

# *Physique Électromagnétique*

- Processus physiques
  - Les Modèles
  - Implémentation
- Seuil de production
- Diffusion (Coulombienne) multiple & Tracking
- Conclusion

# *Physique Électromagnétique*

- **Processus physiques**
  - Les Modèles
  - Implémentation
- Seuil de production
- Diffusion (Coulombienne) multiple & Tracking
- Conclusion

# *Processus Physiques: Généralités*

- Particules

- Toute les particules chargées
- Une particule neutre: le photon
- Hadrons (p, n, ...), ions ...: **physique hadronique**

- Modèles

- **Standard** (défaut):  $E > 1 \text{ keV}$
- Extension **basse énergie**:  $E > 250 \text{ eV}$



# *Processus Physiques: Classes & Particules*

- Total de 15 processus physiques
  - Regroupés dans ~40 classes
- Répartition:
  - Toutes les particules chargées
  - Muons
  - Electrons et positrons
  - Photons
  - Photons optiques

# *Physique Électromagnétique*

- **Processus physiques**
  - Les Modèles
  - Implémentation
- Seuil de production
- Diffusion (Coulombienne) multiple & Tracking
- Conclusion

# Modèle Standard

Particules	Processus	Plage en Energie
<b>Particules Chargées</b>	Ionisation Diffusion Coulombienne Effet Čerenkov Scintillation 'Transition Radiation'	>~keV >~keV
<b>Muons</b>	Production de paires ( $e^+$ , $e^-$ ) Bremsstrahlung Interactions nucléaires	>~100 GeV >~100 GeV >~1 TeV
<b>Electrons et Positrons</b>	Bremsstrahlung Annihilation de $e^+$	>~10 MeV
<b>Photons</b>	Conversion en paires ( $e^+$ , $e^-$ ) Diffusion incohérente Diffusion cohérente Effet photo-électrique	>~10 MeV ~100 keV-~10 MeV <~100 keV <~100 keV
<b>Photons Optiques</b>	Réflexion et réfraction Absorption Diffusion Rayleigh	



# *Modèle Basse Energie (a)*

<b>Particules</b>	<b>Processus</b>	<b>Plage en Energie</b>
<b>Photons, Electrons, Positrons, Hadrons et Ions</b>	Modèle Standard Fluorescence (dé-excitation)	> 250 eV

<b>Observable</b>	<b>Base de données</b>
<b>Section efficace (probabilité d'interaction)</b>	Evaluated Photon Data Library : EPDL97 Evaluated Electron Data Libray : EEDL Evaluated Atomic Data Library : EADL International Commission on Radiation Units : ICRU49 Energies de liaisons : Scofield

# *Modèle Basse Energie (b)*

- Bases de données
  - Mixture: expériences et théories
  - Extraites des libraries publiques: EEDL, EPDL ...
- Inclusion dans Geant4
  - **Sections efficaces totales**: effet photo-électrique, diffusions Compton et Rayleigh, production de paires et Bremsstrahlung
  - **Section efficaces intégrées des sous-couches**: effet photo-électrique et ionisation
  - **Spectres en énergie**: processus secondaires en  $e^-$



# *Modèle Basse Energie (c)*

- Inclusion dans Geant4 ...
  - Fonctions de diffusion: effet Compton
  - Facteurs de forme: diffusion Rayleigh
  - Probabilités de transition: sous-couches pour la fluorescence et l'effet Auger
  - Tableaux de données: pour 'stopping power'

# *Physique Électromagnétique*

- **Processus physiques**
  - Les Modèles
  - Implémentation
- Seuil de production
- Diffusion (Coulombienne) multiple & Tracking
- Conclusion



# *Implementation dans Geant4: Actions/Méthodes (a)*

- Processus peuvent avoir 3 actions possibles
  - Précise location dans l'espace : **PostStep**
  - Imprécise location dans l'espace : **AlongStep**
  - Précise location en temps : **AtRest**
  
- Pour chaque action
  - Prédire où/quand l'interaction a lieu **GetPhysicalInteractionLength()**
  - Evaluer l'état final de l'interaction **DoIt()**



# *Implementation dans Geant4: Actions/Méthodes (b)*

	PostStep	AlongStep	AtRest
GetPhysicalInteractionLength()			
DoIt()			

- Processus doit remplir l'une ou plus des 3 actions possibles
- Correspondance
  - Processus discrets : **DiscreteProcess** : Seulement **PostStep**
  - Processus continus : **ContinuousProcess** : Seulement **AlongStep**
  - Processus au repos : **AtRestProcess** : Seulement **AtRest**

# *Implementation dans Geant4: Actions/Méthodes - Exemples (c)*

- Processus 'purs'

