

Modélisation des cascades électromagnétiques dans le milieu intergalactique

David SARRIA
Université de Toulouse
Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie



12 Juin 2012
Soutenance de stage
Encadrant : Julien Malzac



Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Modélisation du fond diffus
- 3 Taux d'interaction et profondeurs optiques
 - Définitions et calcul
 - Production de paire
 - Diffusion Compton
- 4 Transport des particules entre les interactions
 - Méthode
 - Résultats
- 5 Monte-Carlo
- 6 Exemple de résultats du programme
- 7 Conclusion et perspectives

Introduction : Cadre et enjeux

- Astrophysique des hautes énergies → HESS, MAGIC, VERITAS, CTA ?
- Fortement lié à : fonds diffus, cosmologie et champ magnétique extragalactique (EGMF).
- Pas d'observation claire → travail de modélisation
⇒ calculs théoriques + numériques.
- ⇒ Contraintes sur l'EGMF, fonds diffus de rayonnement, autres ?

Introduction : Cadre et enjeux

- Astrophysique des hautes énergies → HESS, MAGIC, VERITAS, CTA ?
- Fortement lié à : fonds diffus, cosmologie et champ magnétique extragalactique (EGMF).
- Pas d'observation claire → travail de modélisation
⇒ calculs théoriques + numériques.
- ⇒ Contraintes sur l'EGMF, fonds diffus de rayonnement, autres ?

Introduction : Cadre et enjeux

- Astrophysique des hautes énergies → HESS, MAGIC, VERITAS, CTA ?
- Fortement lié à : fonds diffus, cosmologie et champ magnétique extragalactique (EGMF).
- Pas d'observation claire → travail de modélisation
⇒ calculs théoriques + numériques.
- ⇒ Contraintes sur l'EGMF, fonds diffus de rayonnement, autres ?

Introduction : Cadre et enjeux

- Astrophysique des hautes énergies → HESS, MAGIC, VERITAS, CTA ?
- Fortement lié à : fonds diffus, cosmologie et champ magnétique extragalactique (EGMF).
- Pas d'observation claire → travail de modélisation
⇒ calculs théoriques + numériques.
- ⇒ Contraintes sur l'EGMF, fonds diffus de rayonnement, autres ?

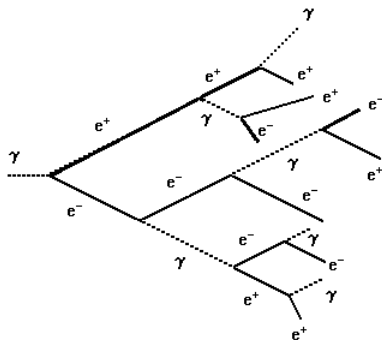
Introduction : Cadre et enjeux

- Astrophysique des hautes énergies → HESS, MAGIC, VERITAS, CTA ?
- Fortement lié à : fonds diffus, cosmologie et champ magnétique extragalactique (EGMF).
- Pas d'observation claire → travail de modélisation
⇒ calculs théoriques + numériques.
- ⇒ Contraintes sur l'EGMF, fonds diffus de rayonnement, autres ?

Introduction : cascades, késako ?

Trois processus :

- Création de paire : $\gamma + \gamma_{milieu} \rightarrow e^+ + e^-$
- Diffusion Compton inverse : $e^\pm + \gamma_{milieu} \rightarrow e^\pm + \gamma_{milieu}$
- Effets de l'EGMF : rayonnement synchrotron et déviation des électrons/positrons

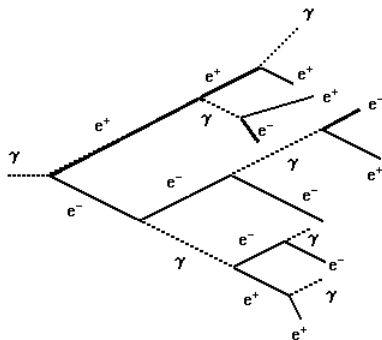


Le tout dans un univers en expansion.

Introduction : cascades, késako ?

