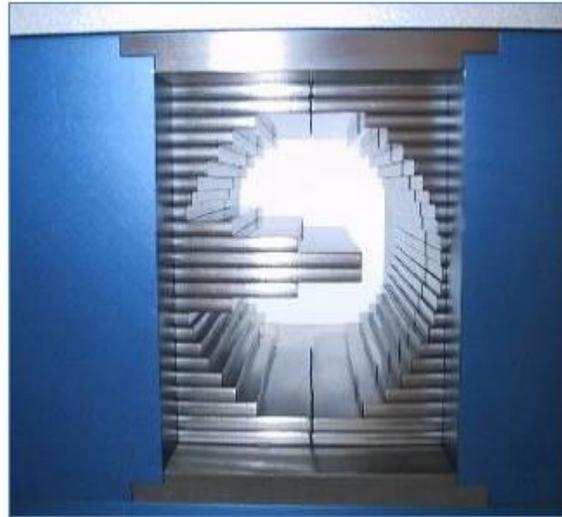


# Un accélérateur linéaire moderne (X + e<sup>-</sup> 4-20 MeV)



Possibilité d'irradier selon toutes les incidences et de combiner les faisceaux

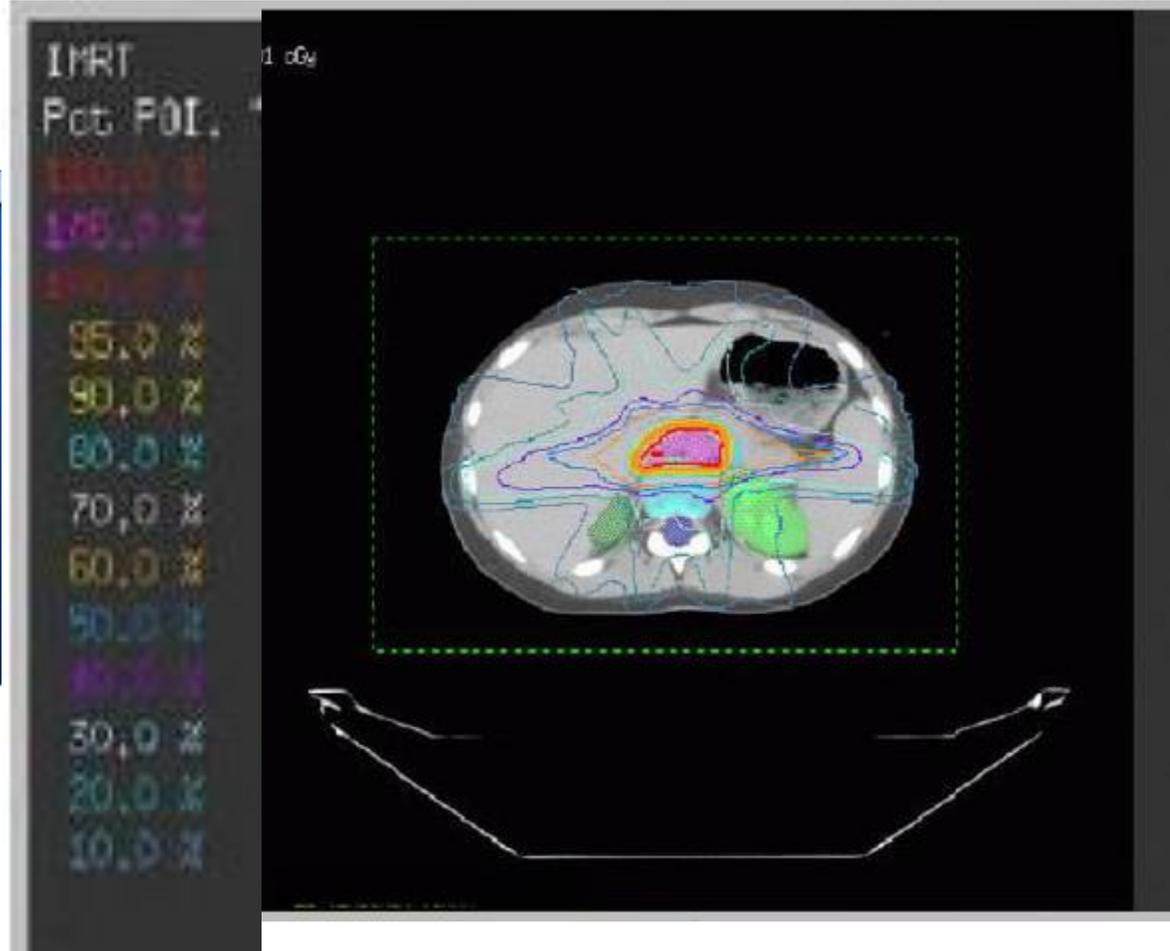
# Conformer le faisceau au volume : le collimateur multi-lames



Domaine en pleine explosion :

IMRT : Radiothérapie par modulation d'intensité (en faisceau d'électron)

# Conformer le faisceau au volume : le collimateur multi-lames





(dis)cours sur la detection  
en physique des particules, nucléaires et astro-particules

Merci pour votre attention ! 😊

Diapos supplémentaires...

# GLOSSAIRE

Quelques mots et expressions fréquemment employés (à connaître par cœur !!) :

$X_0$ ,  $\lambda_I$ ,  $R_M$ , séparation  $\pi/e$  à  $n\sigma$ , diffusion multiple (multiple scattering),  $dE/dx$ , bremsstrahlung, vertex, création de paire, ionisation, mip, quencheur, effet cerenkov,  $\delta_{ray}$ ,  $E_c$ , seuil -à fraction constante- (-constant- threshold), boost de Lorentz, gerbe EM ou Had., cascade, PM, dynode, HT (HV), chambre à dérive, calorimètre, pré-shower, tracker, TRD, vieillissement (aging), longueur d'atténuation, ID, vertex, temps de montée (rising time/edge), signal de fin (trailing edge), déclenchement (trigger), fréquence cyclotron, fluctuation de Landau,  $W_I$ , pic de Bragg, range, section efficace (cross section), fin/retour de signal (afterglow), temps mort (dead time), efficacité (efficiency), plateau, retour d'aimant (return yoke), fer instrumenté, punchthrough, CCD, énergie manquante (missing E), énergie/impulsion transverse ( $E_t$ ,  $p_t$ ), photoélectron, strip, pad/pixel, MWPC, pedestal, jitter, slewing, photodiode, fenêtre en quartz, photocathode, WLS, TPC, formule de Bethe-Bloch, ADC, TDC, analogique/numérique, bit/octet/byte, échantillonneur n-bits (n-bits converter), paire twistée, linéarité, angle de Lorentz, anode, gap, pitch, diffusion Compton, mode Geiger-Müller, mode streamer, FWHM, Monte-Carlo, rapidité/eta, relation r-t,  $T_0$ , étalonnage (calibration), section efficace, coup (hit), barrel/end-cap, mise en forme (shaper), granularité, jets, électronique front-end, traces fantômes (fack/ghost tracks), on-line, off-<sub>63</sub> line, etc...