- **Processus discrets** : Diffusion Compton

Le pas est déterminé par la valeur de la section efficace et l'interaction à la fin du pas (**PostStepAction**)

- **Processus continus** : Effet Čerenkov

Photons sont créés le long du pas (**AlongStep**)

Nombre de photons est proportionnel à la longueur du pas

- **Processus au repos** : Annihilation de  $e^+$

Pas de déplacement (**AtRest**)

Variable importante: le temps



# *Implementation dans Geant4: Actions/Méthodes (d)*

- Combinaison de processus
  - **Ionisation**: continue (perte d'énergie) + discret (Diffusion Möller/Bhabha, production de 'knock on'  $e^-$ )
  - **Bremsstrahlung**: continue (perte d'énergie par emission de photons mous) + discret (perte d'énergie par emission de photons durs)



# *Implementation dans Geant4: Actions/Méthodes (e)*

- Seuil de production
  - Energie minimale pour un processus physique donné
  - $E_{\text{cinétique}}(\text{particule secondaire}) \leq E_{\text{seuil}}$ 
    - Particule secondaire pas créée
    - Interaction traitée comme continue
  - $E_{\text{cinétique}}(\text{particule secondaire}) \geq E_{\text{seuil}}$ 
    - Particule secondaire créée en fin du pas
    - Action: PostStep

# *Implementation dans Geant4: Priorités*

- Liste des processus maintenu par: **ProcessManager**
- Ordre de priorité: **AtRest**, **AlongStep** et **PostStep**
  - Enregistré dans la class `UserPhysicsList`
- Implementation

`pmanager→AddProcess(new 'Processus', AtRest, AlongStep, PostStep)`

-1	Pas utilisé
0	Toujours
1	Choix primaire
2	Choix secondaire
...	



# *Implementation dans Geant4: Exemple de Liste (a)*

```
if (particleName == "e-") {  
pmanager->AddProcess(new G4MultipleScattering, -1, 1,1);  
pmanager->AddProcess(new G4eIonisation, -1, 2,2);  
pmanager->AddProcess(new G4eBremsstrahlung, -1,-1,3);  
}
```

```
else if (particleName == "e+") {  
pmanager->AddProcess(new G4MultipleScattering, -1, 1,1);  
pmanager->AddProcess(new G4eIonisation, -1, 2,2);  
pmanager->AddProcess(new G4eBremsstrahlung, -1,-1,3);  
pmanager->AddProcess(new G4eplusAnnihilation, 0,-1,4);  
}
```



# *Implementation dans Geant4: Exemple de Liste (b)*

```
if (particleName == "mu+" || particleName == "mu-") {  
  pmanager->AddProcess(new G4MultipleScattering, -1, 1,1);  
  pmanager->AddProcess(new G4MuIonisation,      -1, 2,2);  
  pmanager->AddProcess(new G4MuBremsstrahlung,  -1,-1,3);  
  pmanager->AddProcess(new G4MuPairProduction,  -1,-1,4);  
}
```

```
if ((particle->GetPDGCharge() != 0.0) &&  
    (!particle->IsShortLived()) &&  
    (particle->GetParticleName() != "chargedgeantino")) {  
  pmanager->AddProcess(new G4MultipleScattering, -1,1,1);  
  pmanager->AddProcess(new G4hIonisation,      -1,2,2);  
}
```

# *Implementation dans Geant4: Exemple de Liste (c)*

```
if (particleName == "gamma") {  
pmanager->AddDiscreteProcess(new G4PhotoElectricEffect);  
pmanager->AddDiscreteProcess(new G4ComptonScattering);  
pmanager->AddDiscreteProcess(new G4GammaConversion);  
}
```

is a shortcut for :

```
pmanager->AddProcess(new G4PhotoElectricEffect, -1,-1,1);  
pmanager->AddProcess(new G4ComptonScattering, -1,-1,2);  
pmanager->AddProcess(new G4GammaConversion, -1,-1,3);
```

Processus avec seulement une action PostStep: ordre n'est pas important!

# *Physique Électromagnétique*

- Processus physiques
  - Les Modèles
  - Implémentation
- Seuil de production
- Diffusion (Coulombienne) multiple & Tracking
- Conclusion



# *Seuil de Production: Définition (a)*

- Relation distance-énergie
  - Perte d'énergie par unité de distance:  $dE/dx$
  - Dépendance: particule incidente & matériau
  
- Deux choix possibles
  - Fixer  $dE$  et calculer la distance parcourue  $dx$
  - Fixer  $dx$  et calculer l'énergie perdue  $dE$

# *Seuil de Production: Definition (b)*

- Dans **Geant4**: parcours moyen d'une particule chargée d'énergie cinétique E

$$R(E) = \int_{\epsilon=0}^{\epsilon=E} \left[ \frac{dE}{dx} \right]^{-1} d\epsilon$$