Trois processus :

- Création de paire : $\gamma + \gamma_{milieu} \rightarrow e^+ + e^-$
- Diffusion Compton inverse : $e^\pm + \gamma_{milieu} \rightarrow e^\pm + \gamma_{milieu}$
- Effets de l'EGMF : rayonnement synchrotron et déviation des électrons/positrons

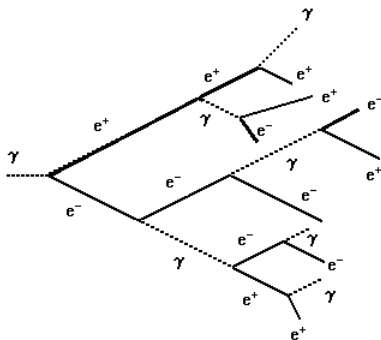


Le tout dans un univers en expansion.

Introduction : cascades, késako ?

Trois processus :

- Création de paire : $\gamma + \gamma_{milieu} \rightarrow e^+ + e^-$
- Diffusion Compton inverse : $e^\pm + \gamma_{milieu} \rightarrow e^\pm + \gamma_{milieu}$
- Effets de l'EGMF : rayonnement synchrotron et déviation des électrons/positrons

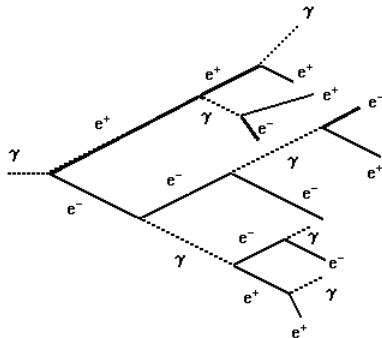


Le tout dans un univers en expansion.

Introduction : cascades, késako ?

Trois processus :

- Création de paire : $\gamma + \gamma_{milieu} \rightarrow e^+ + e^-$
- Diffusion Compton inverse : $e^\pm + \gamma_{milieu} \rightarrow e^\pm + \gamma_{milieu}$
- Effets de l'EGMF : rayonnement synchrotron et déviation des électrons/positrons

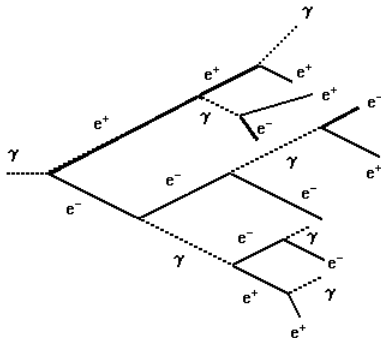


Le tout dans un univers
en expansion.

Introduction : cascades ?

Trois processus :

- Création de paire : $\gamma + \gamma_{milieu} \rightarrow e^+ + e^-$
- Diffusion Compton inverse : $e^\pm + \gamma_{milieu} \rightarrow e^\pm + \gamma_{milieu}$
- Effets de l'EGMF : rayonnement synchrotron et déviation des électrons/positrons



Le tout dans un univers
en expansion

Fond diffus : EBL + CMB

EBL

- Extragalactic Background Light
= Lumière diffuse extragalactique
- Radiation due à la formation d'étoiles, + AGNs
(UV, visible et IR)
- \exists plusieurs modèles d'EBL
→ utilisation de fichiers de données de Dominguez et al.
(arXiv :1007.1459v4), <http://side.iaa.es/EBL/>

CMB

- Cosmic Microwave Background
= fond diffus cosmologique micro-onde
- Modélisation simple : Corps noir à $T_0 = 2.725(1+z)$ K

Fond diffus : EBL + CMB

EBL

- Extragalactic Background Light
= Lumière diffuse extragalactique
- Radiation due à la formation d'étoiles, + AGNs
(UV, visible et IR)
- \exists plusieurs modèles d'EBL
→ utilisation de fichiers de données de Dominguez et al.
(arXiv :1007.1459v4), <http://side.iaa.es/EBL/>

CMB

- Cosmic Microwave Background
= fond diffus cosmologique micro-onde
- Modélisation simple : Corps noir à $T_0 = 2.725(1+z)$ K

Fond diffus : EBL + CMB

EBL

- Extragalactic Background Light
= Lumière diffuse extragalactique
- Radiation due à la formation d'étoiles, + AGNs
(UV, visible et IR)
- \exists plusieurs modèles d'EBL
→ utilisation de fichiers de données de Dominguez et al.
(arXiv :1007.1459v4), <http://side.iaa.es/EBL/>