Does all this is true or not ?  
Event display of “typical” events (ALPEH, ATLAS)

Event display of “typical” events from ALEPH experiment  
at CERN on LEP accelerator :

$$e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow \text{something} \quad @ \quad \sqrt{s} \sim 91 \text{ GeV}$$

This experiment has detector for :

vertex

TPC i.e. gaseous det. (dE/dx)

EM calorimeter

solenoid magnet

Had calorimeter

return flux “instrumented” ( $\mu$ )

} +B field  
-B

Does all this is true or not ?  
Event display of “typical” events (ALPEH, ATLAS)

Event display of “typical” events from ATLAS experiment at CERN on LHC accelerator :

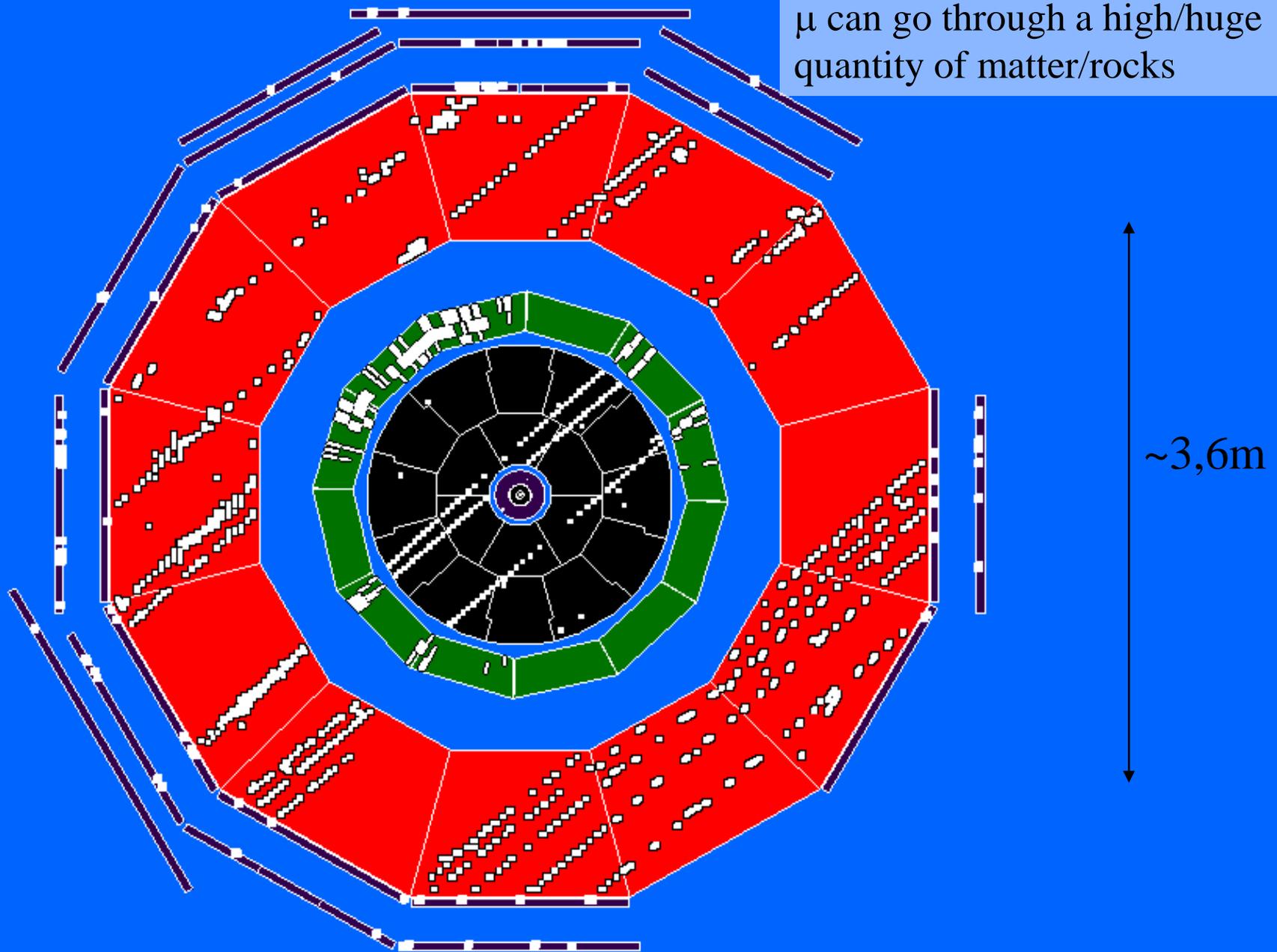
$pp \rightarrow (\text{many})\text{something} \quad @ \quad \sqrt{s} \sim 7 \text{ to } 13 \text{ TeV}$