- $R(E)$  utilisation intensive pour le:
  - Control du '**stepping**' des particules chargées
  - Control de la **perte d'énergie** des particules chargées
  - Control de la **production des particules secondaires** ('cut in range')



# *Seuil de Production: Stepping of Charge Particles (a)*

- Perte d'énergie continue
  - Impose une **limite sur la taille du pas**
- Section efficace ( $\sigma$ )
  - $\sigma \propto E$  : dépend de l'énergie incidente
  - Perte d'énergie à chaque pas
  - Taille du pas doit être suffisamment petite

$$E \approx \text{cste} \rightarrow \sigma \approx \text{cste}$$

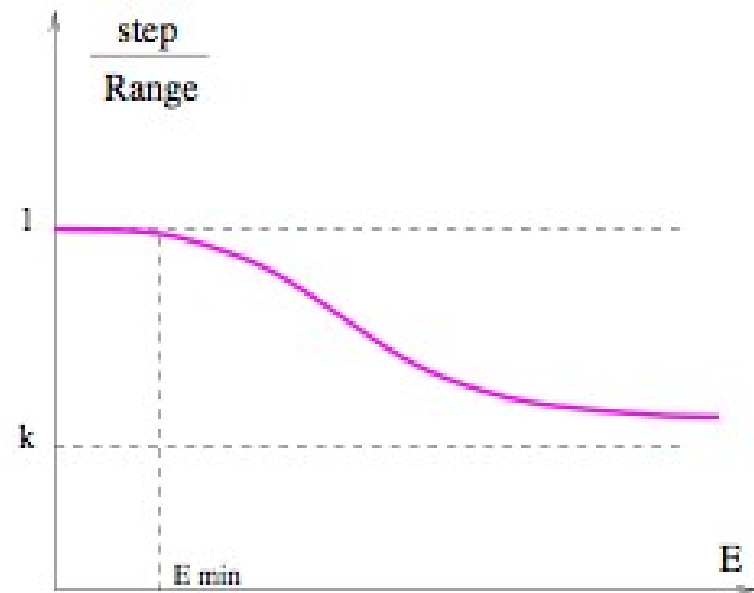
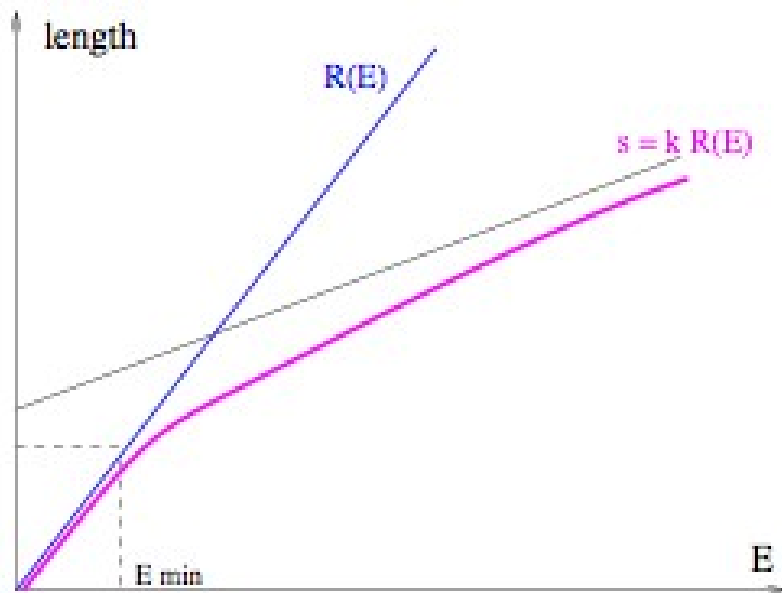
→ Perte d'énergie le long du pas:

$$dE = \text{petite fraction de } E$$



# *Seuil de Production: Stepping of Charge Particles (b)*

- Relaxer la contrainte quand  $E \rightarrow 0$ :  
Le pas approche le 'stopping range' de la particule