CMB

- Cosmic Microwave Background
= fond diffus cosmologique micro-onde
- Modélisation simple : Corps noir à $T_0 = 2.725(1+z)$ K

Fond diffus : EBL + CMB

EBL

- Extragalactic Background Light
= Lumière diffuse extragalactique
- Radiation due à la formation d'étoiles, + AGNs
(UV, visible et IR)
- \exists plusieurs modèles d'EBL
→ utilisation de fichiers de données de Dominguez et al.
(arXiv :1007.1459v4), <http://side.iaa.es/EBL/>

CMB

- Cosmic Microwave Background
= fond diffus cosmologique micro-onde
- Modélisation simple : Corps noir à $T_0 = 2.725(1+z)$ K

Fond diffus : EBL + CMB

EBL

- Extragalactic Background Light
= Lumière diffuse extragalactique
- Radiation due à la formation d'étoiles, + AGNs
(UV, visible et IR)
- \exists plusieurs modèles d'EBL
→ utilisation de fichiers de données de Dominguez et al.
(arXiv :1007.1459v4), <http://side.iaa.es/EBL/>

CMB

- Cosmic Microwave Background
= fond diffus cosmologique micro-onde
- Modélisation simple : Corps noir à $T_0 = 2.725(1+z)$ K

Fond diffus : EBL + CMB

EBL

- Extragalactic Background Light
= Lumière diffuse extragalactique
- Radiation due à la formation d'étoiles, + AGNs
(UV, visible et IR)
- \exists plusieurs modèles d'EBL
→ utilisation de fichiers de données de Dominguez et al.
(arXiv :1007.1459v4), <http://side.iaa.es/EBL/>

CMB

- Cosmic Microwave Background
= fond diffus cosmologique micro-onde
- Modélisation simple : Corps noir à $T_0 = 2.725(1+z)$ K

Fond diffus : EBL + CMB

EBL

- Extragalactic Background Light
= Lumière diffuse extragalactique
- Radiation due à la formation d'étoiles, + AGNs
(UV, visible et IR)
- \exists plusieurs modèles d'EBL
→ utilisation de fichiers de données de Dominguez et al.
(arXiv :1007.1459v4), <http://side.iaa.es/EBL/>

CMB

- Cosmic Microwave Background
= fond diffus cosmologique micro-onde
- Modélisation simple : Corps noir à $T_0 = 2.725(1+z)$ K

Fond diffus : EBL + CMB

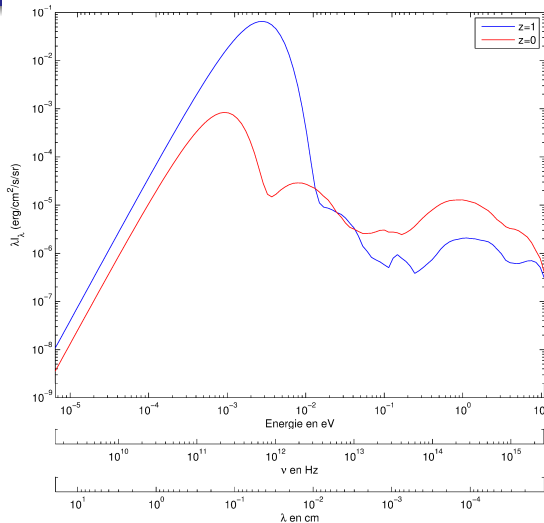
EBL

- Extragalactic Background Light
= Lumière diffuse extragalactique
- Radiation due à la formation d'étoiles, + AGNs
(UV, visible et IR)
- \exists plusieurs modèles d'EBL
→ utilisation de fichiers de données de Dominguez et al.
(arXiv :1007.1459v4), <http://side.iaa.es/EBL/>

CMB

- Cosmic Microwave Background
= fond diffus cosmologique micro-onde
- Modélisation simple : Corps noir à $T_0 = 2.725(1+z)$ K

Fond diffus : distribution spectrale d'énergie



Définitions et calcul

$$\frac{d\tau}{dx} = \int \int \frac{1}{2} \sigma n(\epsilon) (1 - \beta \cos\theta) \sin\theta d\epsilon d\theta$$