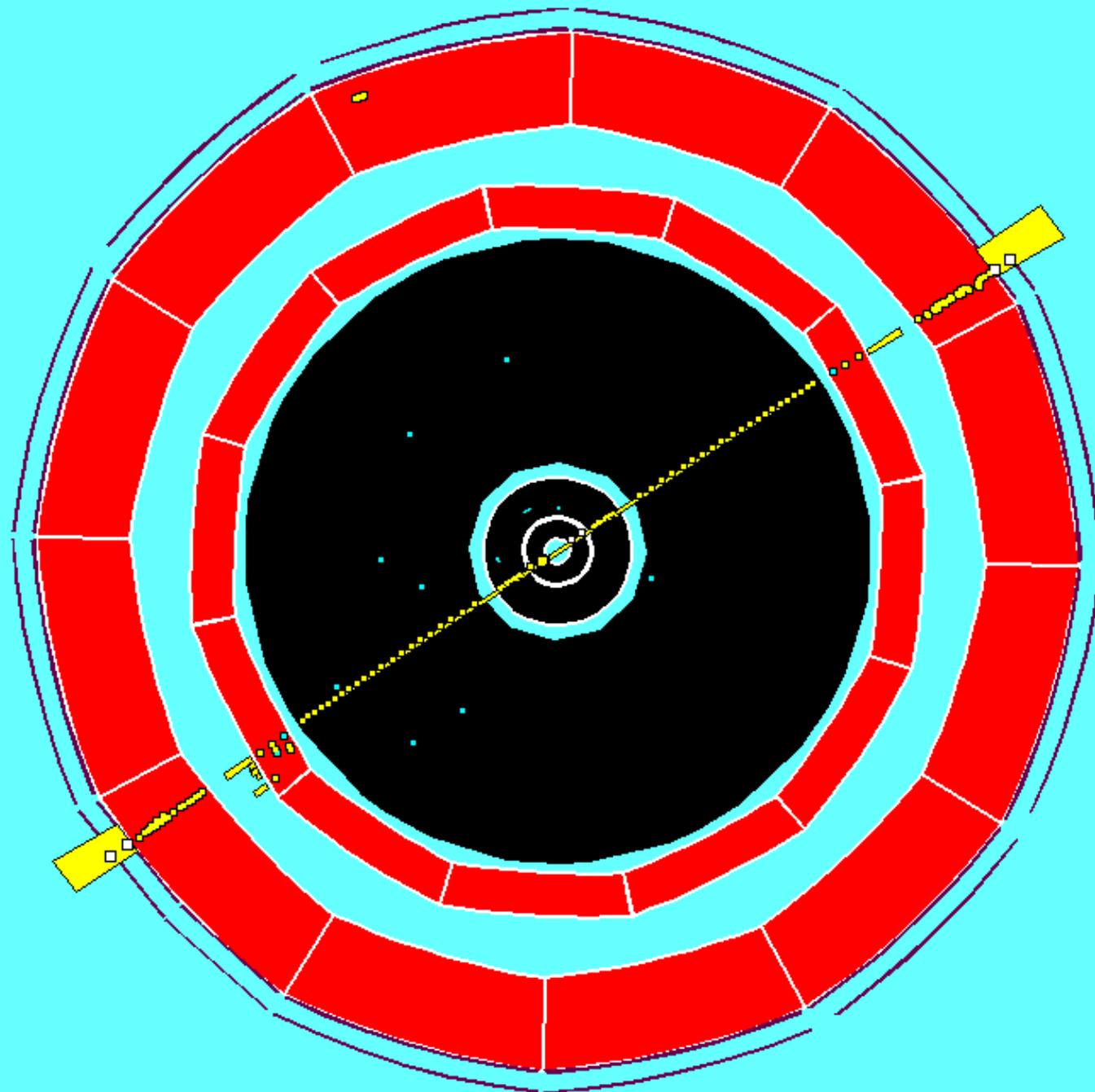
This experiment has detector for :

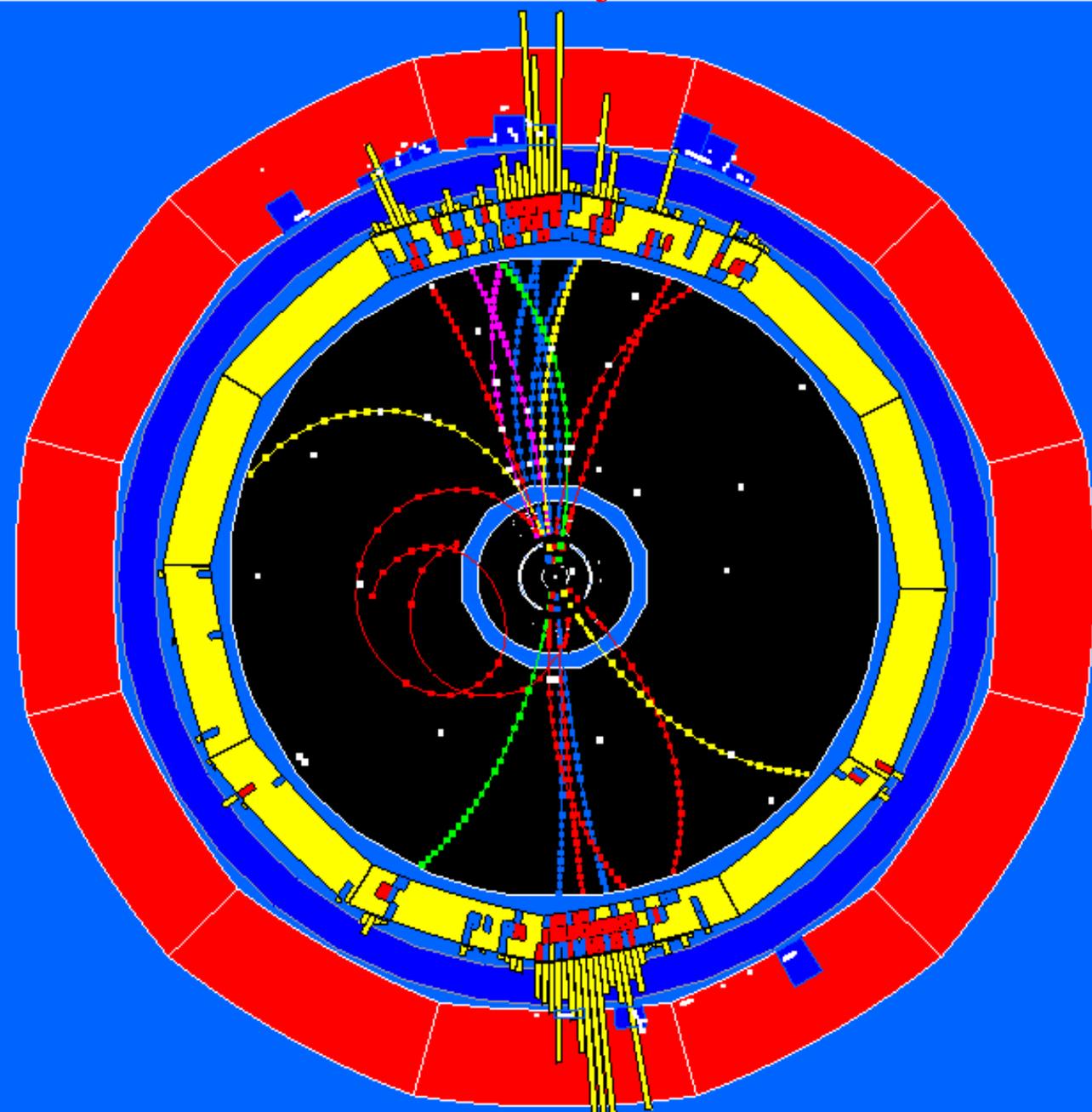
<u>vertex Si + gaseous det.</u>	}	B field
<u>solenoid magnet</u>		
<u>EM calorimeter</u>		
<u>Had calorimeter</u>		
<u>toroid magnet</u>	}	B field Tor.
<u>muon chambers (<math>\mu</math>)</u>		

Cosmic shower.