# *Seuil de Production: Perte d'Énergie Moyenne*

- Perte d'énergie pour chaque pas

Estimée à partir des tableaux

Range et Inverse Range

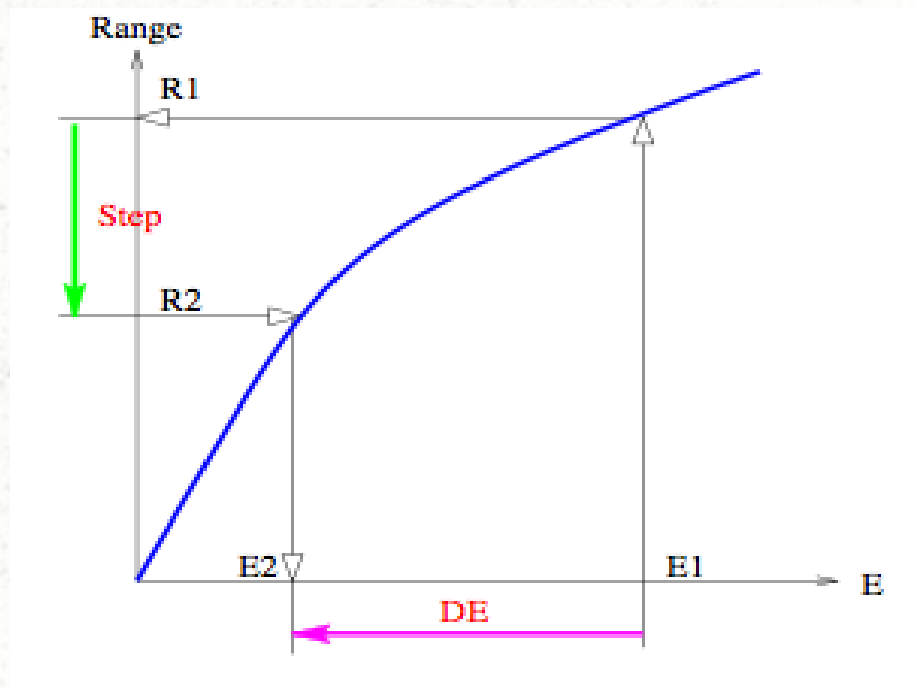
- Plus précis que

$$\Delta E = (dE/dx) * stepLength$$

- Calcul similaire pour le **temps de vie** des particules

Estimée à partir de tableaux

Perte d'énergie le long du pas prise en compte (diminution de la vitesse)



# *Seuil de Production: Particules Secondaires(a)*

- Seuil exprimé en terme de distance ('range') et non en terme d'énergie pour les particules chargées et photons
- Pas de différence dans les milieux homogènes
- Example: Pb + Ar liquide + Pb + Ar liquide

Chaque couche à 1 mm d'épaisseur → coupure/seuil: 1 (0.1) mm

Induit une coupure en energie [  $E_{Ar}^{cut} < E_{Pb}^{cut}$  ]: physique cohérente

Même coupure en énergie dans chaque matériau: physique incohérente

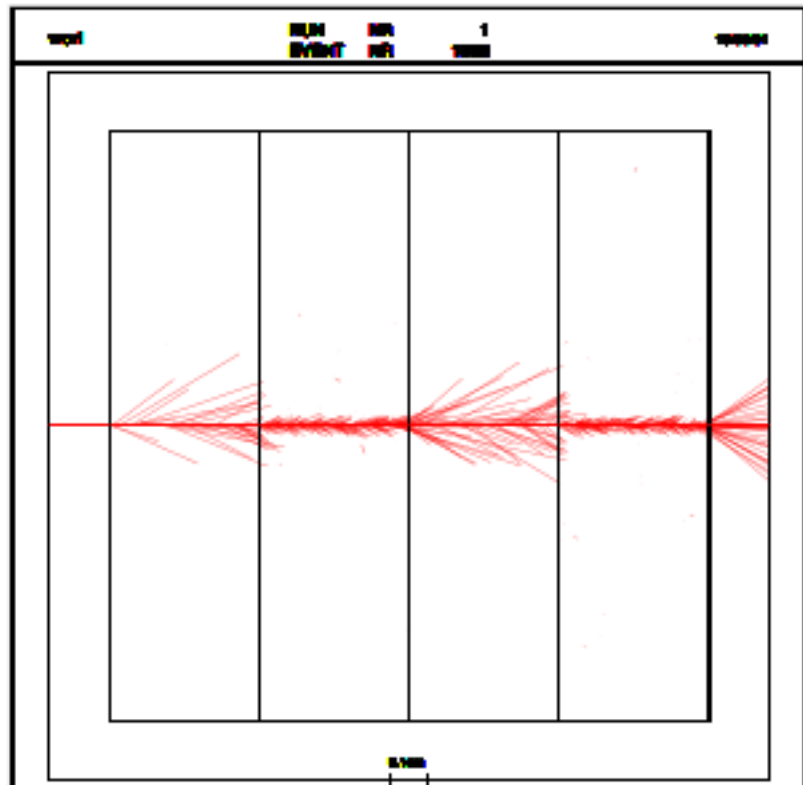
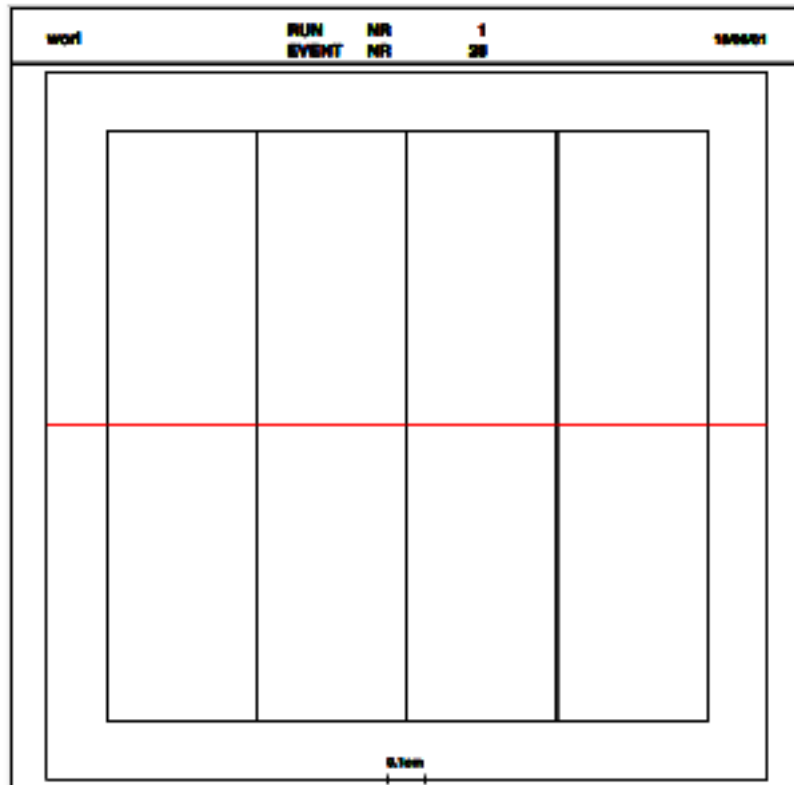
- Hautes coupures: mauvaise physique
- Basses coupures: dégrade l'efficacité (vitesse d'exécution du code)