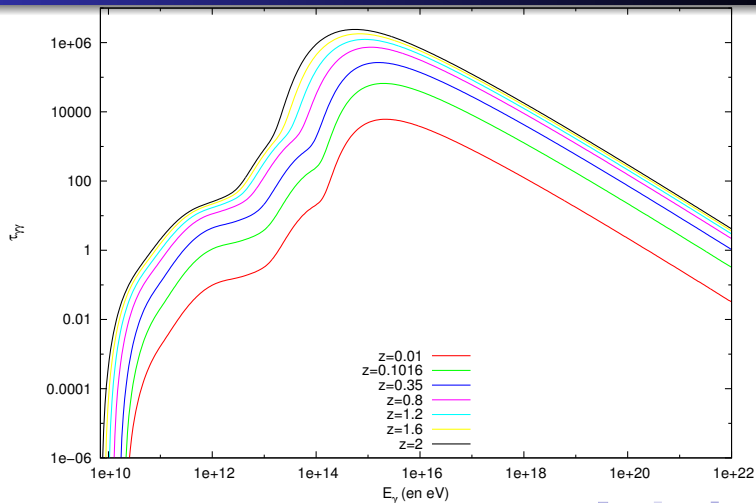
$$\tau = \frac{c}{H_0} \int_0^z \frac{d\tau}{dx} \frac{\beta(z') dz'}{(1+z') \sqrt{\Omega_M (1+z')^3 + \Omega_k (1+z')^2 + \Omega_\Lambda}}$$

Modèle Λ CDM de concordance : $\Omega_M = 0.3, \Omega_\Lambda = 0.7, \Omega_k = 0$.

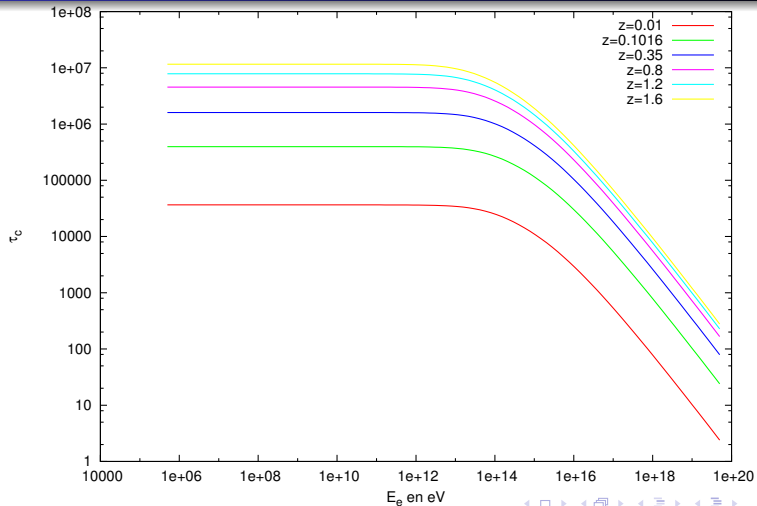
Ces intégrales ne sont pas calculables analytiquement

→ intégration numérique

Production de paire



Diffusion Compton



Transport des particules : méthode

Robertson-Walker pour un univers plat :

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t) dr^2$$

- Photons : $ds^2 = 0$
- Leptons : $ds^2 \neq 0$ + équations des géodésiques

⇒ Relation sur les énergies simple → calcul direct

⇒ Intégrales des parcours non-calculables analytiquement

→ intégration numérique

Résultat : énergies

Photon d'énergie E émis à un redshift z_1 avec une énergie E_1 :