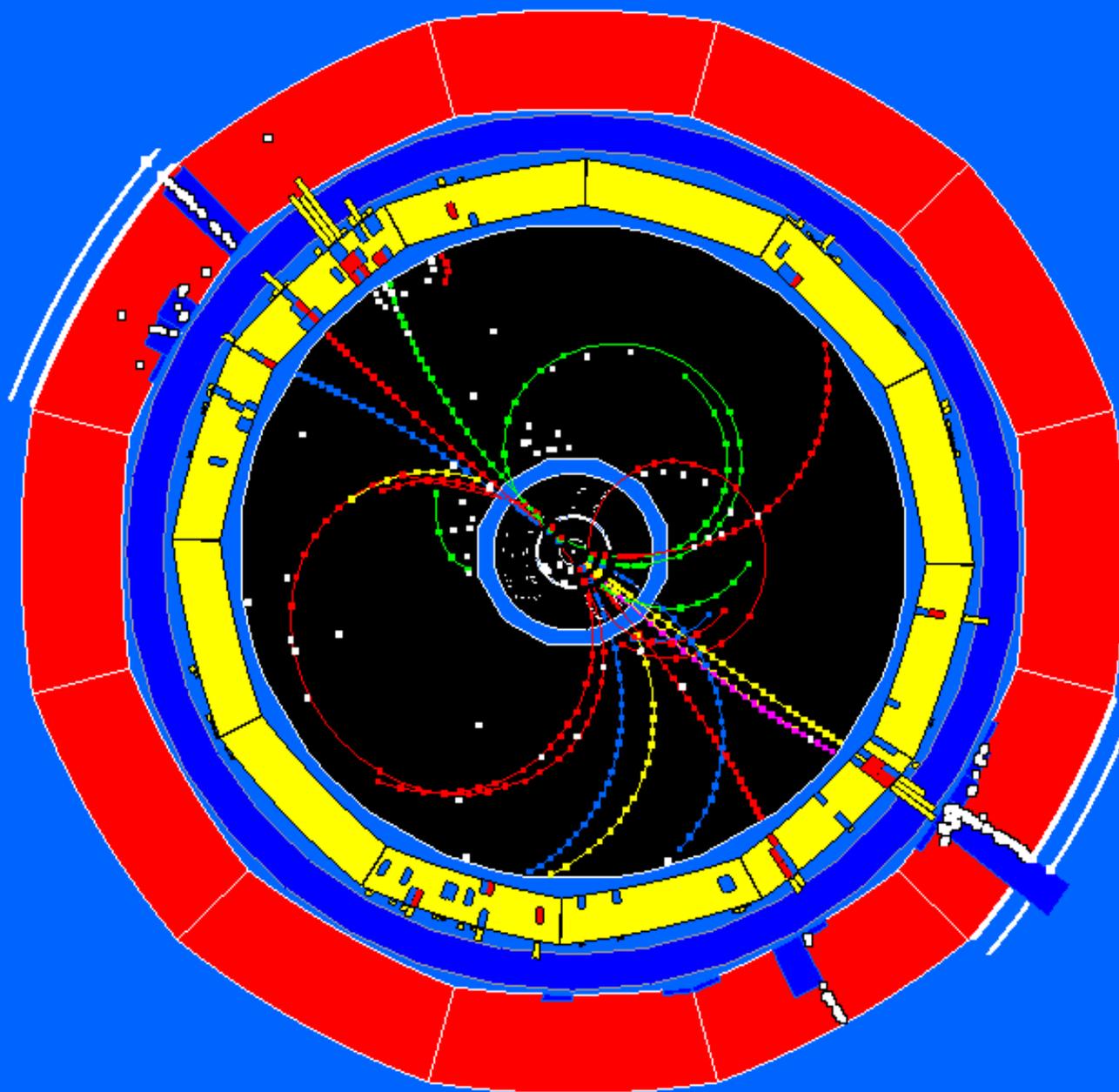
$\mu$  can go through a high/huge quantity of matter/rocks





