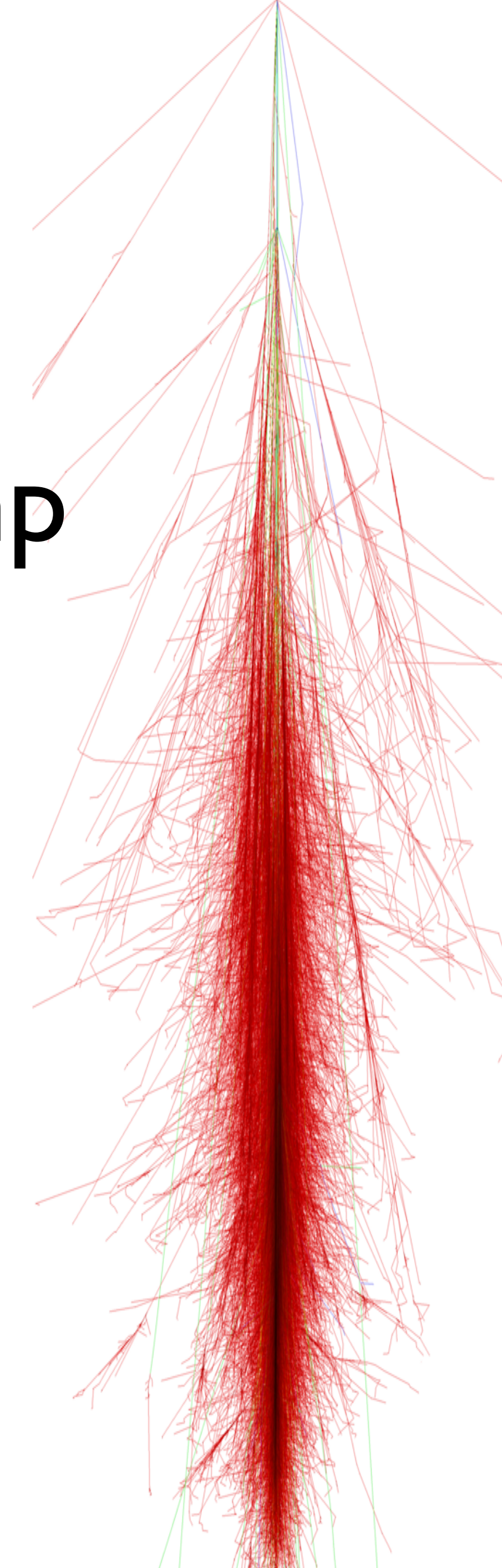
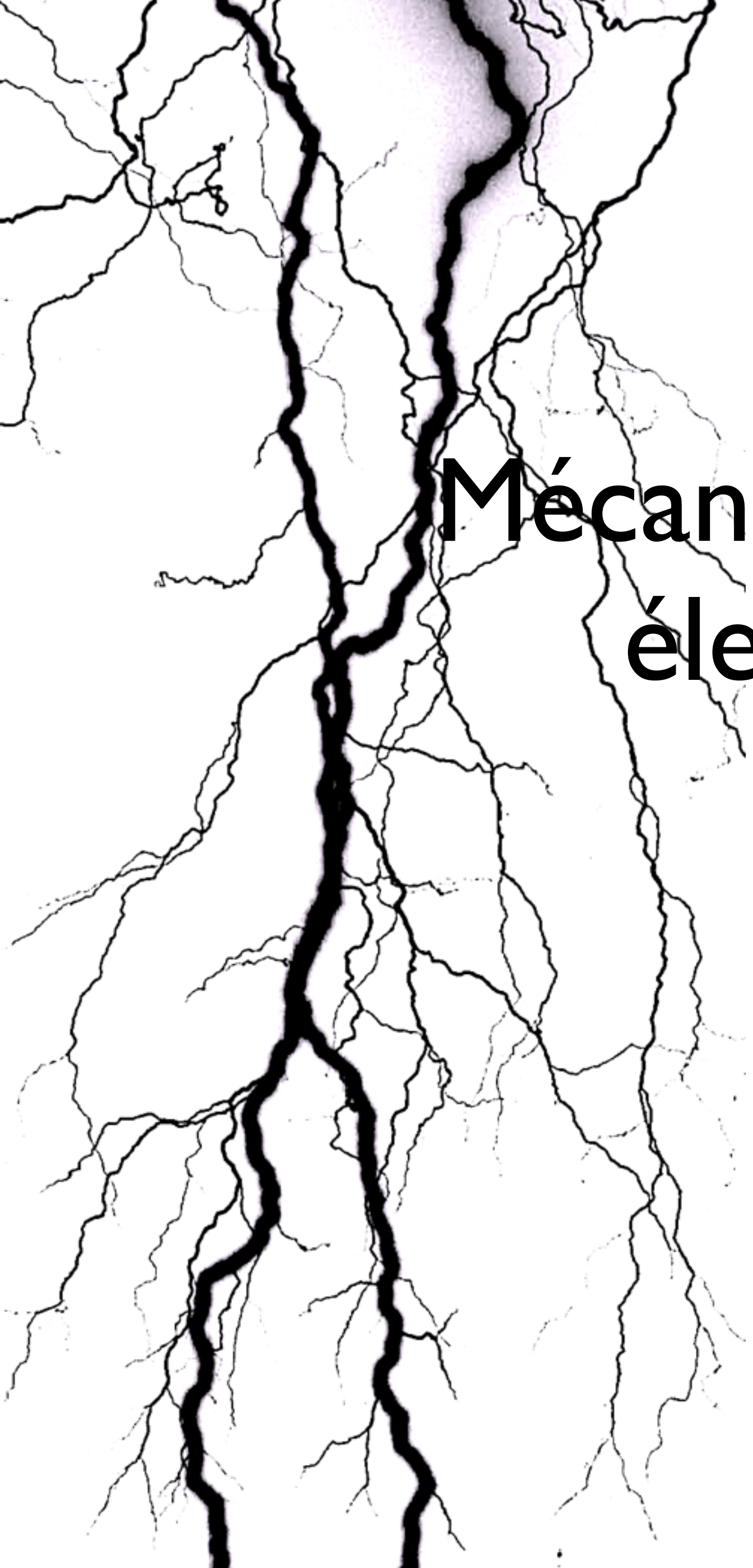


Mécanismes d'émission de champ électrique dans les gerbes



Le signal radio

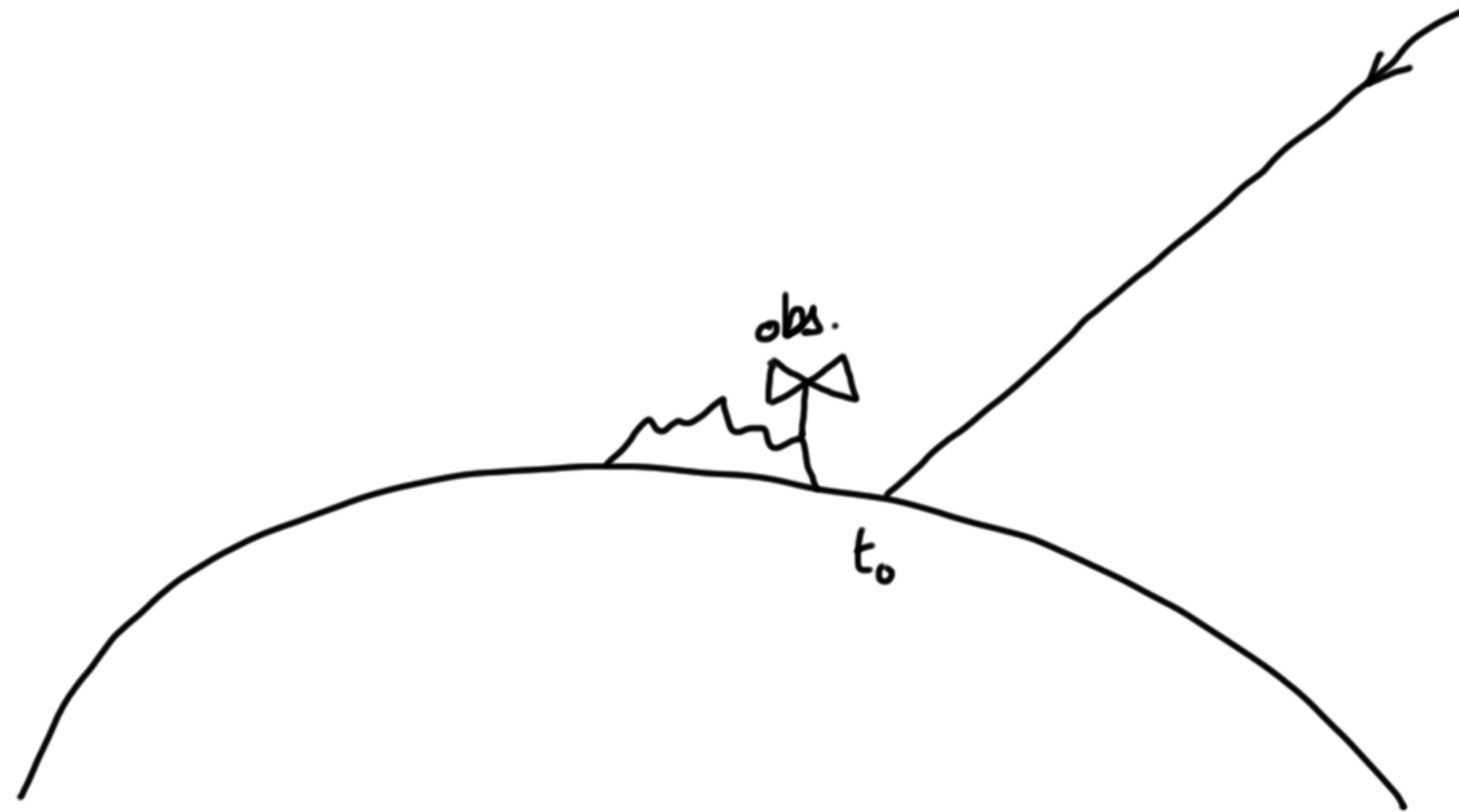
Trois observables :

1. particules secondaires qui atteignent le sol (SD)
2. lumière de fluorescence (FD)
3. champ électrique émis par tous les e^+/e^- : **ondes radio !**

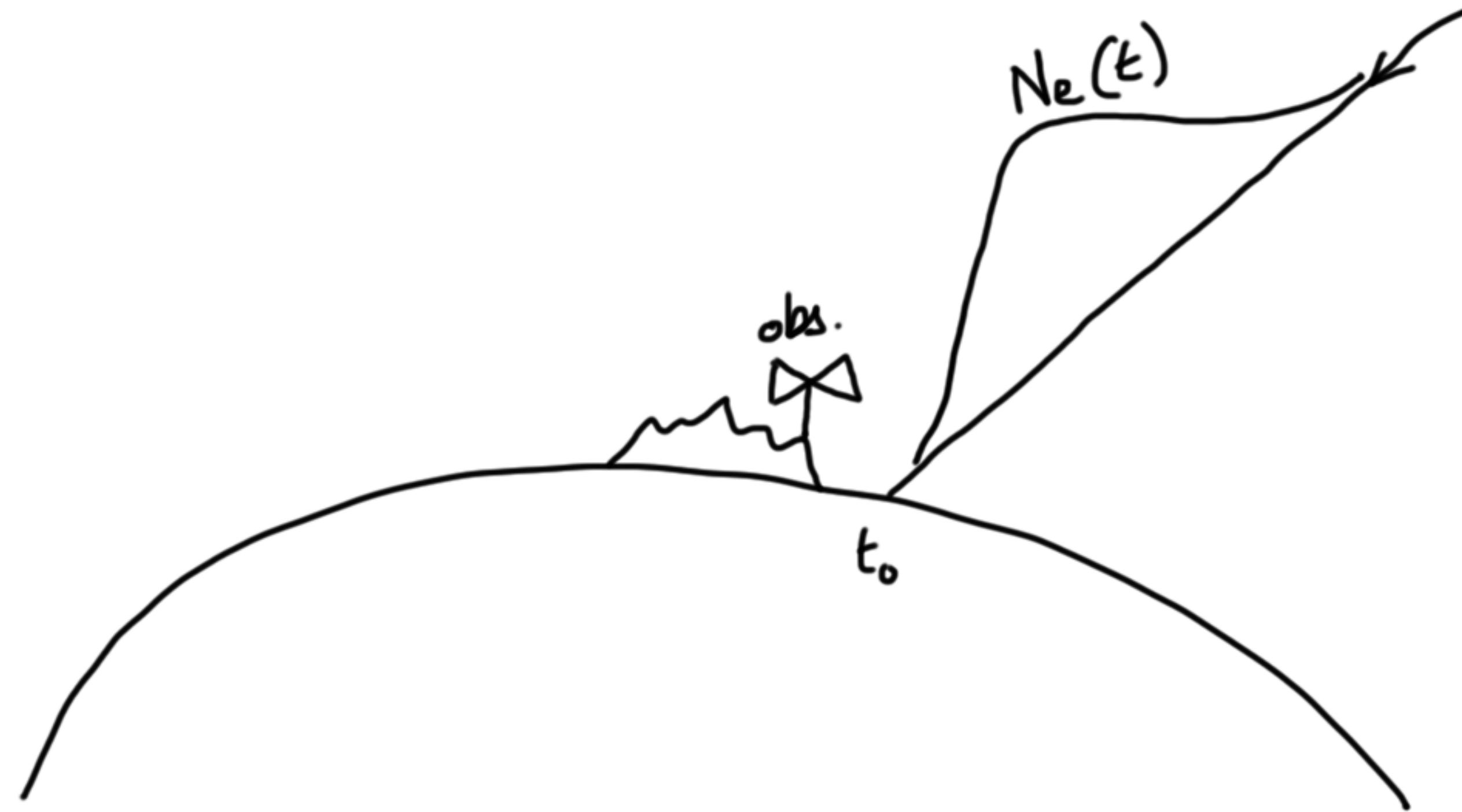
les ondes radio ne sont dues qu'à la composante électromagnétique de la gerbe : très intéressant pour contraindre la composition !

signal étudié entre 1965 et 1975 (abandon car technologie insuffisante)

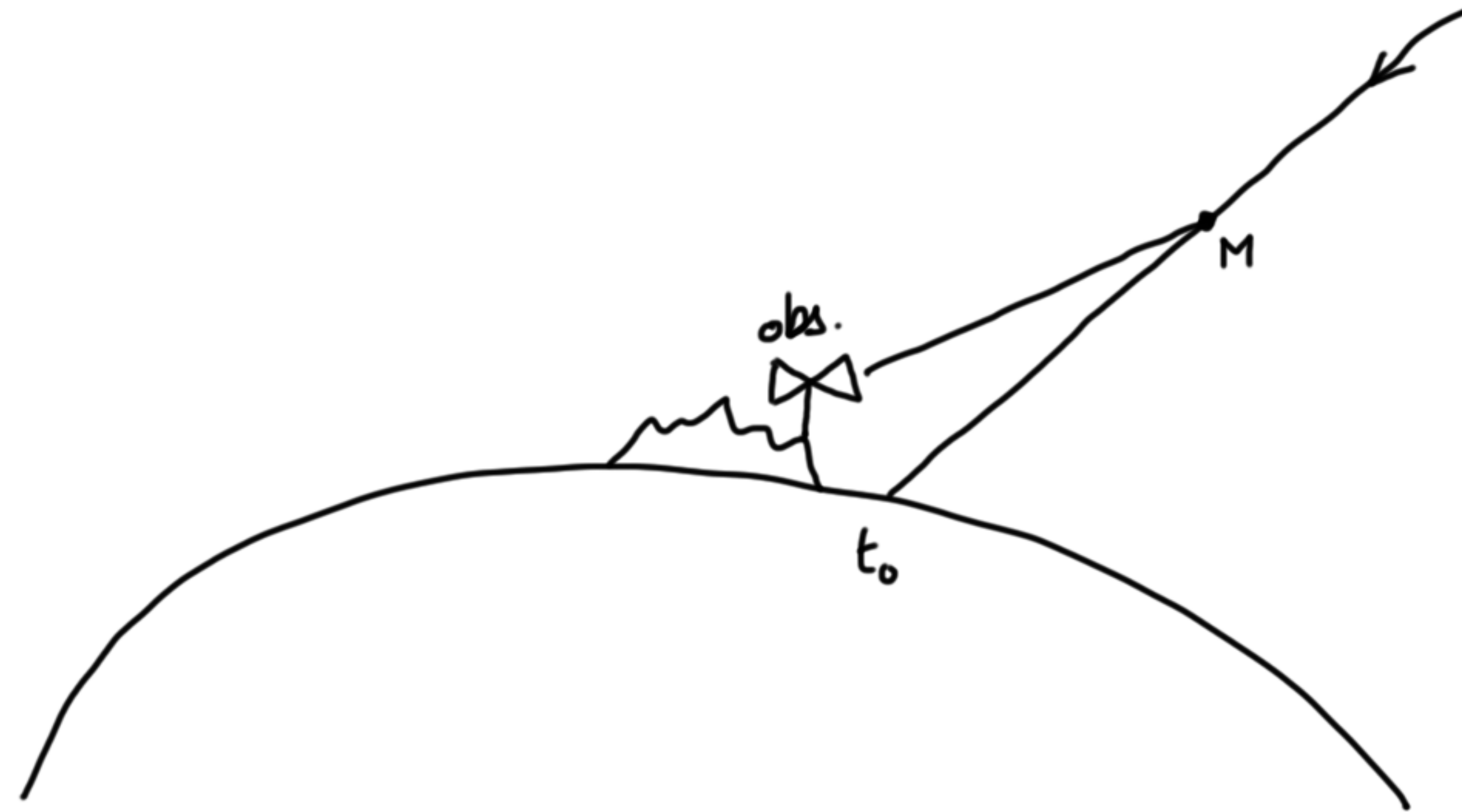
Un modèle très simple : principe



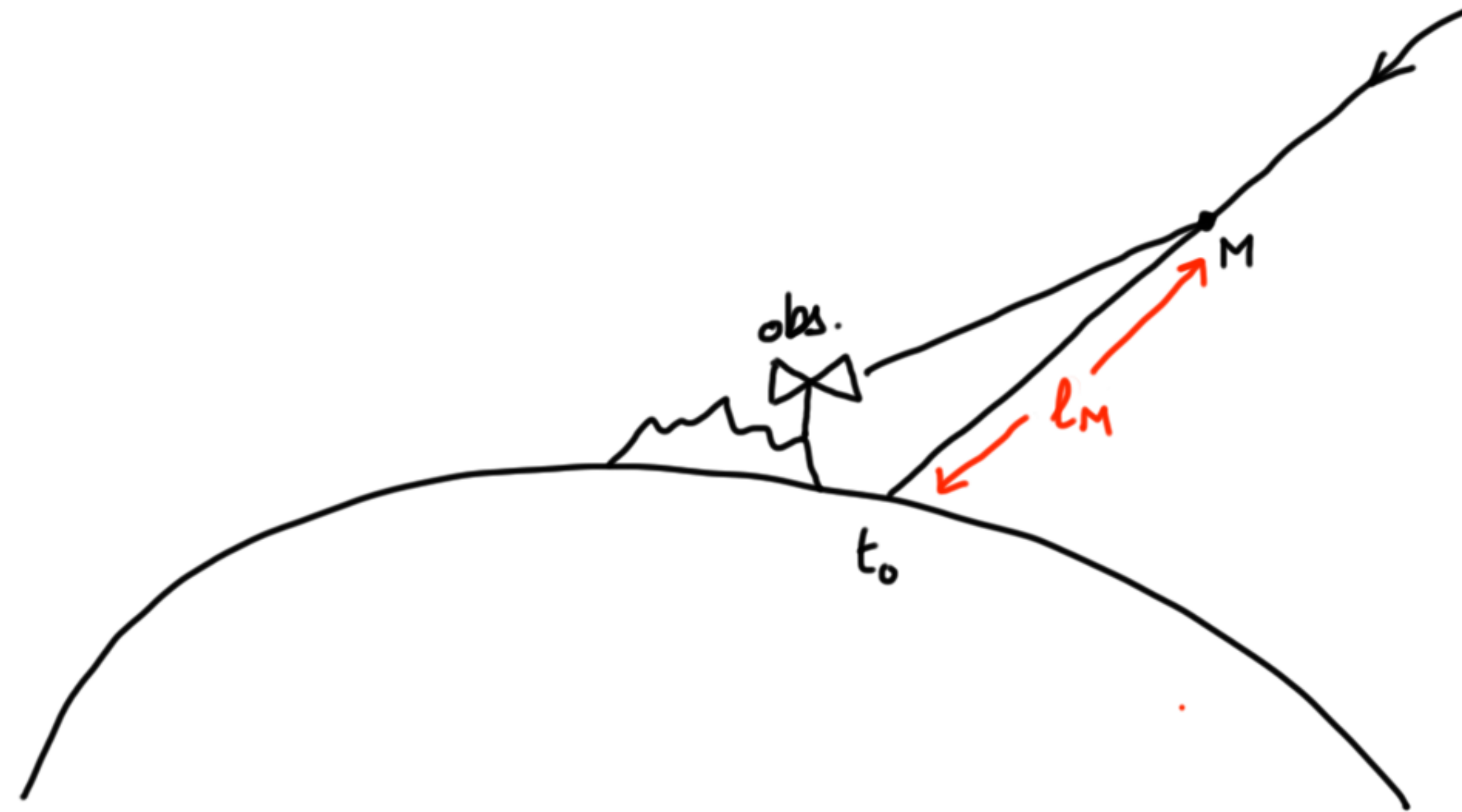
Un modèle très simple : principe



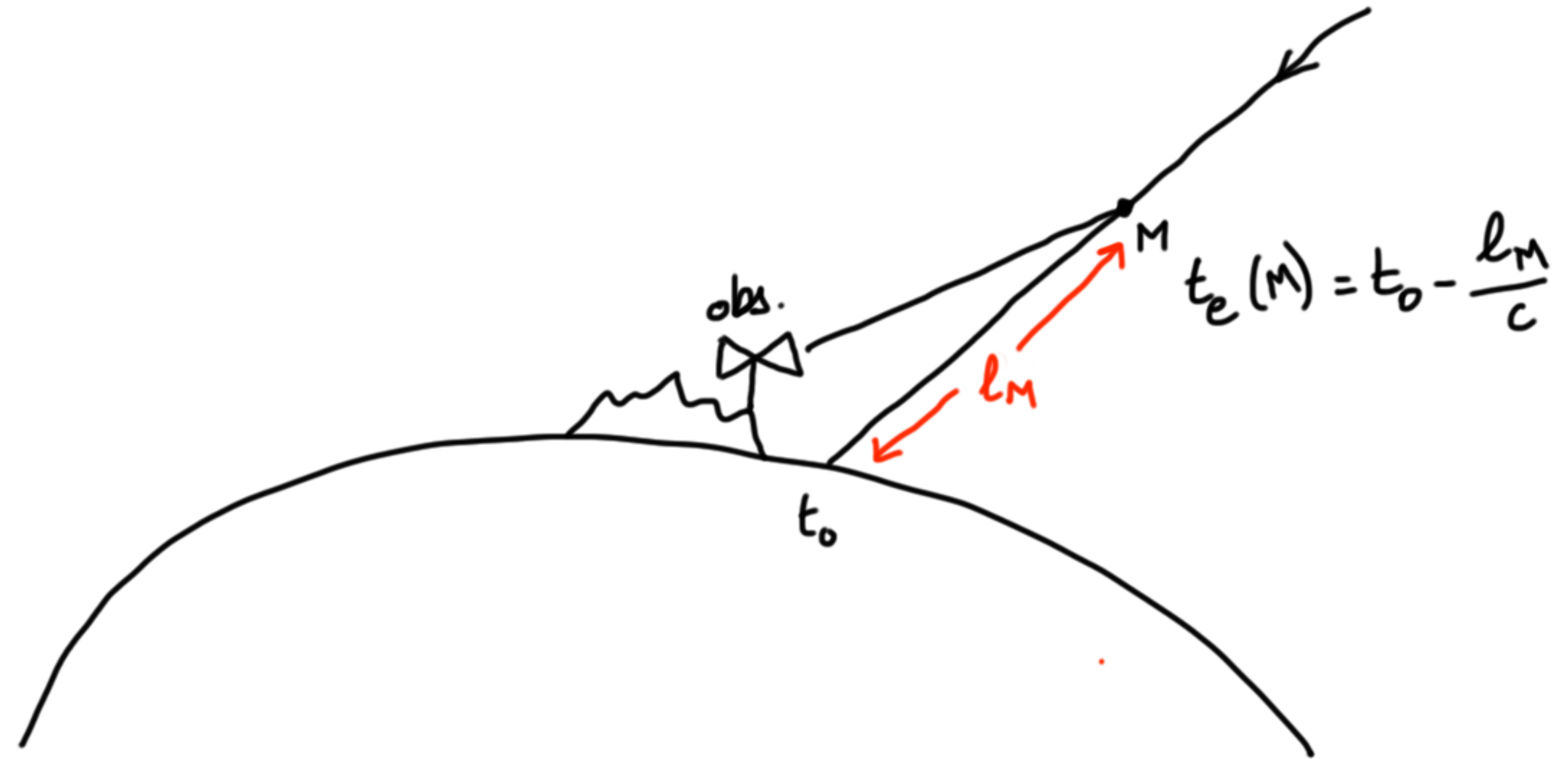
Un modèle très simple : principe



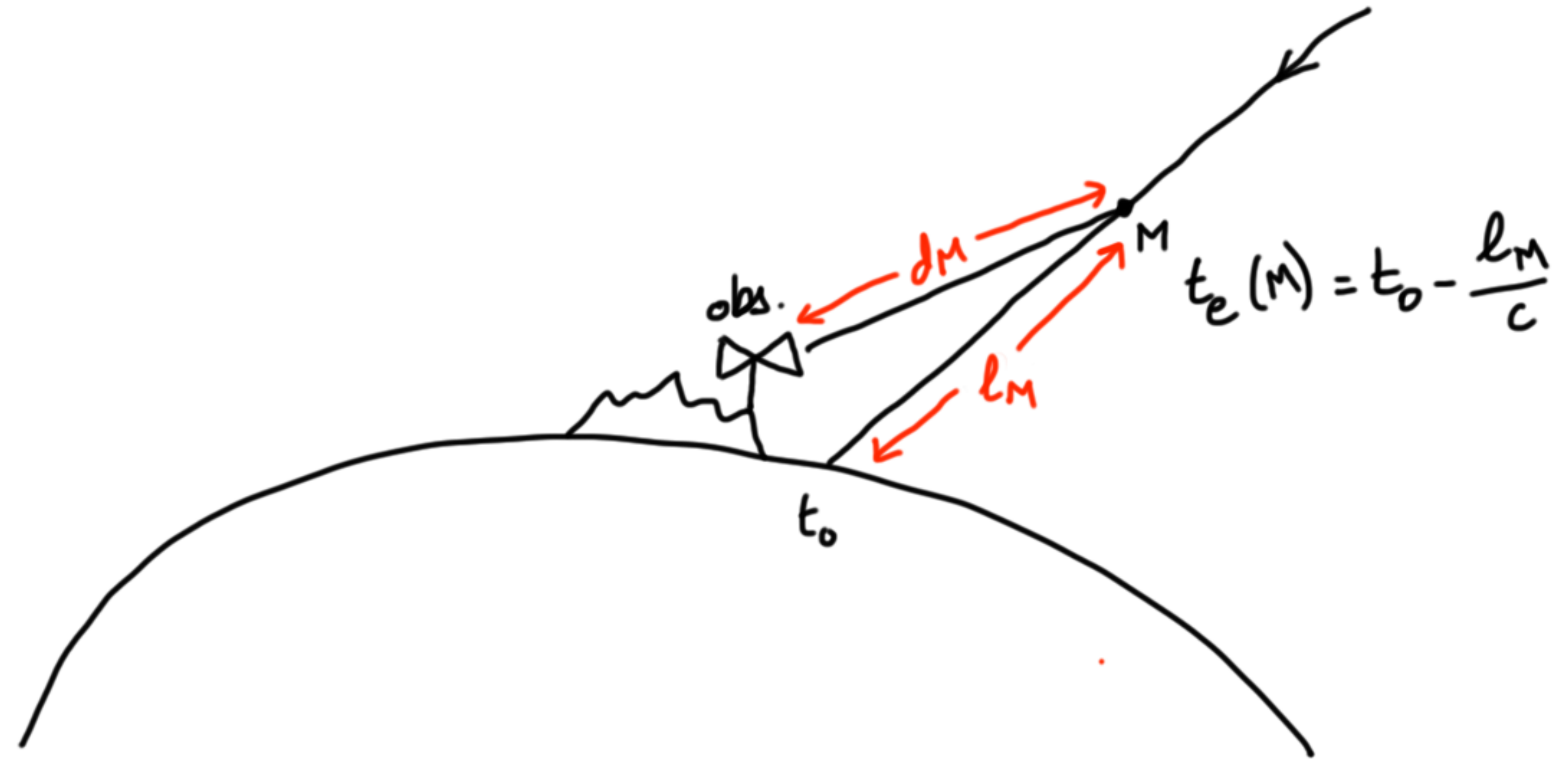
Un modèle très simple : principe



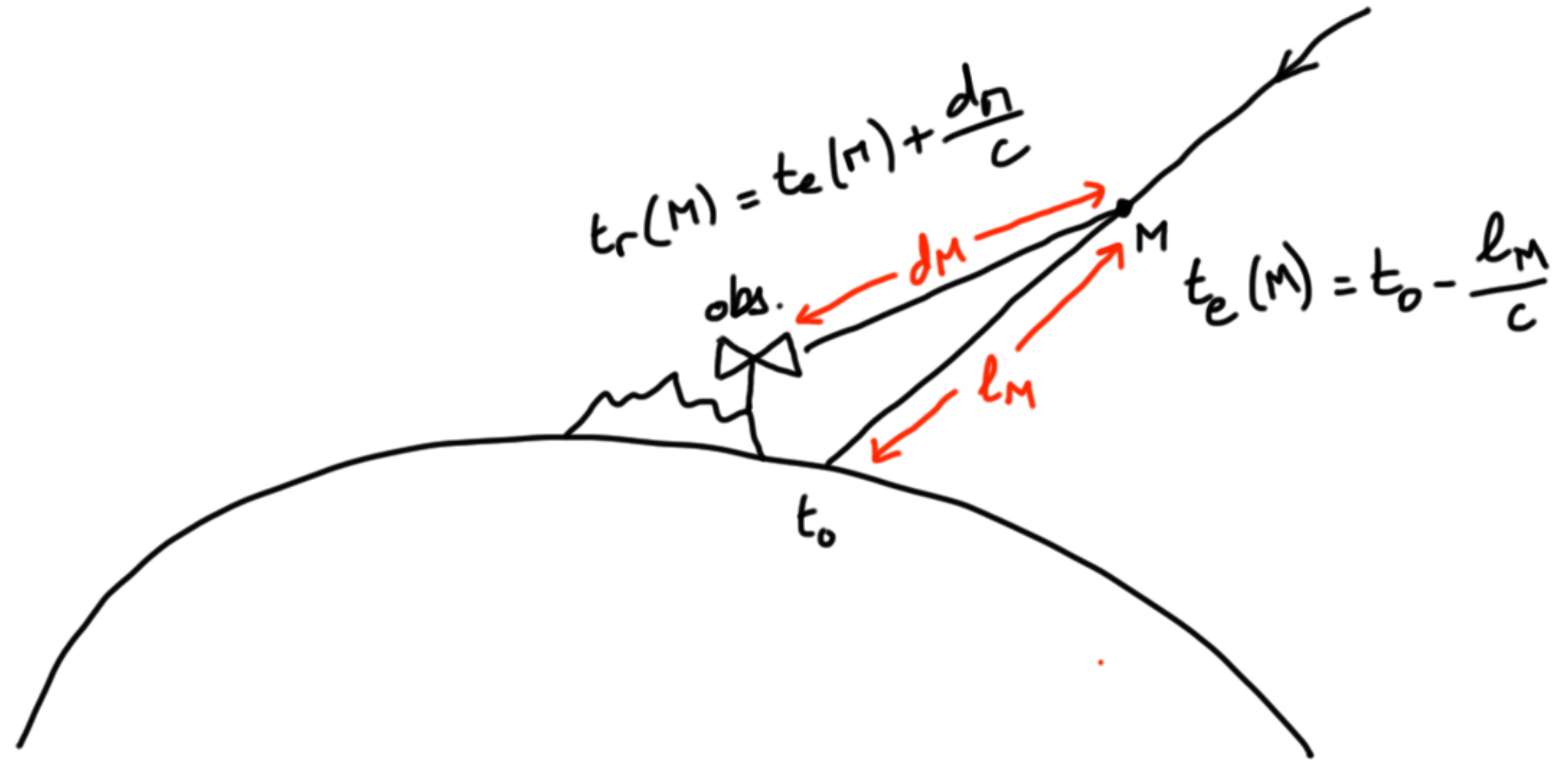
Un modèle très simple : principe



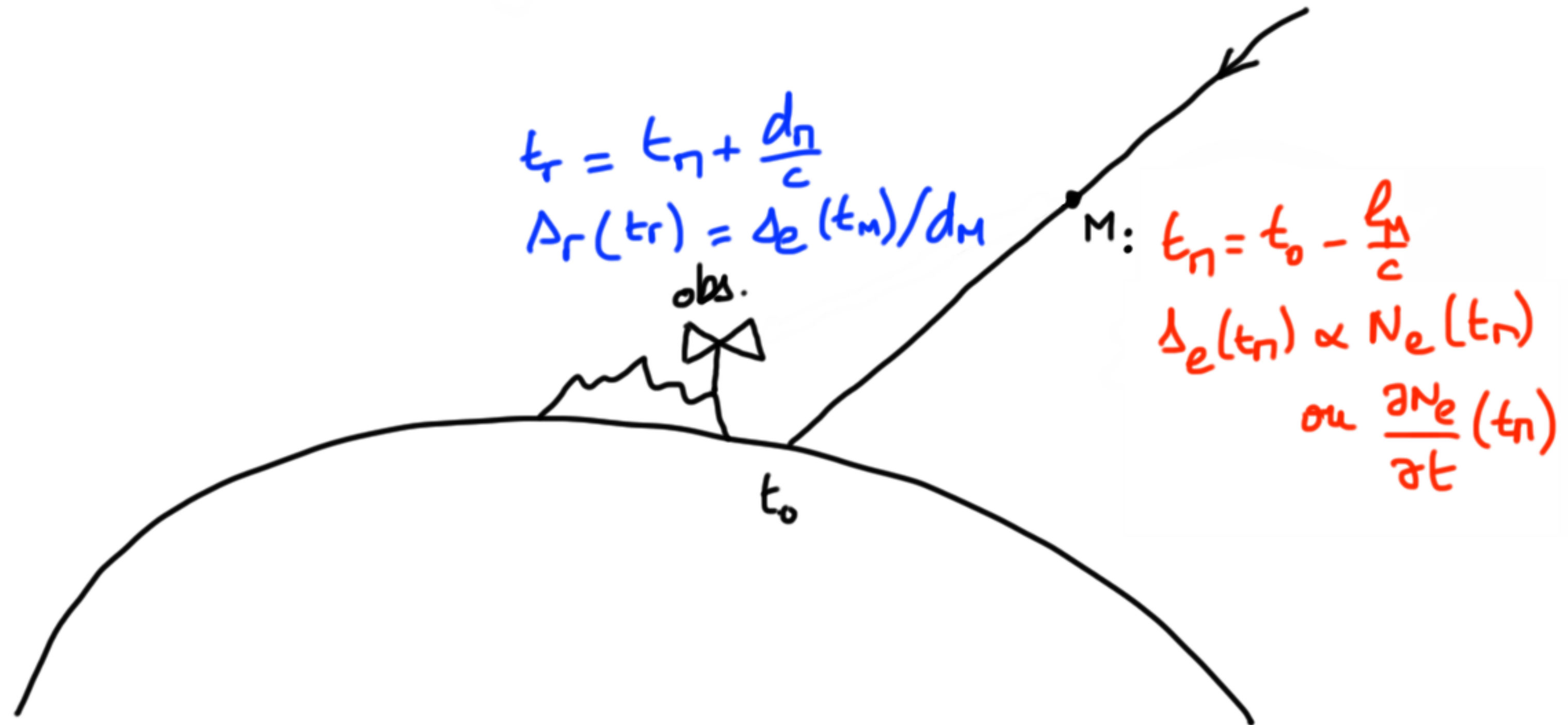
Un modèle très simple : principe



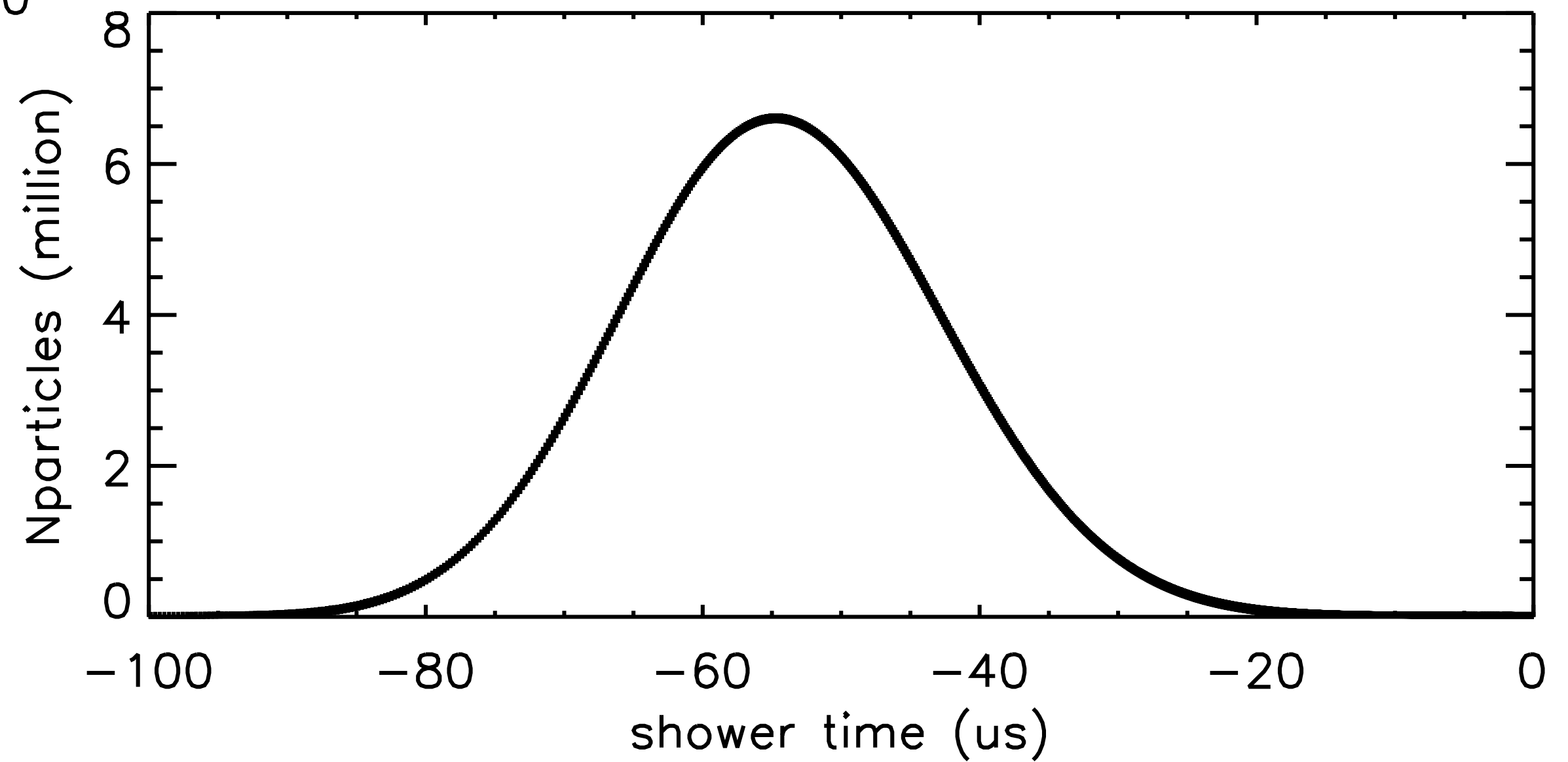
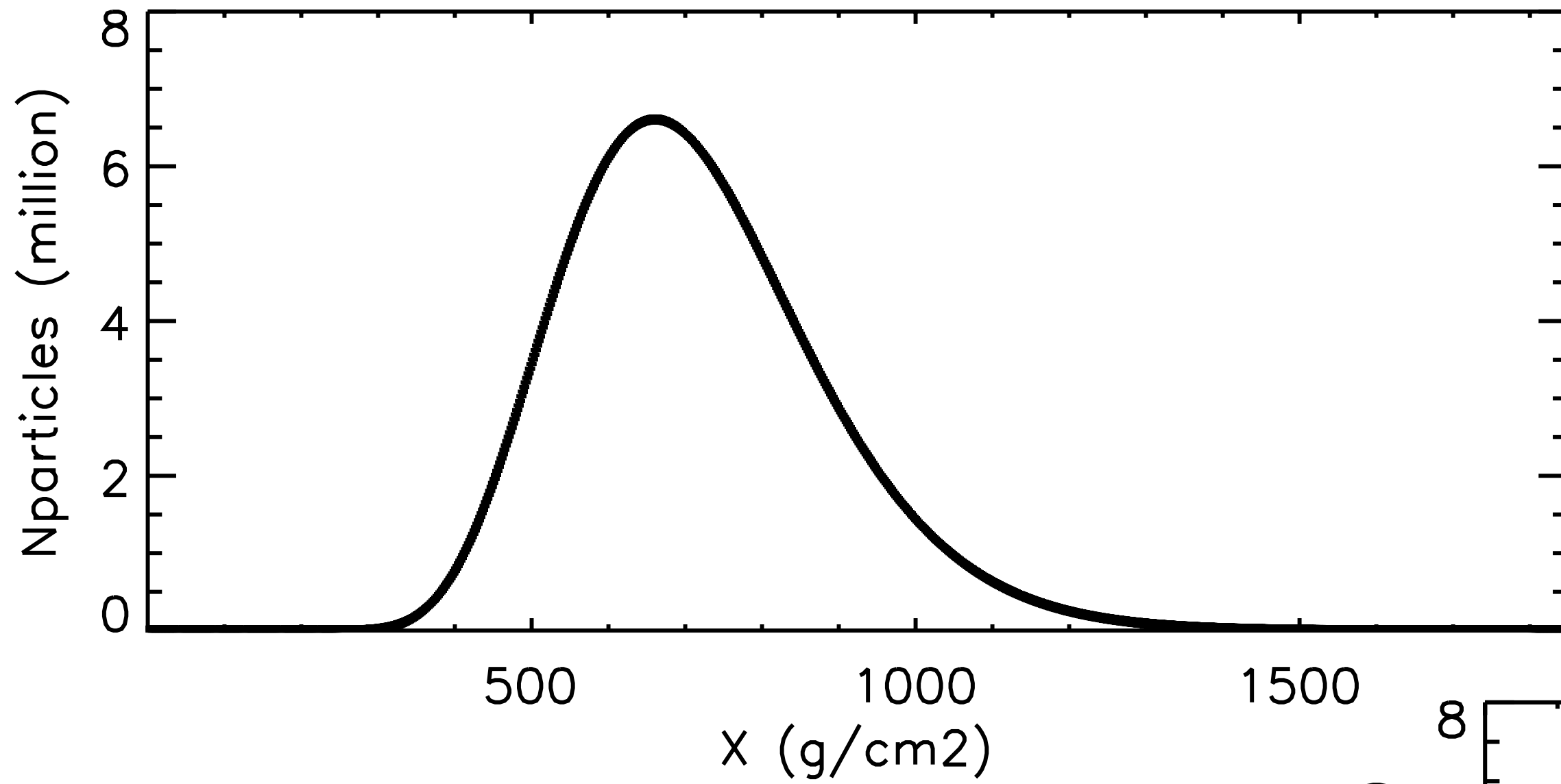
Un modèle très simple : principe