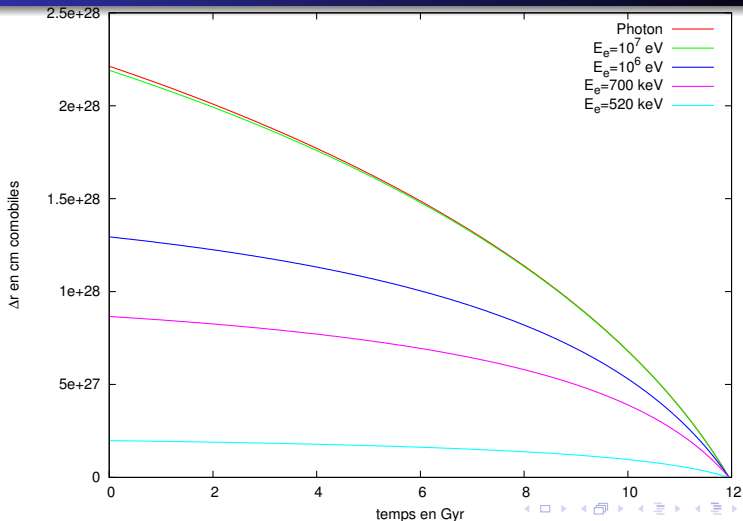
$$E = E_1 \frac{1+z}{1+z_1}$$

Lepton d'énergie γmc^2 émis à un redshift z_1 avec une énergie $\gamma_1 mc^2$:

$$\gamma = \sqrt{1 + \left(\frac{1+z}{1+z_1} \right)^2 (\gamma_1^2 - 1)}$$

Similaires dans la limite $\gamma_1 \rightarrow \infty$

Résultat : parcours



Principe et motivation des méthodes Monte-Carlo

Considérer le système que l'on va étudier comme un ensemble de distributions de probabilités que l'on va simuler.

Avantages :

- Plus rapides que les méthodes classiques si $D > 1$
- Formalisme plus simple
- Intrinsèque aux phénomènes quantiques

Principe et motivation des méthodes Monte-Carlo

Considérer le système que l'on va étudier comme un ensemble de distributions de probabilités que l'on va simuler.

Avantages :

- Plus rapides que les méthodes classiques si $D > 1$
- Formalisme plus simple
- Intrinsèque aux phénomènes quantiques

Principe et motivation des méthodes Monte-Carlo

Considérer le système que l'on va étudier comme un ensemble de distributions de probabilités que l'on va simuler.

Avantages :

- Plus rapides que les méthodes classiques si $D > 1$
- Formalisme plus simple
- Intrinsèque aux phénomènes quantiques

Principe et motivation des méthodes Monte-Carlo

Considérer le système que l'on va étudier comme un ensemble de distributions de probabilités que l'on va simuler.

Avantages :

- Plus rapides que les méthodes classiques si $D > 1$
- Formalisme plus simple
- Intrinsèque aux phénomènes quantiques

Algorithme général du programme

Définition des paramètres :

- nature, nombre, direction et distance des particules initiales
- importance des processus d'accélération



Pour chaque particule initiale

Tant que la pile n'est pas vide

- Calcul du redshift limite z_{lim}
- Calcul du redshift de la prochaine interaction

Si l'interaction a lieu avant z_{lim}

- calcul des propriétés de la particule au moment de l'interaction
- calcul des énergies et directions des particules produites

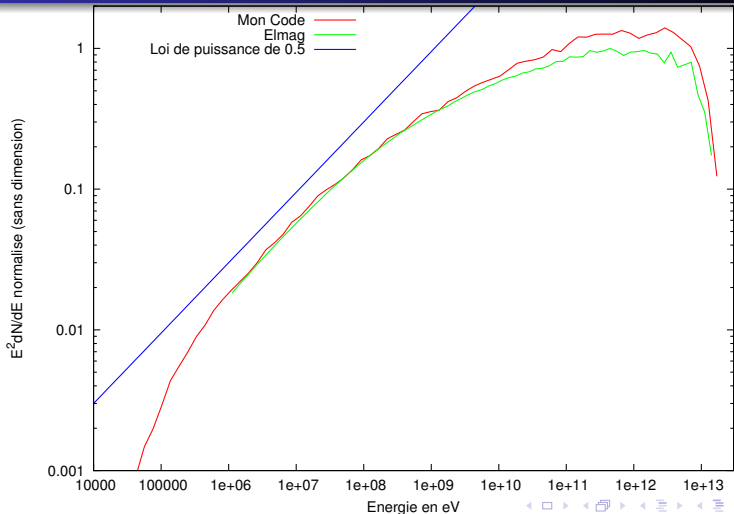
Sinon

- calcul de l'énergie, la position et la direction de la particule quand elle arrive sur Terre