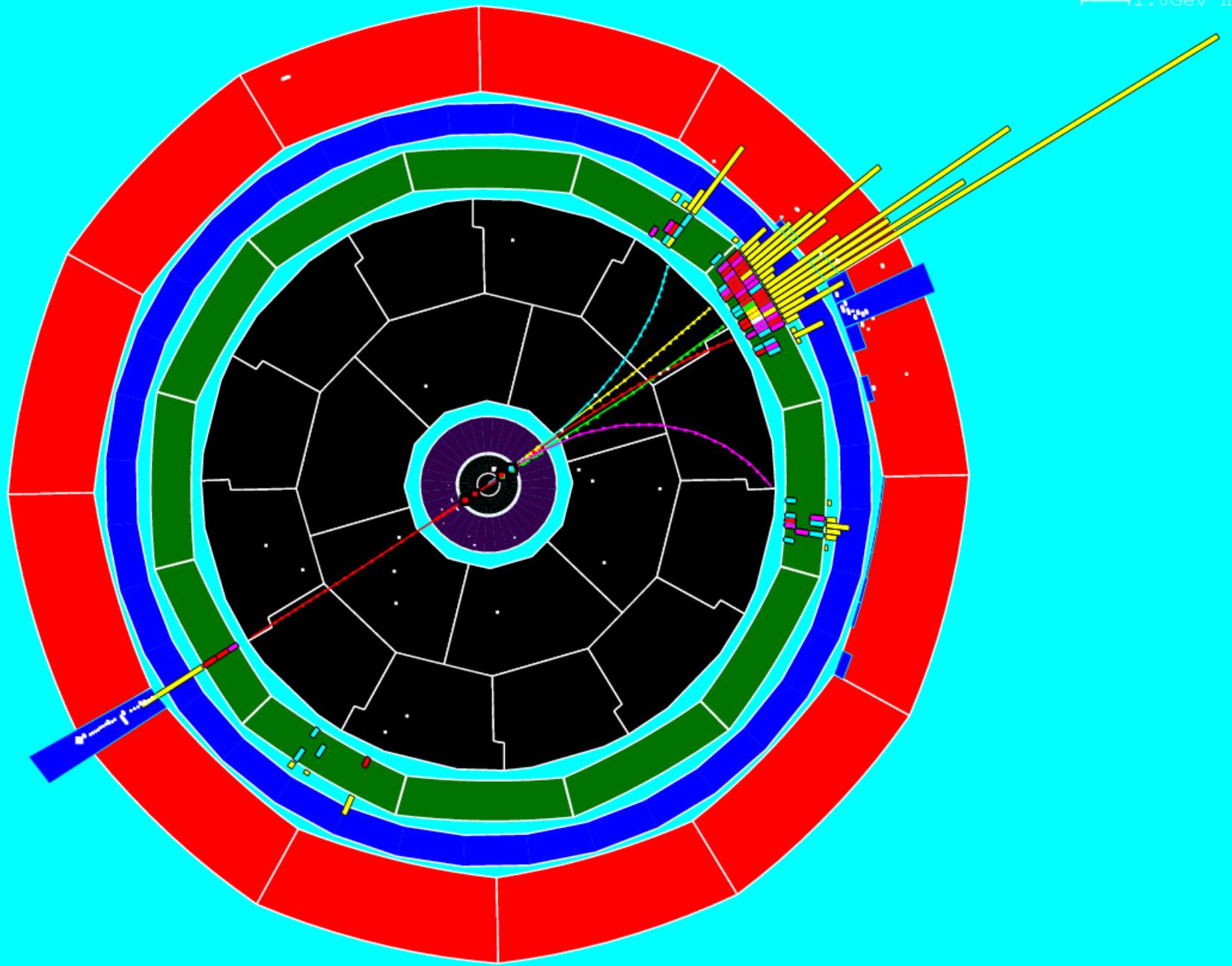


~3,6m



$Z \rightarrow \tau\tau \rightarrow \mu+5\pi+\nu's$

— 40Gev EC  
— 1.6Gev HC

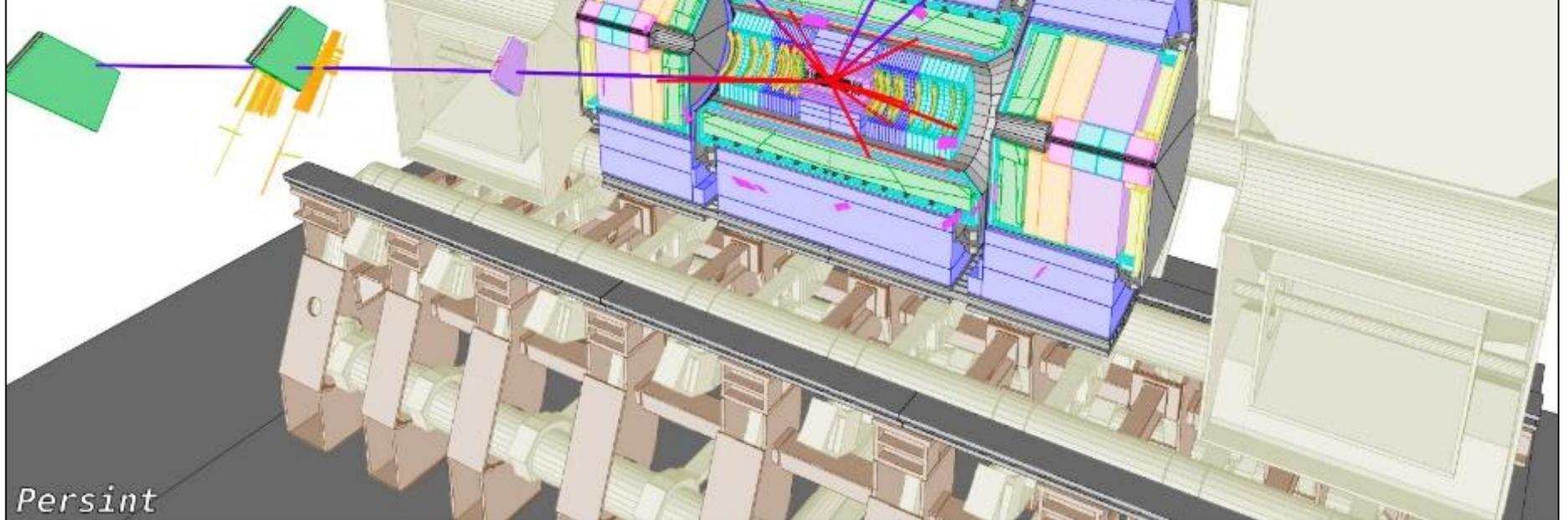


# ATLAS EXPERIMENT

Run Number: 190300,  
Event Number: 60554334  
Date: 2011-10-04, 05:25:26 CET

$E_t$  Cut > 0.3 GeV  
 $P_t$  Cut > 3.0 GeV  
Vertex Cuts:  
Z direction < 1cm  
R $_{\phi}$  < 1cm