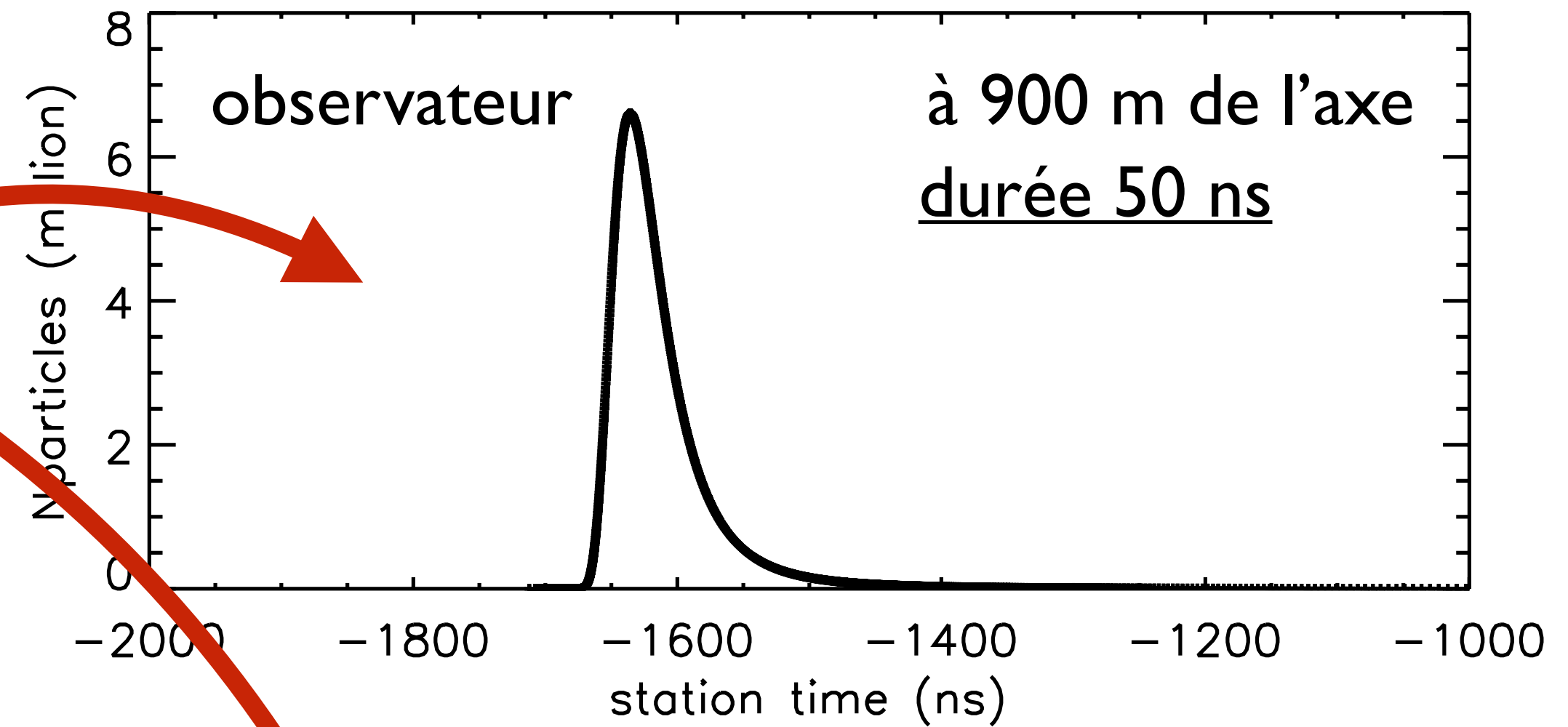
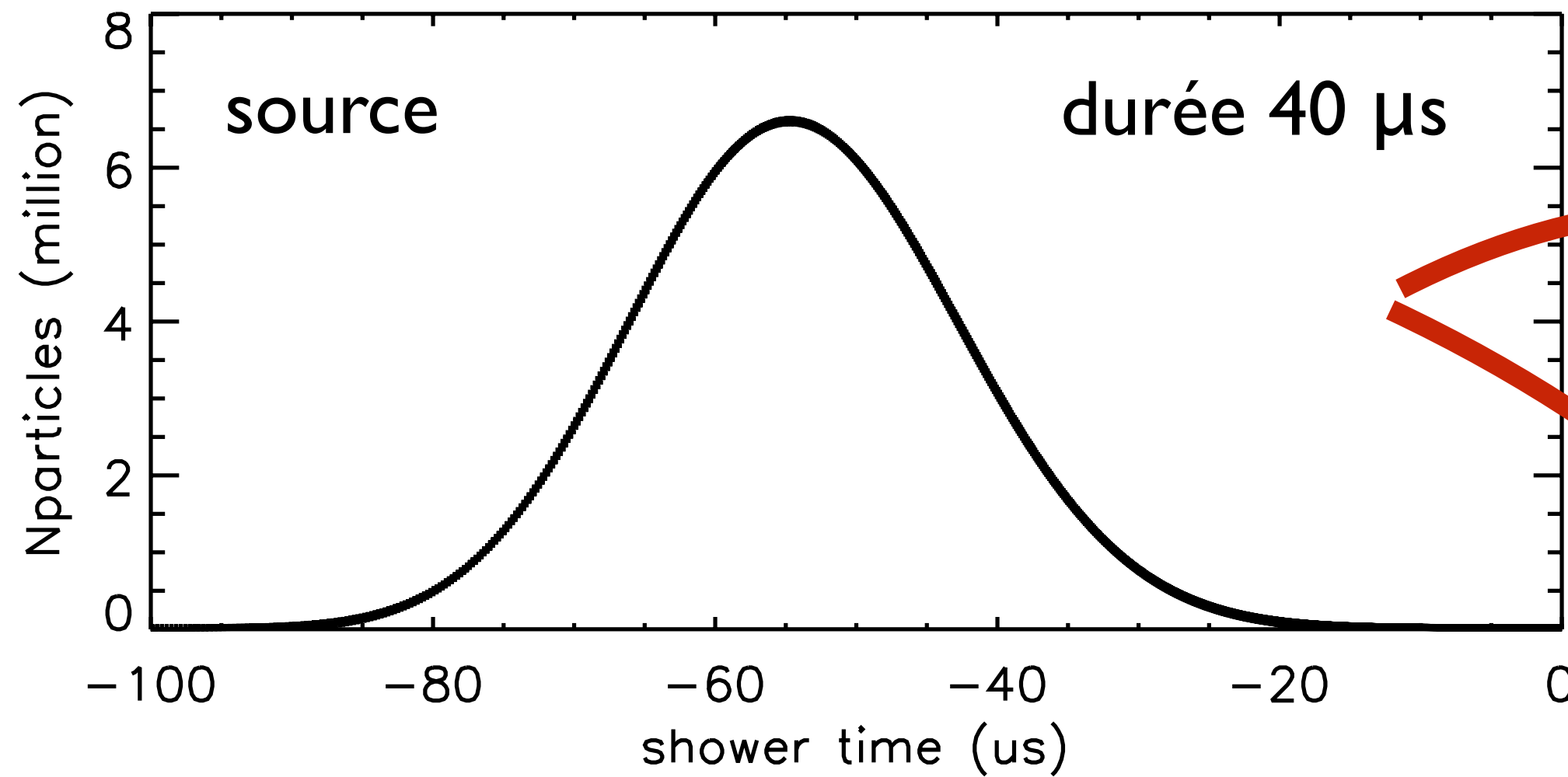
Un modèle très simple : principe



Un modèle très simple : la source

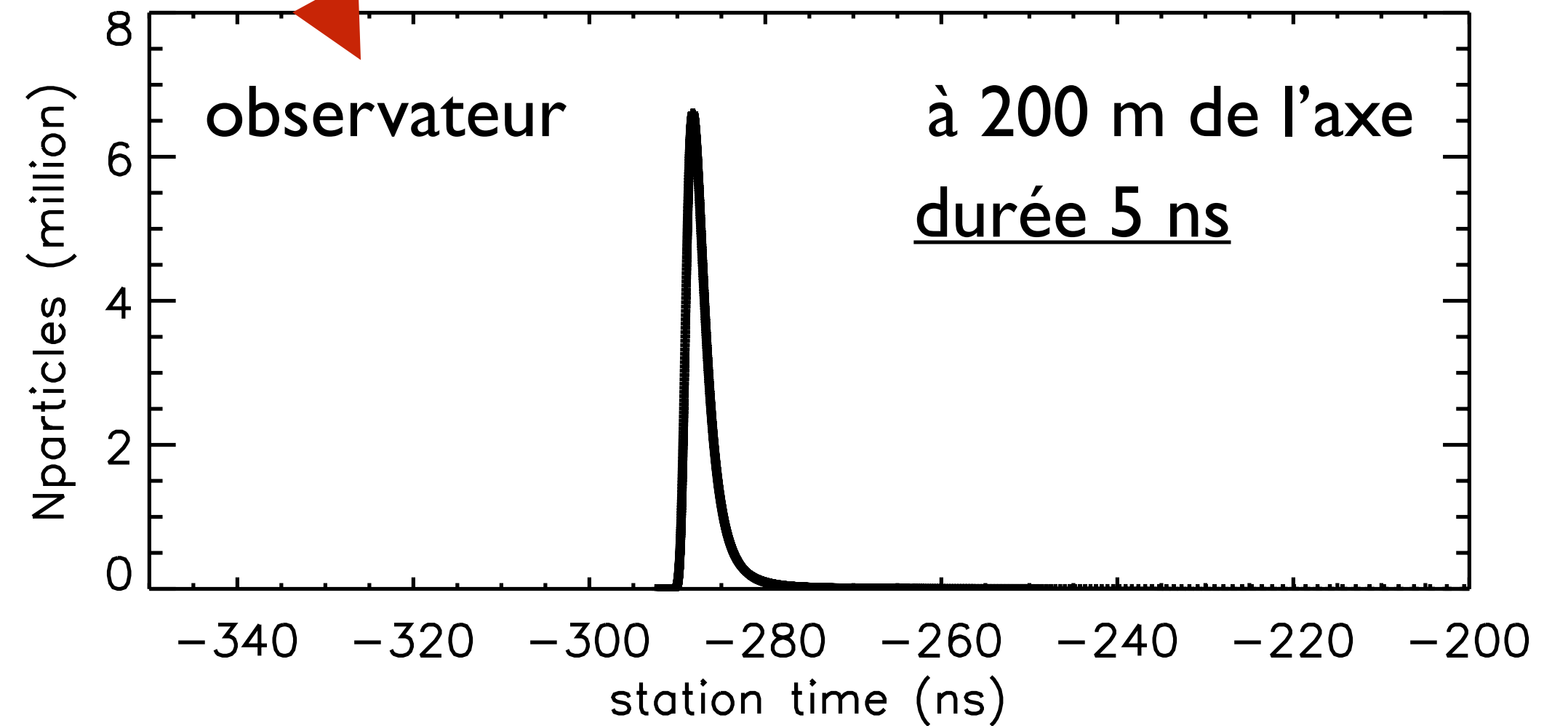


Un modèle très simple : Doppler

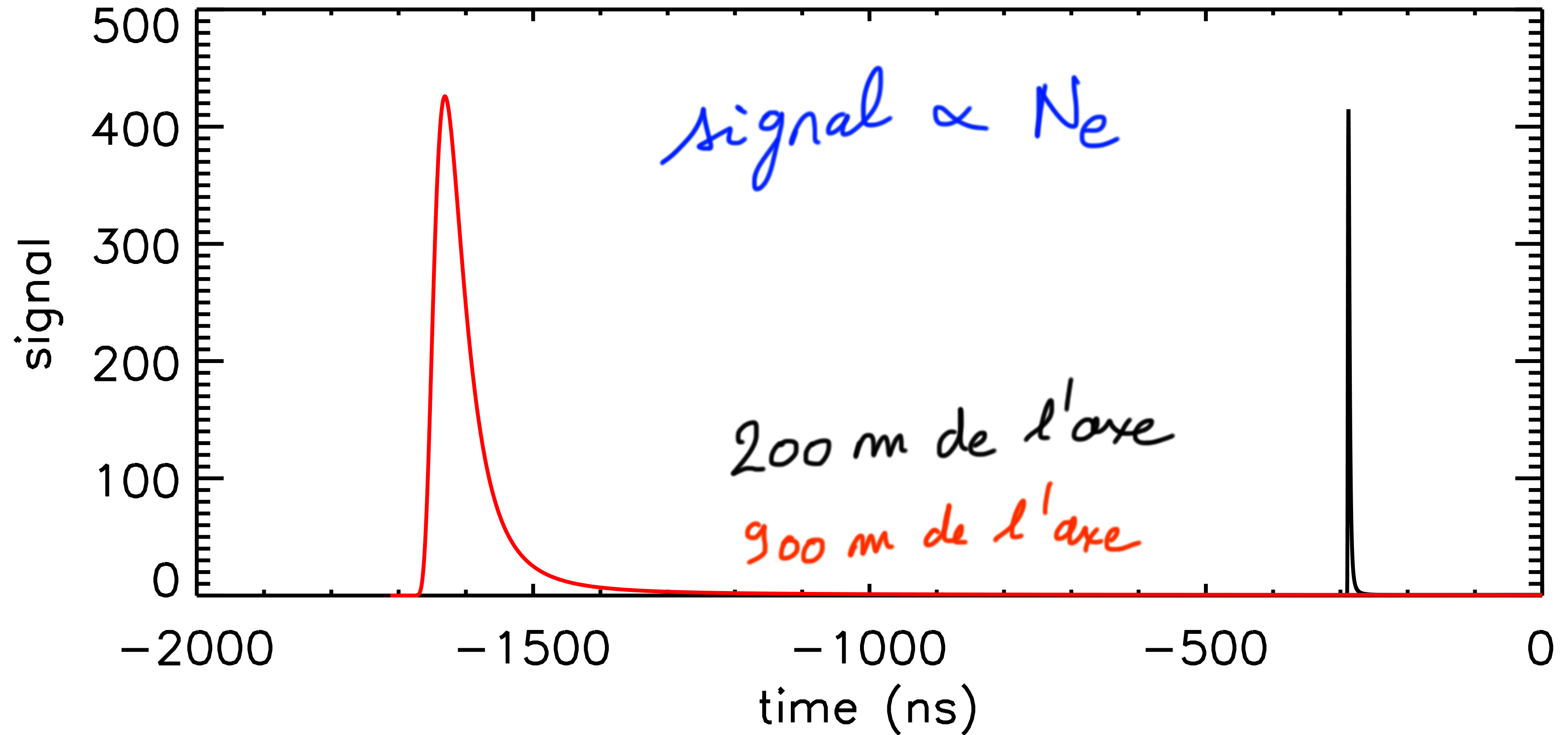


développement de la gerbe

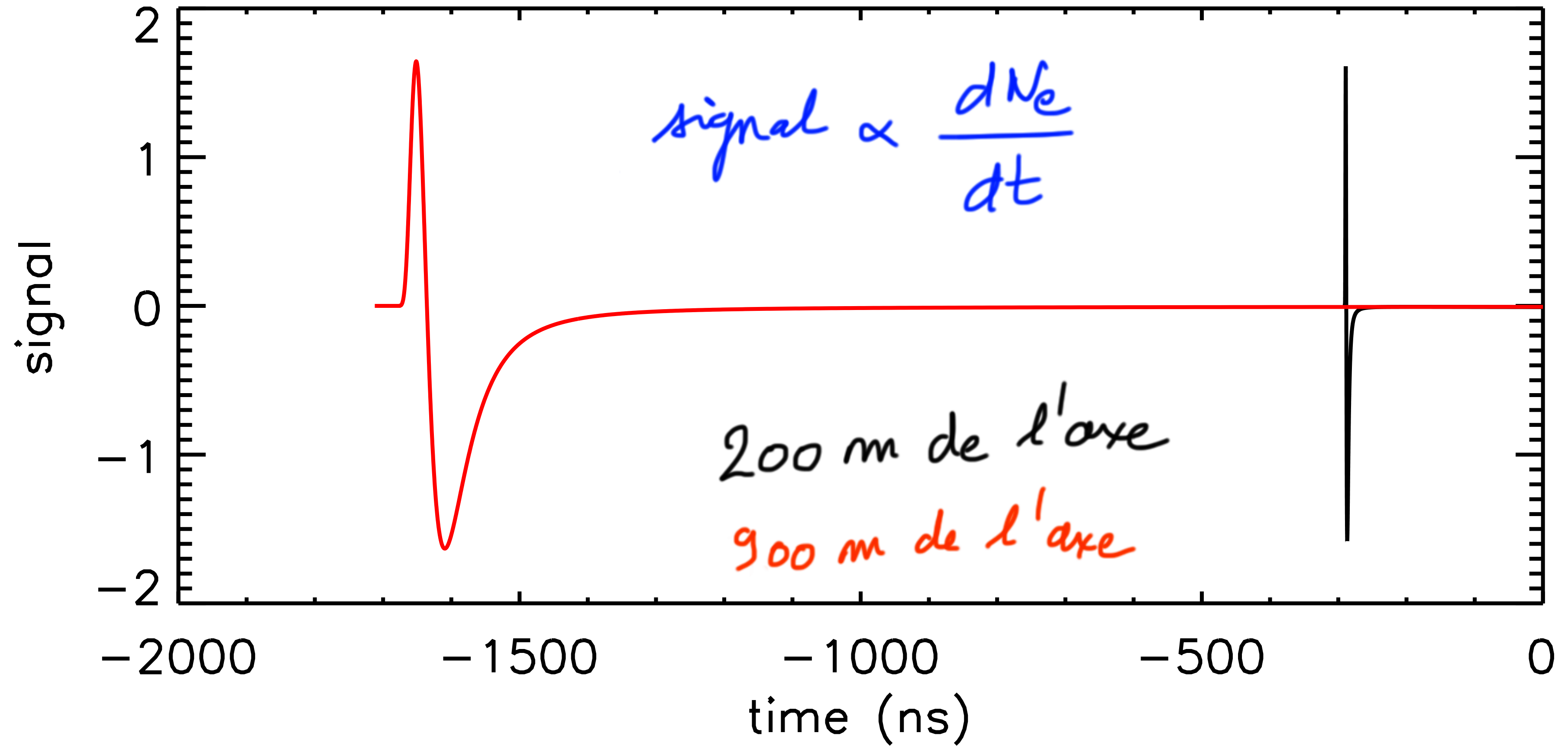
Très forte compression Doppler !



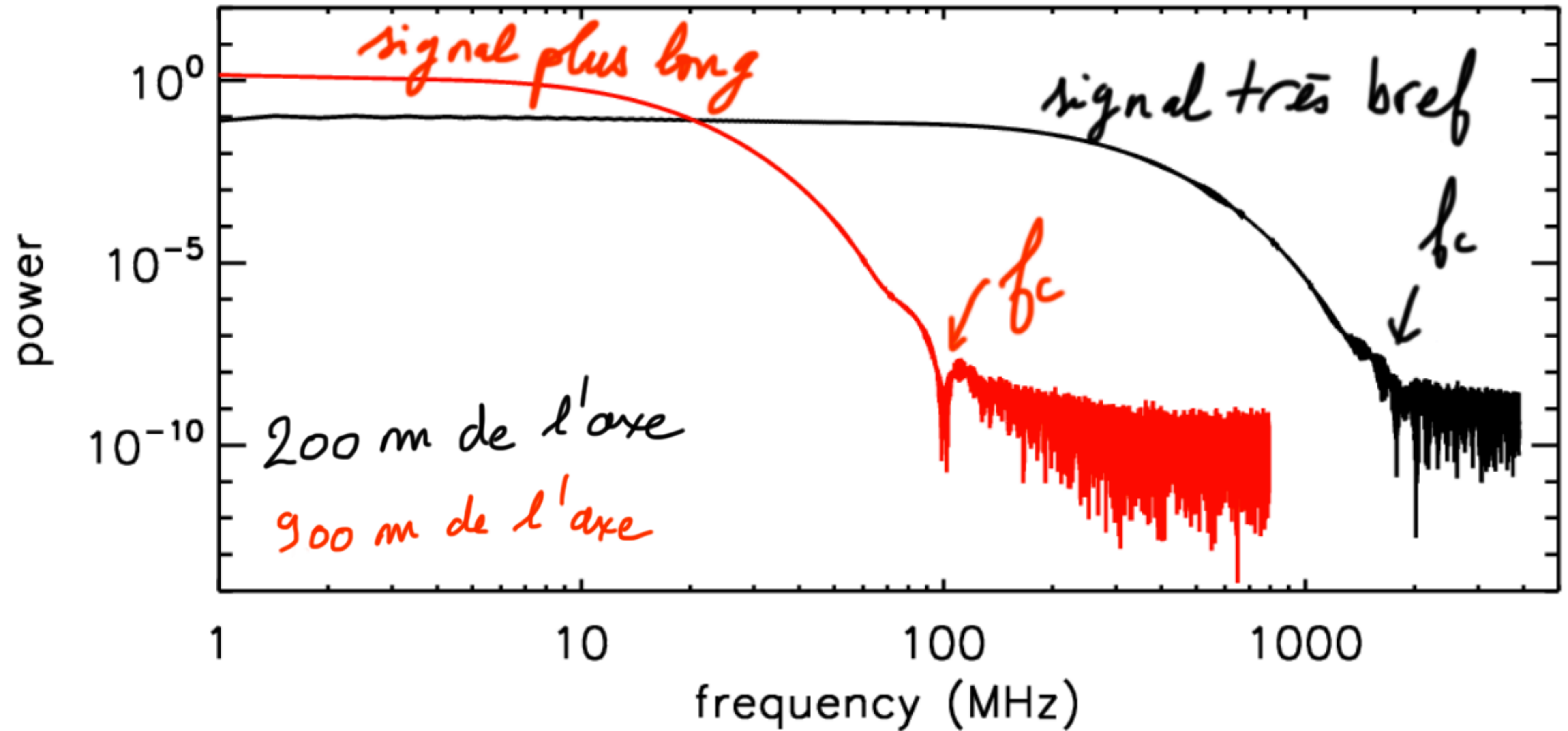
Un modèle très simple : impulsions monopolaires



Un modèle très simple : impulsions bipolaires



Un modèle très simple : spectres



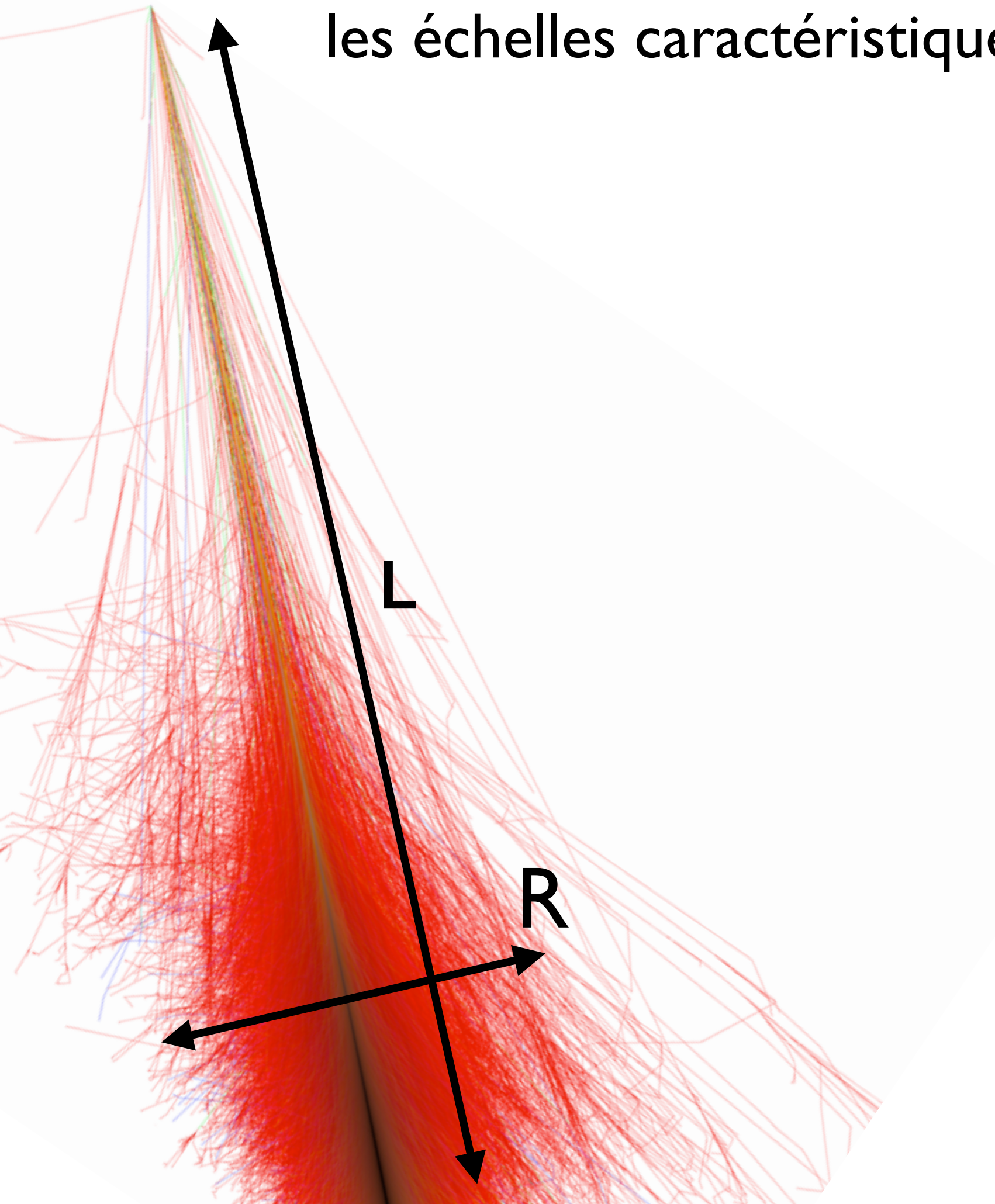
Un modèle très simple : conclusion

ce modèle nous permet de comprendre que :

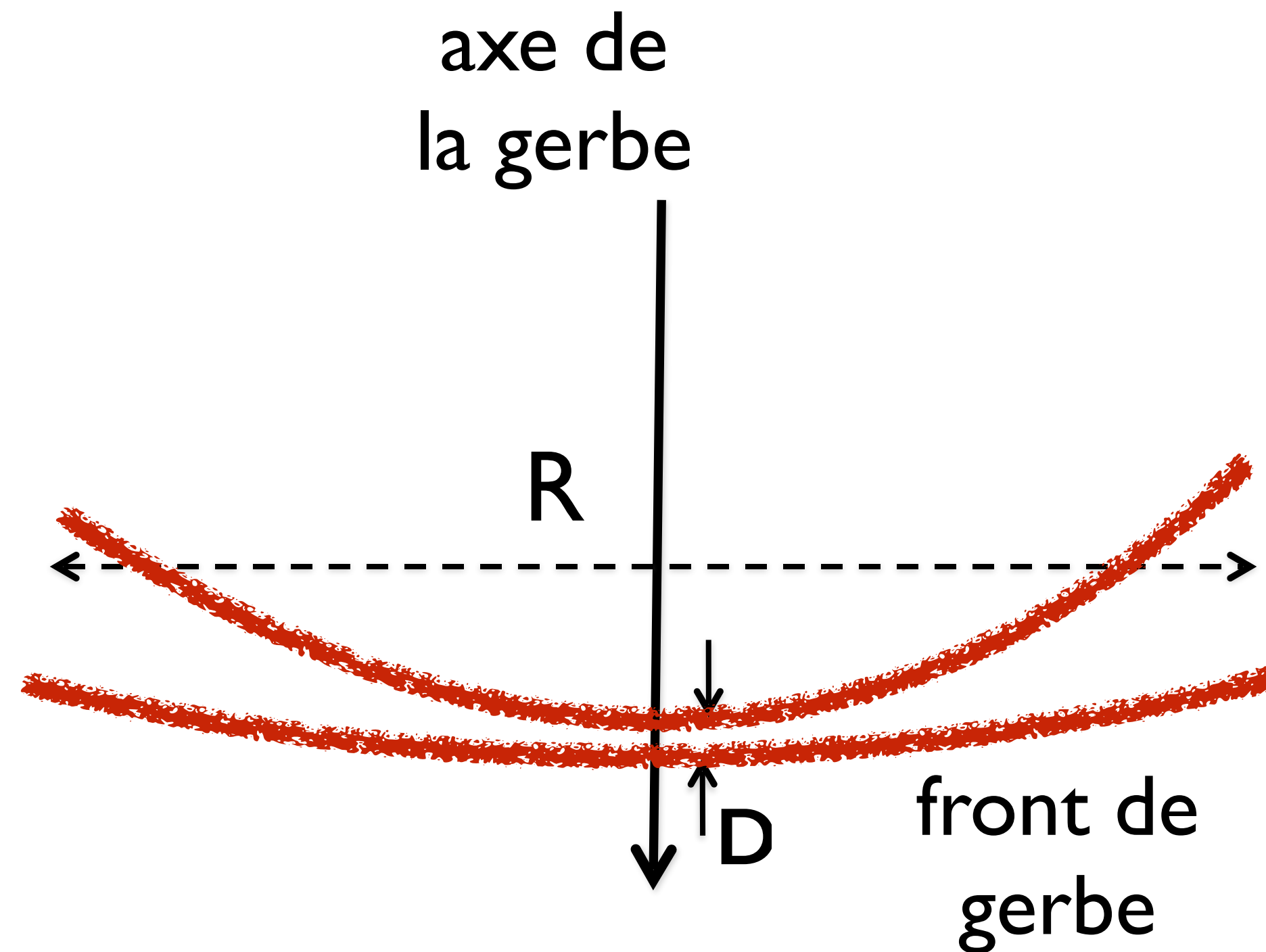
- le signal prédit est une projection du profil longitudinal (ou de sa dérivée) : **sensibilité au primaire**
- signal **monopolaire** si le signal est produit par le profil
- signal **bipolaire** si le signal est produit par la dérivée du profil
- compression Doppler importante (durée = quelques dizaines de ns) : $f_{\text{samp}} \sim 100 \text{ MS/s} - 1 \text{ GS/s}$
- signal cohérent entre quelques dizaines de kHz jusqu'à quelques centaines de MHz selon la position de l'observateur par rapport à la gerbe

Le signal radio : interférences, cohérence

Source du signal radio : les e^+ et e^- de la gerbe
les échelles caractéristiques de la gerbe fixent les longueurs d'onde du signal



ground

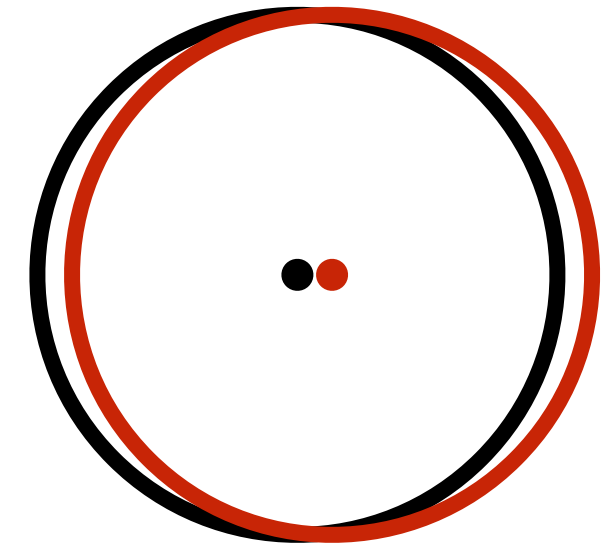


Le signal radio : interférences, cohérence

$\lambda \gg$ dimensions de la source

les champs d'additionnent de façon cohérente
avec la même phase : interférences constructives
champ total $\propto N_{\text{particles}} \propto E_{\text{primary}}$

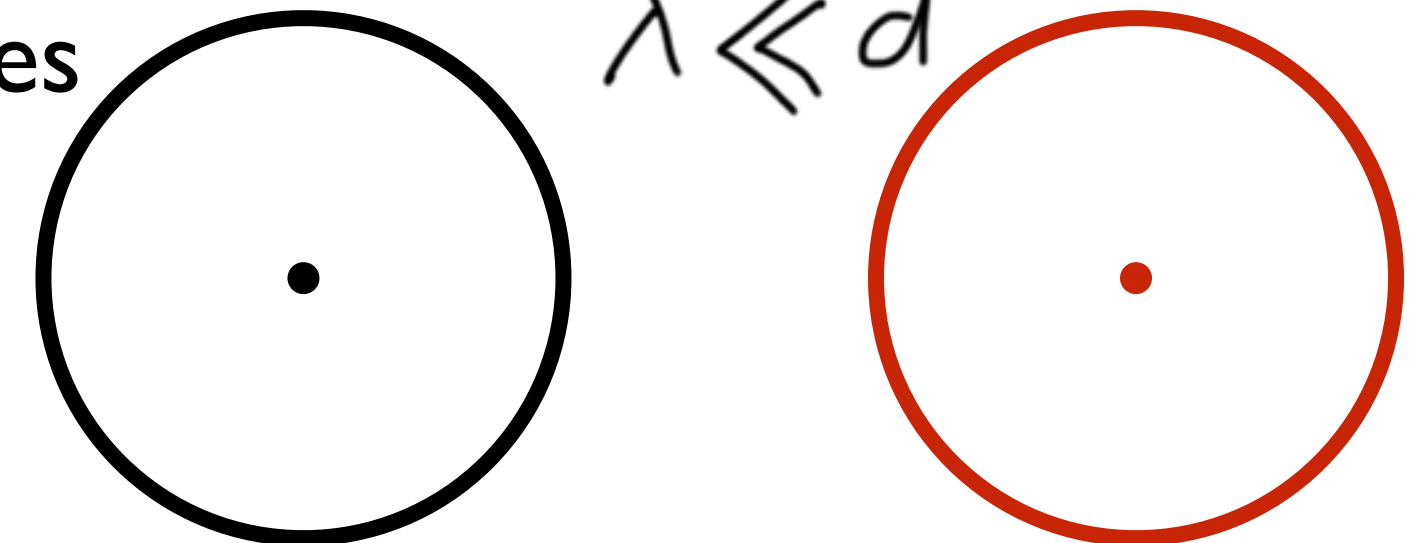
$\lambda \gg d$



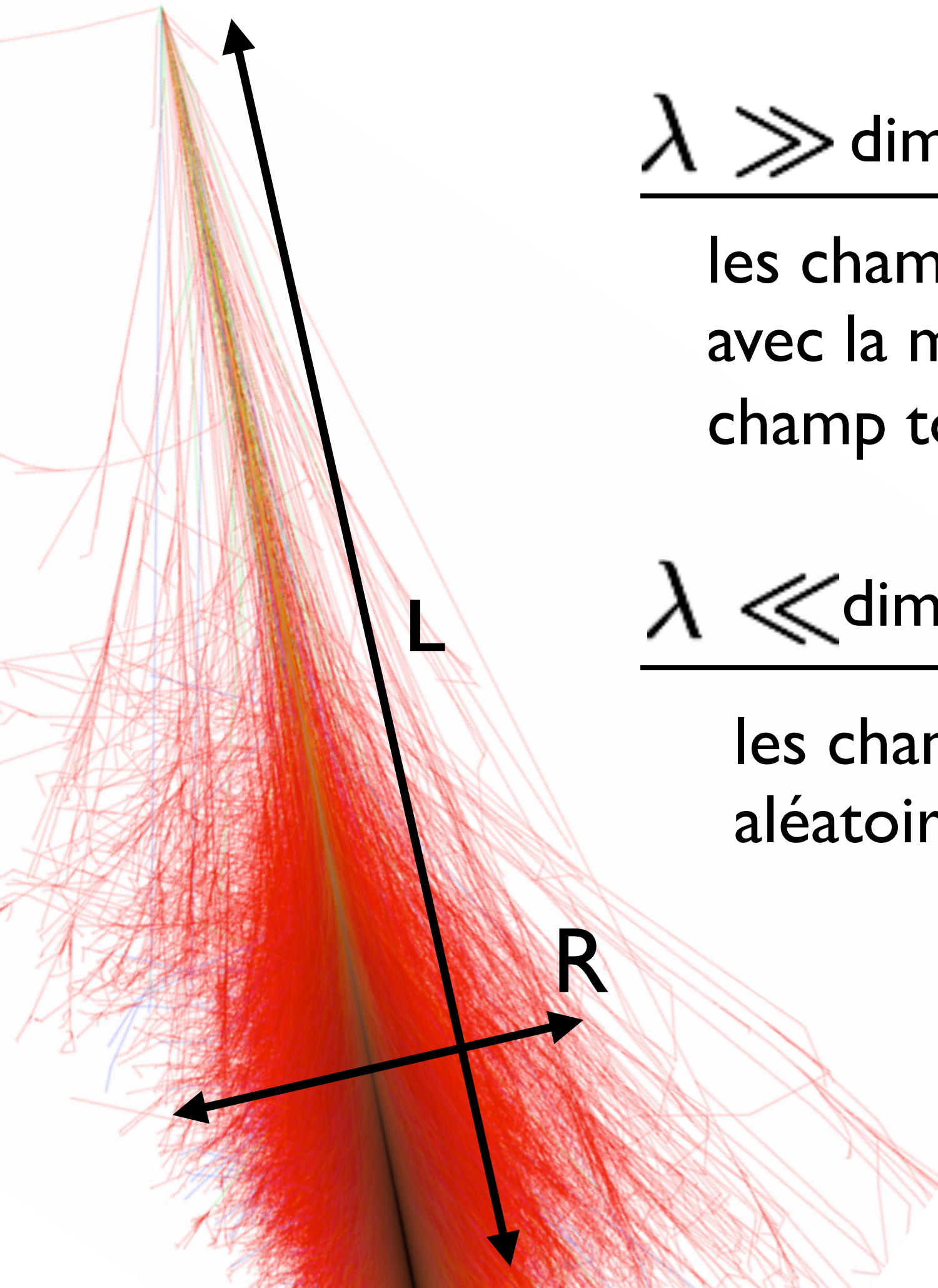
$\lambda \ll$ dimensions de la source

les champs se superposent avec des phases
aléatoires : interférences destructives