- tirage d'un photon du CMB ou de l'EBL

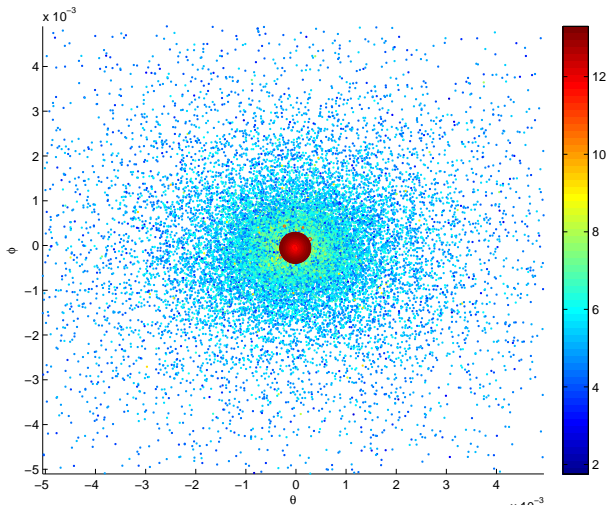
- on ajoute les nouvelles particules à la pile
- on enlève de la pile les particules ayant interagit ou ayant atteint la Terre

Résultats $z_0 = 0.0308$, $E_\gamma = 10^{14}$ eV, $N = 300$



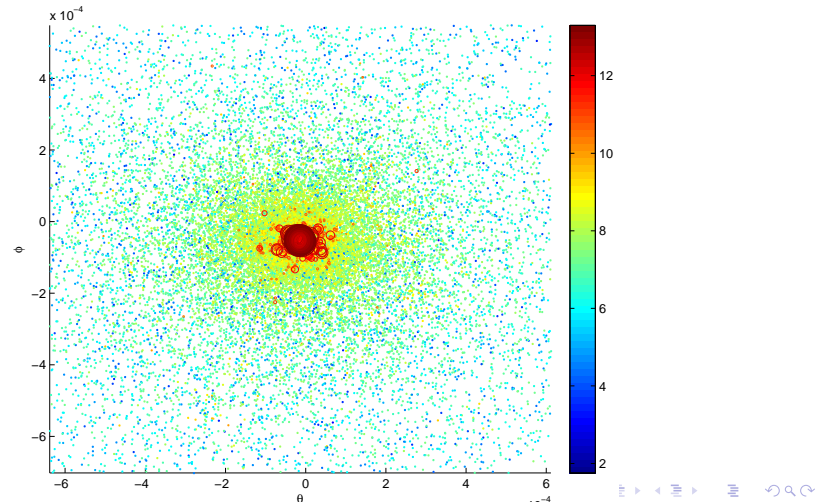
Résultats $z_0 = 0.0308$, $E_\gamma = 10^{14}$ eV

$\downarrow \log(E \text{ en eV})$



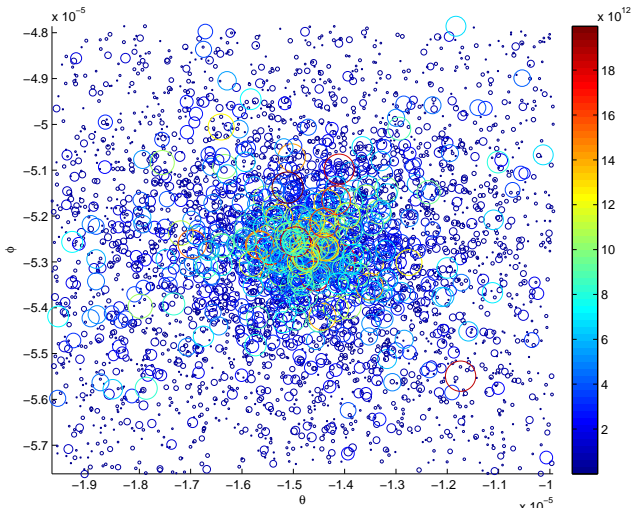
Résultats $z_0 = 0.0308$, $E_\gamma = 10^{14}$ eV