# *Seuil de Production: Particules Secondaires(b)*

Simulation: Arl (4 mm), Pb (4 mm), Protons (500 MeV)

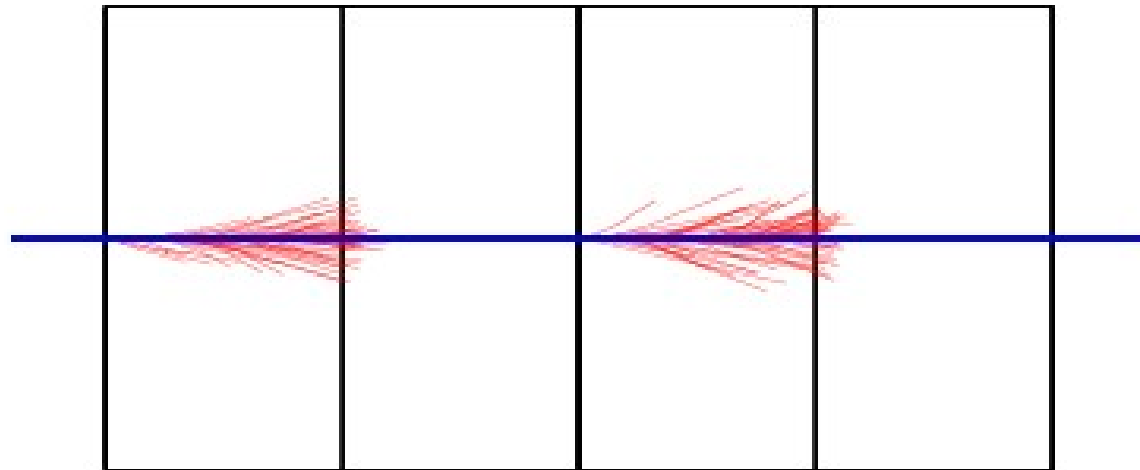
Geant3: cut = 2 MeV (gauche), 450 keV (droite)



# *Seuil de Production: Particules Secondaires(c)*

Simulation: Arl (4 mm), Pb (4 mm), Protons (500 MeV)

Geant4: cut = 1.5 mm [450 keV (Arl), 2 MeV (Pb)]



# *Physique Électromagnétique*

- Processus physiques
  - Les Modèles
  - Implémentation
- Seuil de production
- Diffusion (Coulombienne) multiple & Tracking
- Conclusion