$\lambda \ll d$

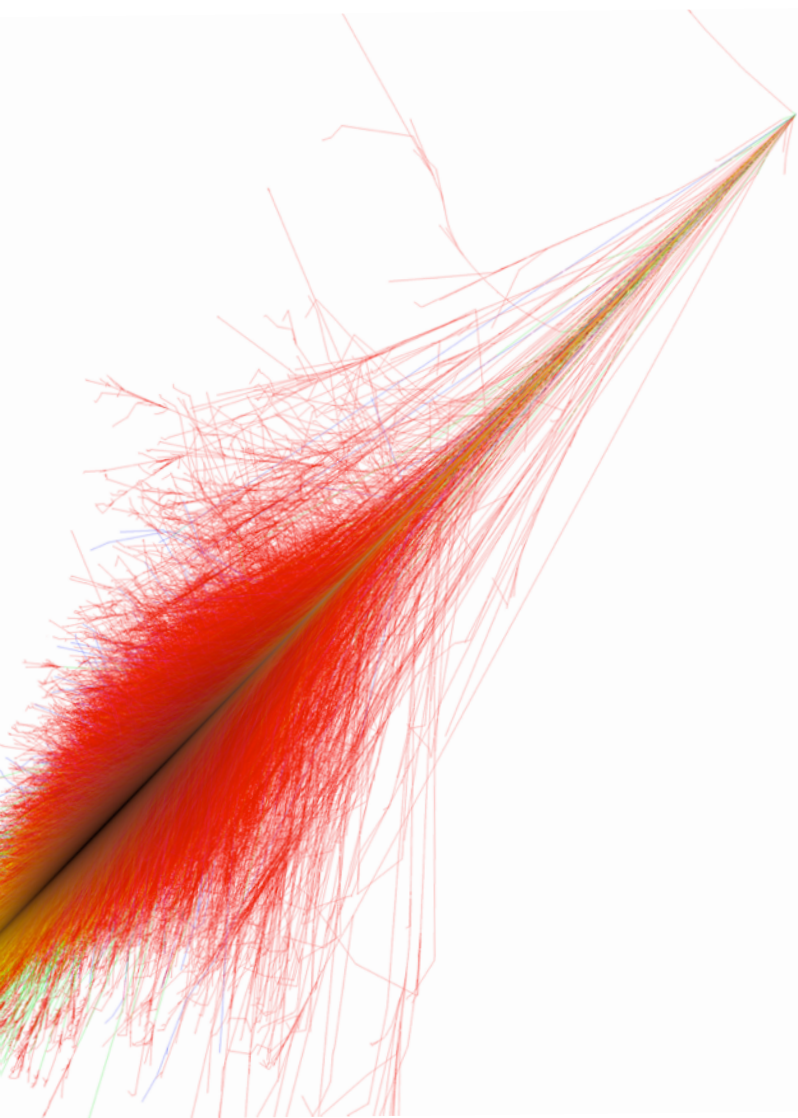


→ coupure dans le spectre en fréquence !
(perte de cohérence au dessus d'une fréquence de coupure)

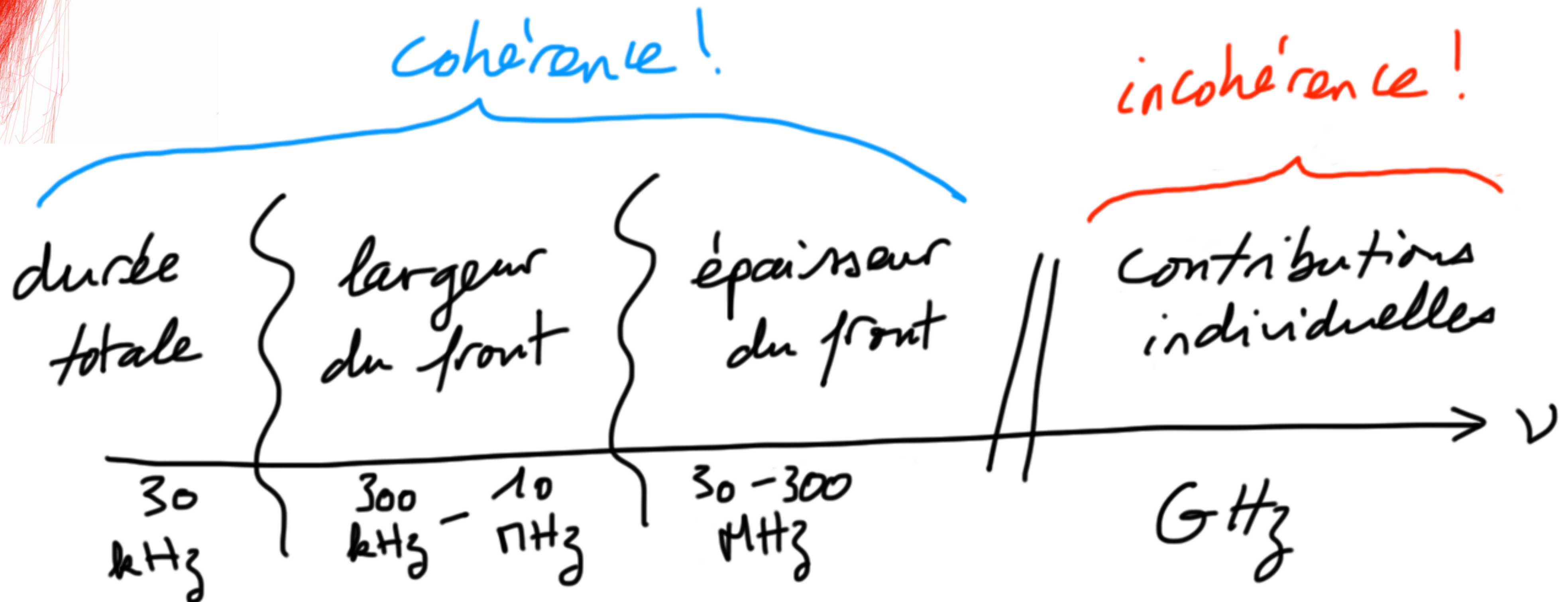


ground

Le signal radio : interférences, cohérence

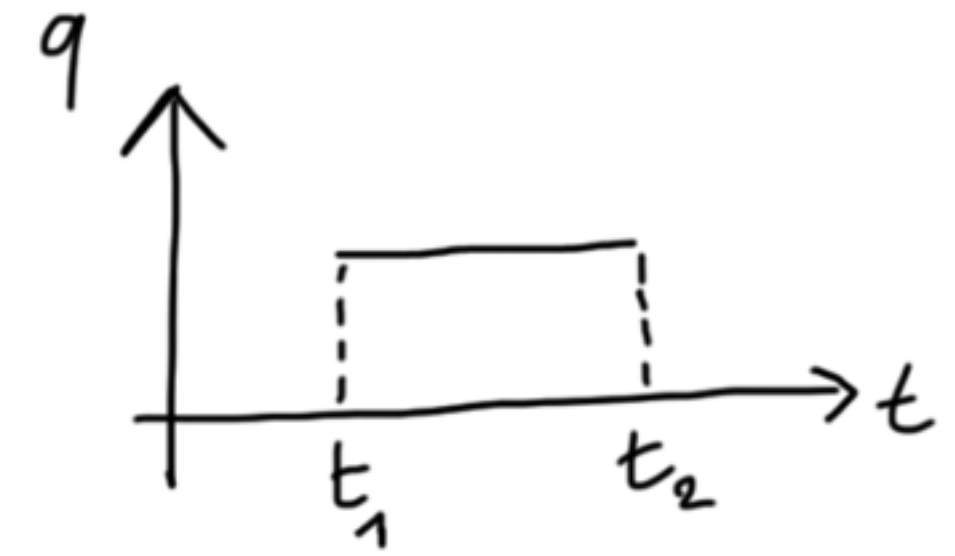


durée totale du développement de la gerbe = $10 \text{ km}/c \leftrightarrow 30 \mu\text{s} \leftrightarrow 30 \text{ kHz}$
largeur du front de gerbe = $50\text{-}1000 \text{ m}/c \leftrightarrow 300\text{-}3000 \text{ ns} \leftrightarrow 300 \text{ kHz}\text{-}10 \text{ MHz}$
épaisseur du front de gerbe = $1\text{-}10 \text{ m}/c \leftrightarrow 3\text{-}30 \text{ ns} \leftrightarrow 30\text{-}300 \text{ MHz}$



Le signal radio (approche théorique)

Pour une particule chargée à durée de vie finie



$$\text{Densité de charge} \quad \rho(\mathbf{x}', t') = q[\theta(t' - t_1) - \theta(t' - t_2)]\delta^3(\mathbf{x}' - \mathbf{x}_0(t'))$$

$$\text{Densité de courant} \quad \mathbf{J}(\mathbf{x}', t') = \rho(\mathbf{x}', t')\mathbf{v}(t')$$

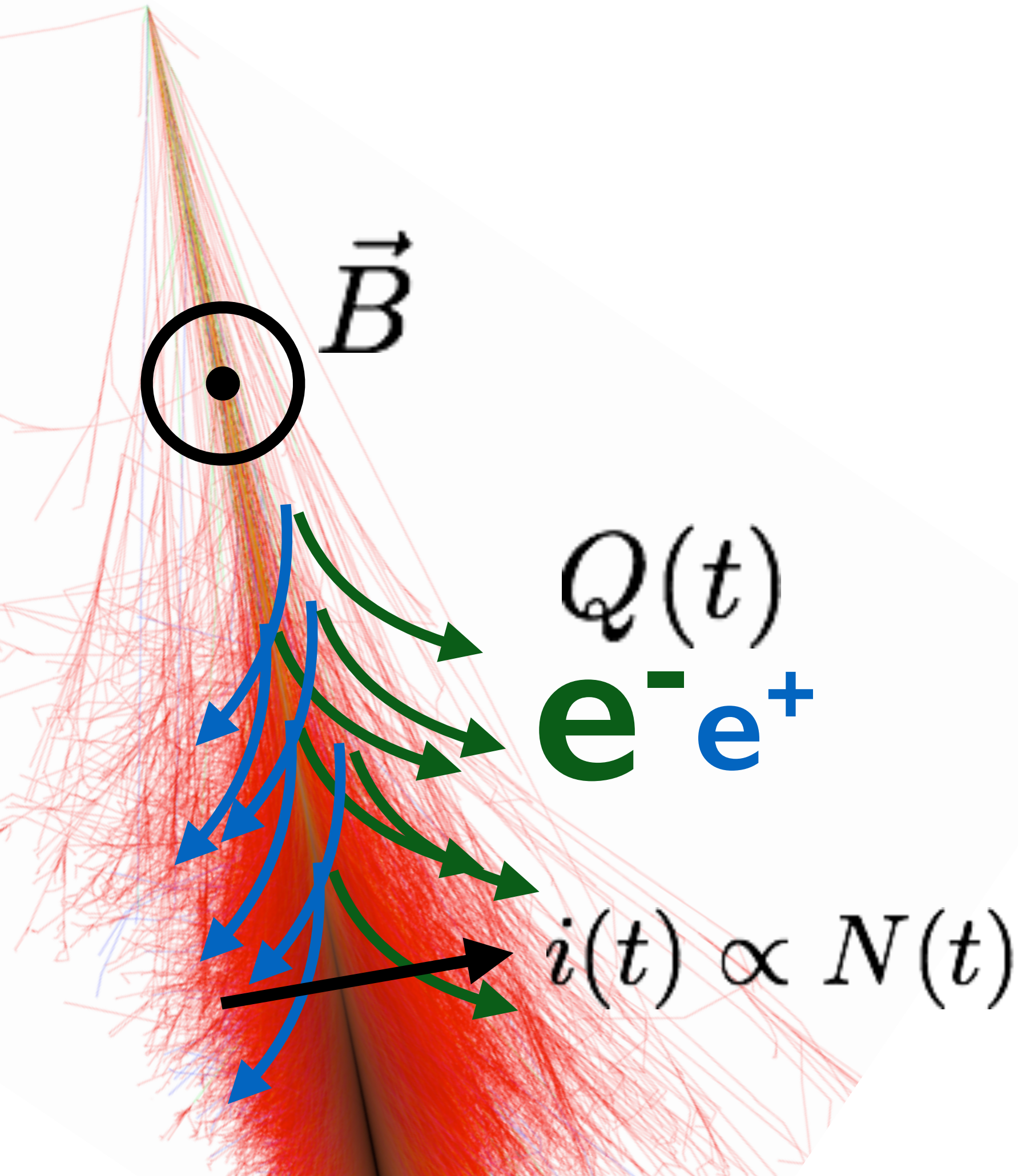
Solution des équations de Maxwell en jauge de Lorenz :

$$\vec{E}(\vec{x}, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int d^3x' d^3t' \frac{1}{R} \left(-\nabla' \rho - \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{J}}{\partial t'} \right)_{\text{ret}} \delta \left(t' - \left(t - \frac{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|}{c/\eta} \right) \right)$$

$$\vec{E}(\vec{x}, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{q \vec{n}}{R^2(1 - \eta \vec{\beta} \cdot \vec{n})} + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \frac{q \vec{n}}{R(1 - \eta \vec{\beta} \cdot \vec{n})} - \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \frac{q \vec{\beta}}{R(1 - \eta \vec{\beta} \cdot \vec{n})} \right)_{\text{ret}}$$

code SELFAS, Marin & Revenu, Astropart. Phys. 35, 733 (2012)

Le signal radio total



$$\vec{E}(\vec{x}, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\sum_{i=1}^N \frac{q_i \vec{n}_i}{R_i^2 (1 - \eta \vec{\beta}_i \cdot \vec{n}_i)} + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{i=1}^N \frac{q_i \vec{n}_i}{R_i (1 - \eta \vec{\beta}_i \cdot \vec{n}_i)} - \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{i=1}^N \frac{q_i \vec{\beta}_i}{R_i (1 - \eta \vec{\beta}_i \cdot \vec{n}_i)} \right)$$

Coulombian contribution

Charge excess contribution

Transverse current contribution

Transverse current contribution

$$-\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{i=1}^N \frac{q_i \vec{\beta}_i}{R_i (1 - \eta \vec{\beta}_i \cdot \vec{n}_i)}$$

- contribution dominante
- polarisation linéaire
- indépendant de la position de l'observateur

PFD Lorentz :

$$\frac{\partial}{\partial t} \vec{\beta}_i \propto \vec{\beta}_i \times \vec{B} + \text{diffusions multiples aléatoires}$$

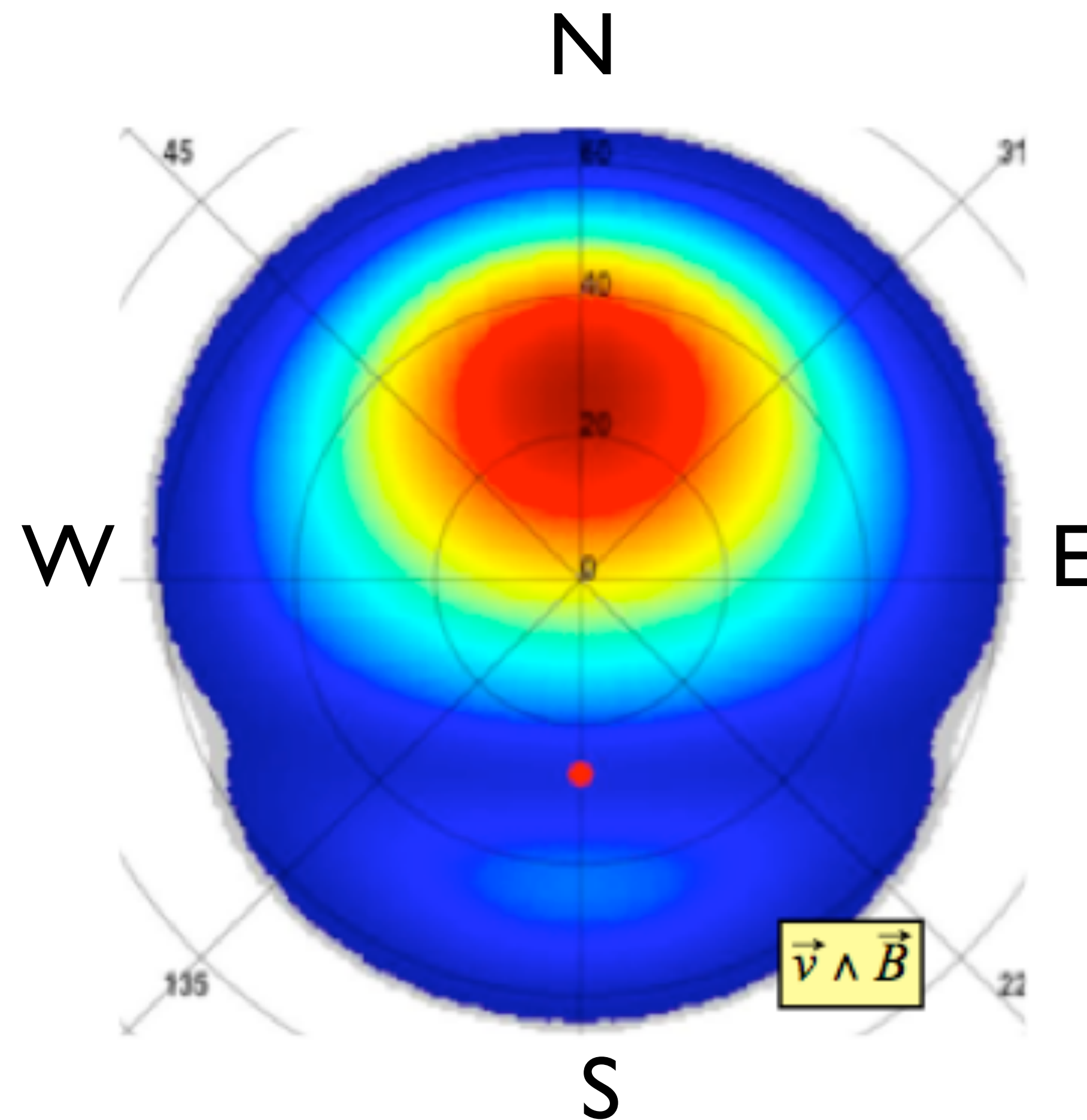
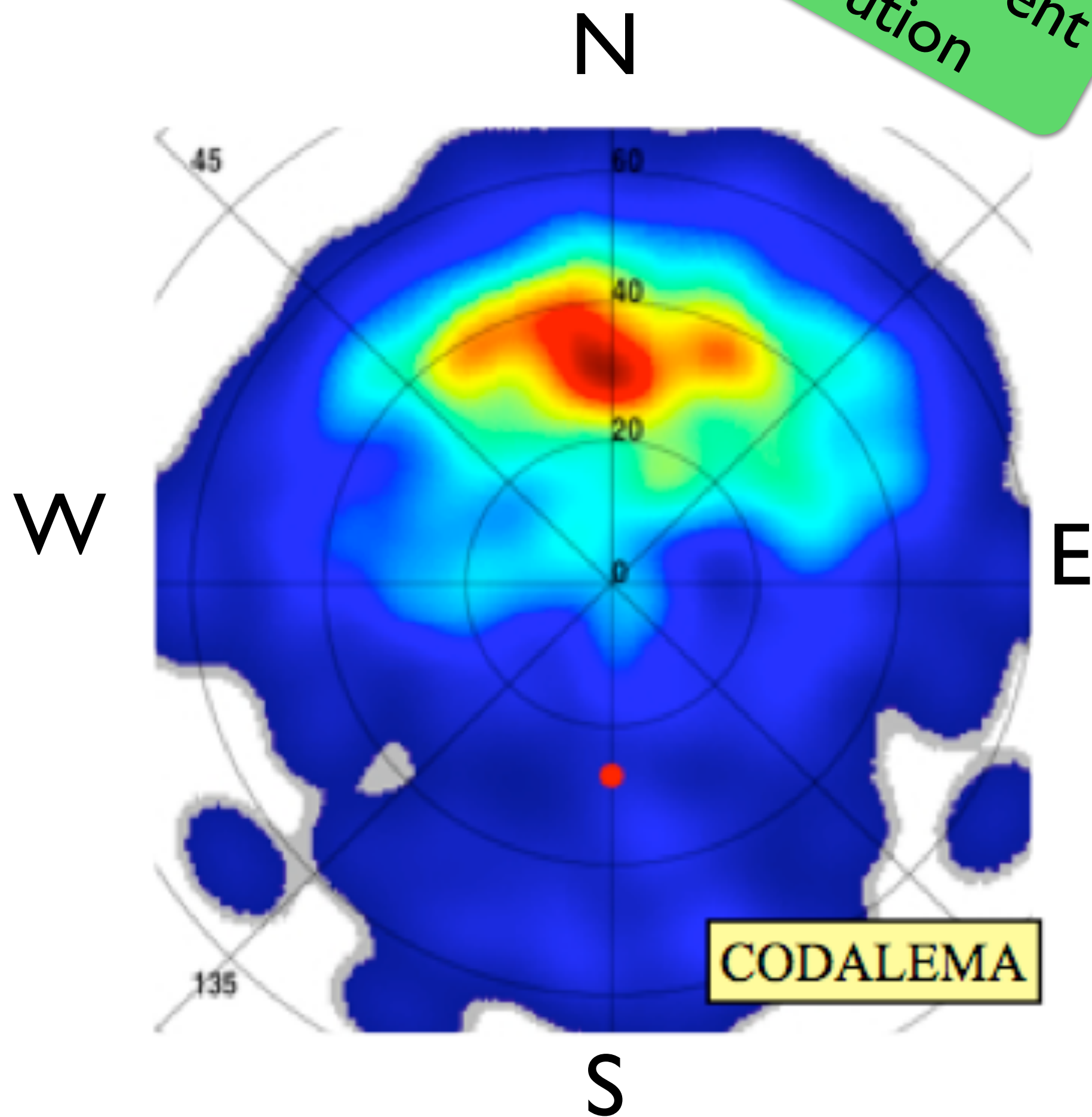
~ direction de l'axe

champ magnétique terrestre

à énergie fixée, le champ électrique produit par ce mécanisme est maximal quand la direction d'arrivée est \perp à \vec{B}

$$-\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{i=1}^N \frac{q_i \vec{\beta}_i}{R_i (1 - \eta \vec{\beta}_i \cdot \vec{n}_i)}$$

Transverse current contribution



CODALEMA collab, Astroparticle Physics 2009

Transverse current contribution

$$-\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{i=1}^N \frac{q_i \vec{\beta}_i}{R_i (1 - \eta \vec{\beta}_i \cdot \vec{n}_i)}$$

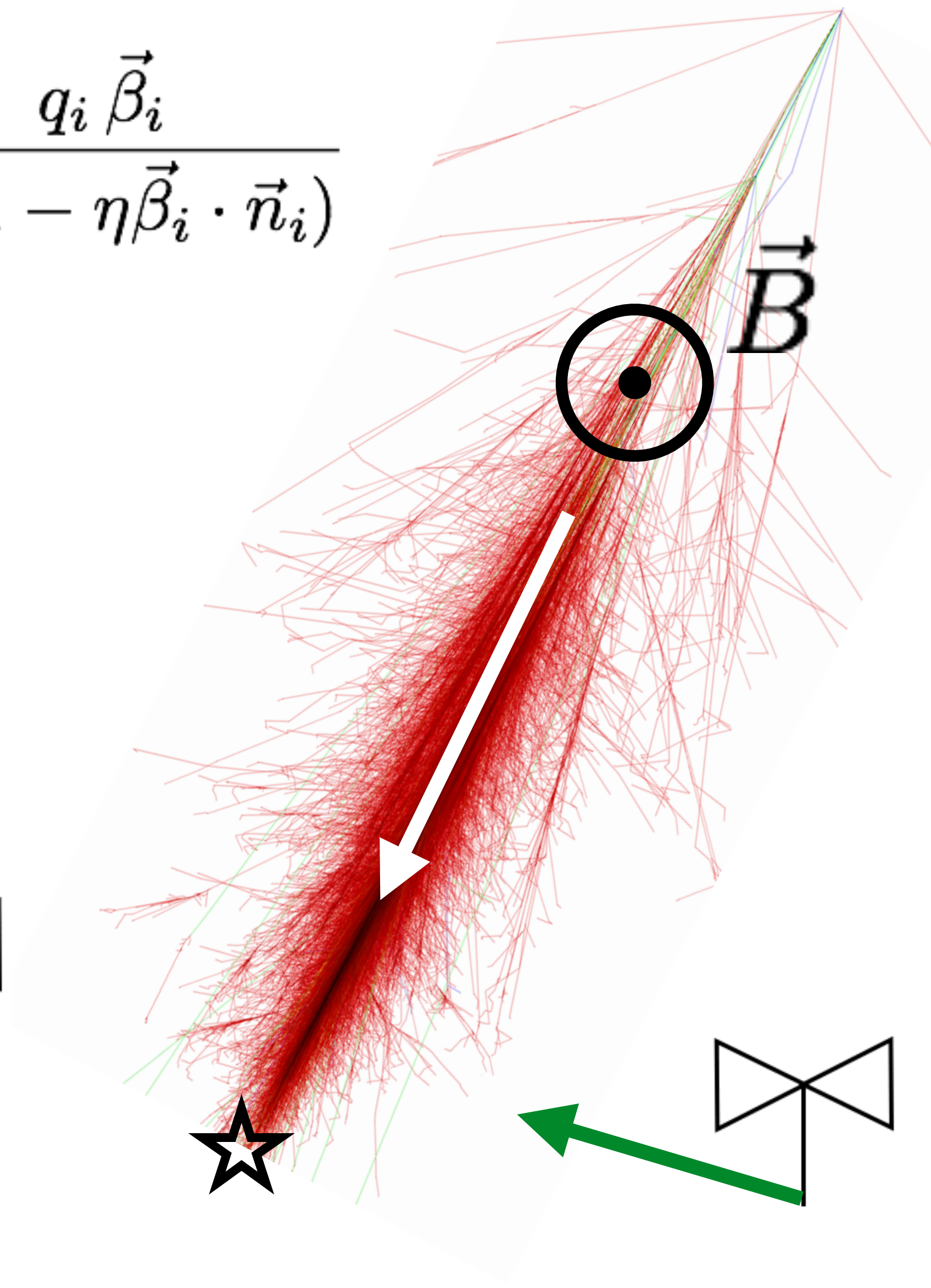
$$\vec{E}_{\text{geo}} \propto \vec{\beta} \times \vec{B}$$

calcul de l'angle de polarisation du champ à partir des **mesures** dans les directions nord/sud et est/ouest :

$$\phi_{\text{mes}} = \arctan(E_{\text{NS}}/E_{\text{EW}})$$

que l'on compare à l'angle de polarisation **attendu** :

$$\phi_{\text{exp}} = \arctan((\vec{\beta} \times \vec{B})_{\text{NS}}/(\vec{\beta} \times \vec{B})_{\text{EW}})$$



Transverse current contribution

$$-\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{i=1}^N \frac{q_i \vec{\beta}_i}{R_i (1 - \eta \vec{\beta}_i \cdot \vec{n}_i)}$$

$$\vec{E}_{\text{geo}} \propto \vec{\beta} \times \vec{B}$$

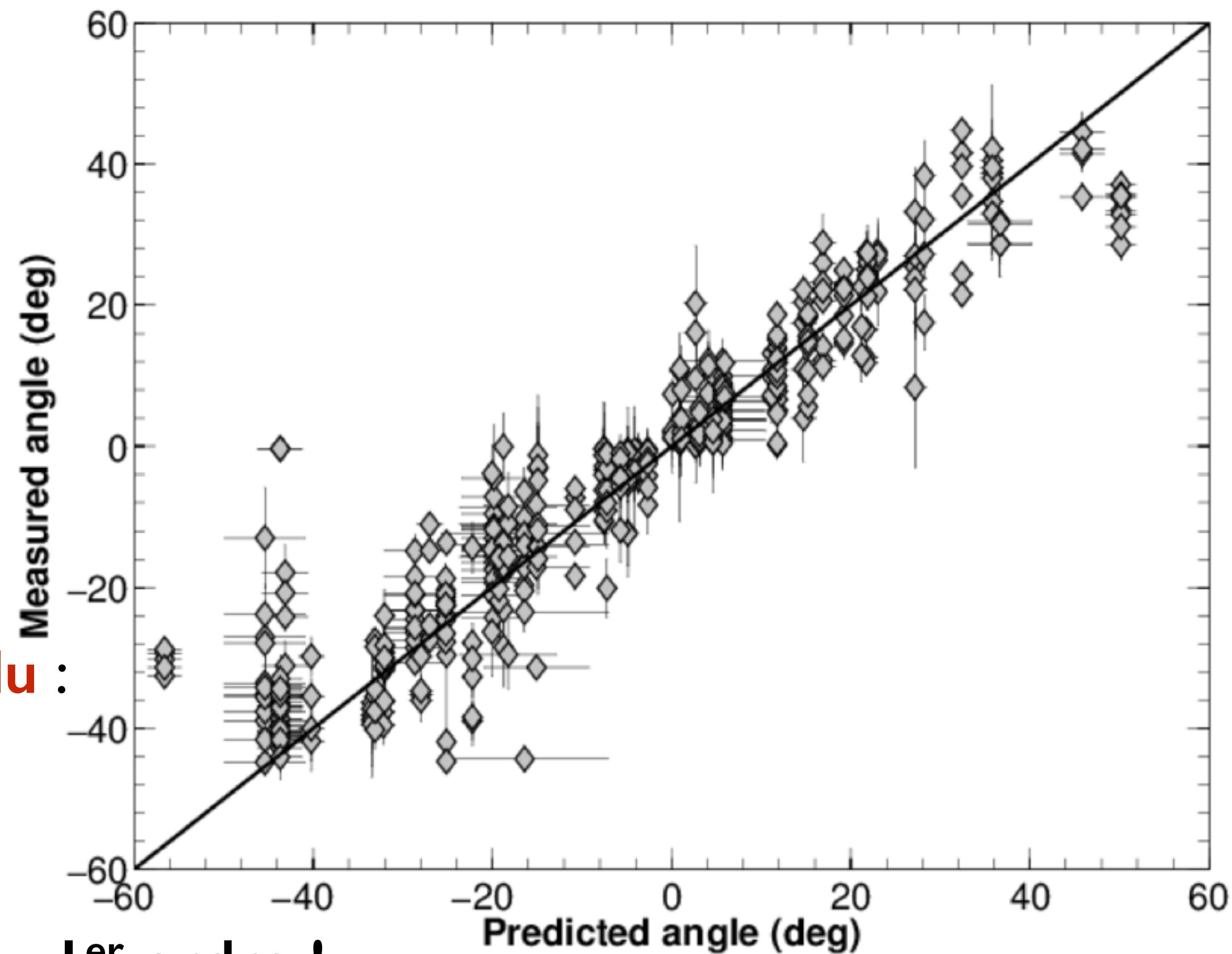
calcul de l'angle de polarisation du champ à partir des **mesures** dans les directions nord/sud et est/ouest :

$$\phi_{\text{mes}} = \arctan(E_{\text{NS}}/E_{\text{EW}})$$

que l'on compare à l'angle de polarisation **attendu** :

$$\phi_{\text{exp}} = \arctan((\vec{\beta} \times \vec{B})_{\text{NS}}/(\vec{\beta} \times \vec{B})_{\text{EW}})$$

CODALEMA data



Domination du mécanisme géomagnétique au 1^{er} ordre !

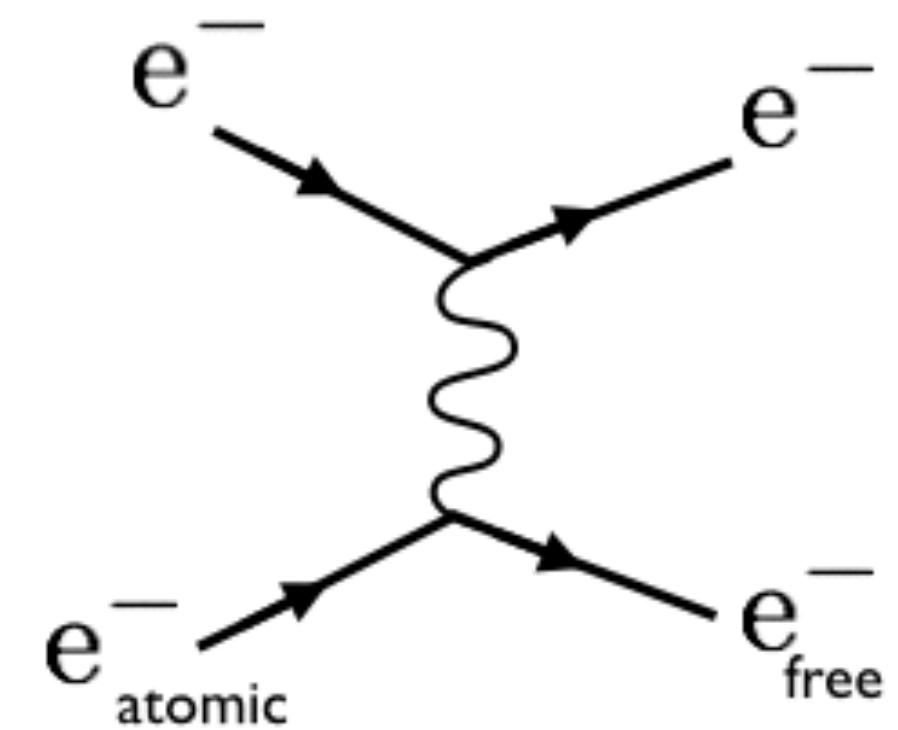
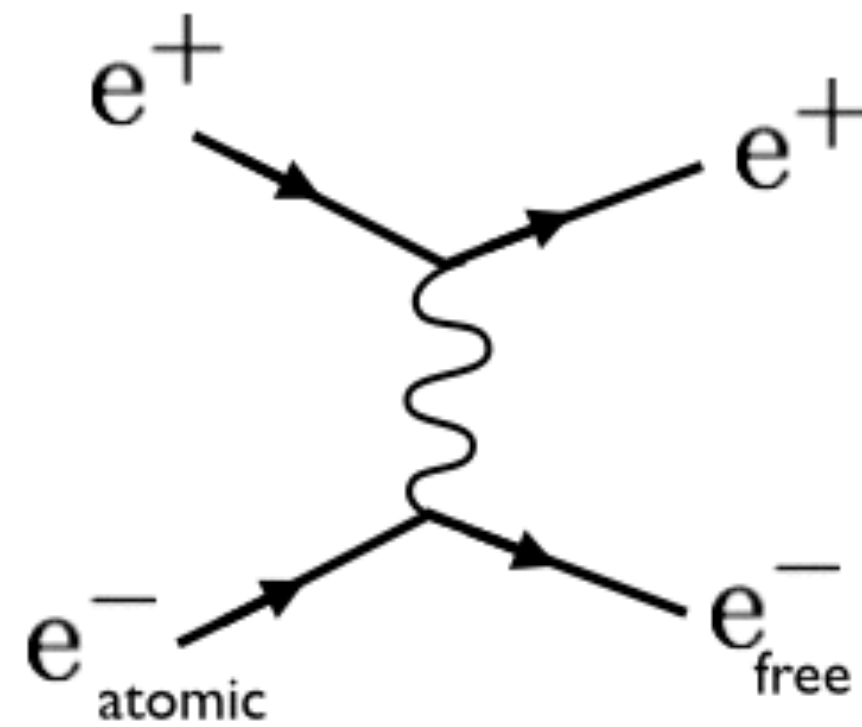
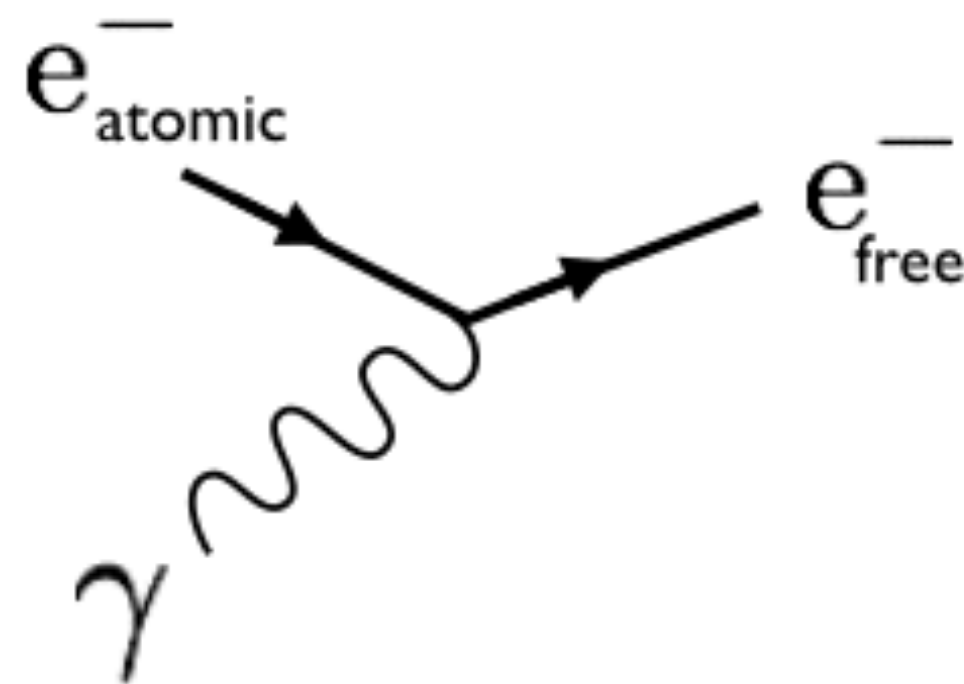
Charge excess contribution

$$+ \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{i=1}^N \frac{q_i \vec{n}_i}{R_i (1 - \eta \vec{\beta}_i \cdot \vec{n}_i)}$$

Pas de champ électrique si $n_{e^+} = n_{e^-}$

mais $n_{e^+} < n_{e^-}$ car :

- annihilation des e^+ en vol
- extraction d' e^- au milieu (Compton, Bhabha, Moeller)



Charge excess
contribution

$$+ \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{i=1}^N \frac{q_i \vec{n}_i}{R_i (1 - \eta \vec{\beta}_i \cdot \vec{n}_i)}$$

(Askaryan 1962, 1965)

Pas de champ électrique si $n_{e+} = n_{e-}$

mais $n_{e+} < n_{e-}$ car :

- annihilation des e^+ en vol
- extraction d' e^- au milieu (Compton, Bhabha, Moeller)

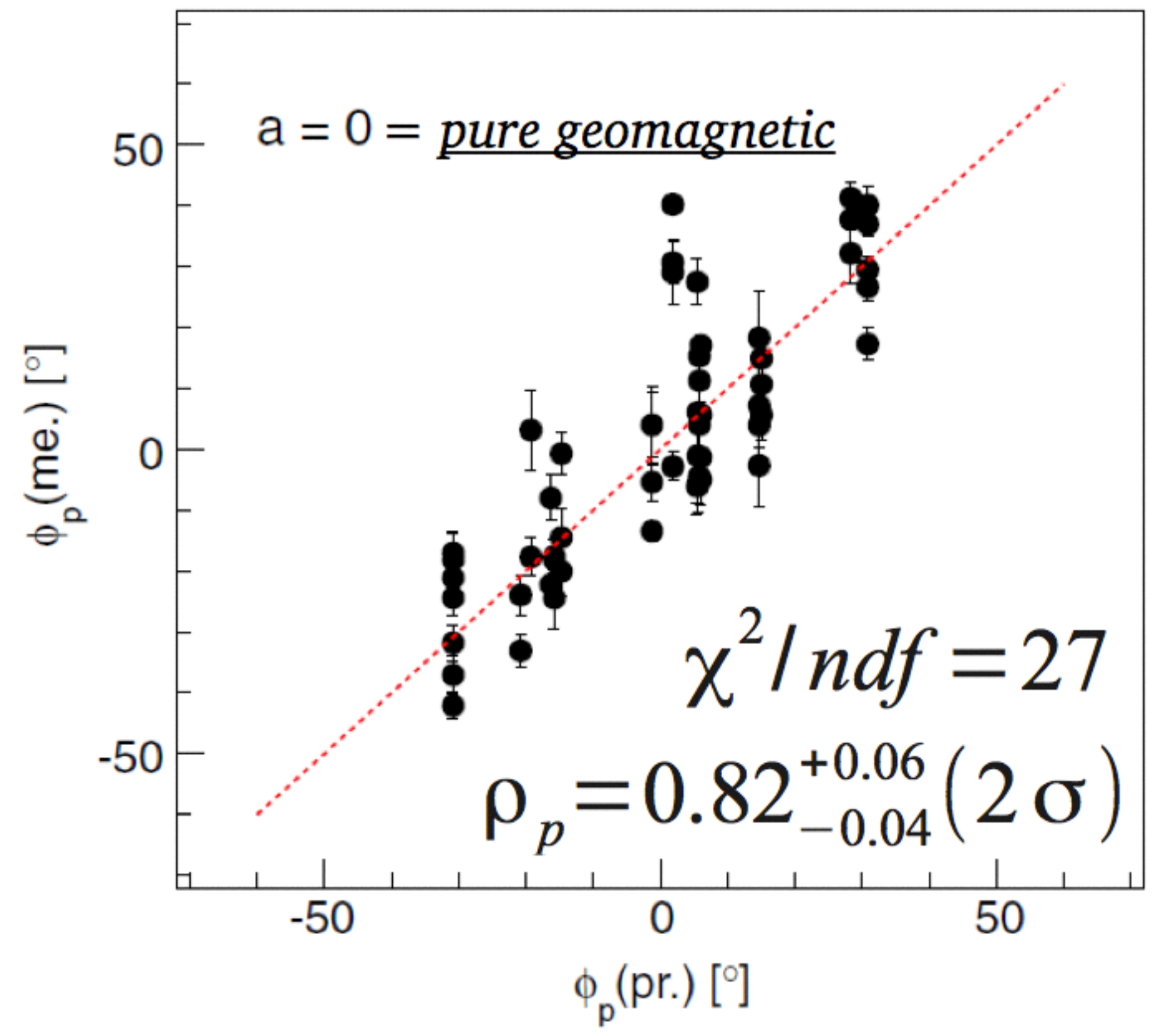
cet excès d'électrons produit :