Muon: blue  
Cells: Tiles, EMC

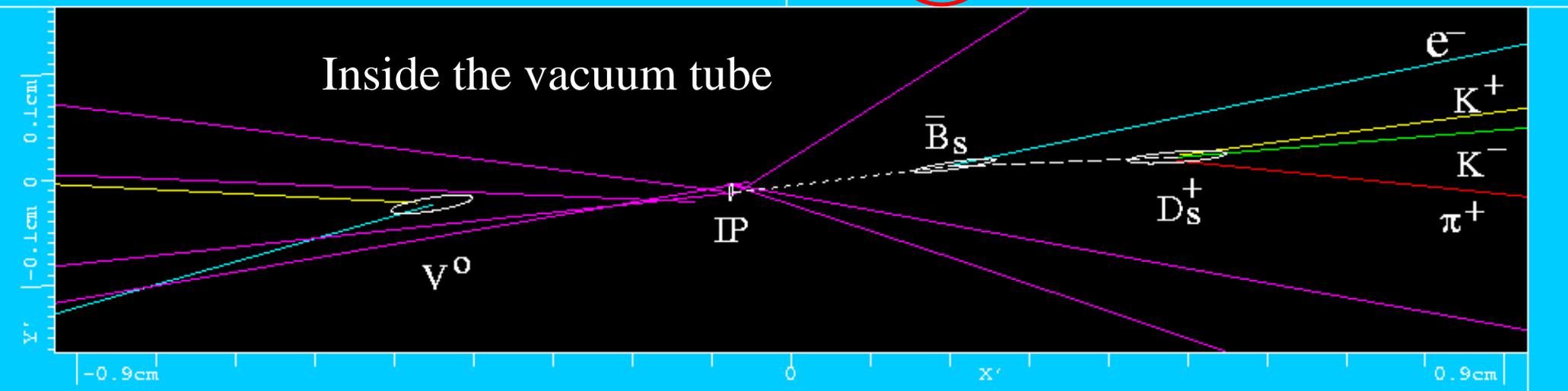
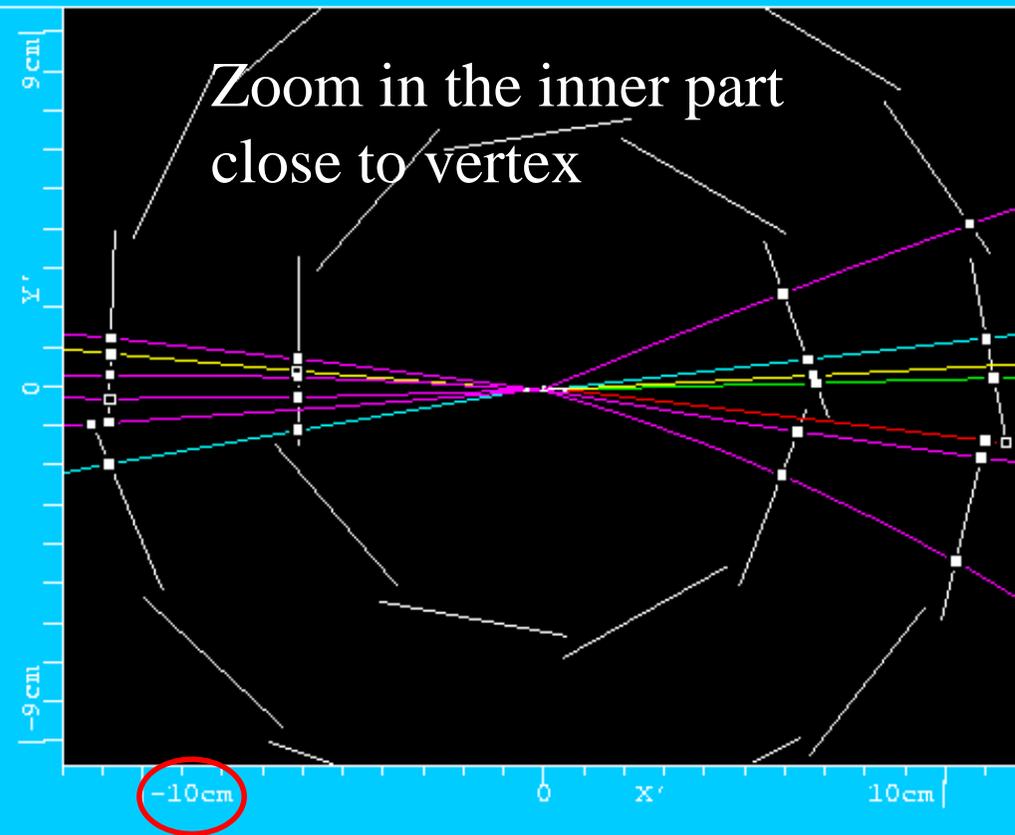
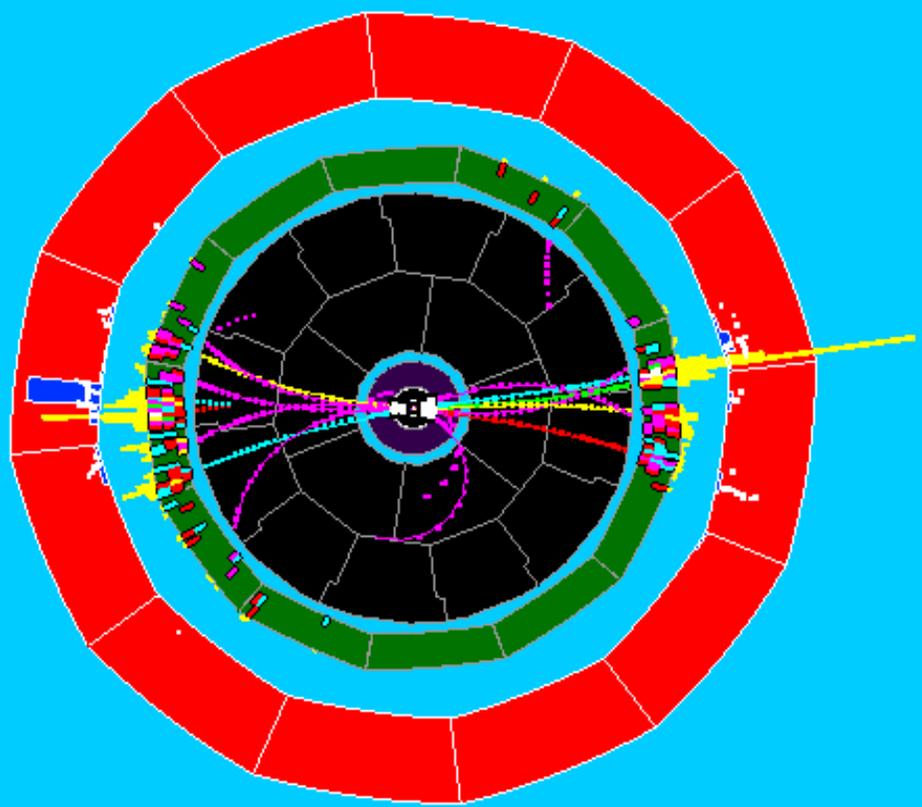


## Closer to the vertex

Some B mesons have a lifetime long enough to “flight”, thanks to Lorentz boost, over measurable distances : few 100 microns.