# *Diffusion Coulombienne Multiple*

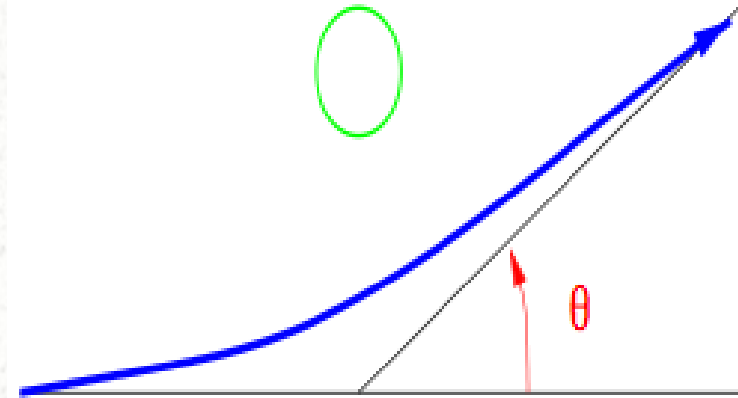
## *Tracking de Particules Chargées (a)*

### Diffusion Coulombienne

Déviaton par un potentiel Coulombien

Formule de Rutherford

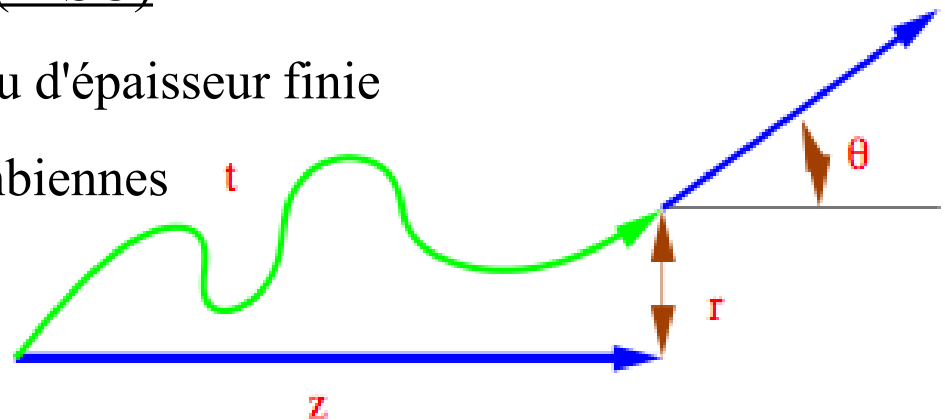
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r_e^2 z_p^2 Z^2}{4} \left( \frac{mc}{\beta p} \right)^2 \frac{1}{\sin^4 \Theta/2}$$



### Diffusion Coulombienne Multiple (MSC)

Déviaton après traversée d'un matériau d'épaisseur finie

Plusieurs diffusions élastiques Coulombiennes



# *Diffusion Coulombienne Multiple Tracking de Particules Chargées (b)*

## Implantation dans les codes de simulation

- **Simulation détaillée (microscopique)**: calcul exact mais prend trop de temps si l'énergie est faible. Utilisation: basse énergie
- **Simulation condensée**: obtient un effet global des collisions dans le cas de pas macroscopiques. Utilise des approximations  
Exemples de code: EGS, Geant3, Geant4
- **Algorithmes mixed**: collisions dures individuelles plus effet global pour les 'soft' collisions

Exemples de code: Penelope



# *Diffusion Coulombienne Multiple*

## *Tracking de Particules Chargées (c)*

### Implantation dans Geant4

- 1) Prendre le plus petit pas de tous les processus physique autres que MSC

$$t = \min(t_{proc1}, t_{proc2}, \dots, t_{procn})$$

- 2) Transformer  $t \rightarrow z: f(z, (t, \lambda)) \rightarrow z_{phys}$  [t: réel, z: géométrique]

Effectué par `AlongStepGetPhysicalInteractionLength()`

- 3) Demander le pas limit ( $z_{geom}$ ) à la géométrie

- 4) Prendre le pas final comme  $z_{step} = \min(z_{phys}, z_{geom})$



# *Diffusion Coulombienne Multiple*

## *Tracking de Particules Chargées (d)*

### Implantation dans Geant4 ...

0) Calculer la longueur de pas réelle:  $z_{step} \rightarrow t_{step}$

Fait par **AlongStepDoIt()**

1) Génération aléatoire de la fonction  $g(\cos\Theta, (t, \lambda))$

$\lambda$ : libre parcours moyen ( $\sigma = 1/\lambda$ )

Fait par **PostStepDoIt()**

2) Génération uniforme de  $\Phi$  entre  $[0, 2\pi]$

3) Calculer l'amplitude et la direction du déplacement latéral ( $r$ )

# *Diffusion Coulombienne Multiple Tracking de Particules Chargées (e)*

## Implantation dans Geant4 ...

- 9) Avant tout déplacement: **test final** pour s'assurer que la particule est encore dans les limites du volume considéré