- un champ électrique non nul
- caractérisé par un schéma de polarisation radial
- le champ dépend de la position de l'observateur

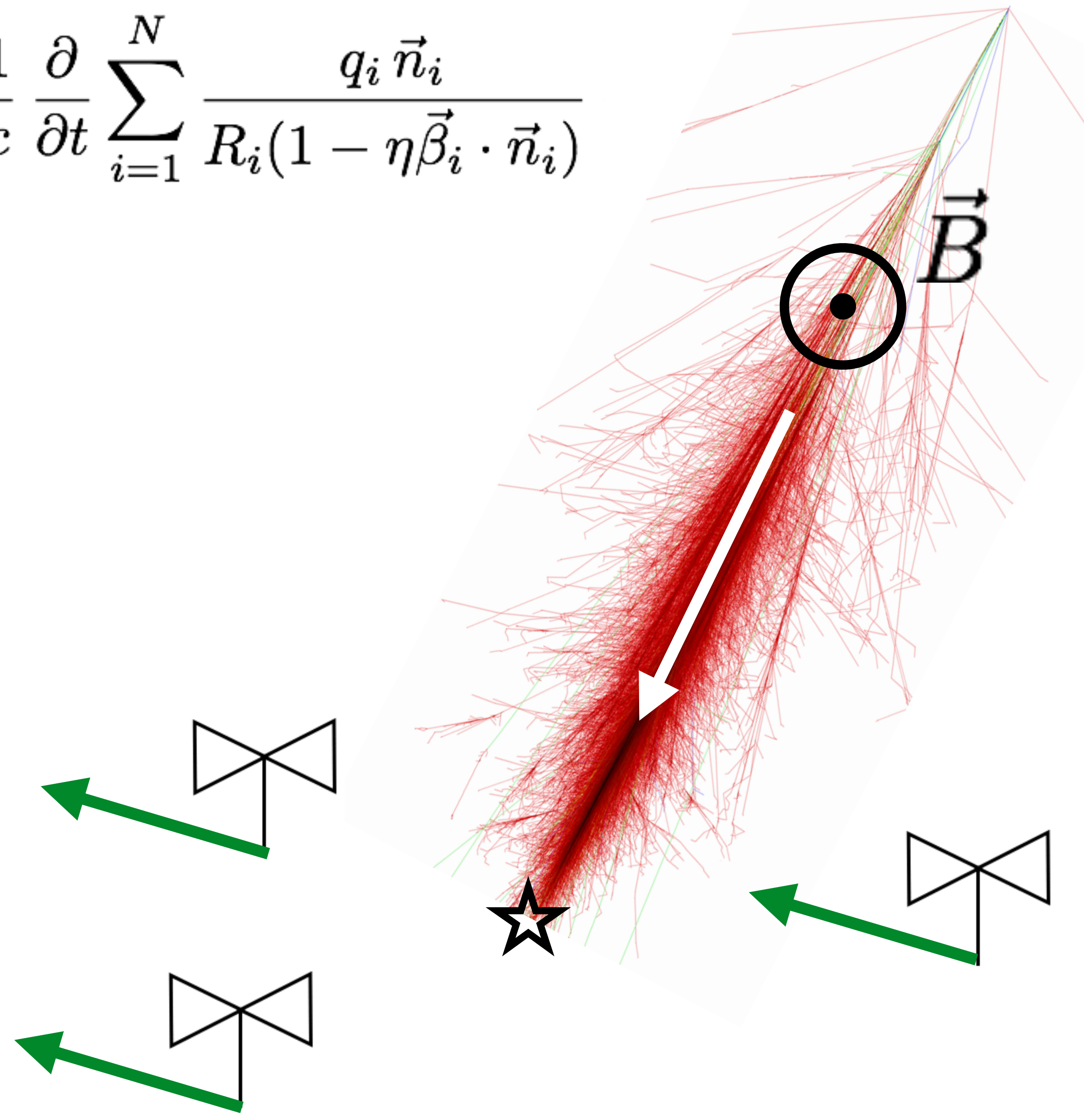
Charge excess contribution

$$+ \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{i=1}^N \frac{q_i \vec{n}_i}{R_i (1 - \eta \vec{\beta}_i \cdot \vec{n}_i)}$$

AERA data



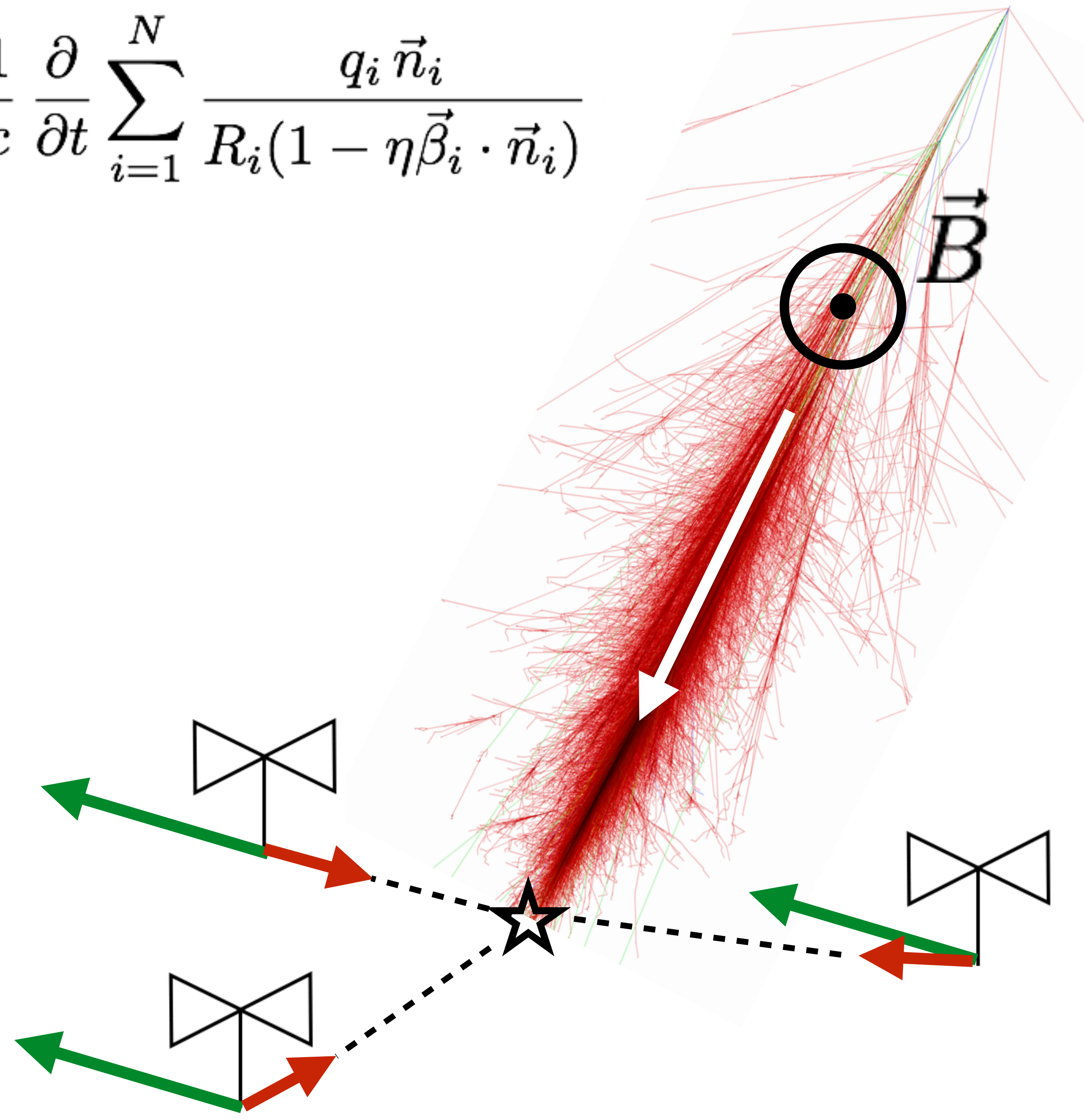
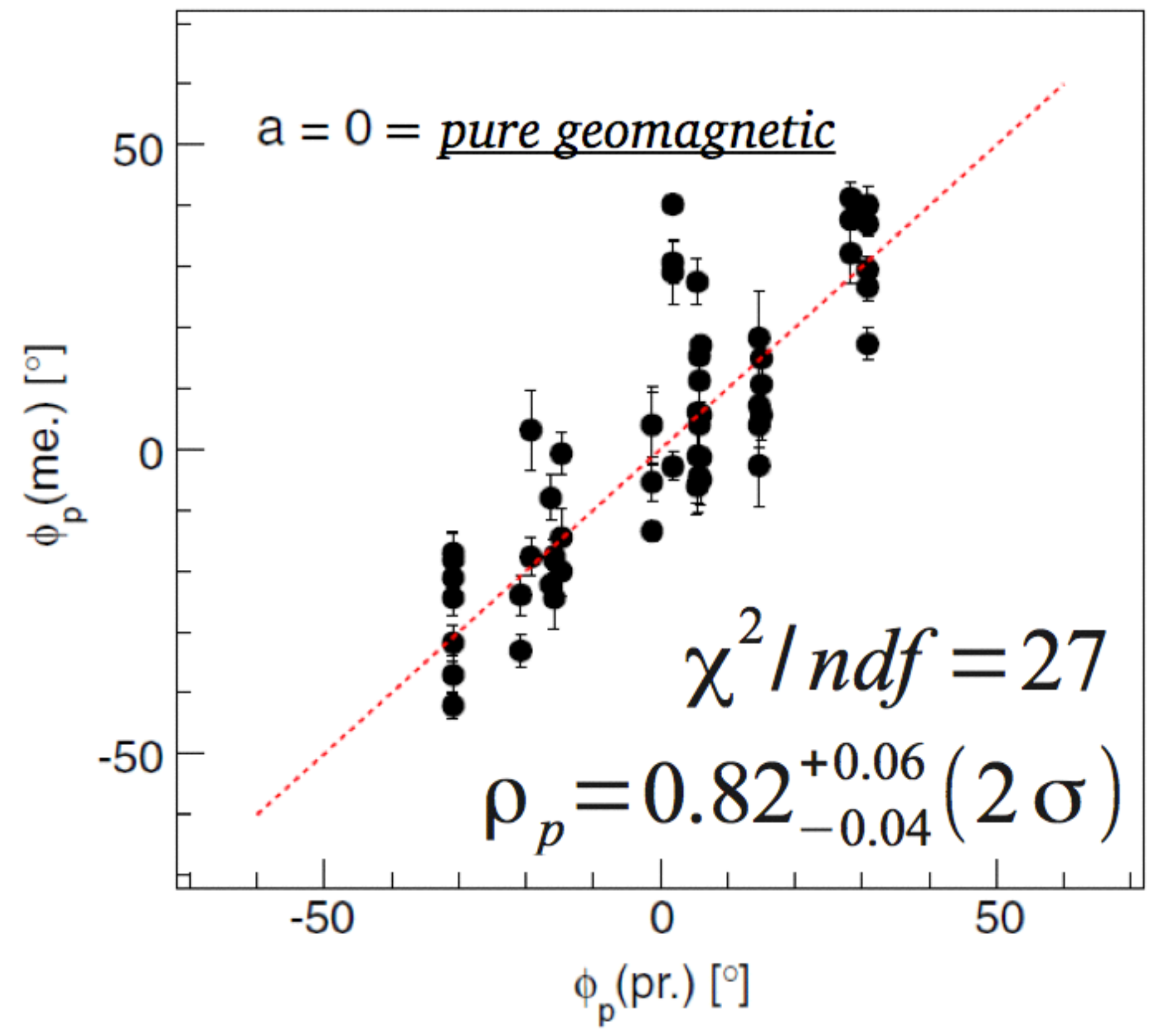
The Pierre Auger Collaboration, Phys. Rev. D 89, 052002 (2014)



Charge excess contribution

$$+ \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{i=1}^N \frac{q_i \vec{n}_i}{R_i (1 - \eta \vec{\beta}_i \cdot \vec{n}_i)}$$

AERA data

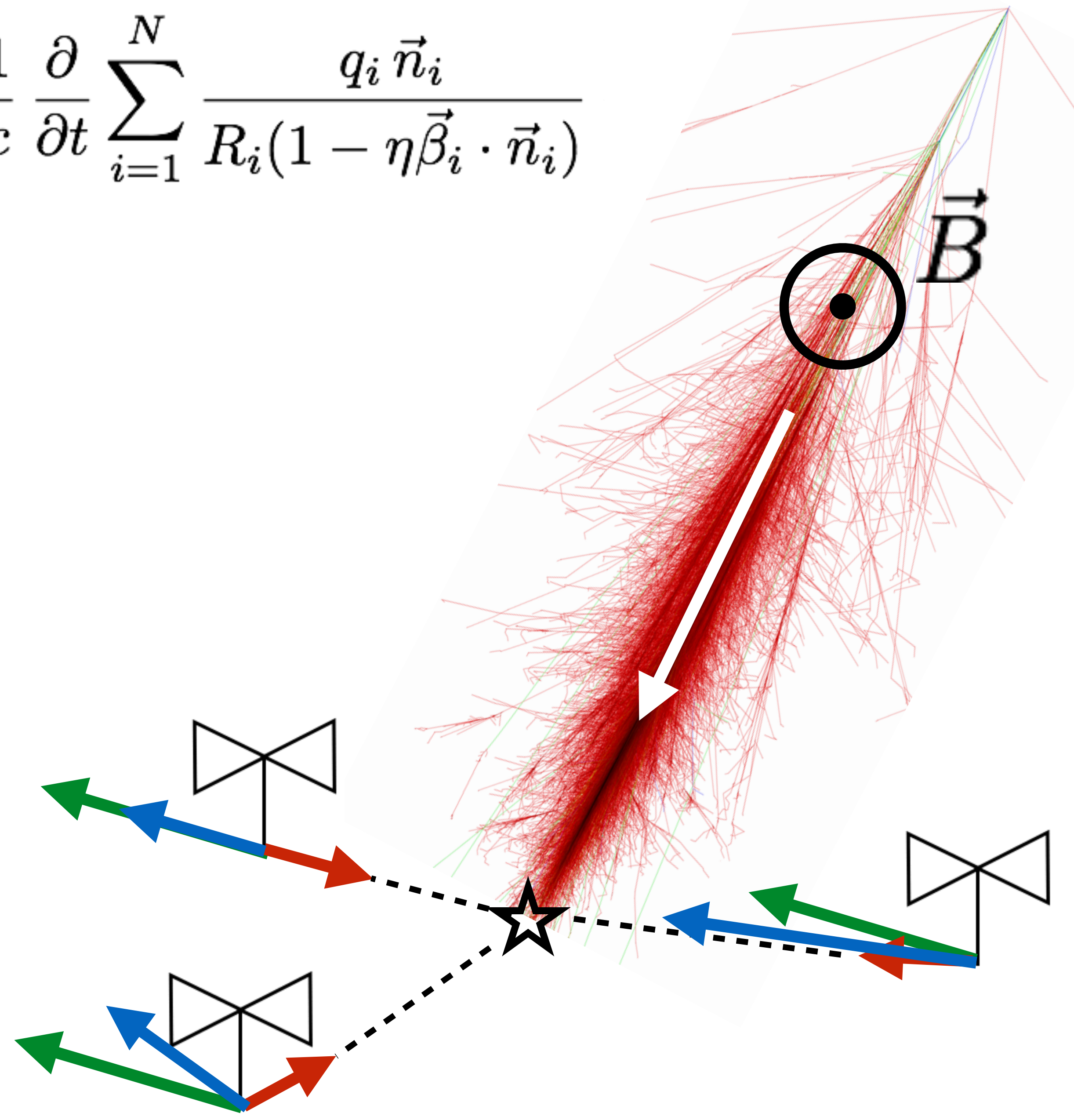
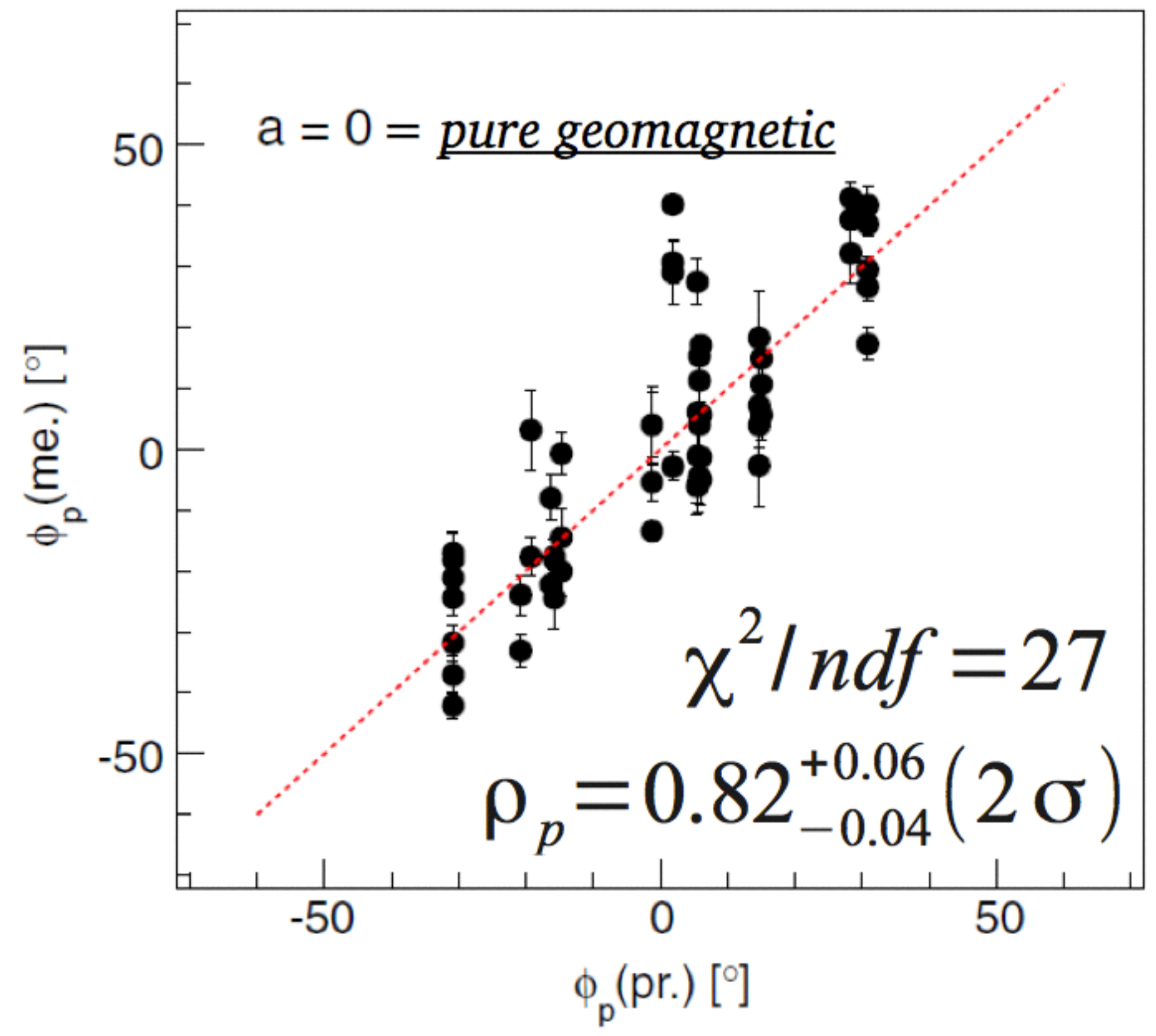


The Pierre Auger Collaboration, Phys. Rev. D 89, 052002 (2014)

Charge excess contribution

$$+ \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{i=1}^N \frac{q_i \vec{n}_i}{R_i (1 - \eta \vec{\beta}_i \cdot \vec{n}_i)}$$

AERA data

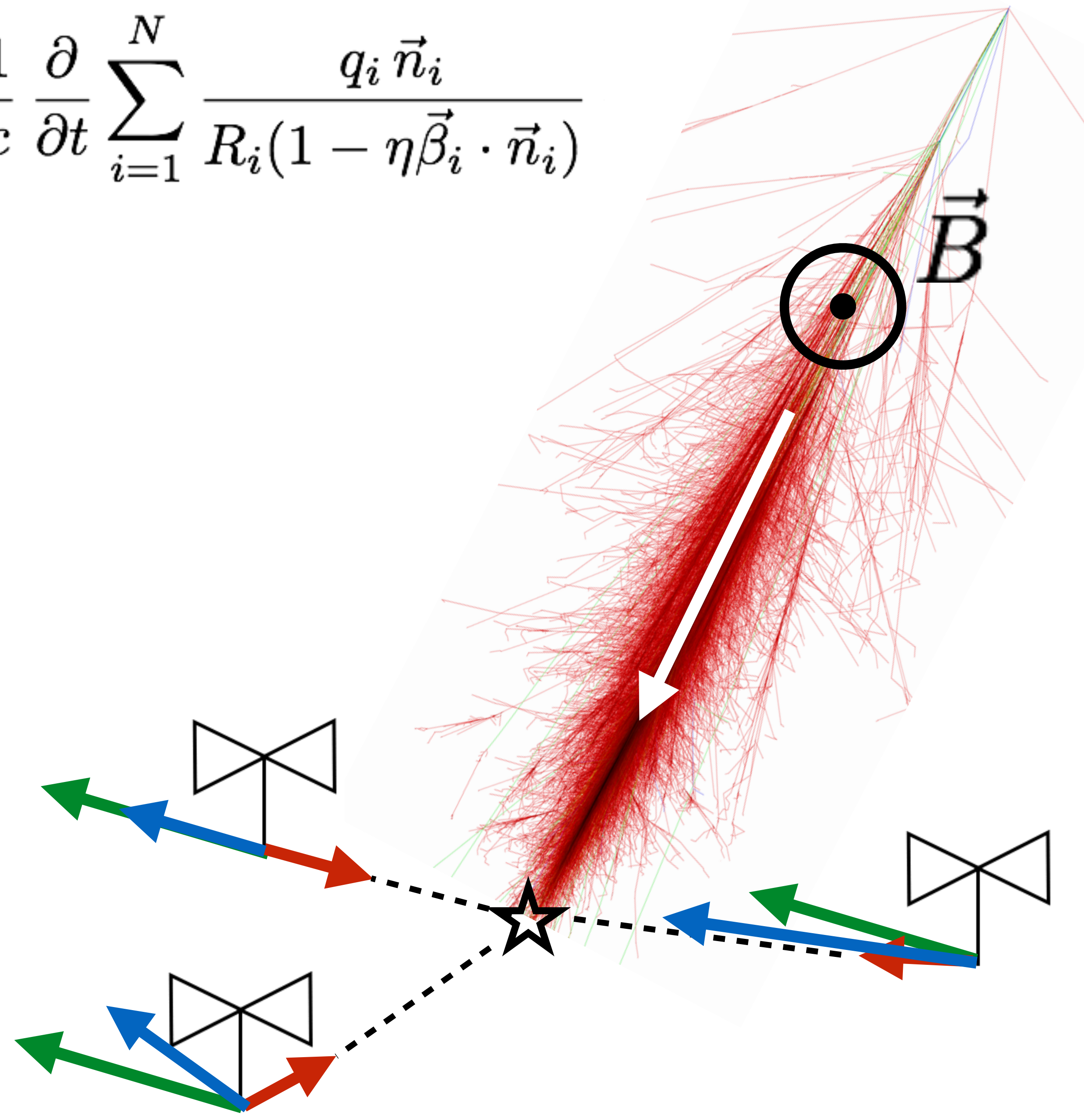
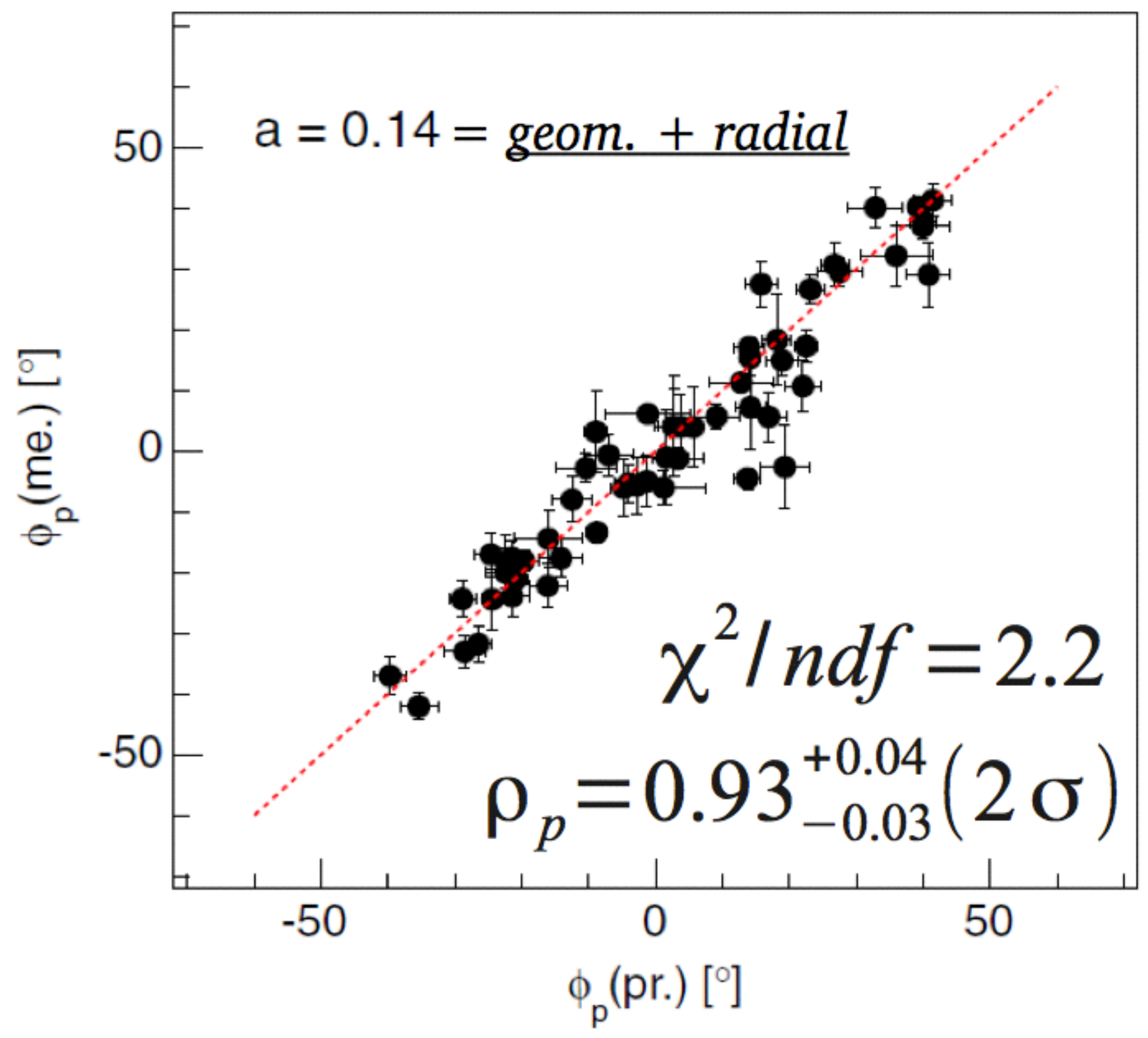


The Pierre Auger Collaboration, Phys. Rev. D 89, 052002 (2014)

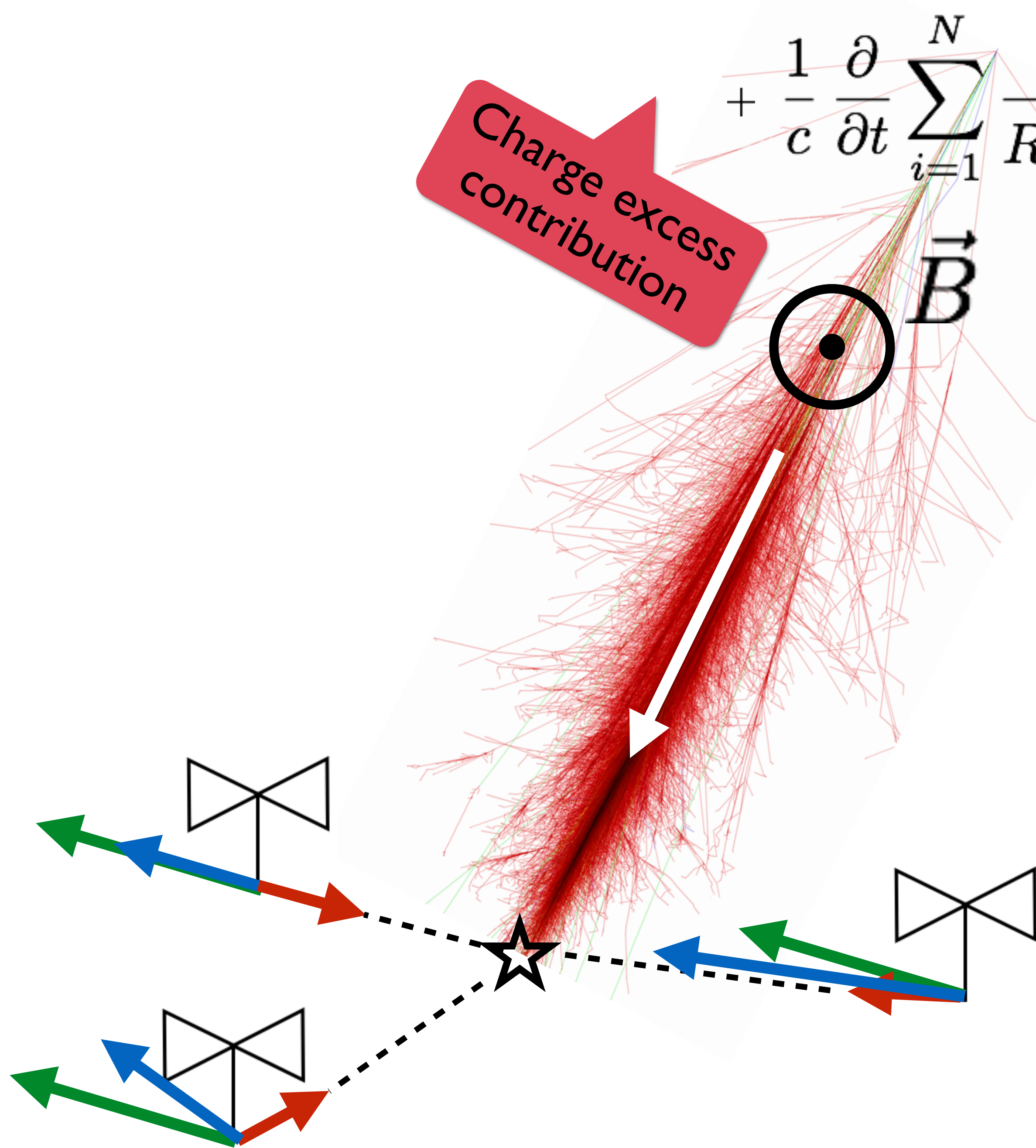
Charge excess contribution

$$+ \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{i=1}^N \frac{q_i \vec{n}_i}{R_i (1 - \eta \vec{\beta}_i \cdot \vec{n}_i)}$$

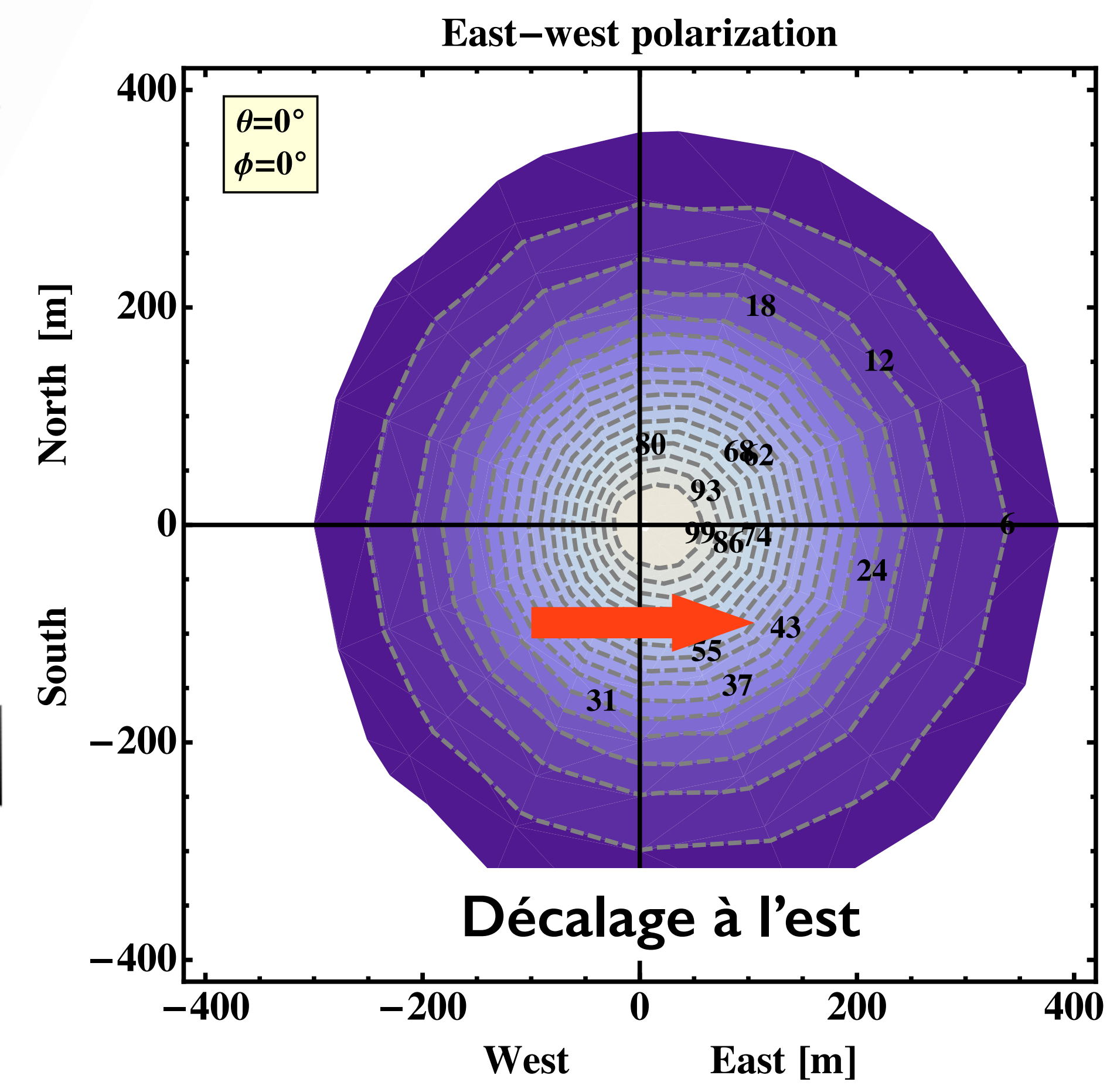
AERA data



The Pierre Auger Collaboration, Phys. Rev. D 89, 052002 (2014)



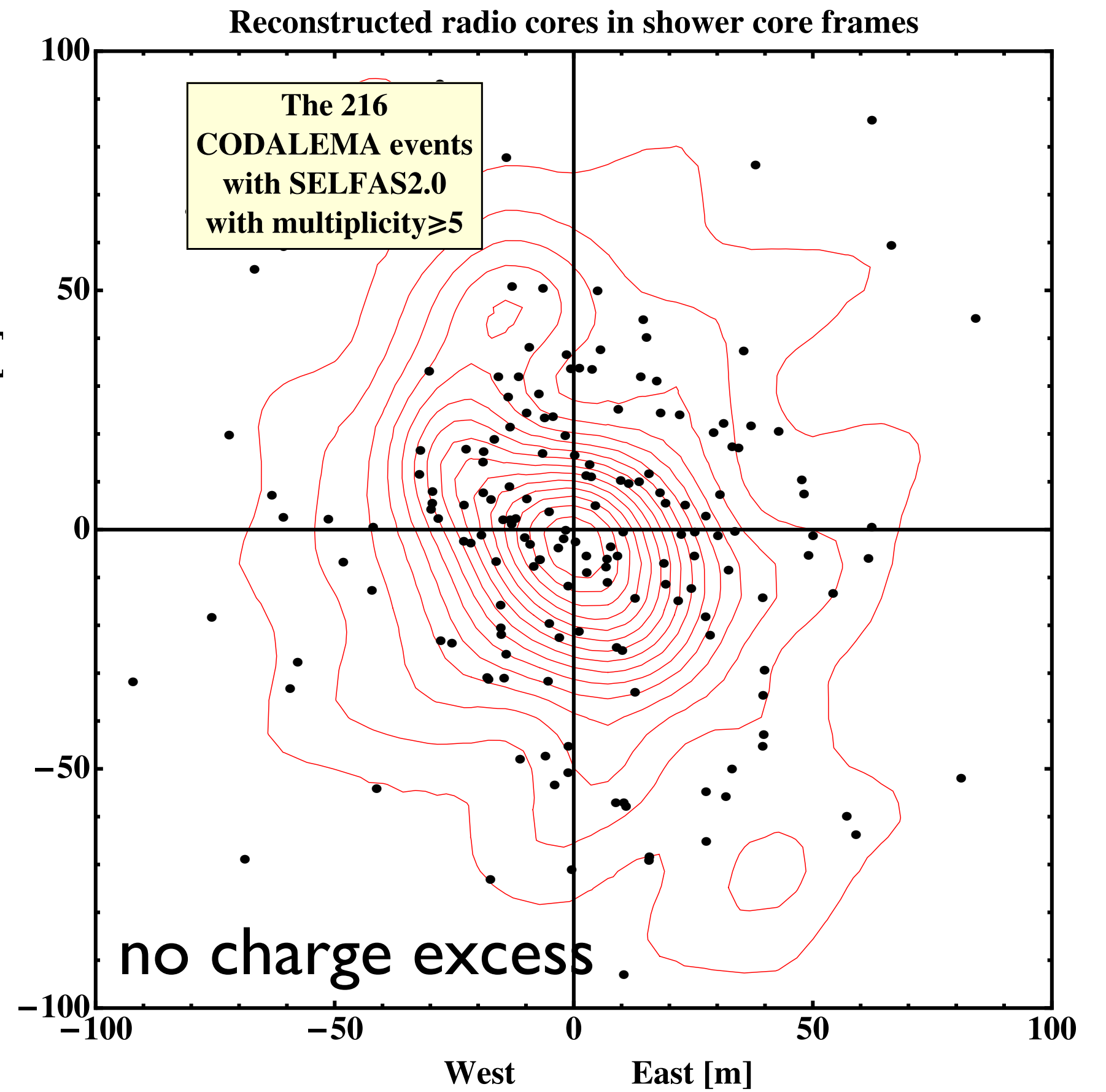
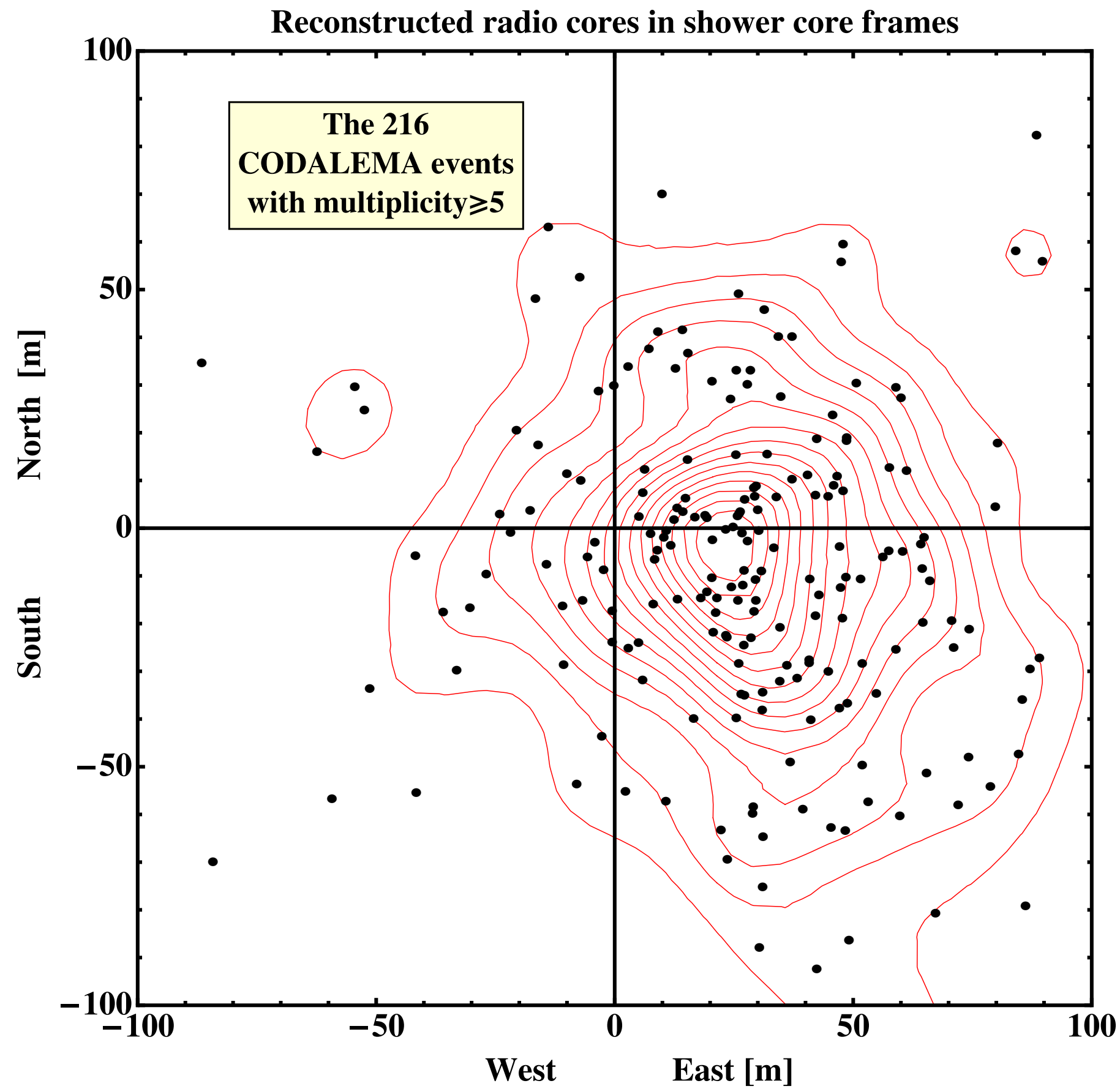
$$+ \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{i=1}^N \frac{q_i \vec{n}_i}{R_i (1 - \eta \vec{\beta}_i \cdot \vec{n}_i)}$$