$\downarrow \log(E \text{ en eV})$



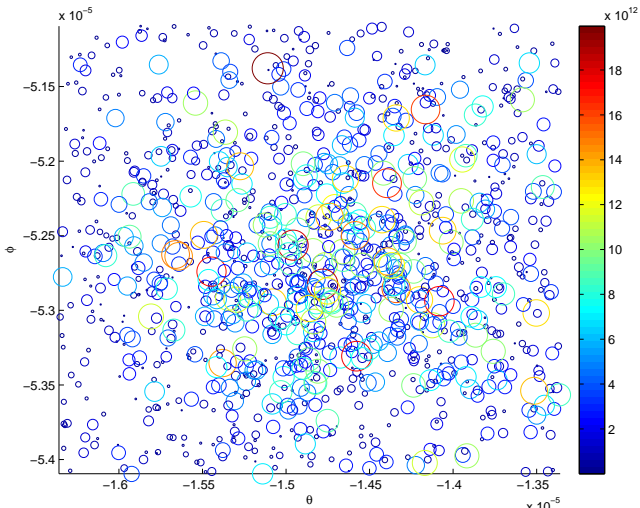
Résultats $z_0 = 0.0308$, $E_\gamma = 10^{14}$ eV

↓ E en eV



Résultats $z_0 = 0.0308$, $E_\gamma = 10^{14}$ eV

↓ E en eV



Conclusion

- Code précis : peu d'approximations, voir pas du tout
- Image de la cascade en 3D + spectre
- Temps de calcul pas très long **si** utilisation judicieuse des technique d'accélération
- Il manque les effets de l'EGMF...

Conclusion

- Code précis : peu d'approximations, voir pas du tout
- Image de la cascade en 3D + spectre
- Temps de calcul pas très long **si** utilisation judicieuse des technique d'accélération
- Il manque les effets de l'EGMF...

Conclusion

- Code précis : peu d'approximations, voir pas du tout
- Image de la cascade en 3D + spectre
- Temps de calcul pas très long si utilisation judicieuse des techniques d'accélération
- Il manque les effets de l'EGMF...

Conclusion

- Code précis : peu d'approximations, voir pas du tout
- Image de la cascade en 3D + spectre
- Temps de calcul pas très long **si** utilisation judicieuse des techniques d'accélération
- Il manque les effets de l'EGMF...

Conclusion

- Code précis : peu d'approximations, voir pas du tout
- Image de la cascade en 3D + spectre
- Temps de calcul pas très long **si** utilisation judicieuse des techniques d'accélération
- Il manque les effets de l'EGMF...

Perspectives

Le code développé lors de mon stage pourrait être utile pour :

- Reconstituer le spectre de la source γ originale à partir du spectre détecté
- Contraintes sur l'EGMF
- Contributions au fond diffus de rayons gamma extragalactiques (EGKB)
- Annihilation des positrons galactiques

Perspectives

Le code développé lors de mon stage pourrait être utile pour :

- Reconstituer le spectre de la source γ originale à partir du spectre détecté
- Contraintes sur l'EGMF
- Contributions au fond diffus de rayons gamma extragalactiques (EGRB)
- Annihilation des positrons galactiques

Perspectives

Le code développé lors de mon stage pourrait être utile pour :

- Reconstituer le spectre de la source γ originale à partir du spectre détecté
- Contraintes sur l'EGMF
- Contributions au fond diffus de rayons gamma extragalactiques (EGRB)
- Annihilation des positrons galactiques

Perspectives

Le code développé lors de mon stage pourrait être utile pour :

- Reconstituer le spectre de la source γ originale à partir du spectre détecté
- Contraintes sur l'EGMF
- Contributions au fond diffus de rayons gamma extragalactiques (EGRB)
- Annihilation des positrons galactiques

Perspectives

Le code développé lors de mon stage pourrait être utile pour :

- Reconstituer le spectre de la source γ originale à partir du spectre détecté
- Contraintes sur l'EGMF
- Contributions au fond diffus de rayons gamma extragalactiques (EGRB)
- Annihilation des positrons galactiques

Perspectives

Le code développé lors de mon stage pourrait être utile pour :

- Reconstituer le spectre de la source γ originale à partir du spectre détecté
- Contraintes sur l'EGMF
- Contributions au fond diffus de rayons gamma extragalactiques (EGRB)
- Annihilation des positrons galactiques

Merci pour votre attention