Fait par **PostStepDoIt()**

MSC est un processus continu: ContinuousDiscretProcess

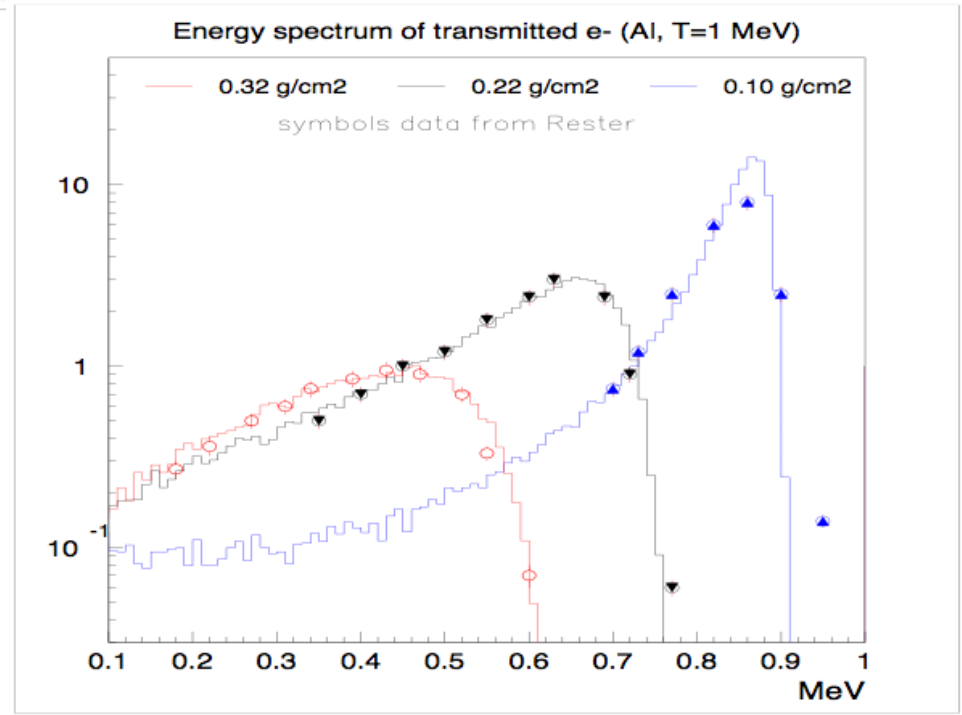
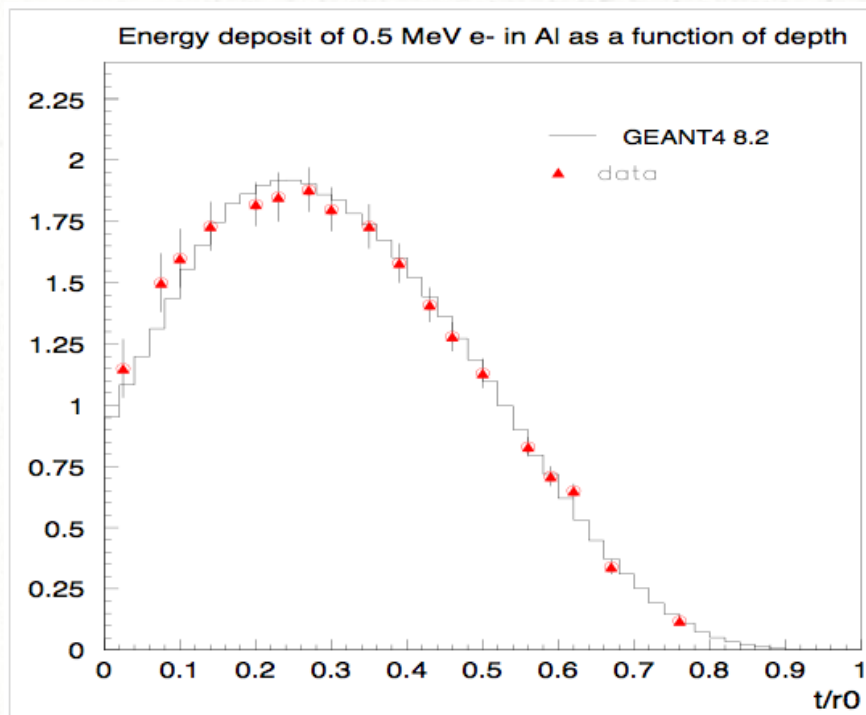
Note: pour prendre en compte les effets nucléaires,  $\sigma \rightarrow \sigma_0 F(q)$