Charge excess contribution

$$+ \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{i=1}^N \frac{q_i \vec{n}_i}{R_i (1 - \eta \vec{\beta}_i \cdot \vec{n}_i)}$$

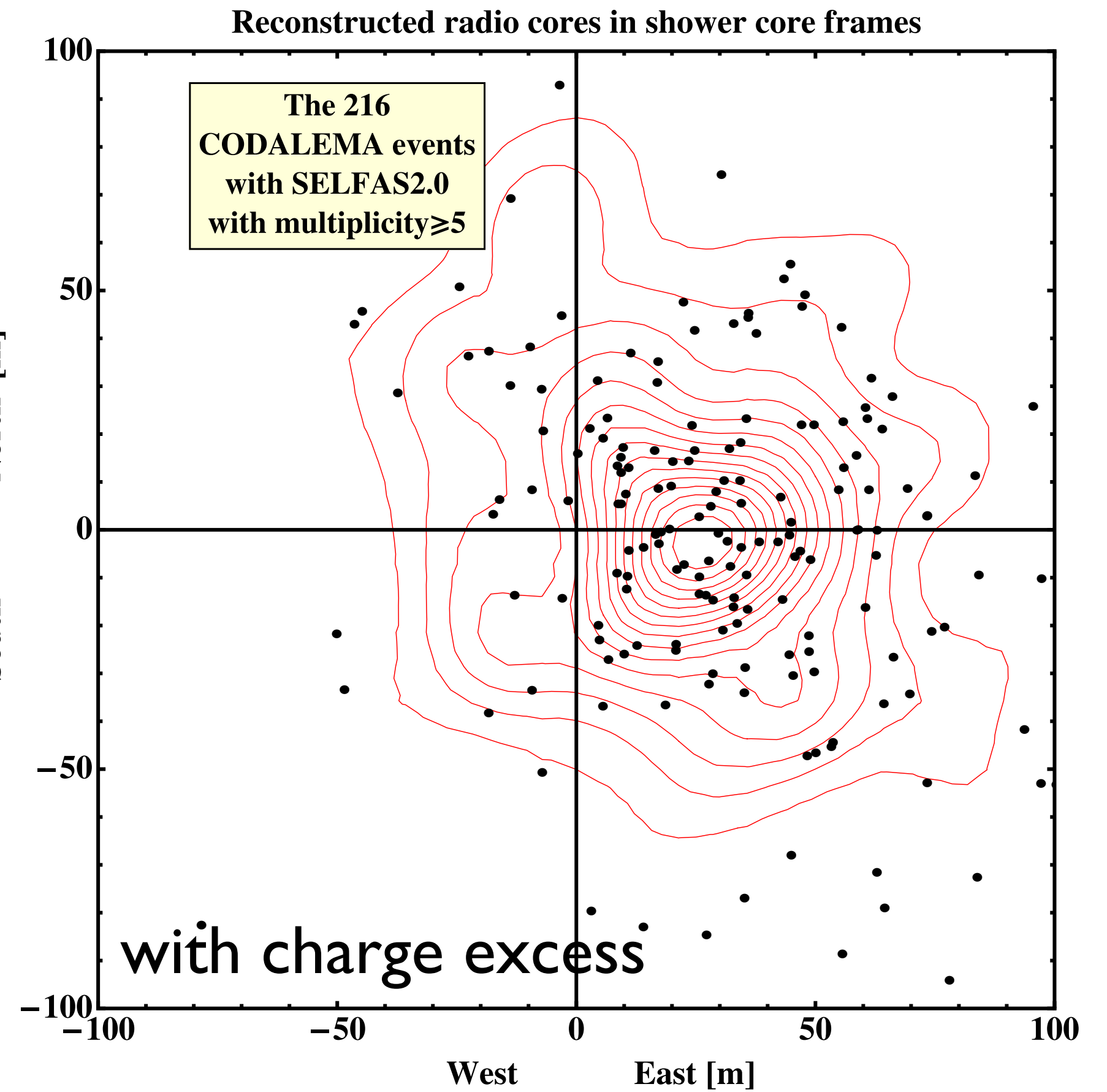
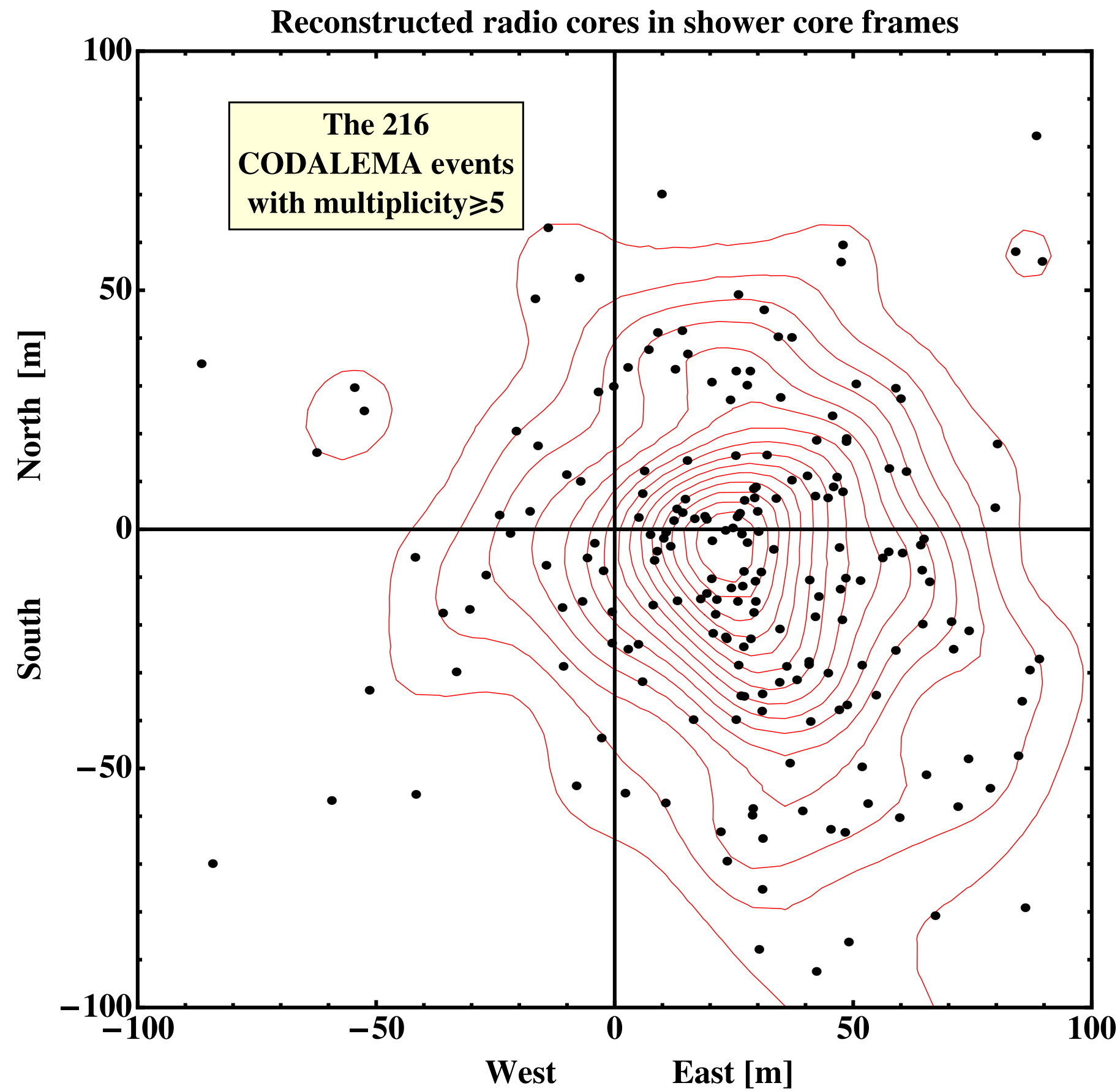
ICRC 2011 & Astroparticle physics 2015



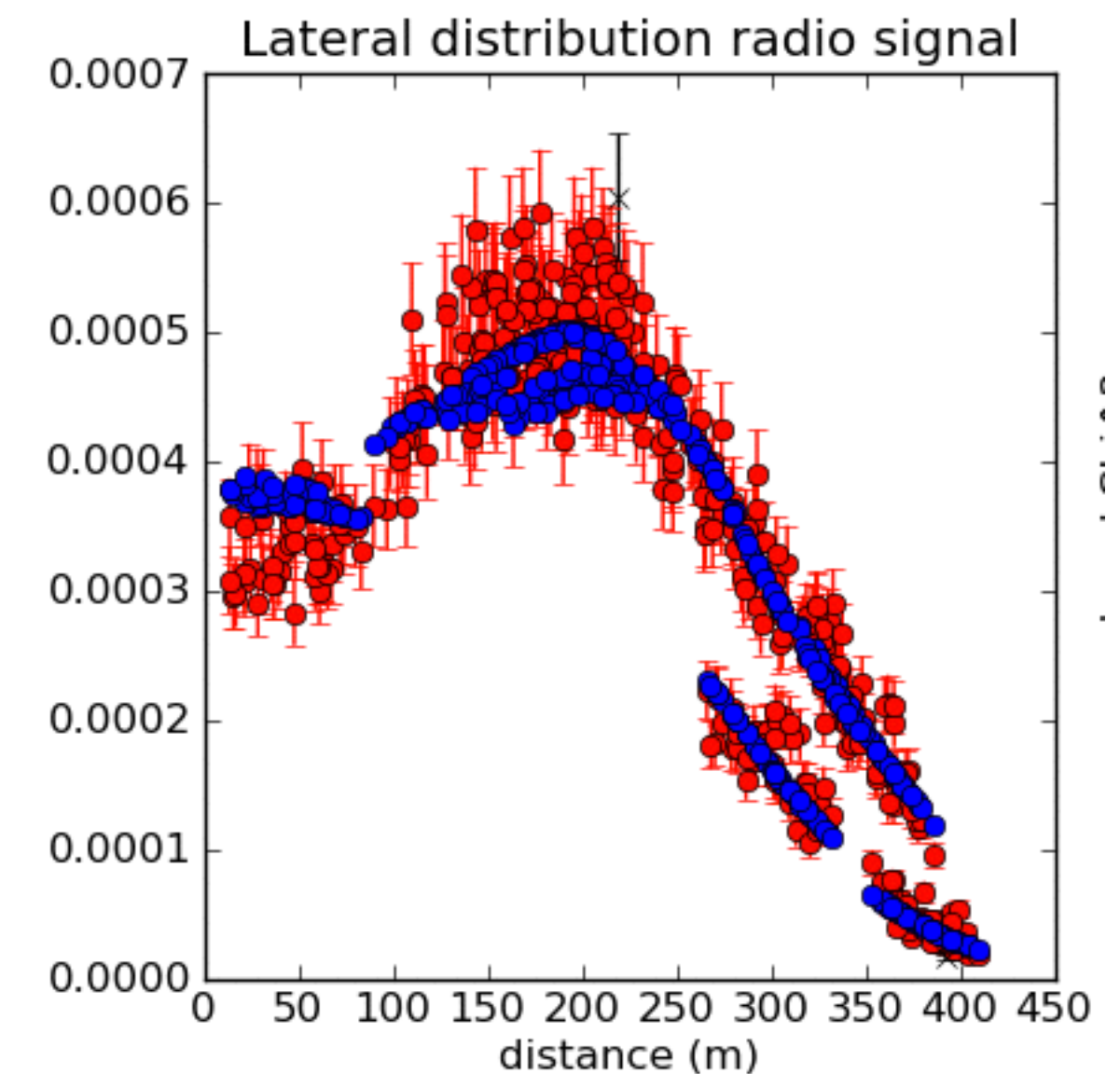
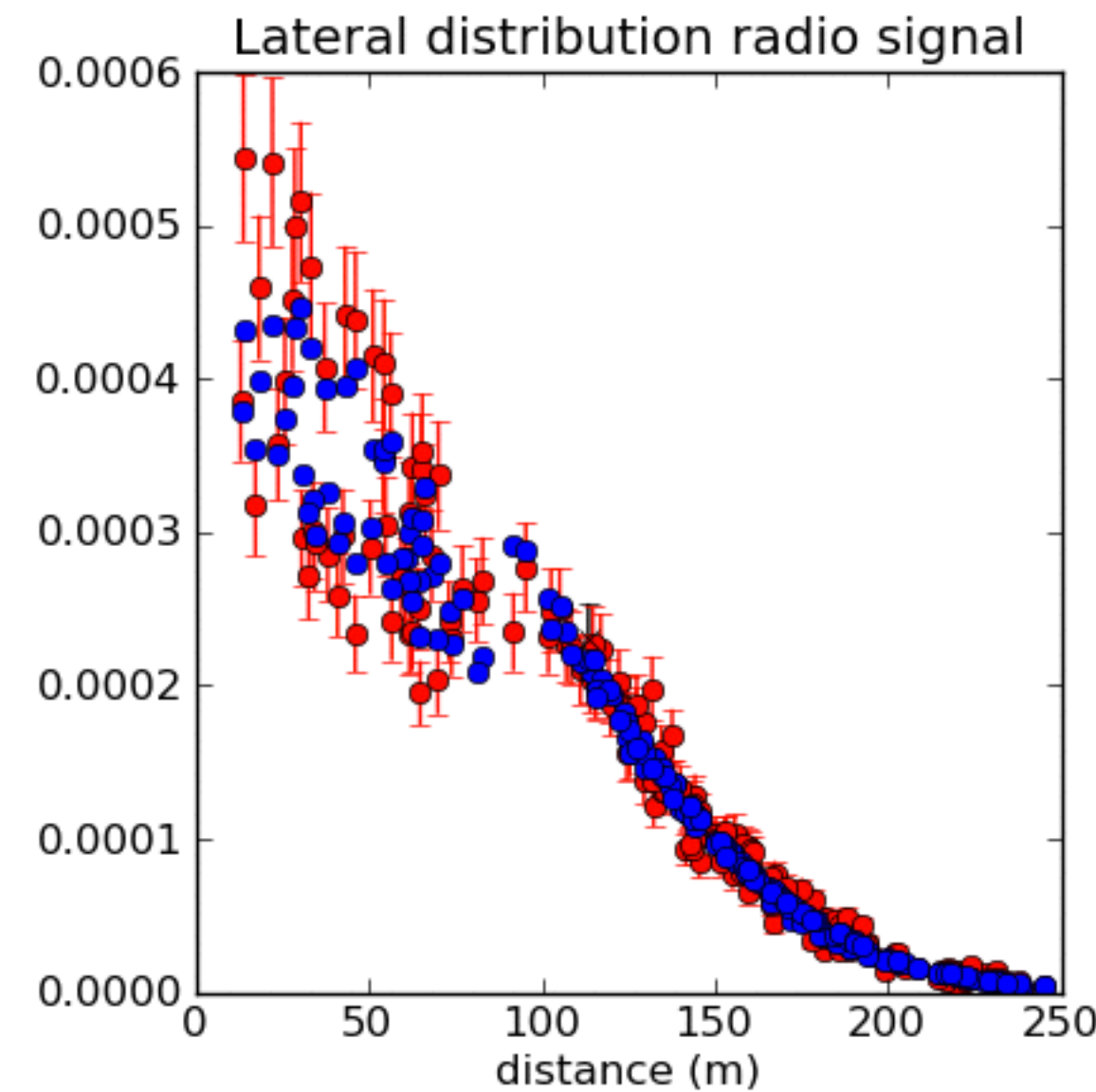
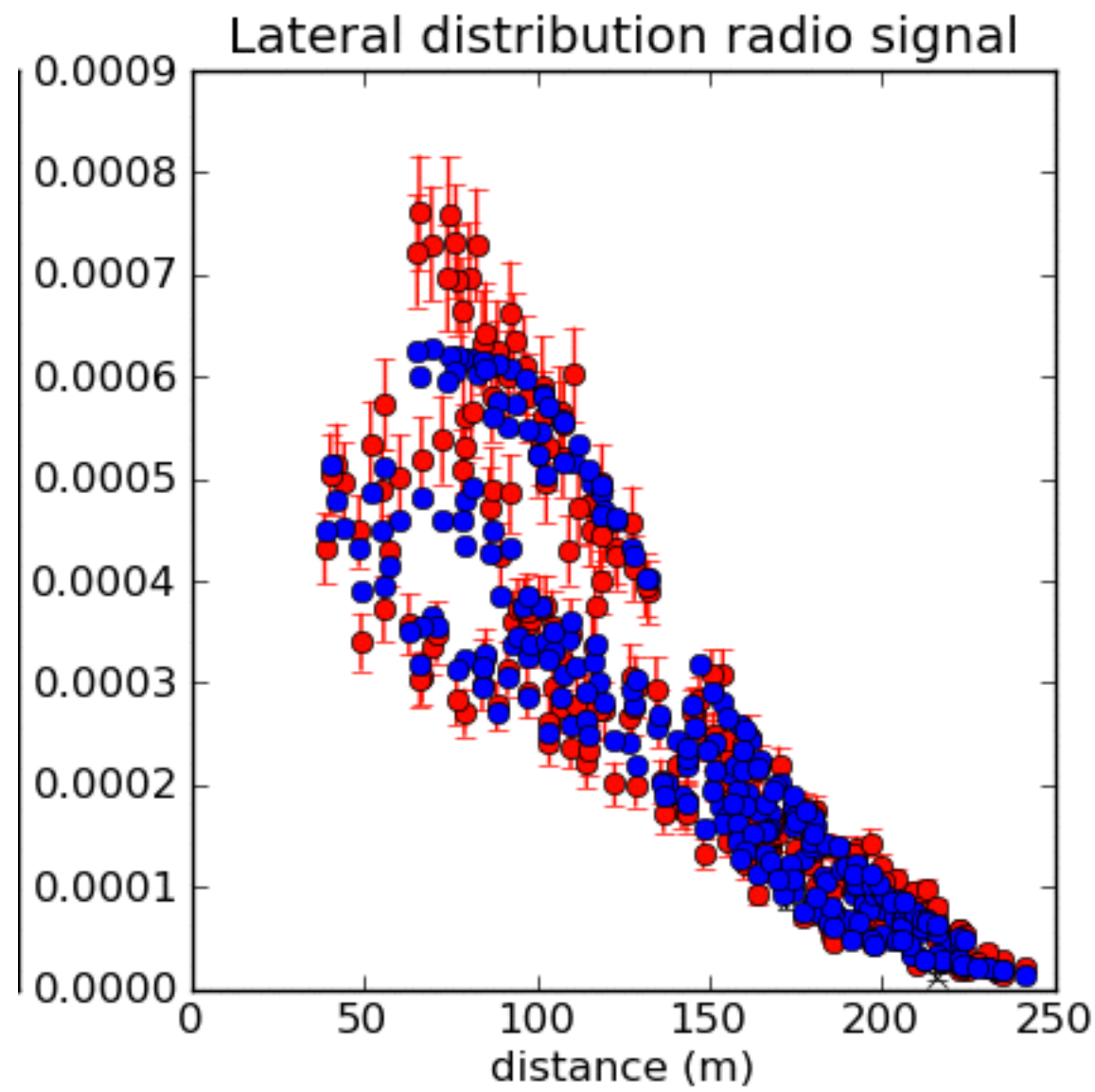
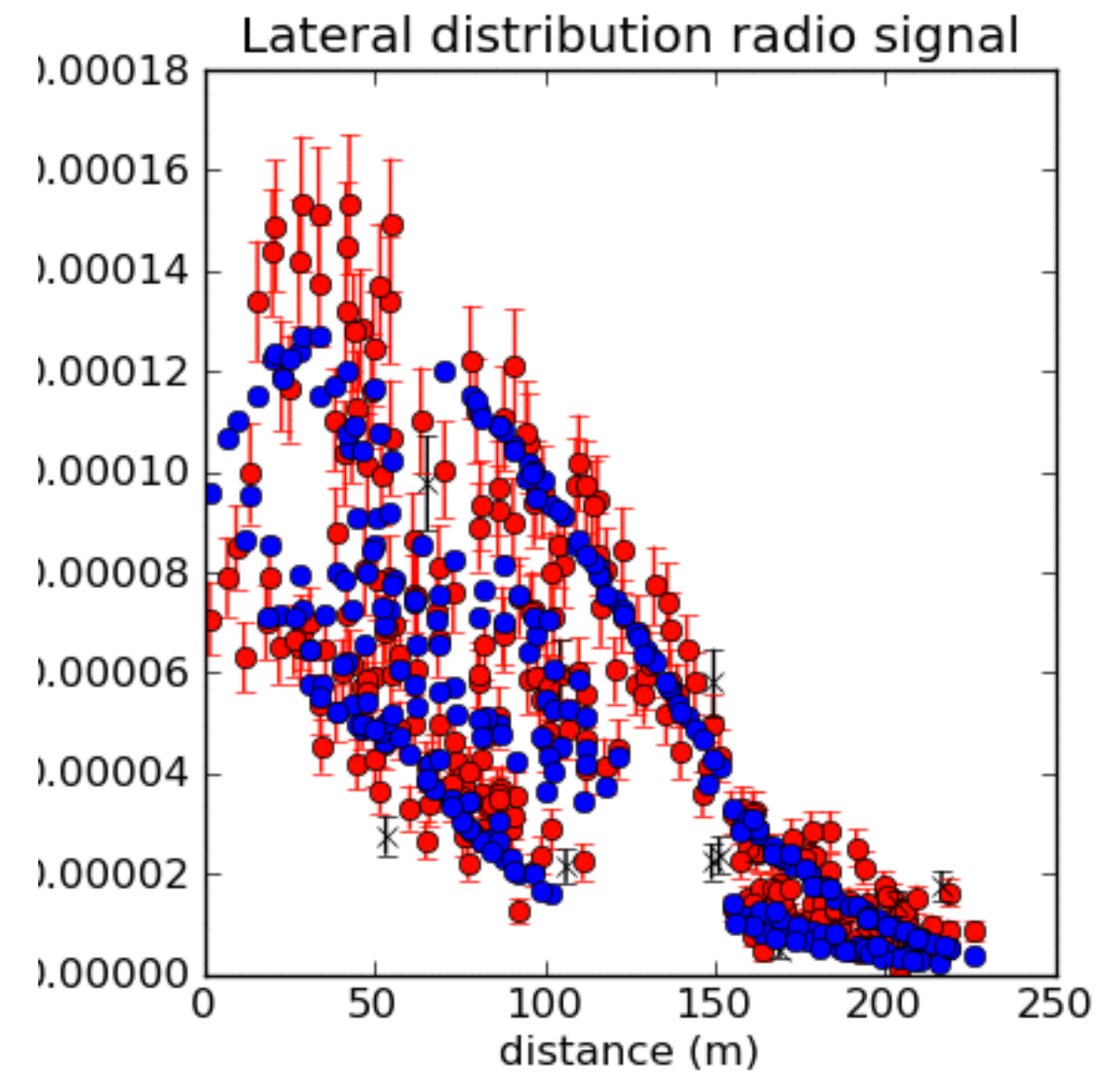
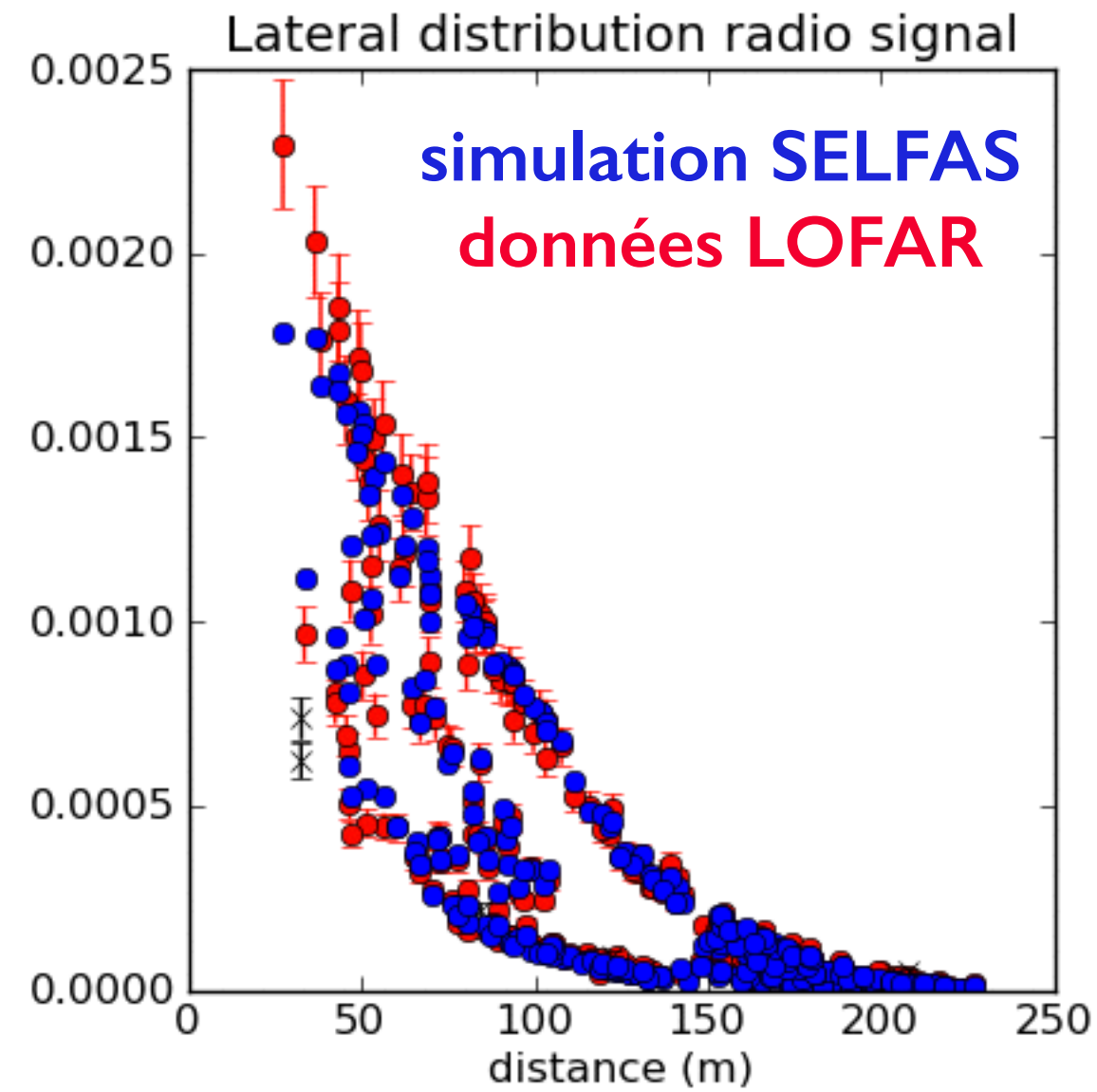
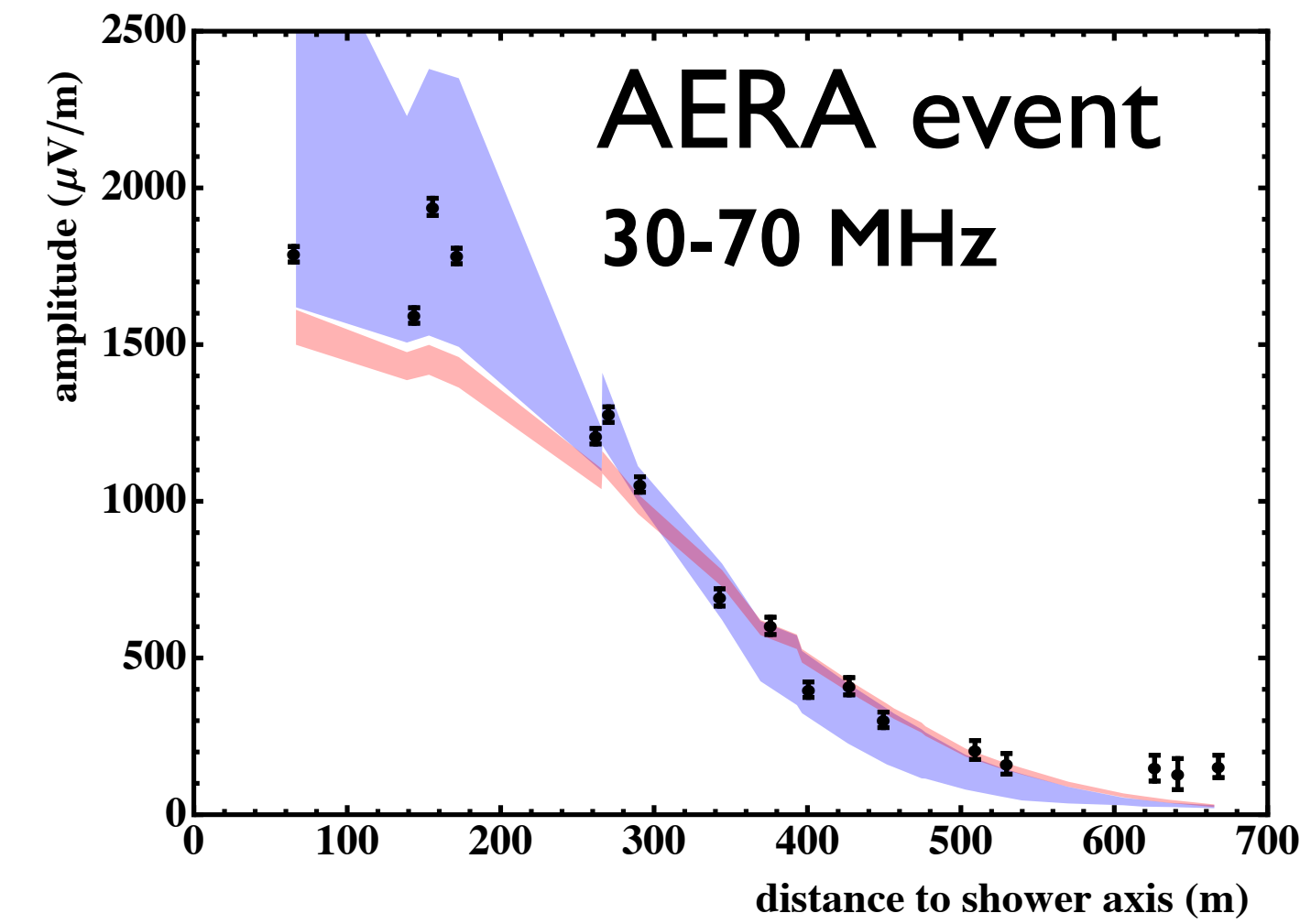
Charge excess contribution

$$+ \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{i=1}^N \frac{q_i \vec{n}_i}{R_i (1 - \eta \vec{\beta}_i \cdot \vec{n}_i)}$$

ICRC 2011 & Astroparticle physics 2015

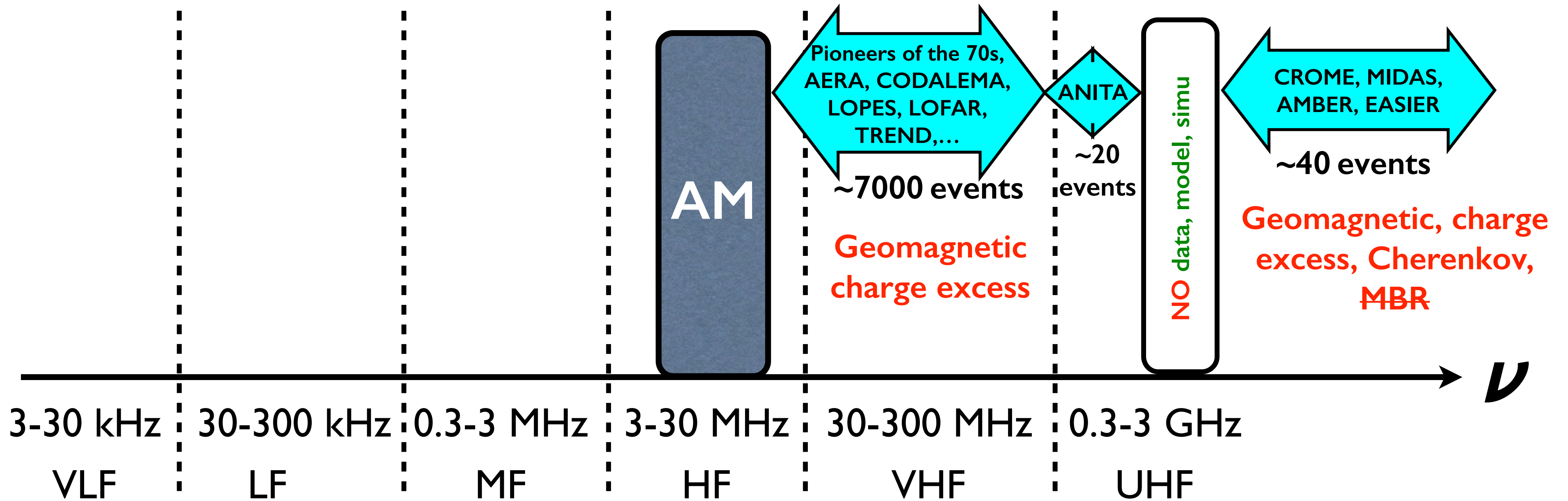


Signal très bien compris (2014)



(LOFAR plots by S. Buitink)

Mécanismes 20 MHz - GHz



À basse fréquence : kHz-MHz

year	reference	frequency	message
1970	Allan, Clay, Nature 225, 253	2 MHz	100 times higher than at 32 MHz
1970	Prescott et al, 11th ICRC 3, 717	3.6 MHz, 10 MHz	higher than geomagnetic, no detection at 10 MHz
1971	Stubbs, Nature 230, 172	2 MHz	250 times higher than at 44 MHz
1971	Hough et al, Nature 232, 14	3.6 MHz	10 times higher than geomagnetic in 20-60 MHz
1972	Felgate, Stubbs, Nature 239, 151	6 MHz	two polarizations, not only geomagnetic
1973	Clay et al, 13th ICRC 4, 2420	100 kHz	$\varepsilon_\nu \propto \nu^{-1.5}$
1973	Gregory et al, Nature 245, 86	100 kHz	large SNR, not only geomagnetic
1985	Suga et al, 20th ICRC 7, 268	50 kHz, 170 kHz, 1.6 MHz	Akeno, huge field strength vs geo-magnetic/electric
1987	Nishi, Suga, 20th ICRC 6, 125	26-300 kHz	Akeno, monopolar, l/d, 2.5 km
1991	Castagnoli et al, 22nd ICRC 4, 363	470 kHz, 2.6 MHz	EASTOP/EASRadio, amplitude ↗ when freq ↘
1992	Baishya et al, NCimC 16, 17	2 MHz, 9 MHz	TR is not the only mechanism
1993	Kadota et al, 18th ICRC 4, 262	30 kHz-3 MHz	AGASA, mono/bi polar

À basse fréquence : kHz-MHz

year	reference	frequency	message
1970	Allan, Clay, Nature 225, 253	2 MHz	100 times higher than at 32 MHz
1970	Prescott et al, 11th ICRC 3, 717	3.6 MHz, 10 MHz	higher than geomagnetic, no detection at 10 MHz
1971	Stubbs, Nature 230, 172	2 MHz	250 times higher than at 44 MHz
1971	Hough et al, Nature 232, 14	3.6 MHz	10 times higher than geomagnetic in 20-60 MHz
1972	Felgate, Stubbs, Nature 239, 151	6 MHz	two polarizations, not only geomagnetic
1973	Clay et al, 13th ICRC 4, 2420	100 kHz	$\epsilon_\nu \propto \nu^{-1.5}$
1973	Gregory et al, Nature 245, 86	100 kHz	large SNR, not only geomagnetic
1985	Suga et al, 20th ICRC 7, 268	50 kHz, 170 kHz, 1.6 MHz	Akeno, huge field strength vs geo-magnetic/electric
1987	Nishi, Suga, 20th ICRC 6, 125	26-300 kHz	Akeno, monopolar, l/d, 2.5 km
1991	Castagnoli et al, 22nd ICRC 4, 363	470 kHz, 2.6 MHz	EASTOP/EASRadio, amplitude \nearrow when freq \searrow
1992	Baishya et al, NCimC 16, 17	2 MHz, 9 MHz	TR is not the only mechanism
1993	Kadota et al, 18th ICRC 4, 262	30 kHz-3 MHz	AGASA, mono/bi polar

Mécanismes d'émission (kHz-MHz)

année	référence	mécanisme
1957	Wilson, Phys. Rev. 108, 155	géoélectrique
1968	Charman, J. Atm. Terr. Phys. 30, 195	géoélectrique
1972	Allan, Nature 237, 384	cohérence maximale
1983	Kaneko et al, 18th ICRC 11, 428	excès de charge au niveau du sol
1985	Nishimura, 20th ICRC 7, 308	TR des e ⁻ au sol
1985	Suga et al, 20th ICRC 7, 268	TR des e ⁻ au sol

Résumé

- forte augmentation du champ électrique à basse fréquence
- peu de données, pas de contrôle atmosphérique, pas de conclusion
- des signaux bipolaires et monopolaires ont été obtenus
- pas de mécanisme clair
- bande de fréquence inexploitée depuis plus de 20 ans

Mort subite des gerbes atmosphériques

Mécanisme proposé (hors TR) :

émission d'un champ électrique **cohérent** à basse fréquence
lors du contact front de gerbe/sol

macroscopique

$$\mathbf{E}(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int d^3x' dt' \left\{ \frac{\mathbf{n}}{R^2} [\rho(\mathbf{x}', t')]_{\text{ret}} + \frac{\mathbf{n}}{cR} \left[\frac{\partial \rho(\mathbf{x}', t')}{\partial t'} \right]_{\text{ret}} - \frac{1}{c^2 R} \left[\frac{\partial \mathbf{J}(\mathbf{x}', t')}{\partial t'} \right]_{\text{ret}} \right\} \delta \left\{ t' - \left(t - \frac{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|}{c} \right) \right\}$$

très forte variation de J et ρ !