If we succeed to measure a secondary vertex, shifted from the initial one, one thus sign the existence of such a particular particle.

The exact flavour may/could be determine by decay products of this (secondary) particle.



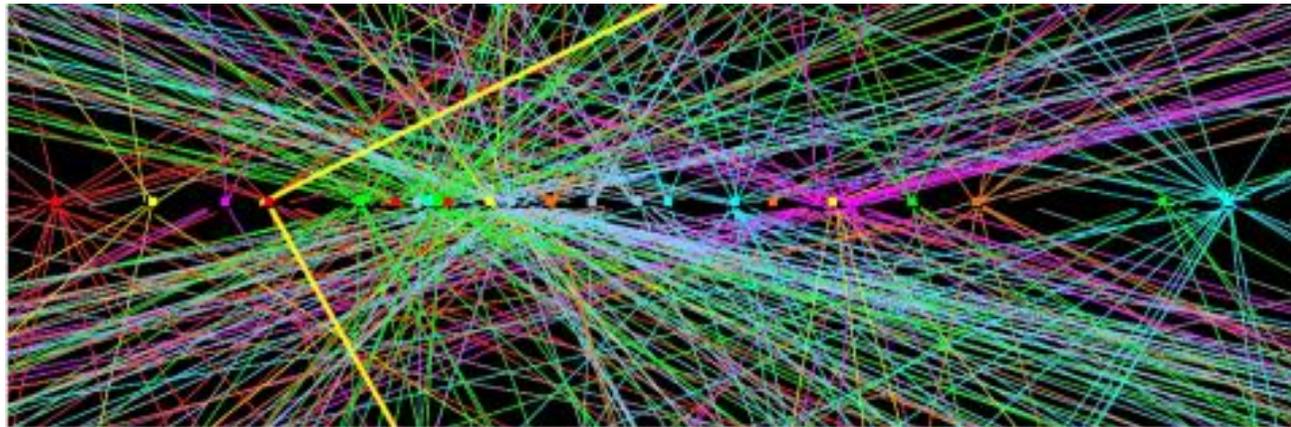
# Multi-collisions proton-proton au LHC

The # of events  $p+p \rightarrow X$  after some time  $T$  is :  $n_{\text{evt}} = \sigma_{\text{pp}}^{\text{total}} \cdot L \cdot T$

To increase this number, one need to increase  $L$  with  $L = f \cdot n_b \cdot n_1 \cdot n_2 / (4\pi \cdot d_x \cdot d_y)$

At LHC,  $n_{\text{max}} = 3808$  (*usually*  $> 2000$ )

$\Rightarrow$  By decreasing  $d_x$  – or  $d_y$  – the number of collisions per bunch will increase : this is the so called “pile-up”.