F: facteur de forme du noyau obtenu par l'Approximation de Born



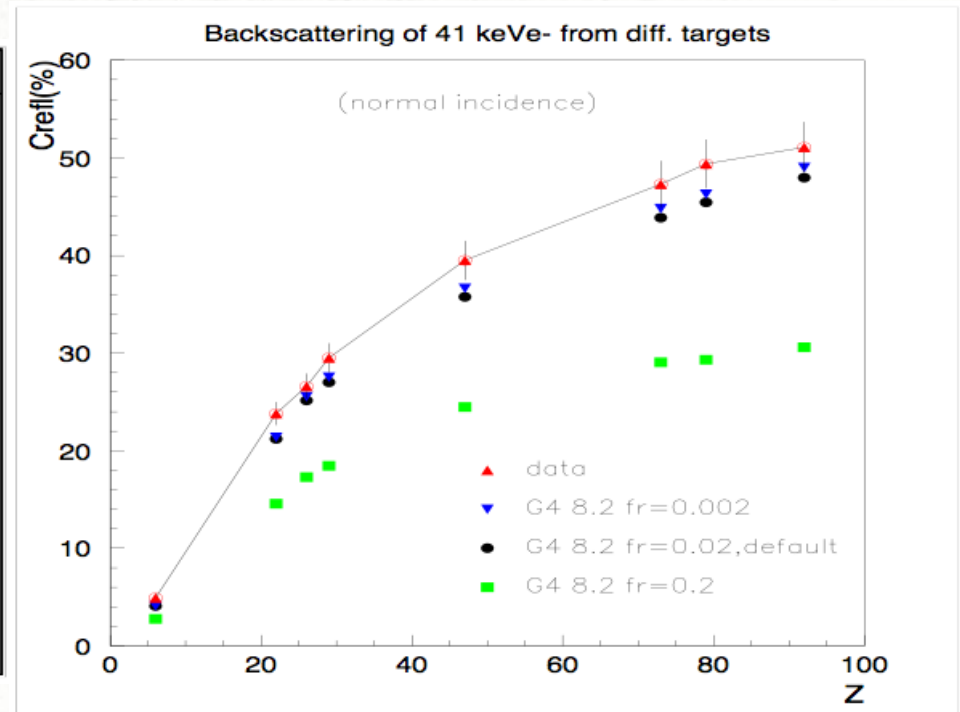
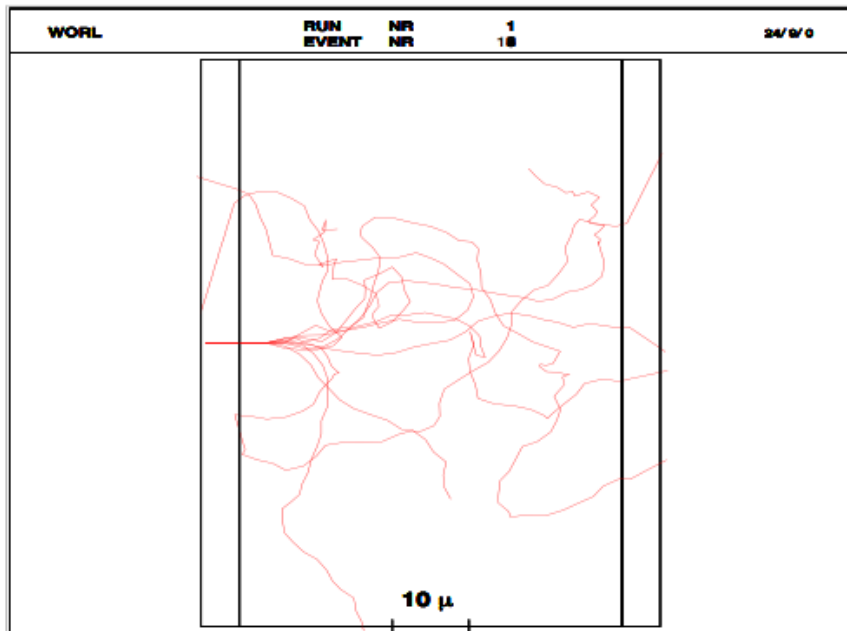
# *Diffusion Coulombienne Multiple*

## *Tracking de Particules Chargées (f)*





# Diffusion Coulombienne Multiple Tracking de Particules Chargées (g)



Backscattering:  $10 e^-$ ,  $E_{inc} = 600 \text{ keV}$ , cible:  
 $50 \mu\text{m}$  Tungstène –  $4 e^-$  transmis et  $2 e^-$   
 backscattered

# *Physique Électromagnétique*

- Processus physiques
  - Les Modèles
  - Implémentation
- Seuil de production
- Diffusion (Coulombienne) multiple & Tracking
- Conclusion

# *Conclusion*

- Application: exercice cette après-midi
- Plus de détails: [Documentation Geant4](#) (jour 3)
- Inspiré de cours réalisés par M. Maire