~ instantané à basse fréquence (< 20 MHz, > 15 m) : cohérence

microscopique

la décélération cohérente (Bremsstrahlung) des électrons crée le champ électrique

$$\mathbf{J}(x, y, z, t)$$

$$\rho(x, y, z, t)$$

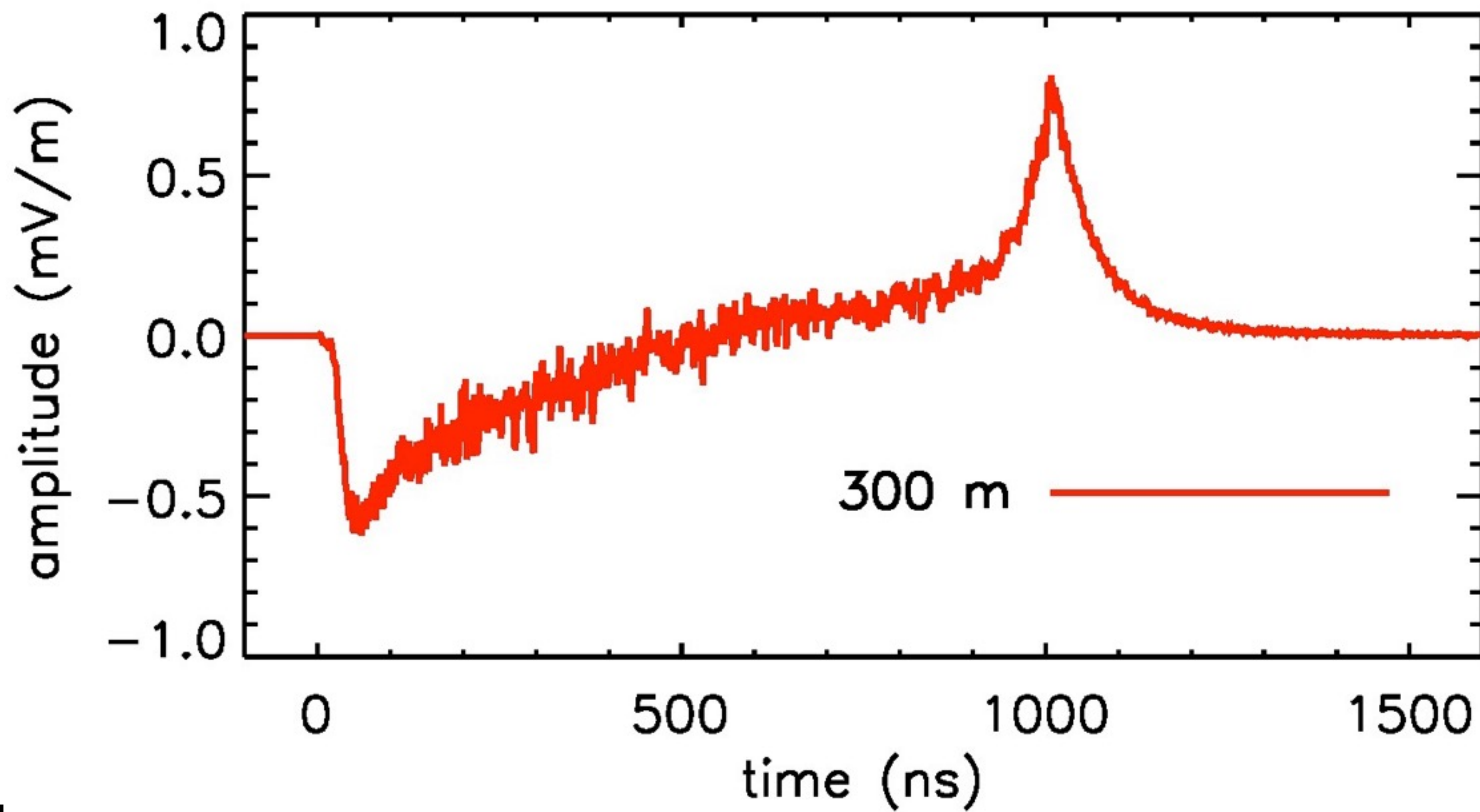
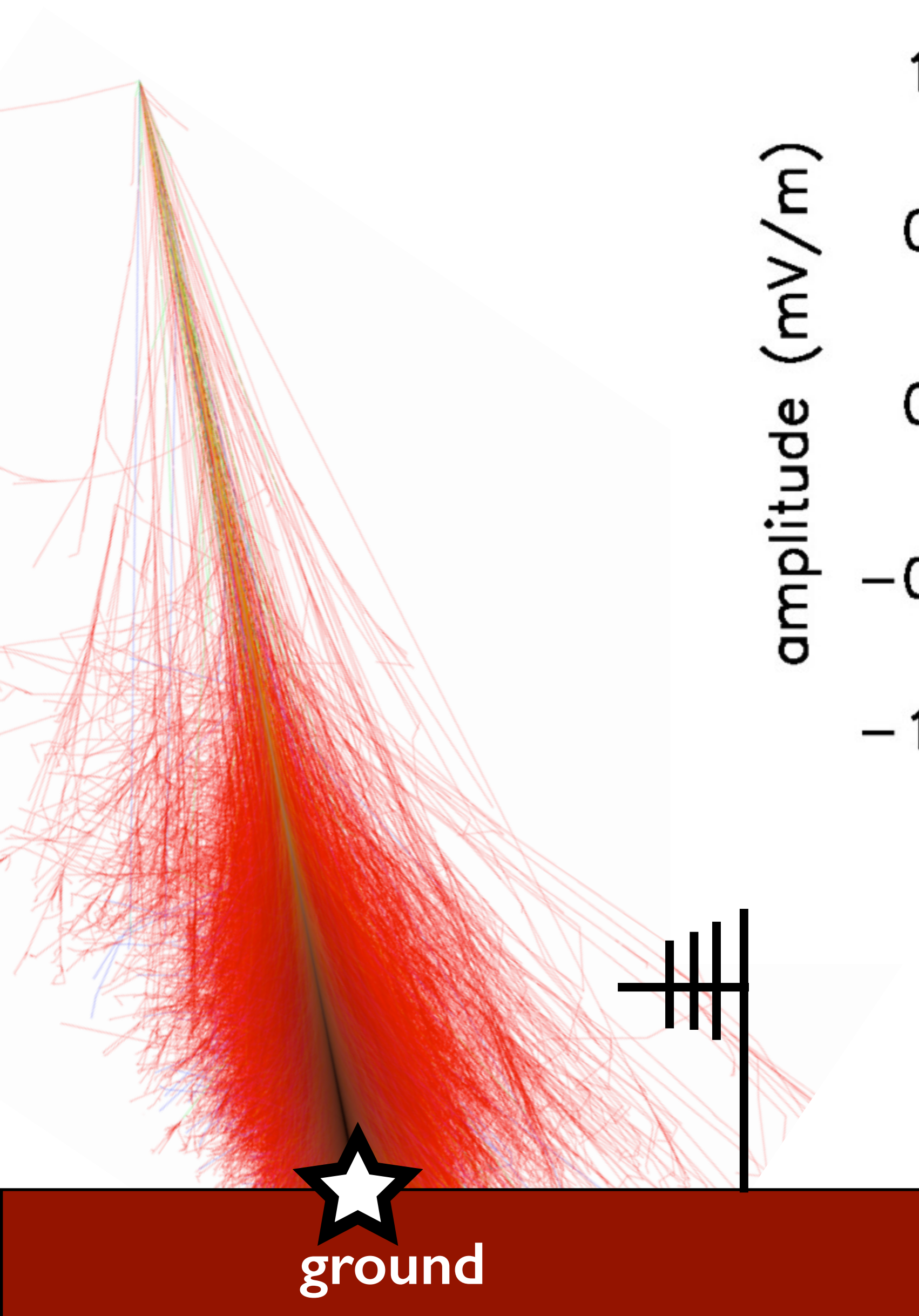


Utilisation de la simulation avec SELFAS pour caractériser ce signal

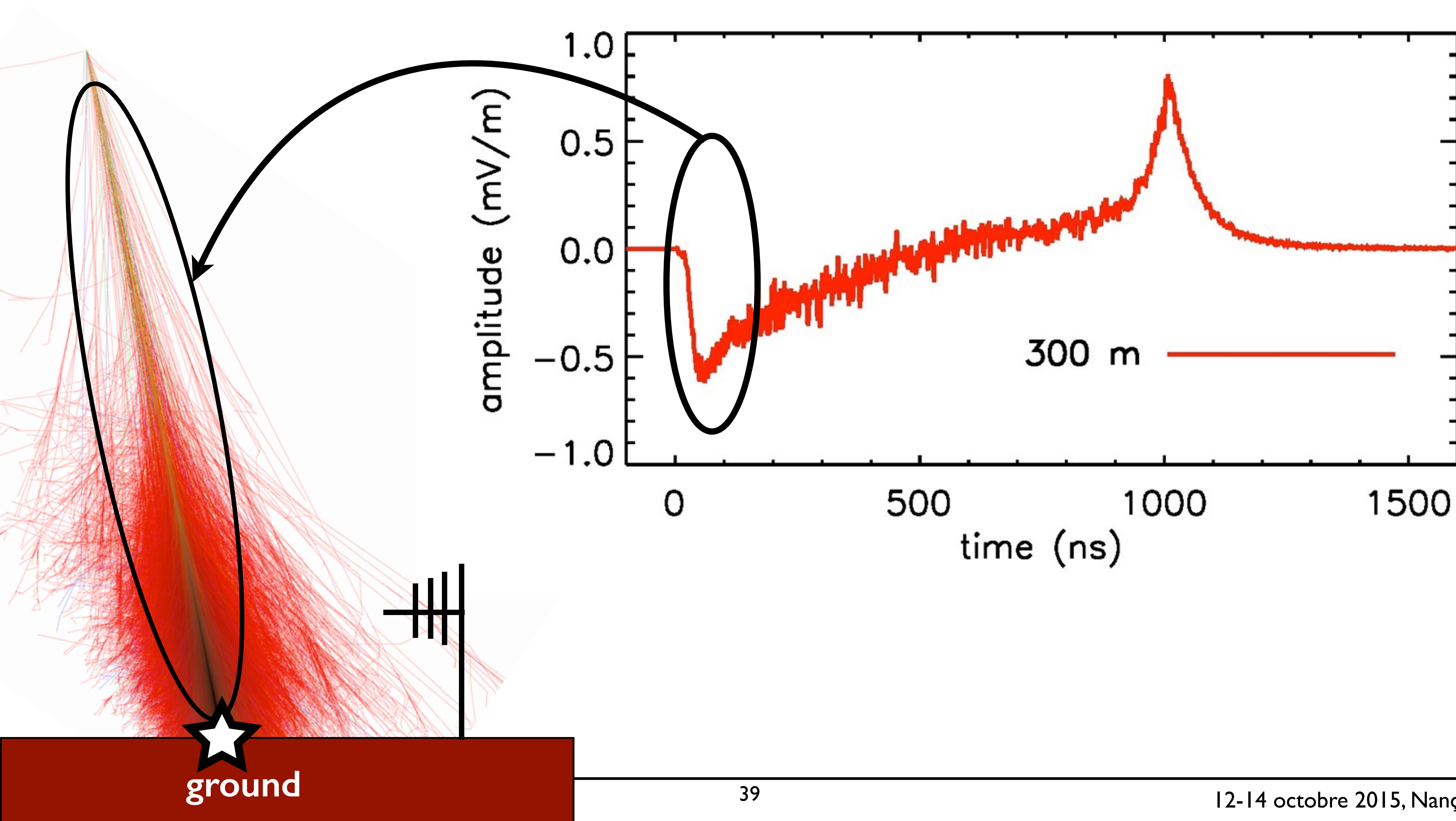
$$\vec{E}(\vec{x}, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 c} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{i=1}^N q_i \left(\frac{\vec{\beta}_i - (\vec{n}_i \cdot \vec{\beta}_i) \vec{n}_i}{R_i (1 - \eta \vec{\beta}_i \cdot \vec{n}_i)} \right)_{\text{ret}}$$

(jauge de Coulomb)

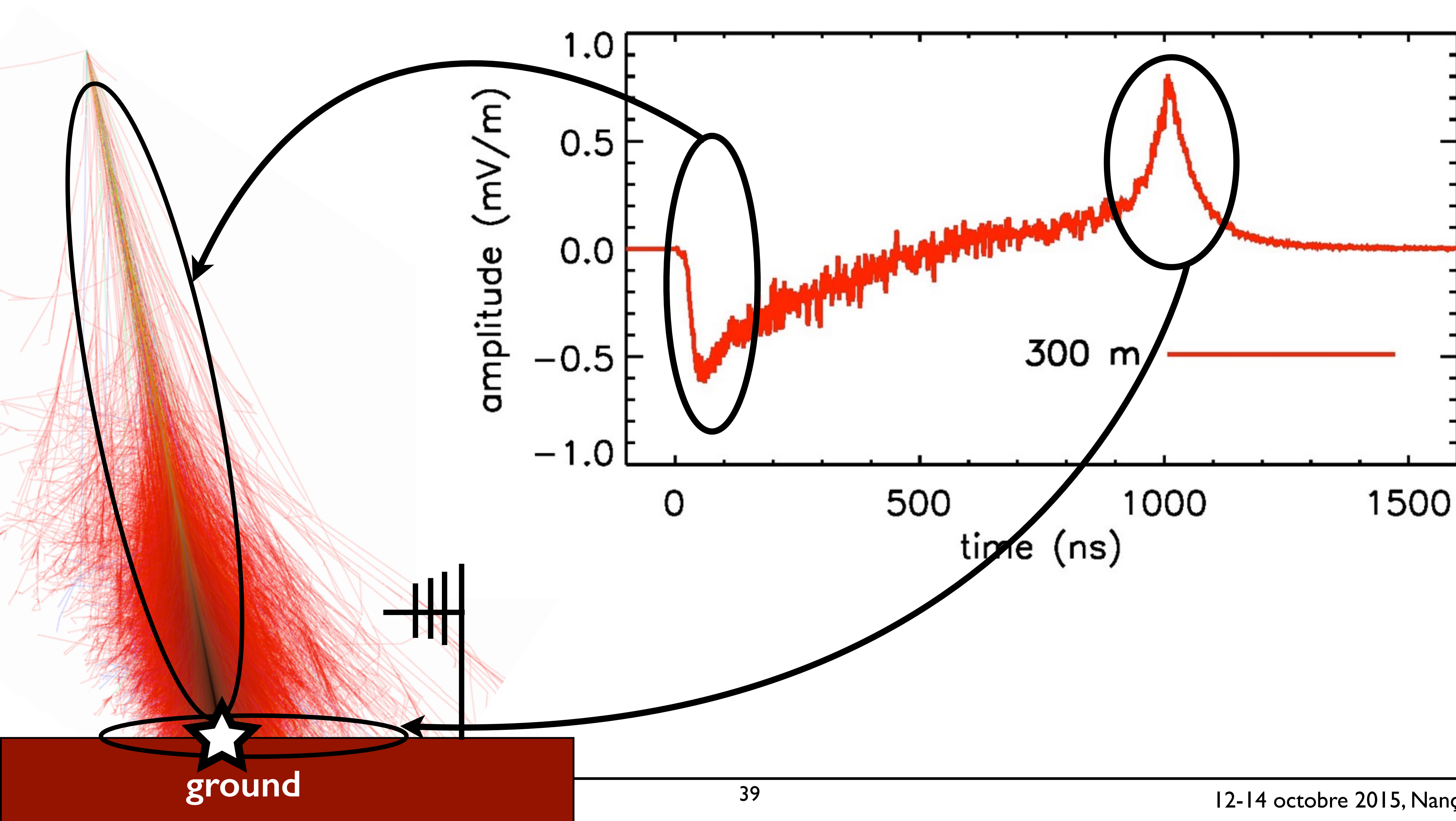
Signal de mort subite



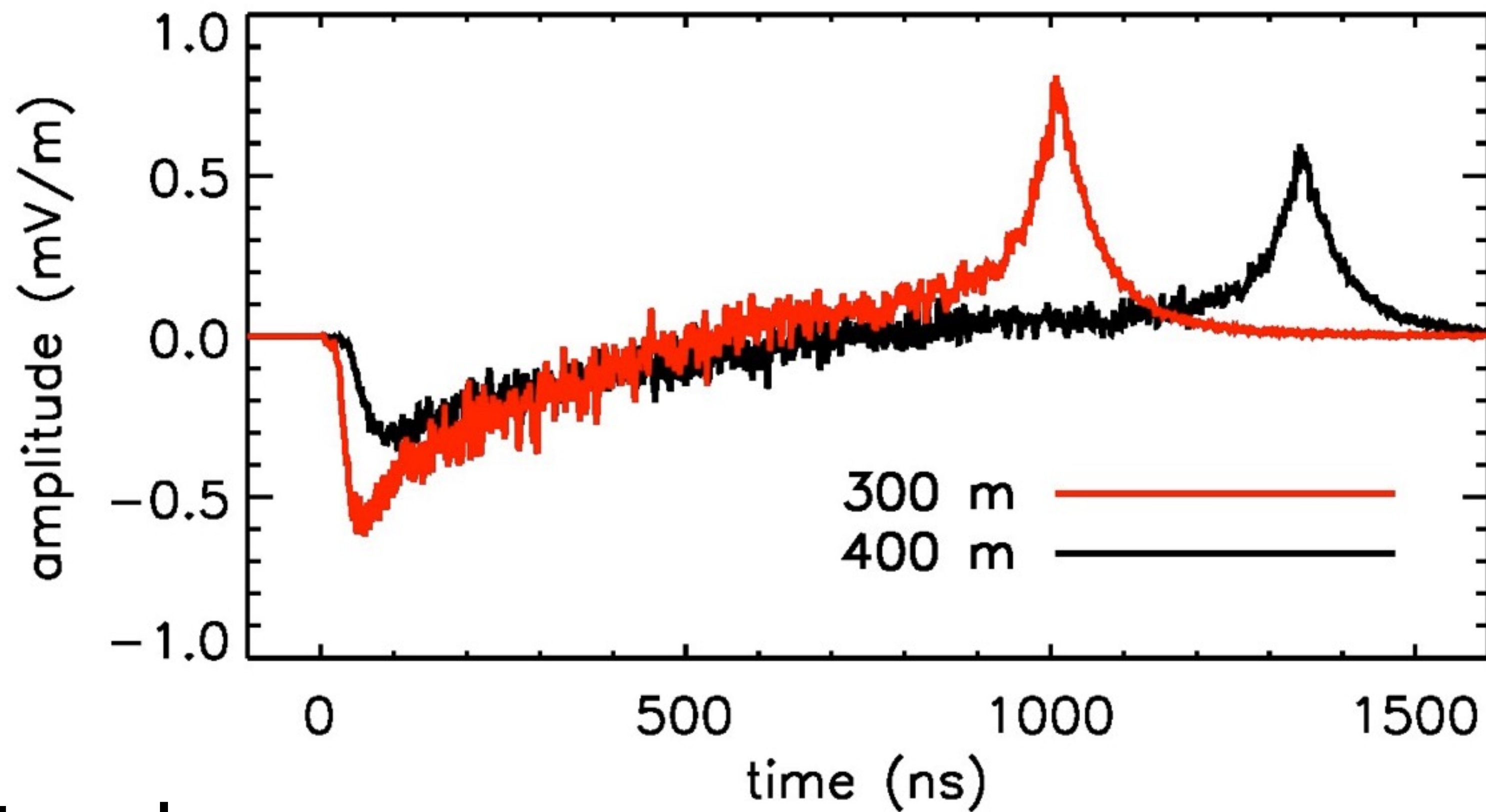
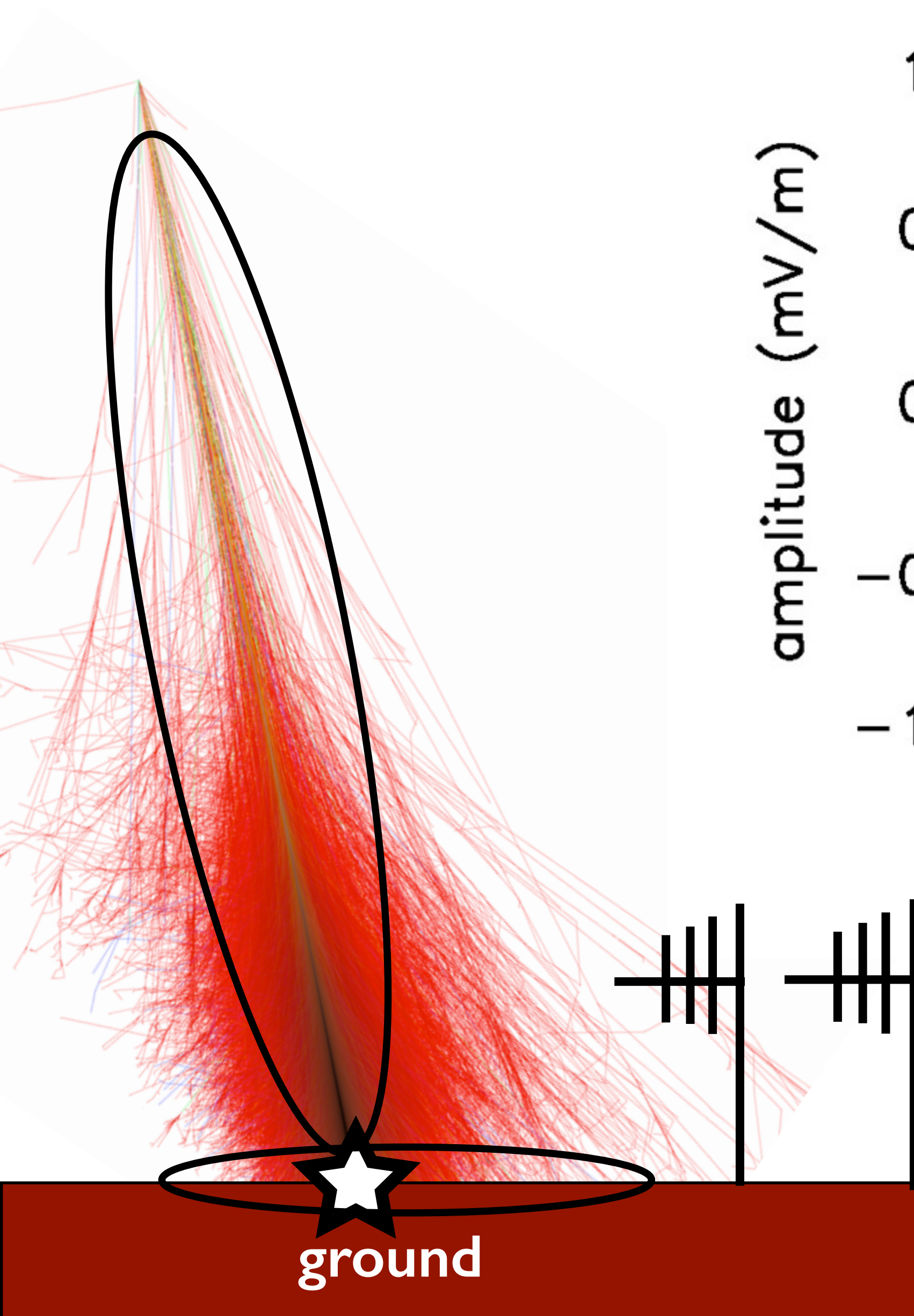
Signal de mort subite



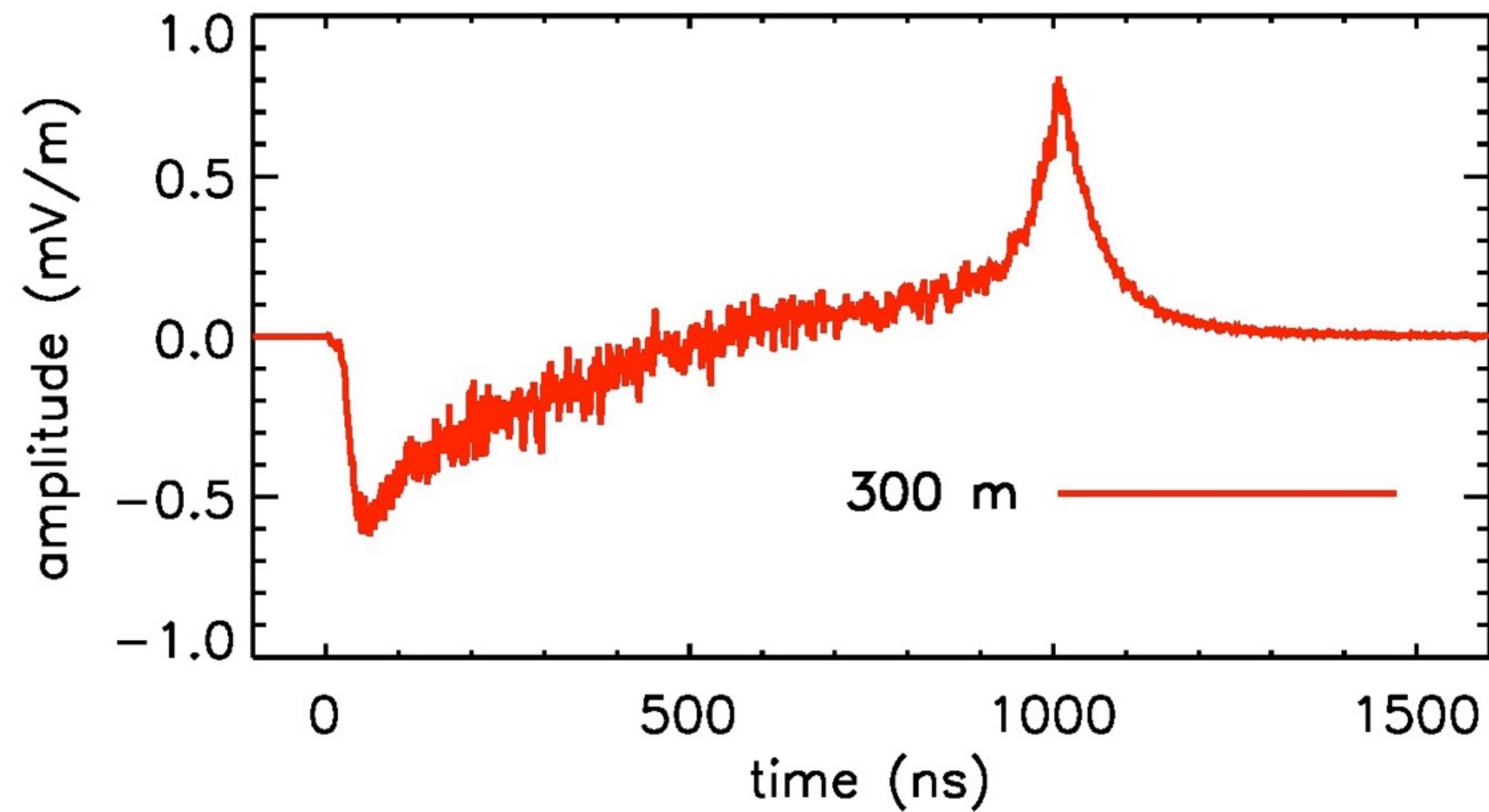
Signal de mort subite



Signal de mort subite



Modèle de mort subite : amplitude, structure temporelle

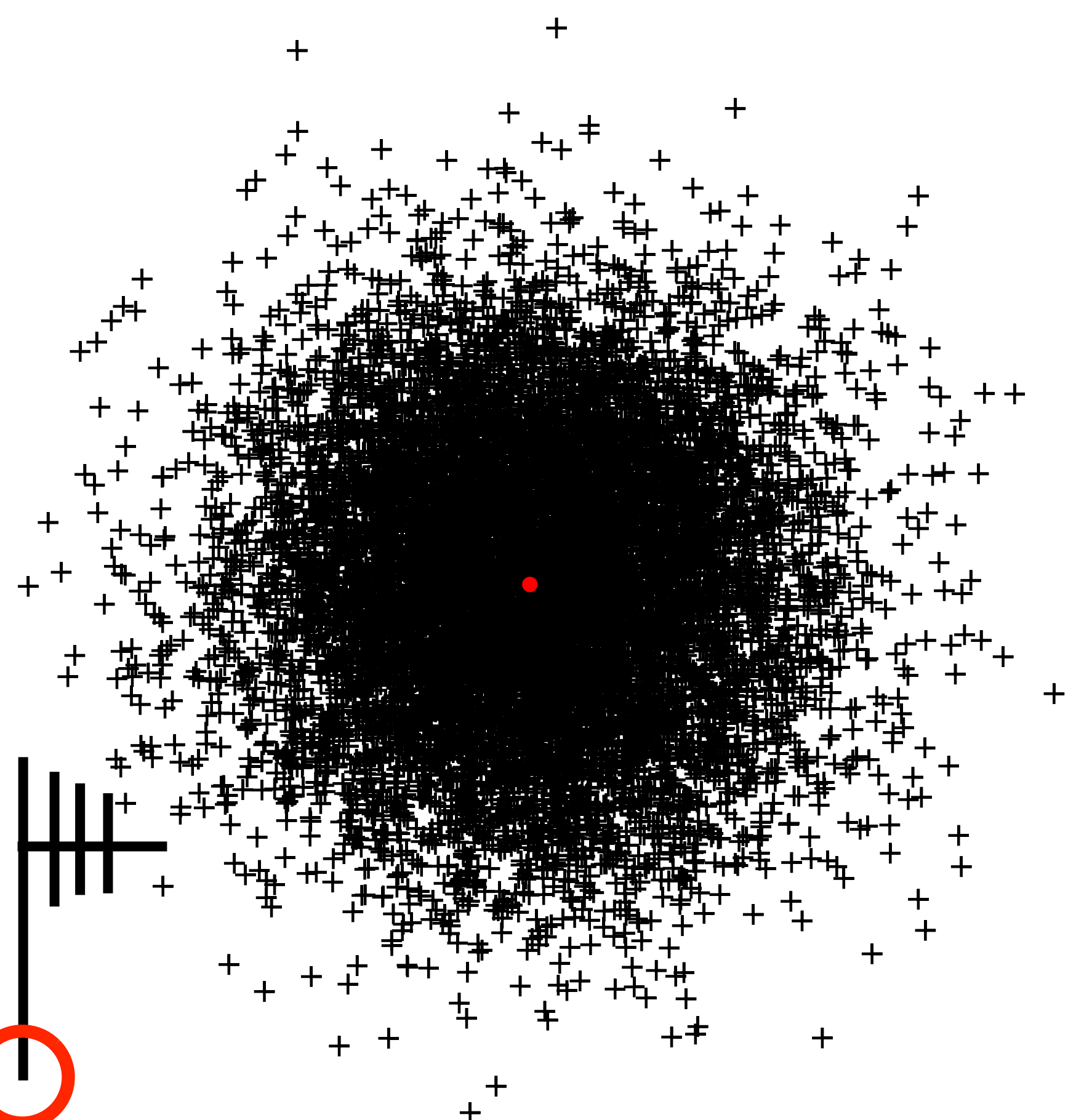


- modèle simple basé sur les particules au sol
- fonctionne pour des gerbes verticales et inclinées

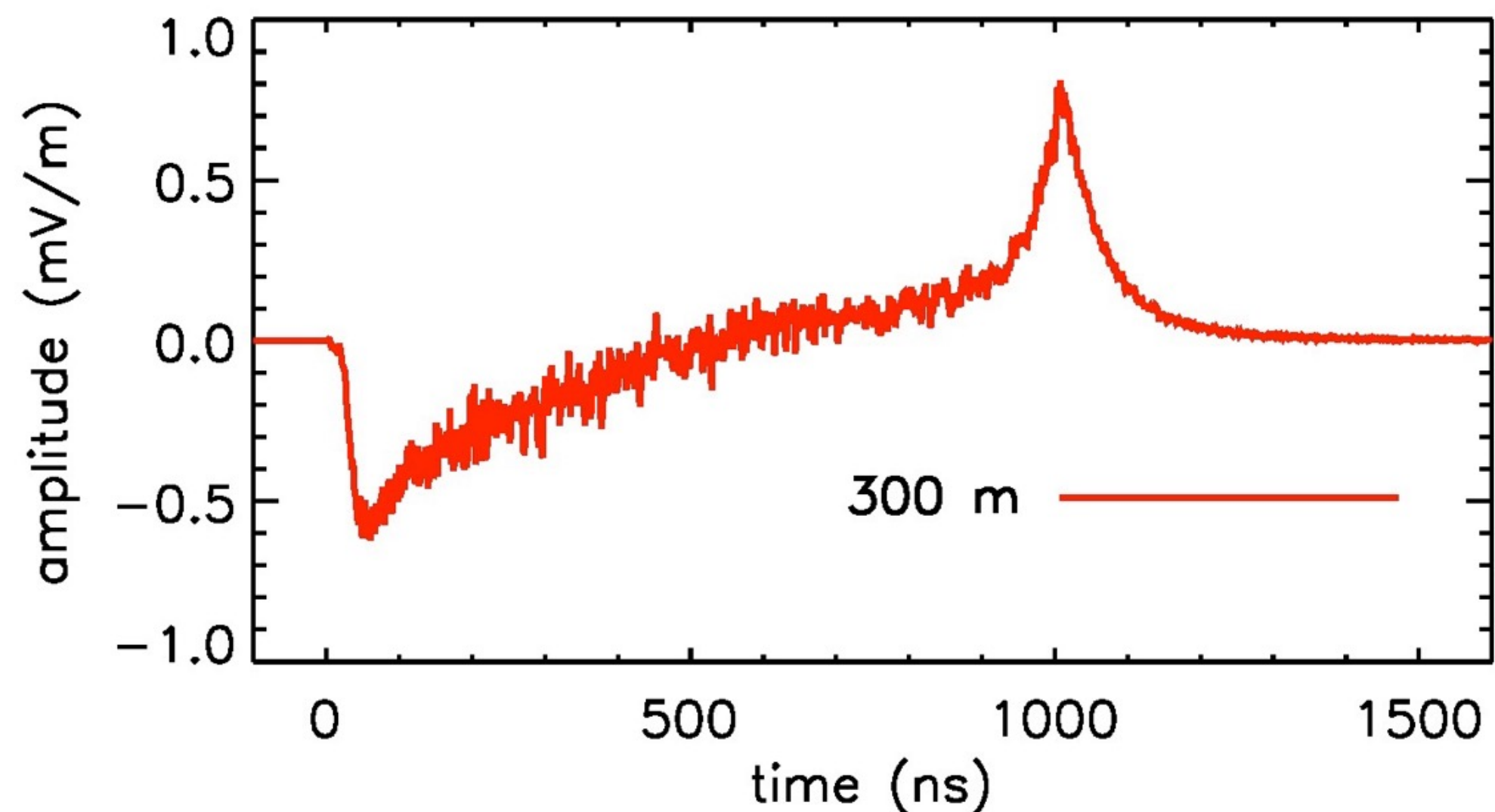
$$s(t = r/c) \propto \int_0^{2\pi} \mathcal{L}(\rho) d\phi$$

corrélé au nombre total d'e⁻/e⁺

A 



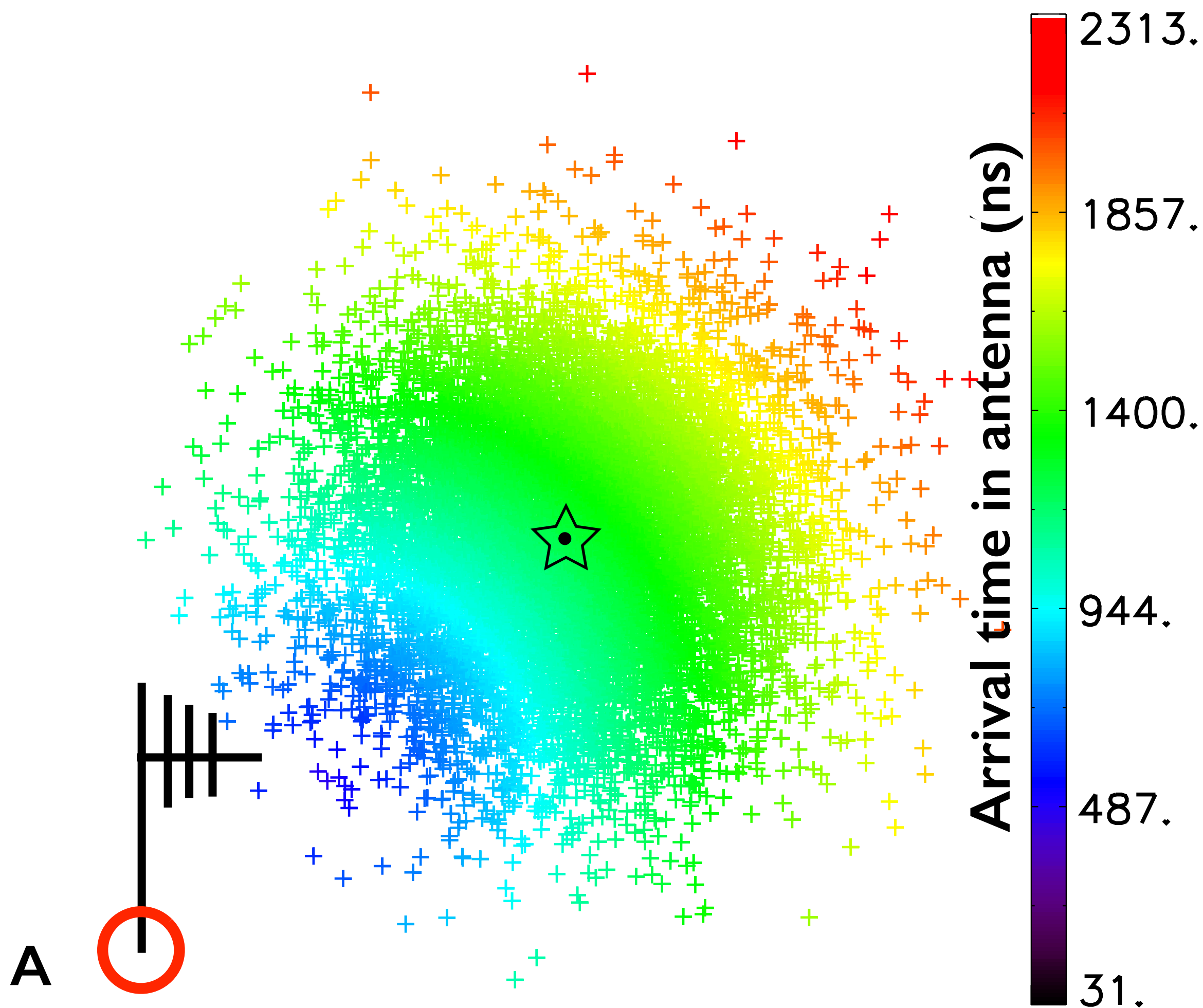
Modèle de mort subite : amplitude, structure temporelle