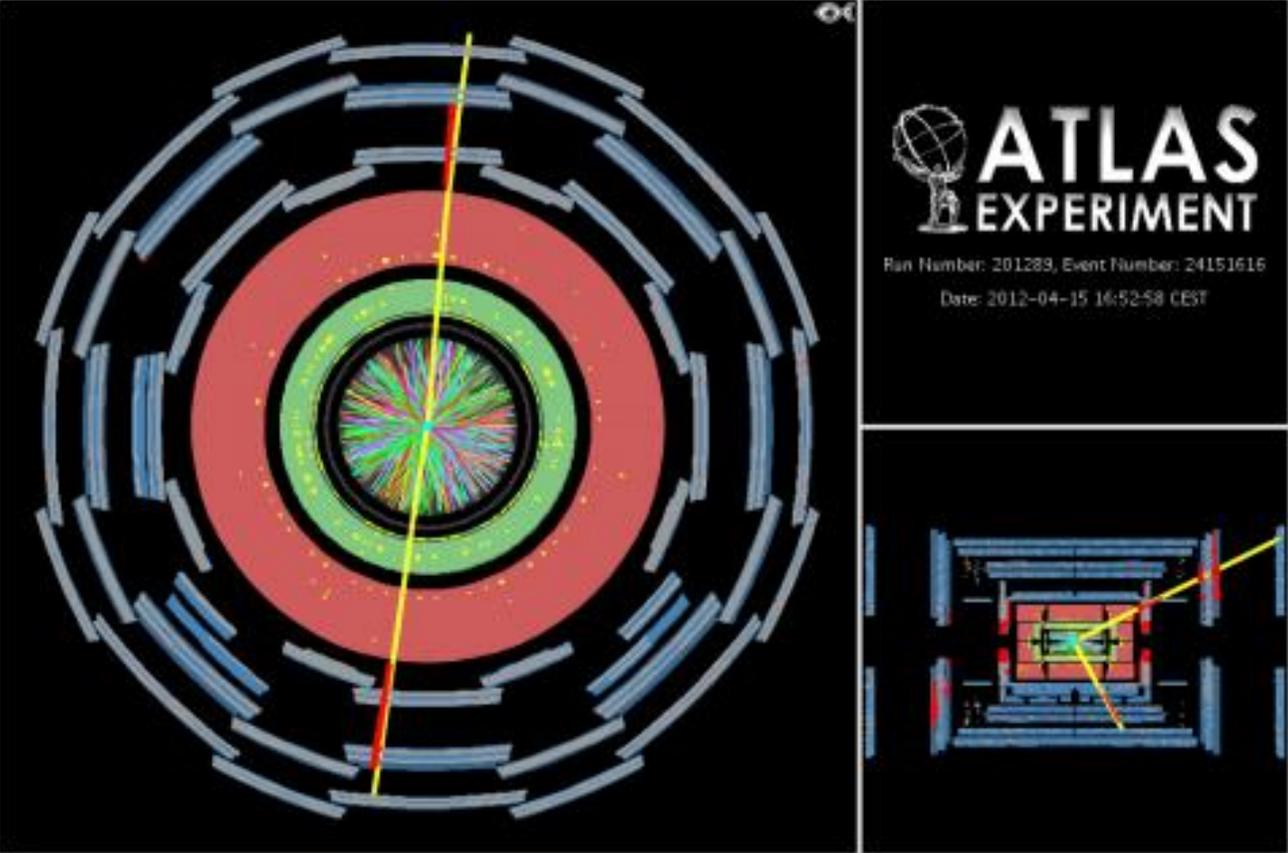


# proton-proton collision and final state at high energy

The # of e

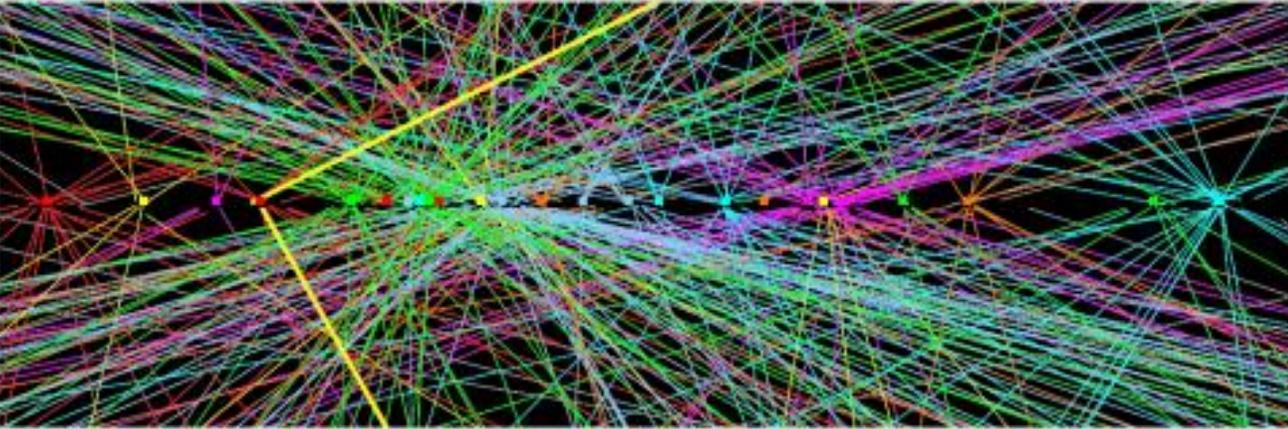
To increas  
At LHC, 1

⇒ By dec  
this is the



$d_x \cdot d_y$ )

increase :

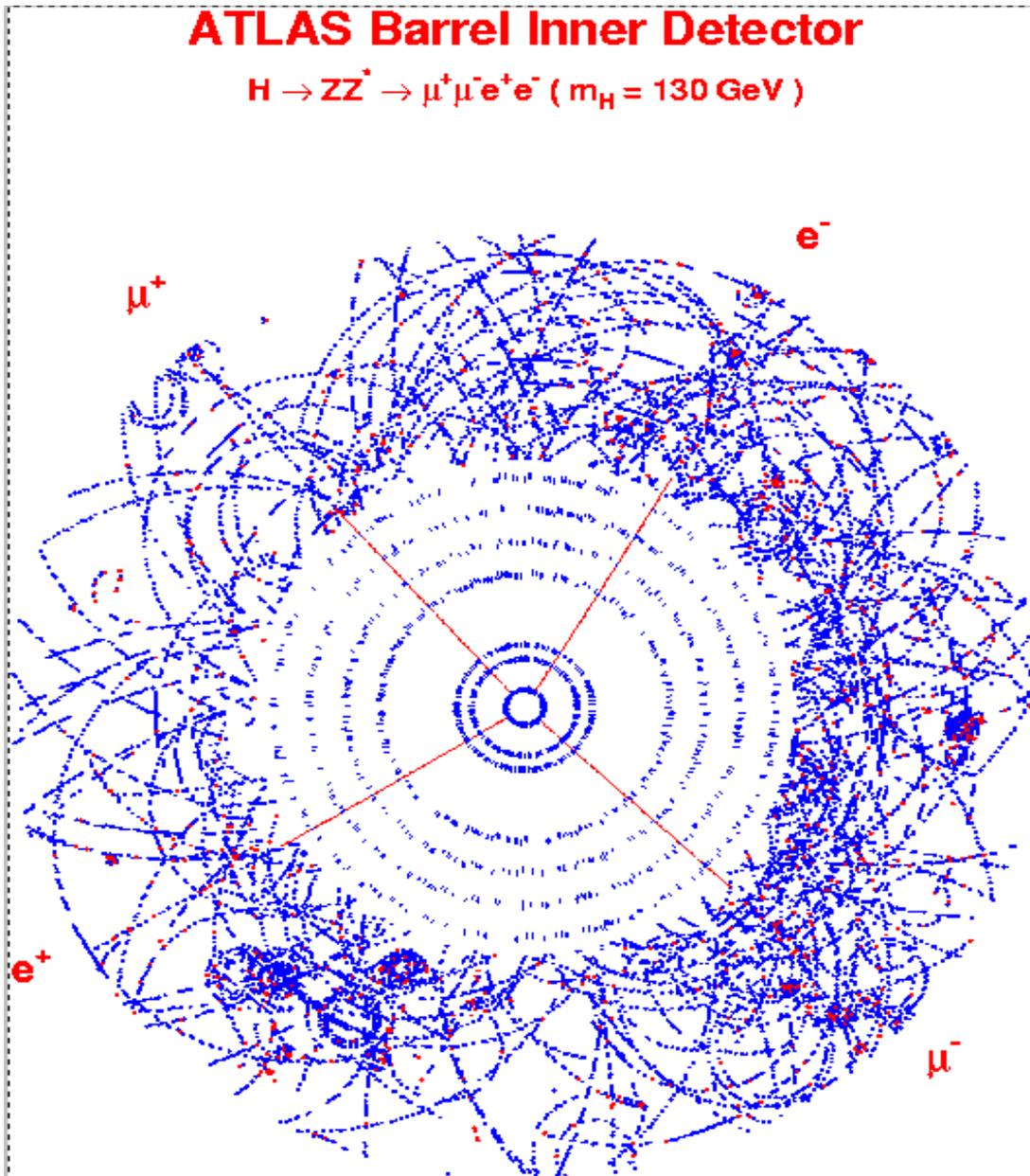


Example: simulation of  $H^0 \rightarrow Z Z^* \rightarrow e^+ e^- \mu^+ \mu^-$  in the ATLAS detector

$E_{CM} \sim 14 \text{ TeV}$

**ATLAS Barrel Inner Detector**

$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow \mu^+ \mu^- e^+ e^- (m_H = 130 \text{ GeV})$



$\sim 1\text{m}$

Each point blue/red is a hit in the inner detector