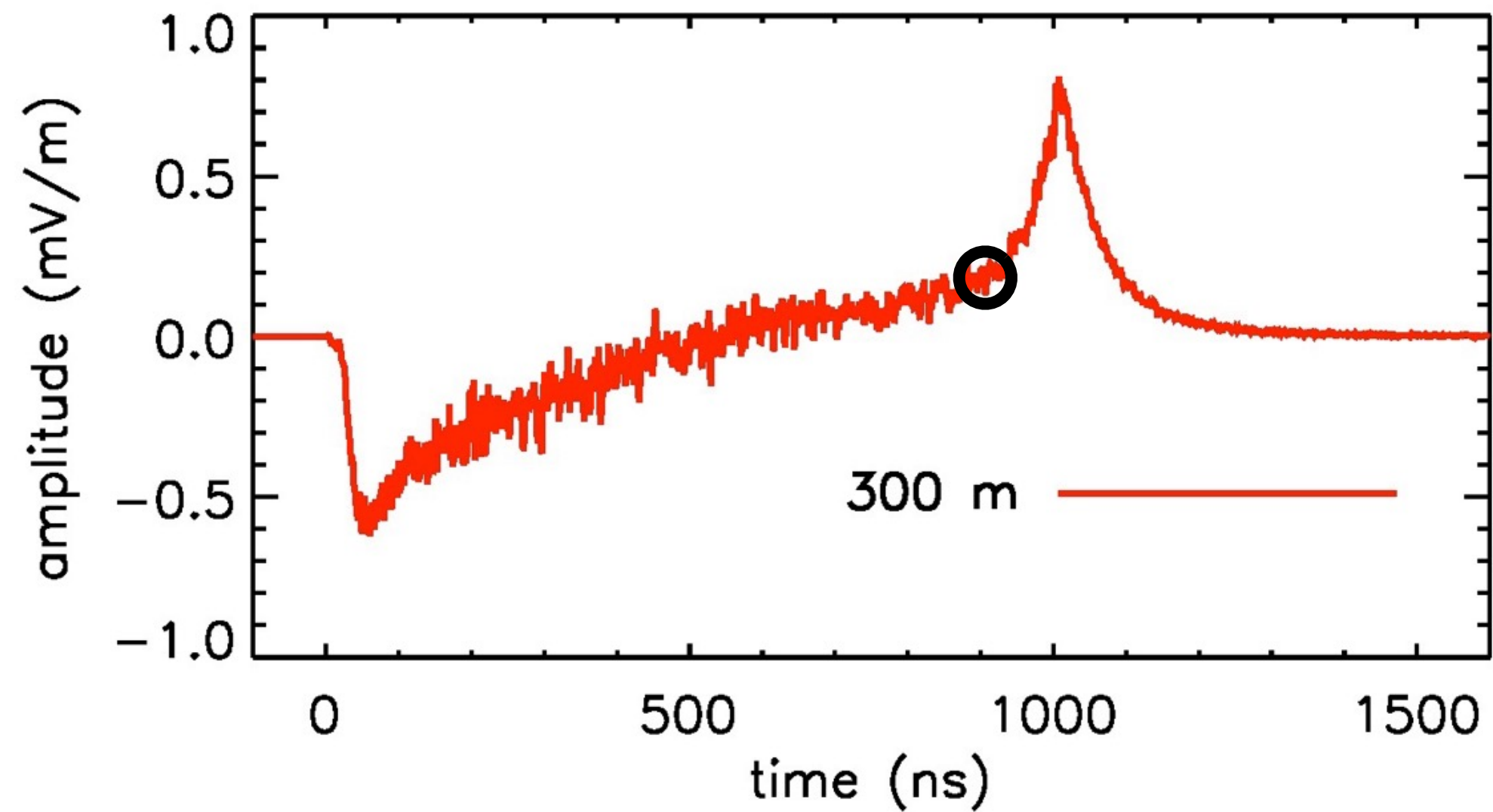
- modèle simple basé sur les particules au sol
- fonctionne pour des gerbes verticales et inclinées

$$s(t = r/c) \propto \int_0^{2\pi} \mathcal{L}(\rho) d\phi$$

corrélé au nombre total d'e⁻/e⁺



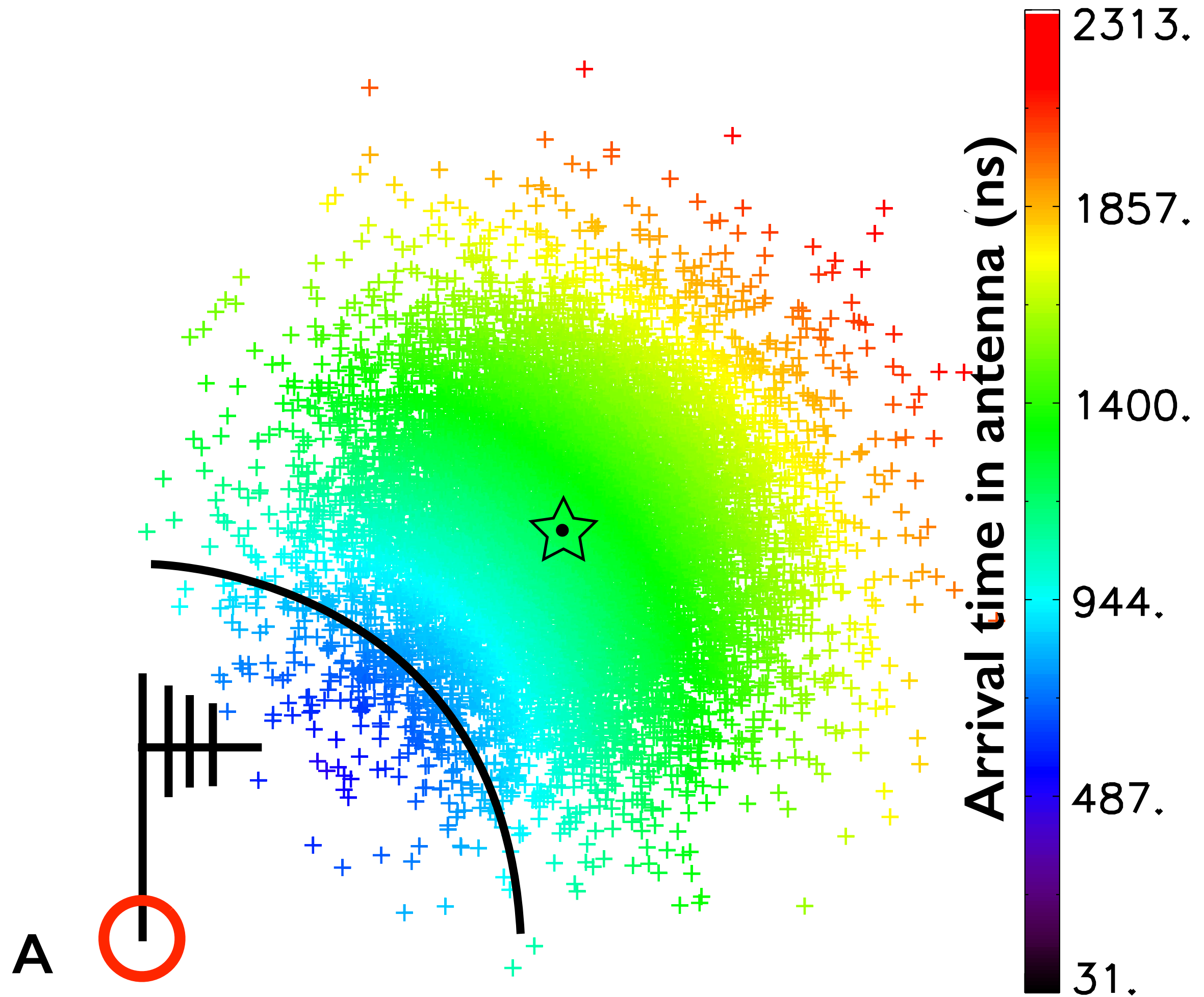
Modèle de mort subite : amplitude, structure temporelle



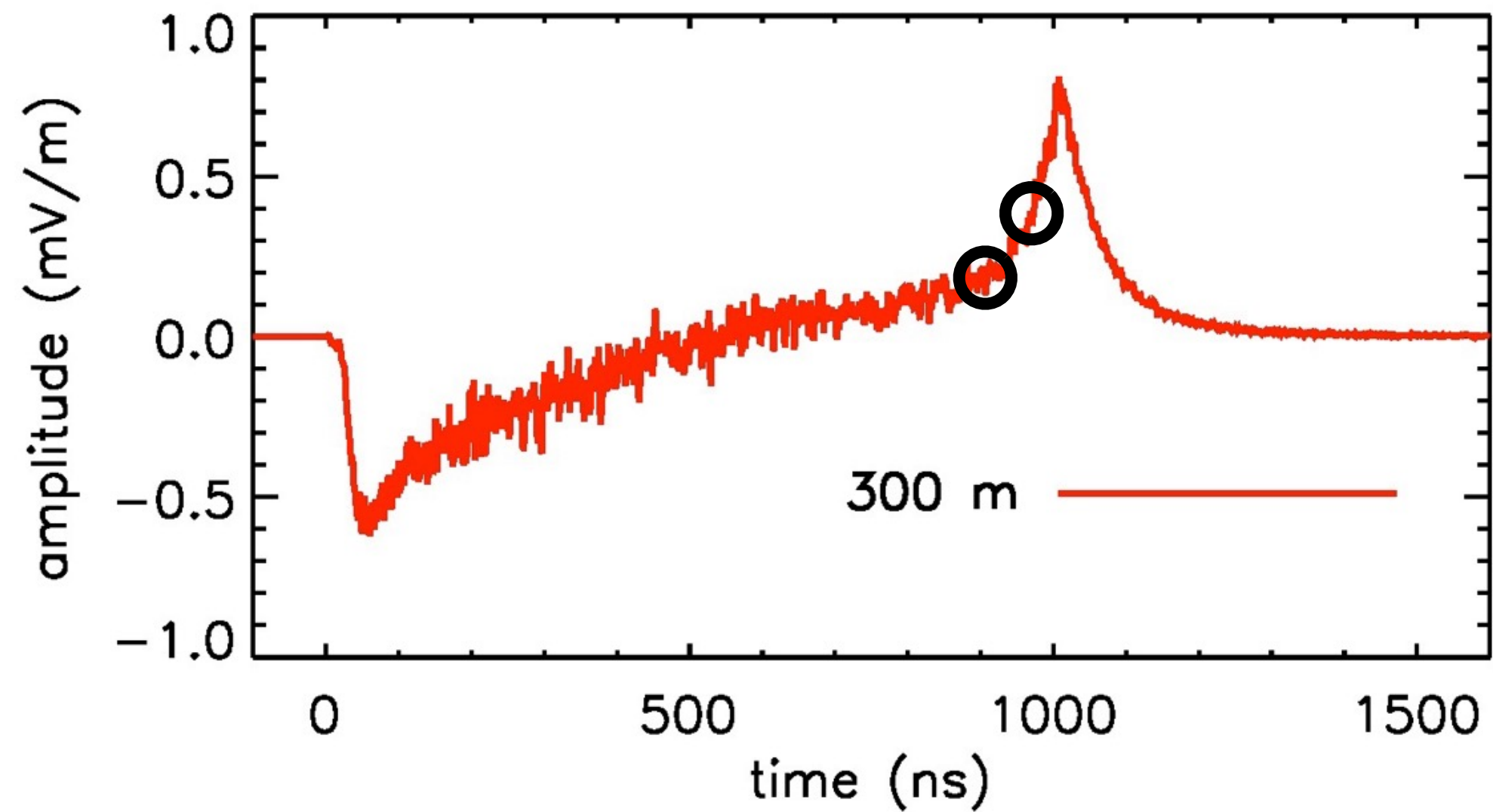
- modèle simple basé sur les particules au sol
- fonctionne pour des gerbes verticales et inclinées

$$s(t = r/c) \propto \int_0^{2\pi} \mathcal{L}(\rho) d\phi$$

corrélé au nombre total d'e⁻/e⁺



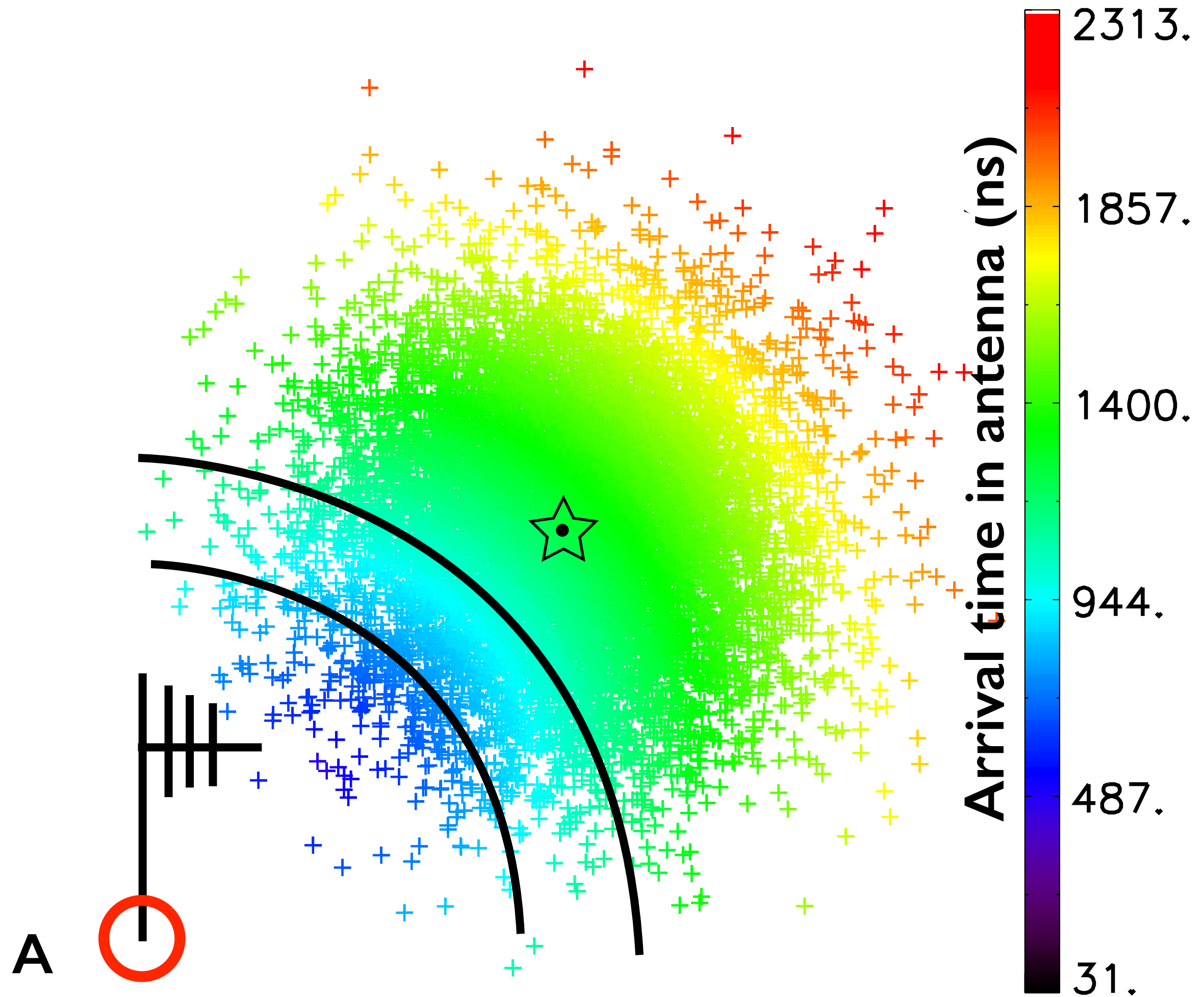
Modèle de mort subite : amplitude, structure temporelle



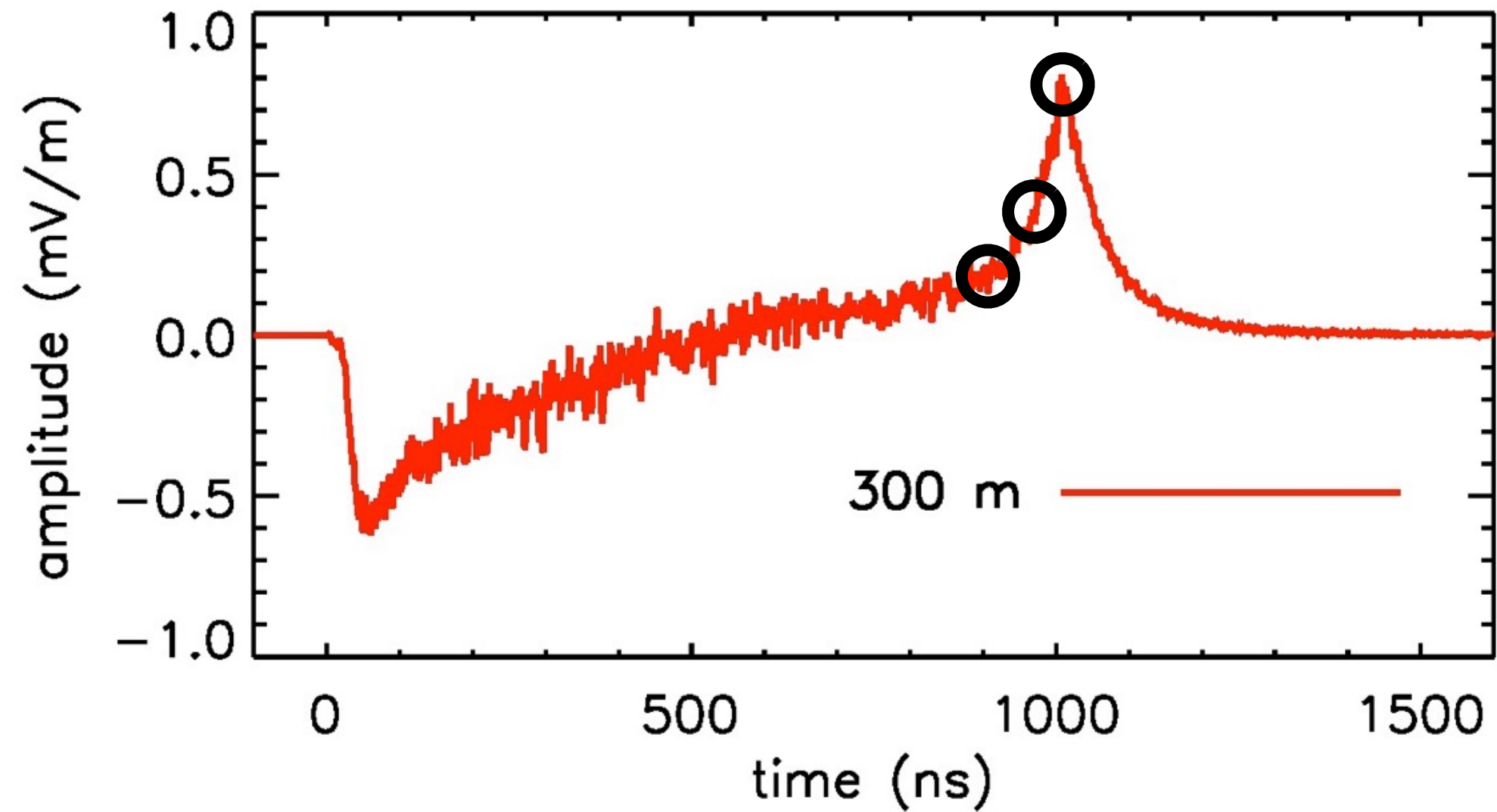
- modèle simple basé sur les particules au sol
- fonctionne pour des gerbes verticales et inclinées

$$s(t = r/c) \propto \int_0^{2\pi} \mathcal{L}(\rho) d\phi$$

corrélé au nombre total d'e⁻/e⁺



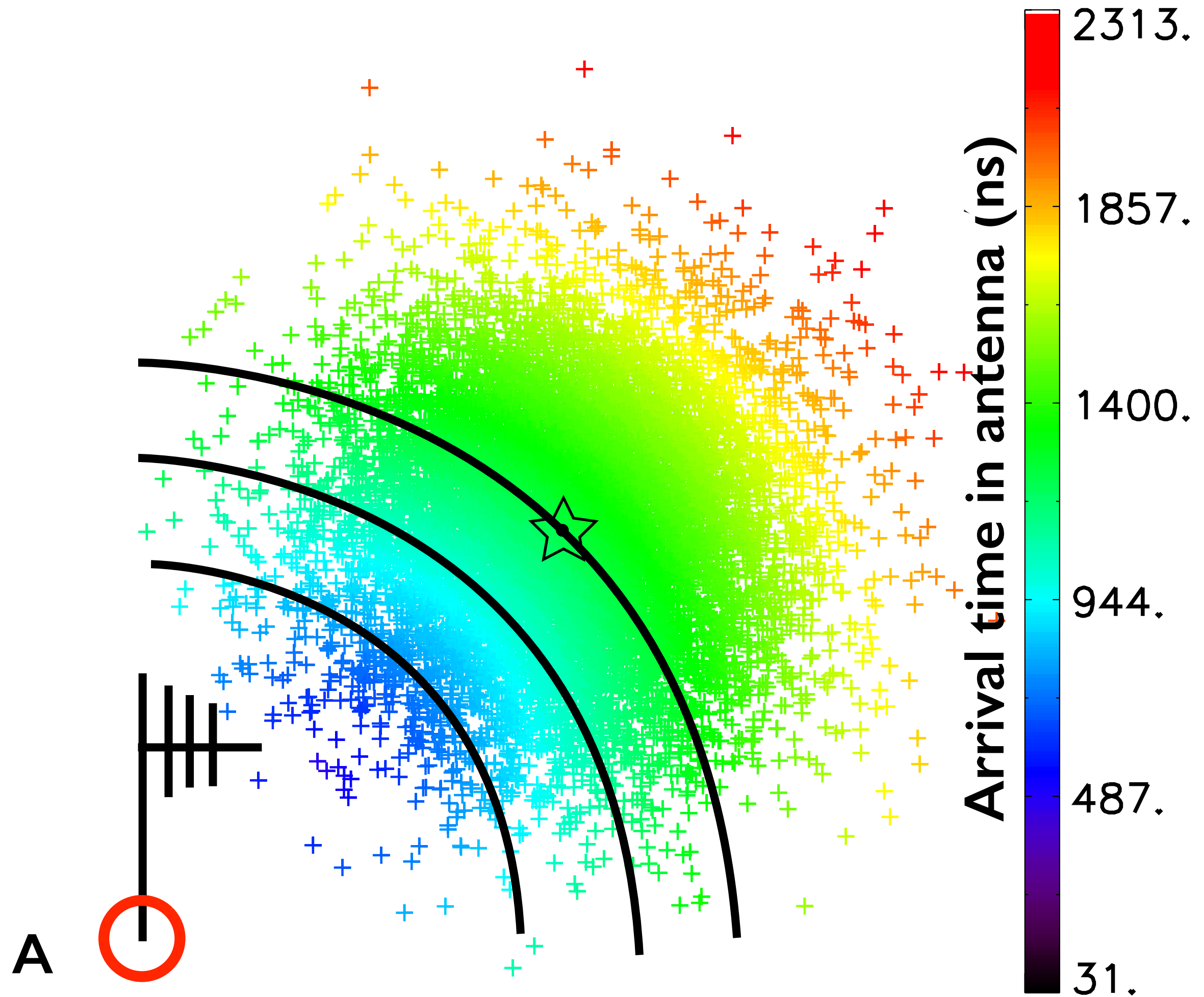
Modèle de mort subite : amplitude, structure temporelle



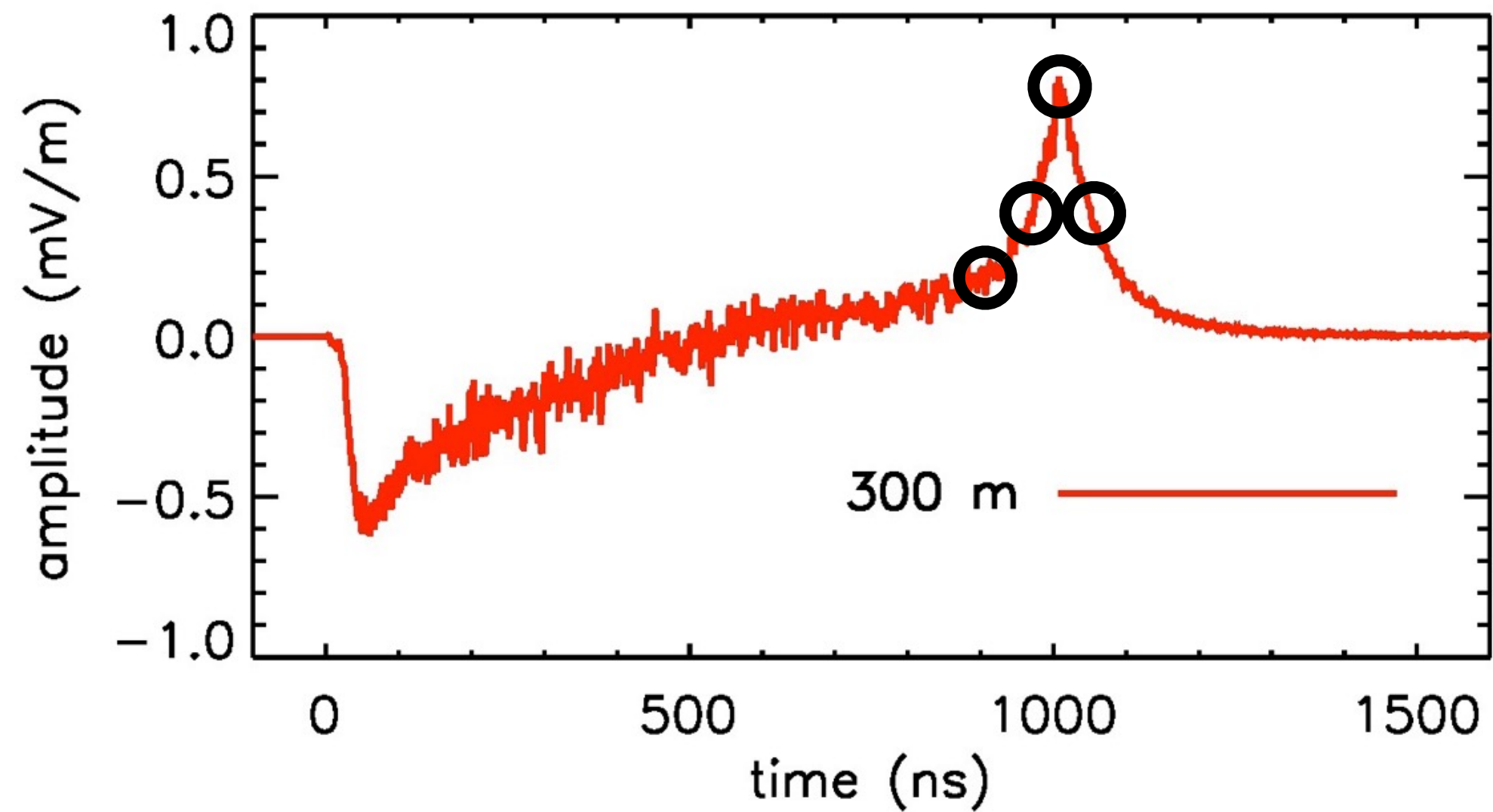
- modèle simple basé sur les particules au sol
- fonctionne pour des gerbes verticales et inclinées

$$s(t = r/c) \propto \int_0^{2\pi} \mathcal{L}(\rho) d\phi$$

corrélé au nombre total d'e⁻/e⁺



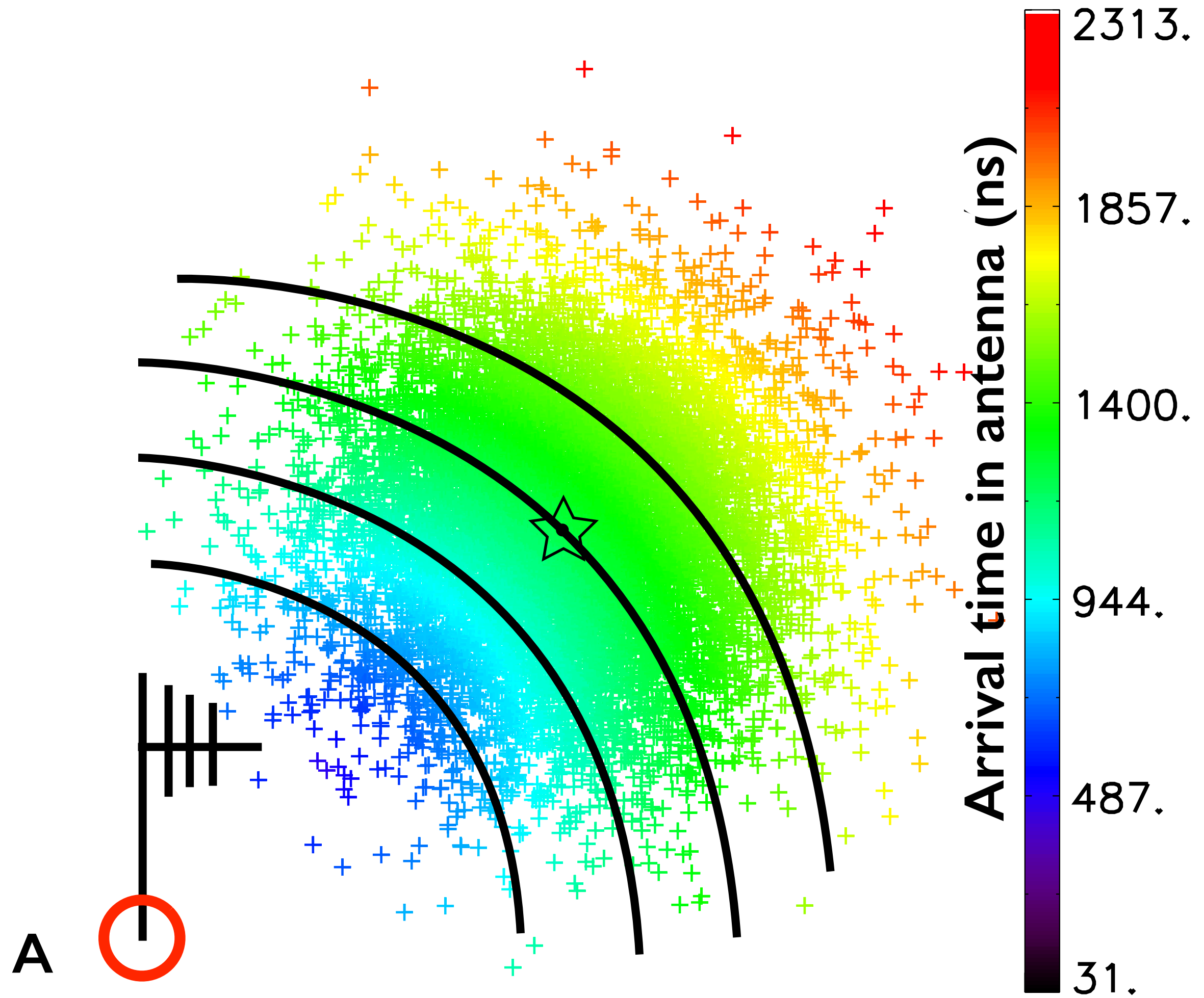
Modèle de mort subite : amplitude, structure temporelle



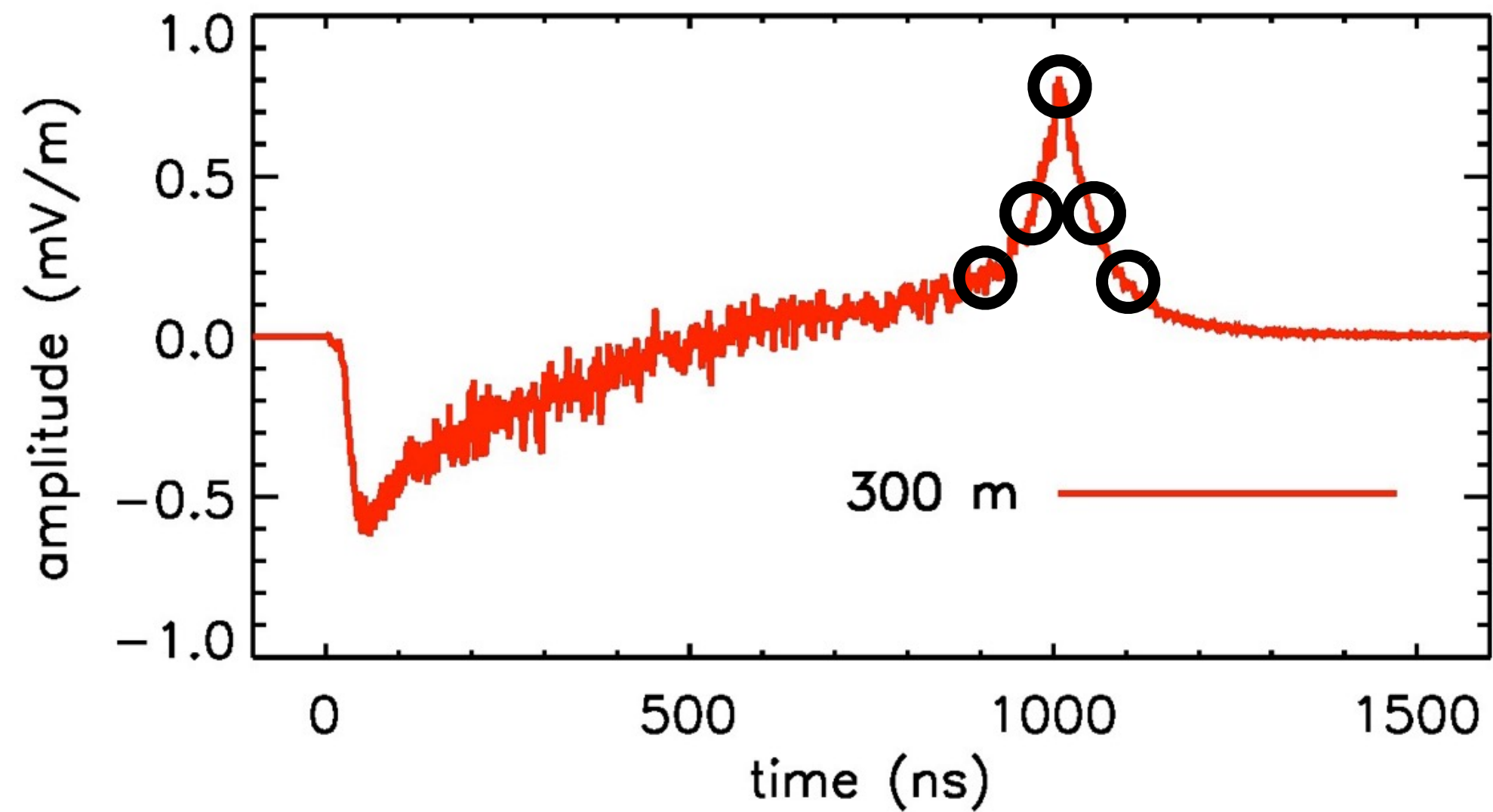
- modèle simple basé sur les particules au sol
- fonctionne pour des gerbes verticales et inclinées

$$s(t = r/c) \propto \int_0^{2\pi} \mathcal{L}(\rho) d\phi$$

corrélé au nombre total d'e⁻/e⁺



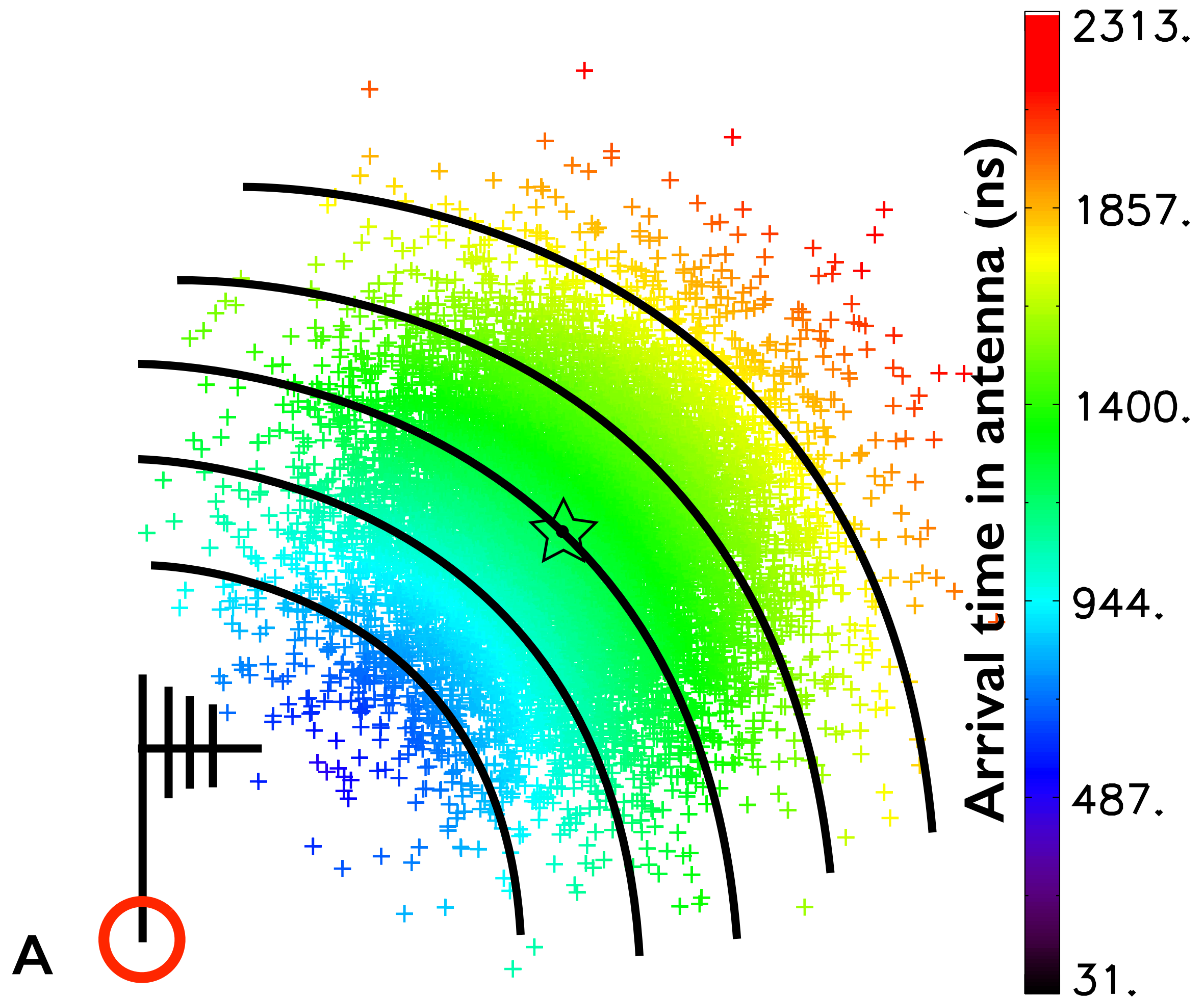
Modèle de mort subite : amplitude, structure temporelle



- modèle simple basé sur les particules au sol
- fonctionne pour des gerbes verticales et inclinées

$$s(t = r/c) \propto \int_0^{2\pi} \mathcal{L}(\rho) d\phi$$

corrélé au nombre total d'e⁻/e⁺



Signal de mort subite : quelques propriétés

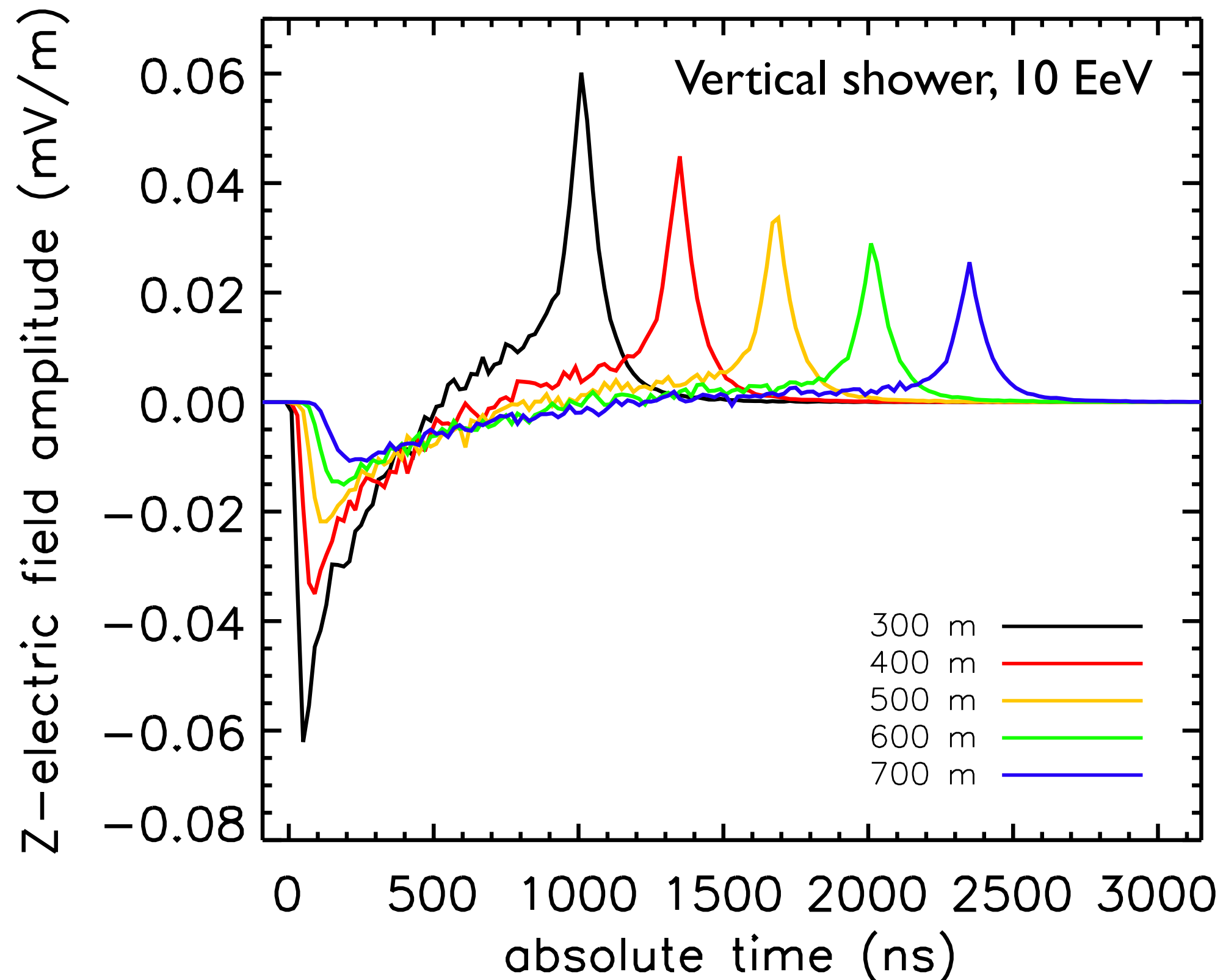
Amplitude : varie linéairement avec E

Polarisation: le champ est dans le plan \perp à la direction observateur/cœur, composante **verticale**

Signal de mort subite : quelques propriétés

Amplitude : varie linéairement avec E

Polarisation: le champ est dans le plan \perp à la direction observateur/cœur, composante **verticale**

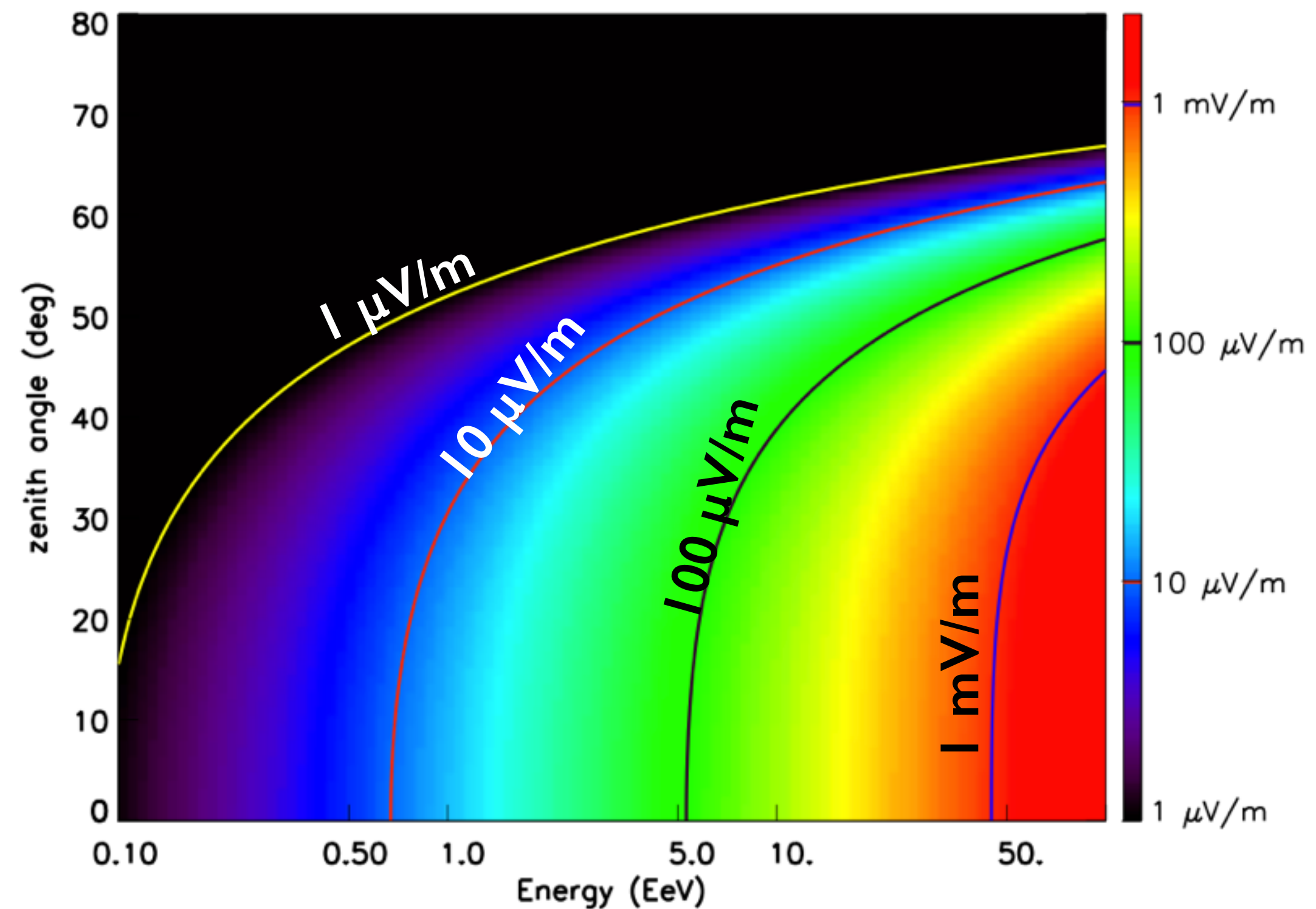
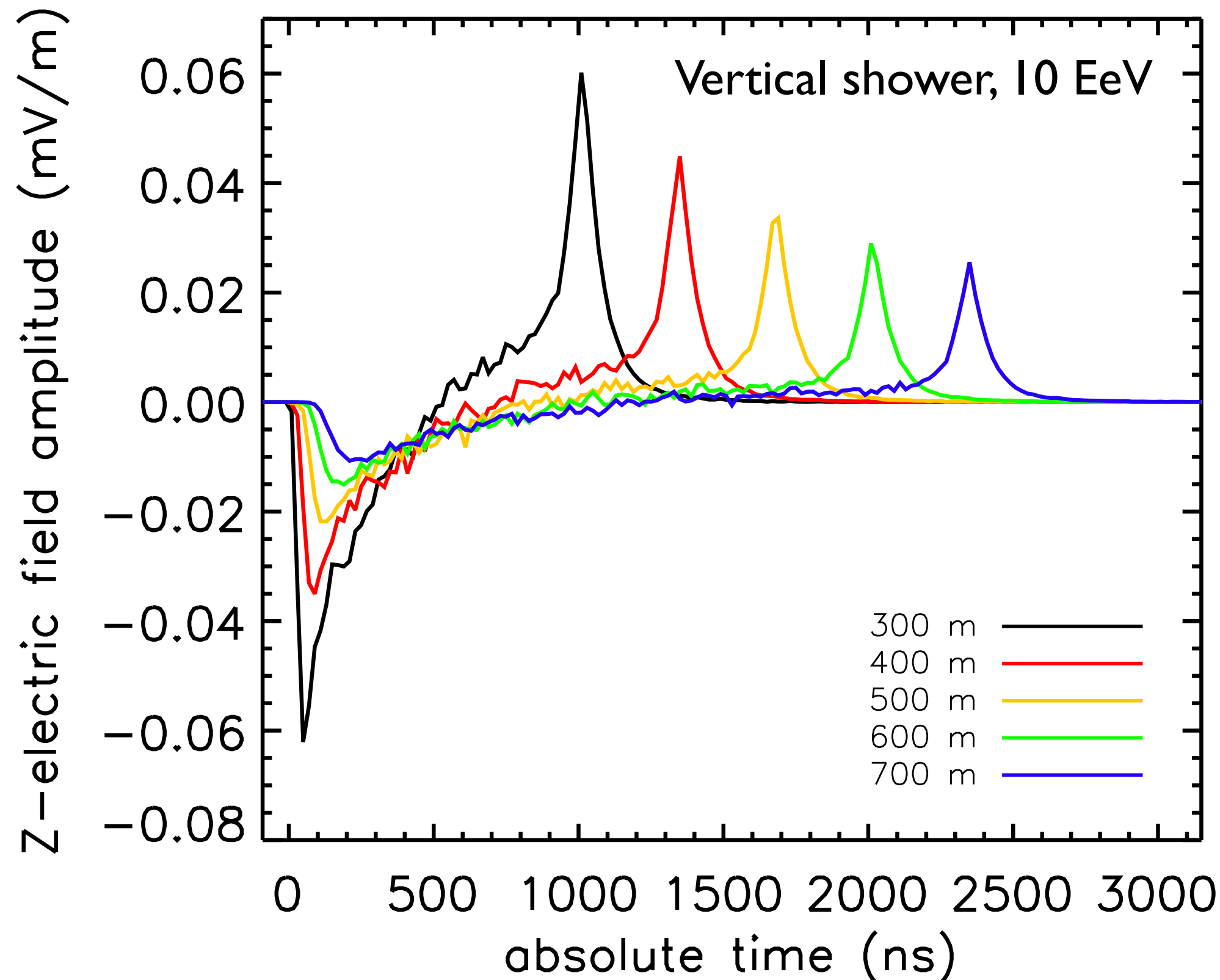


Le pulse "habituel" décroît \sim exponentiellement,
l'amplitude du signal de mort subite décroît en $1/d_{\text{core}}$

Signal de mort subite : quelques propriétés

Amplitude : varie linéairement avec E

Polarisation: le champ est dans le plan \perp à la direction observateur/cœur, composante verticale



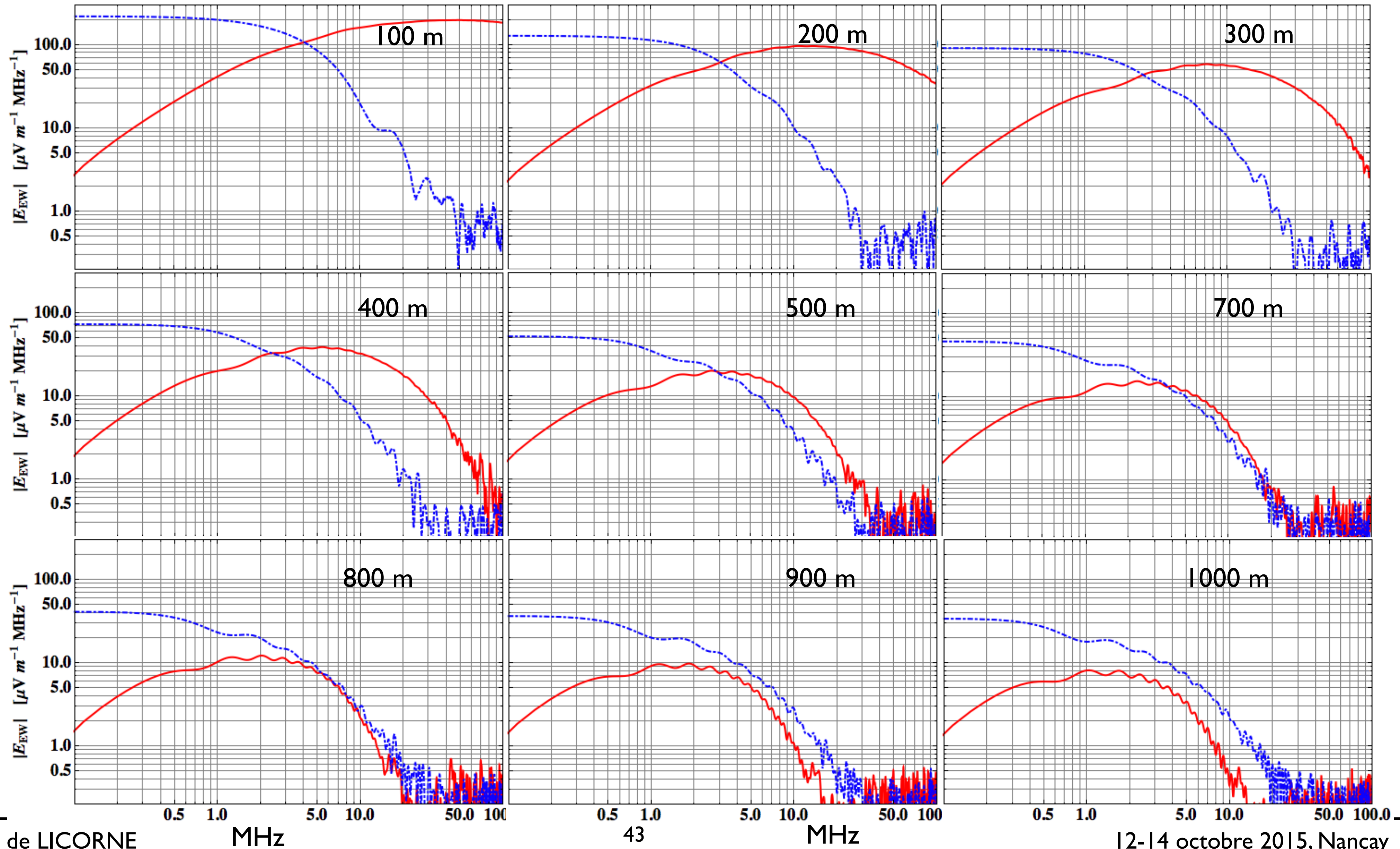
Le pulse “habituel” décroît \sim exponentiellement, l’amplitude du signal de mort subite décroît en $1/d_{\text{core}}$

Amplitude attendue en fonction des caractéristiques du primaire (angle zénithal, énergie).

contribution au sol
développement dans l'air

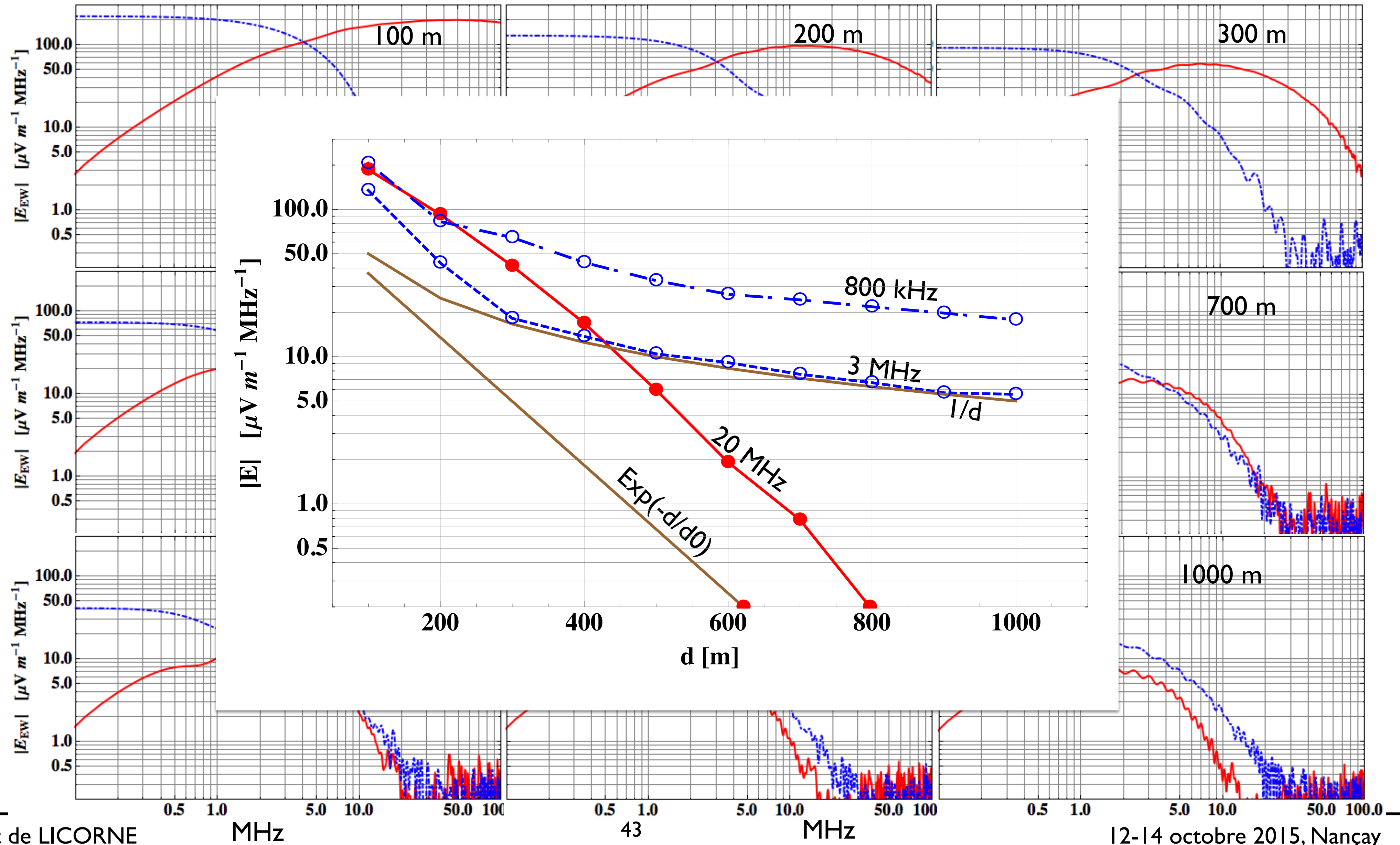
Signal de mort subite : spectre

(SELFAS simulations)



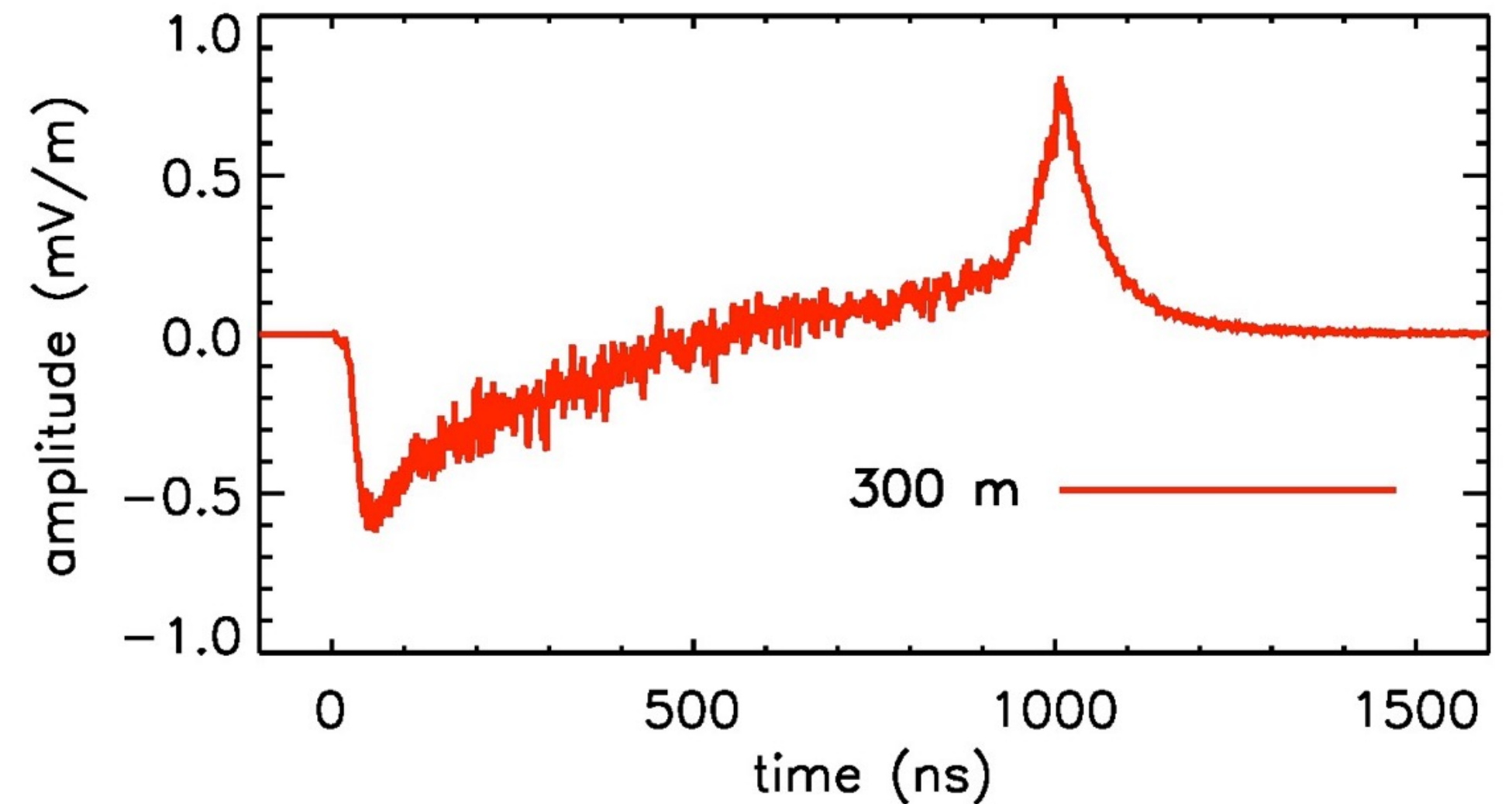
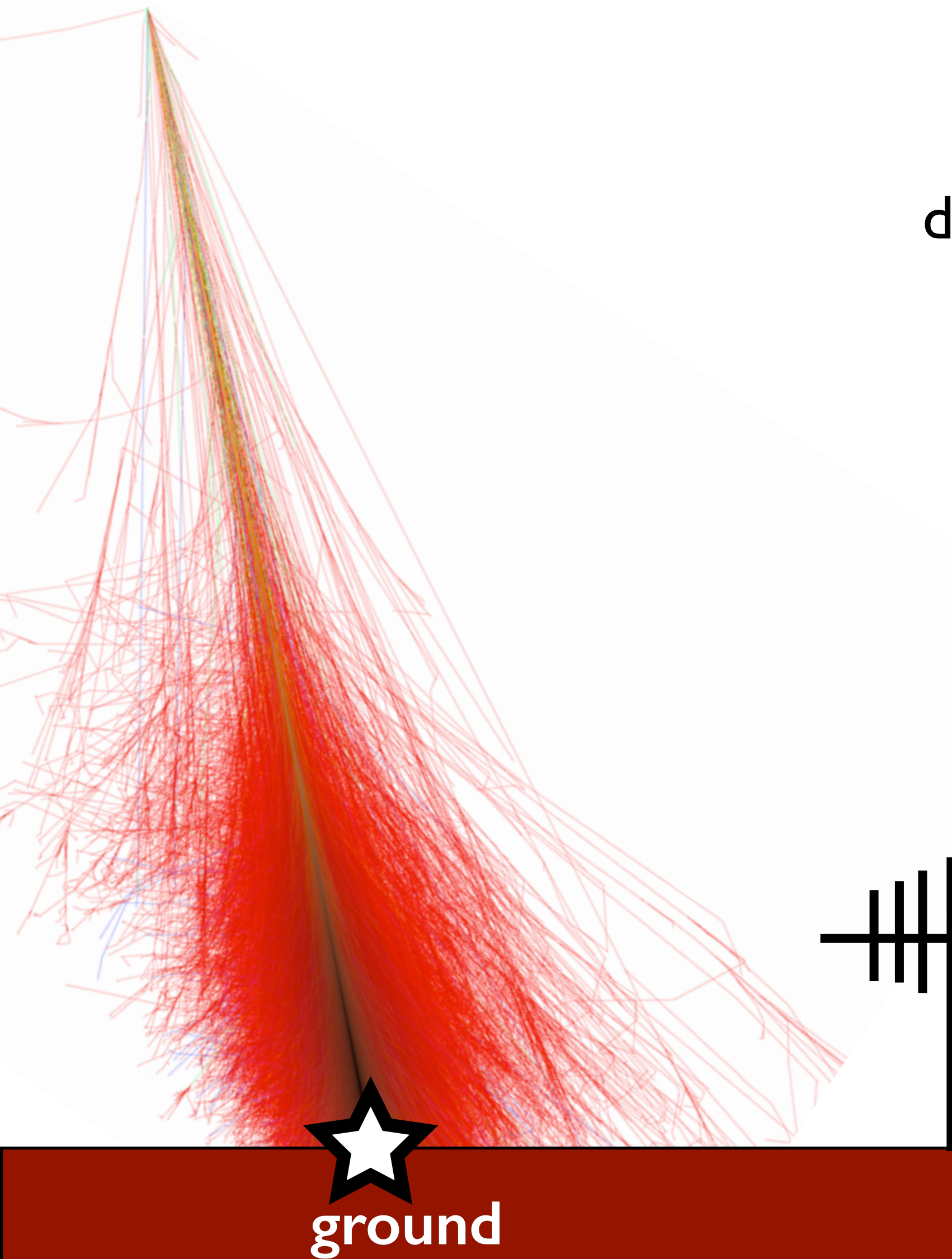
Signal de mort subite : spectre

(SELFAS simulations)



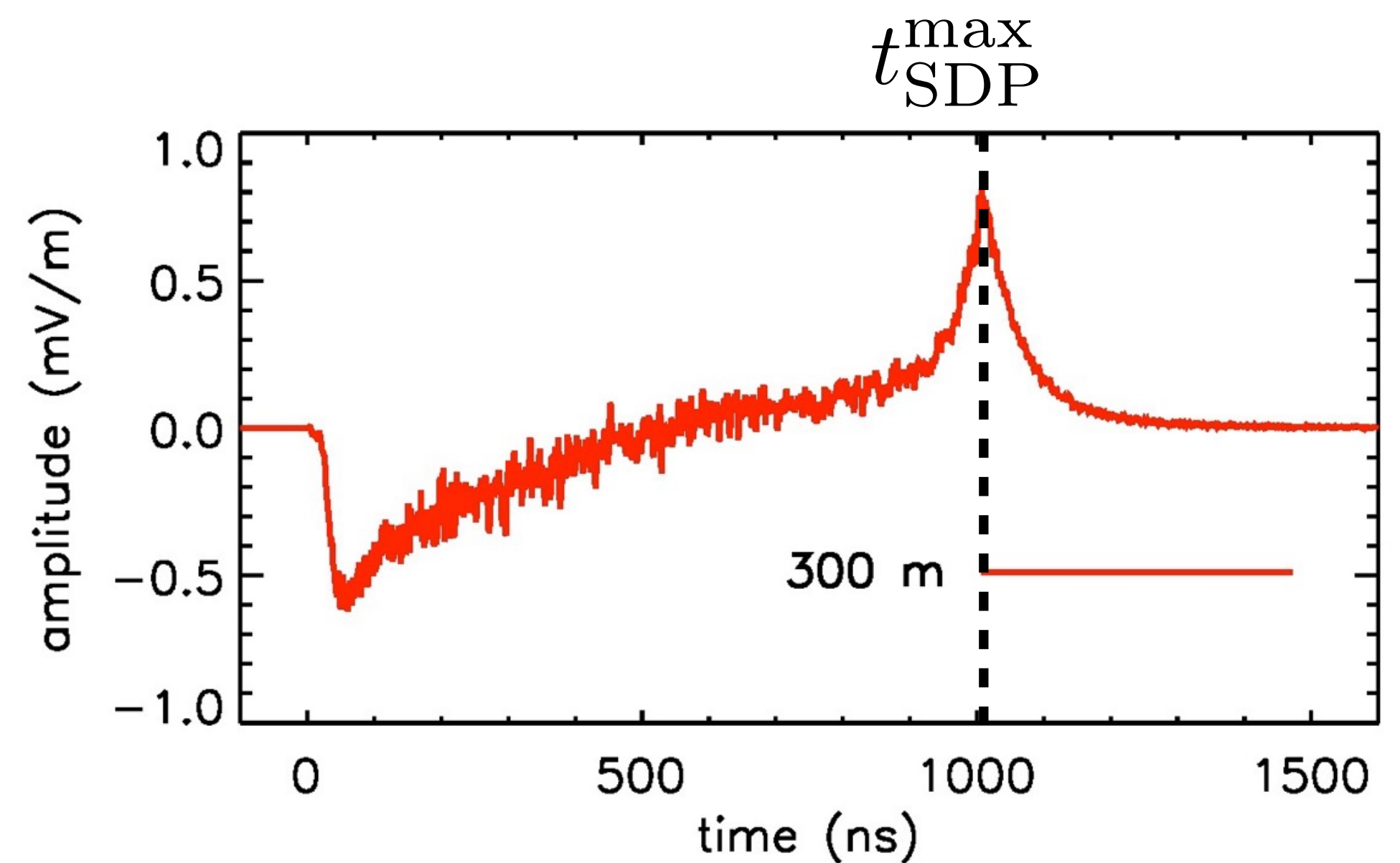
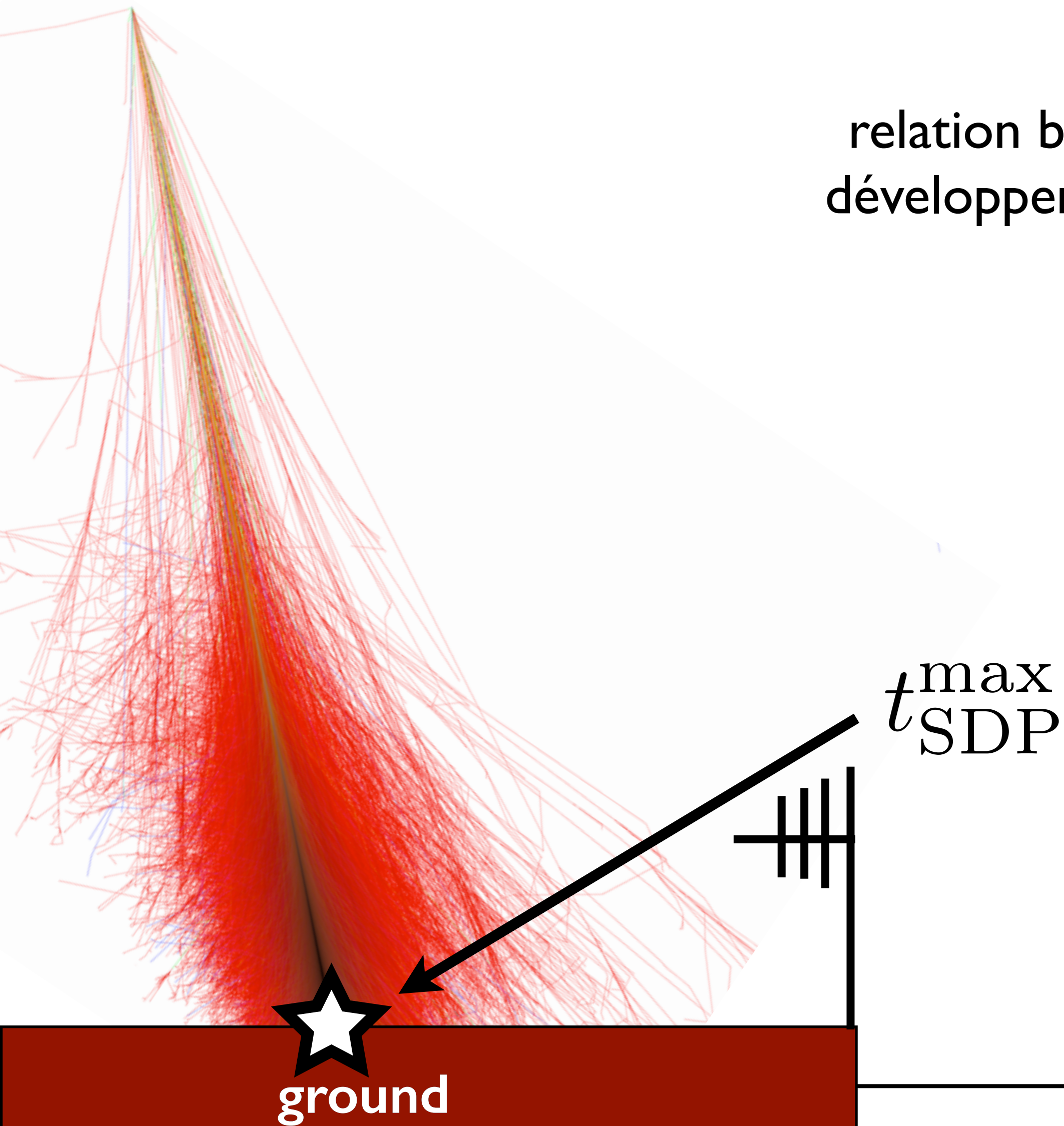
Signal de mort subite : timing absolu

relation bijective entre le temps d'un observateur et le développement de la gerbe (loin de l'anneau Cherenkov)



Signal de mort subite : timing absolu

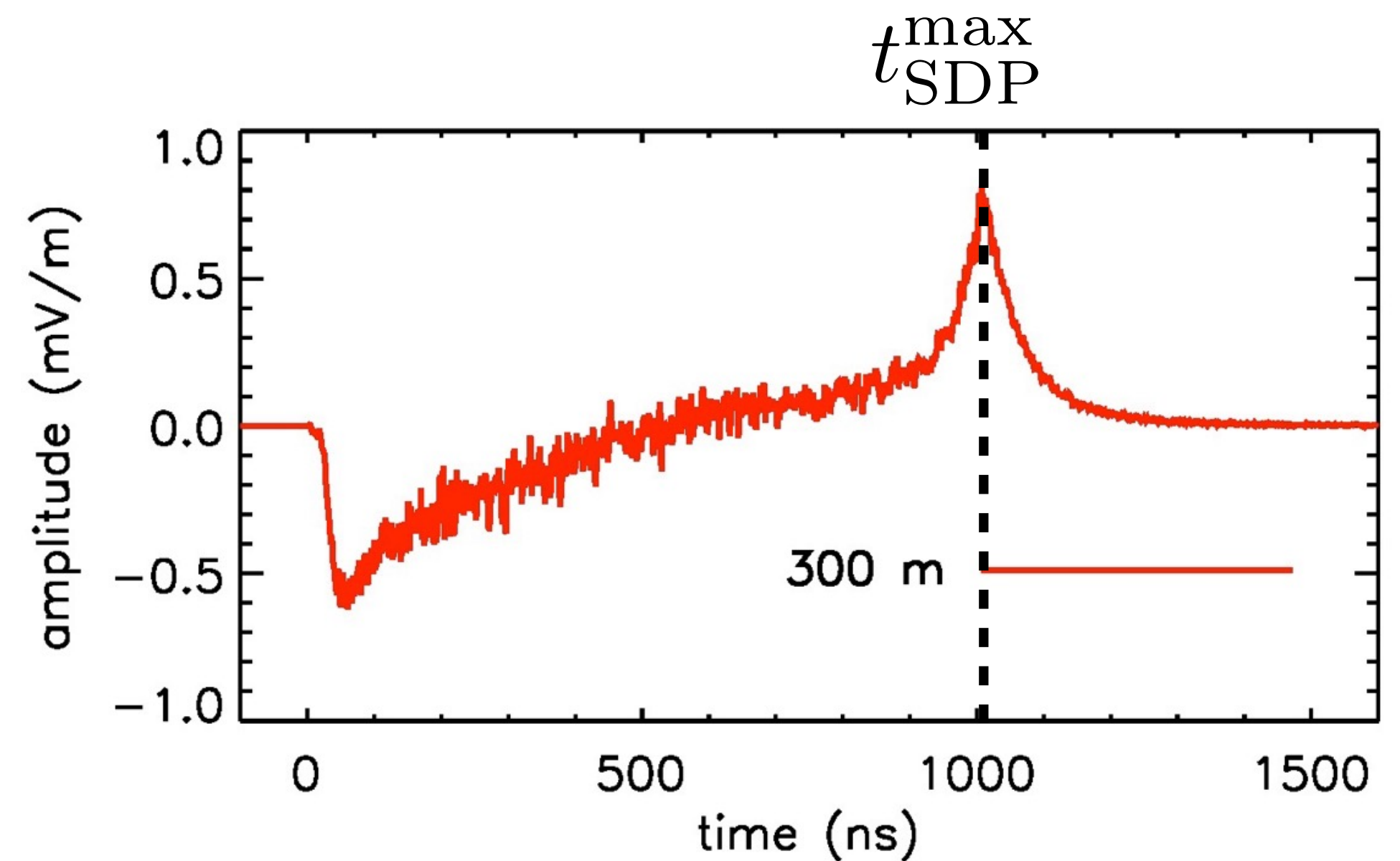
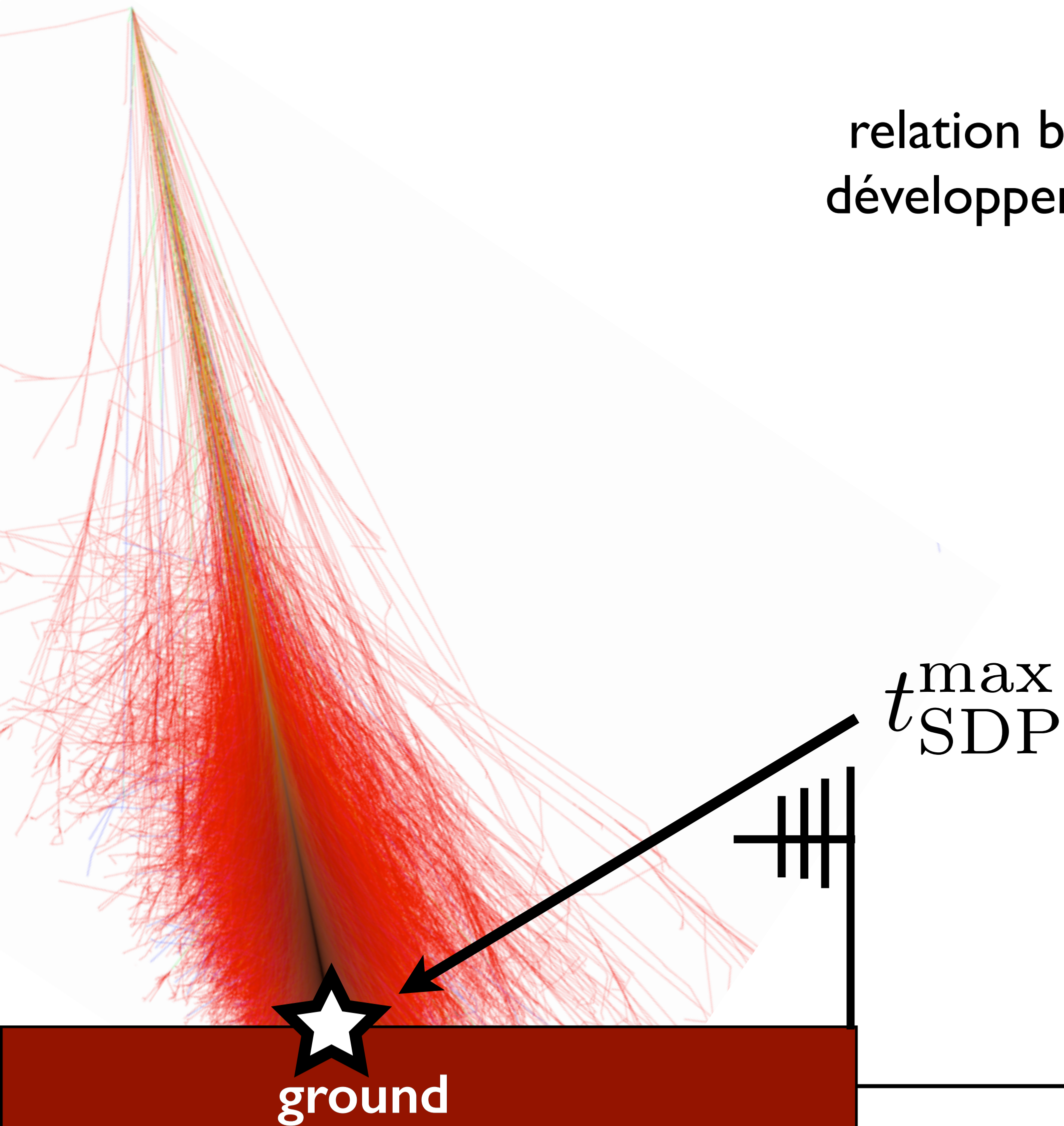
relation bijective entre le temps d'un observateur et le développement de la gerbe (loin de l'anneau Cherenkov)



Signal de mort subite : timing absolu

relation bijective entre le temps d'un observateur et le développement de la gerbe (loin de l'anneau Cherenkov)

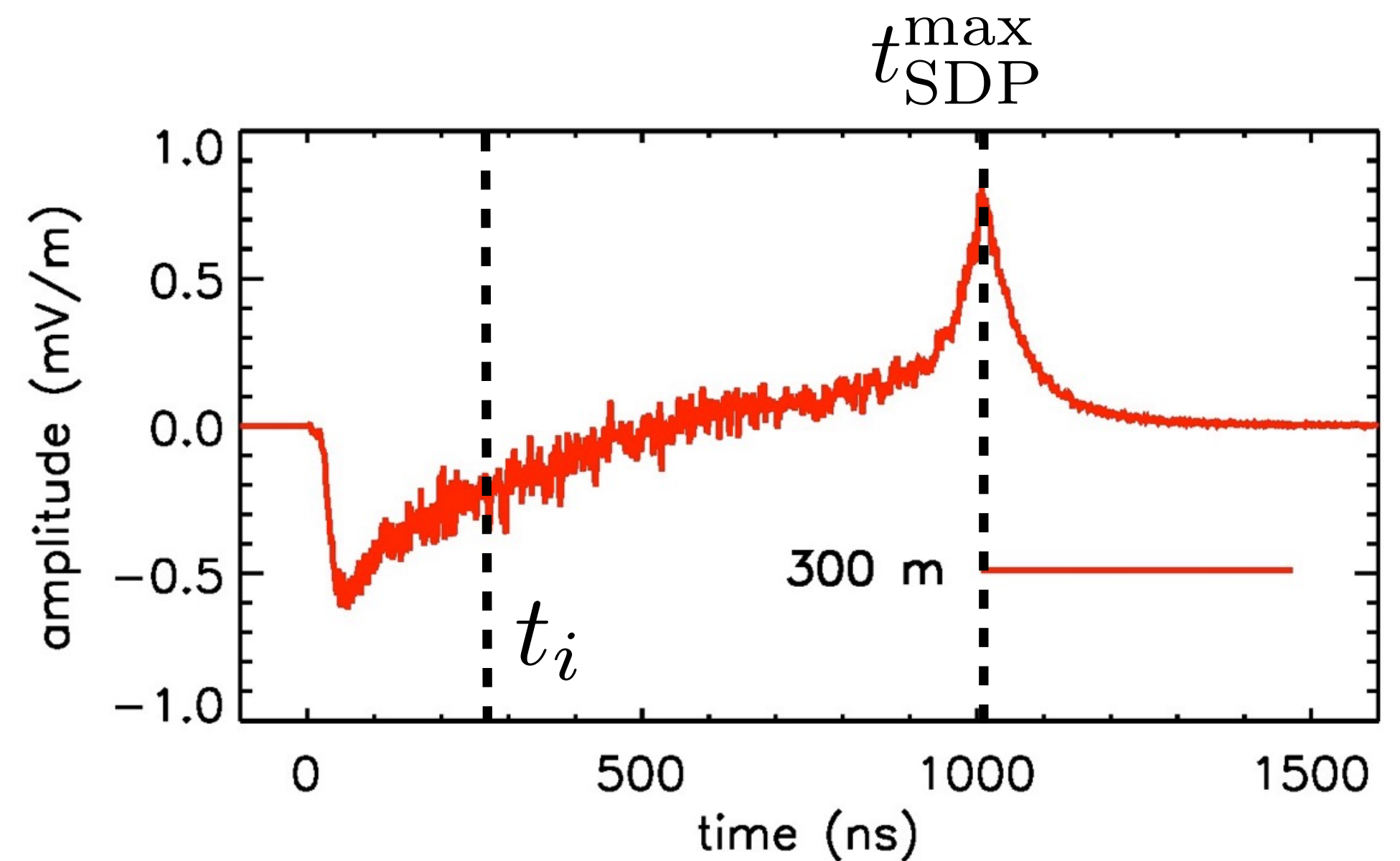
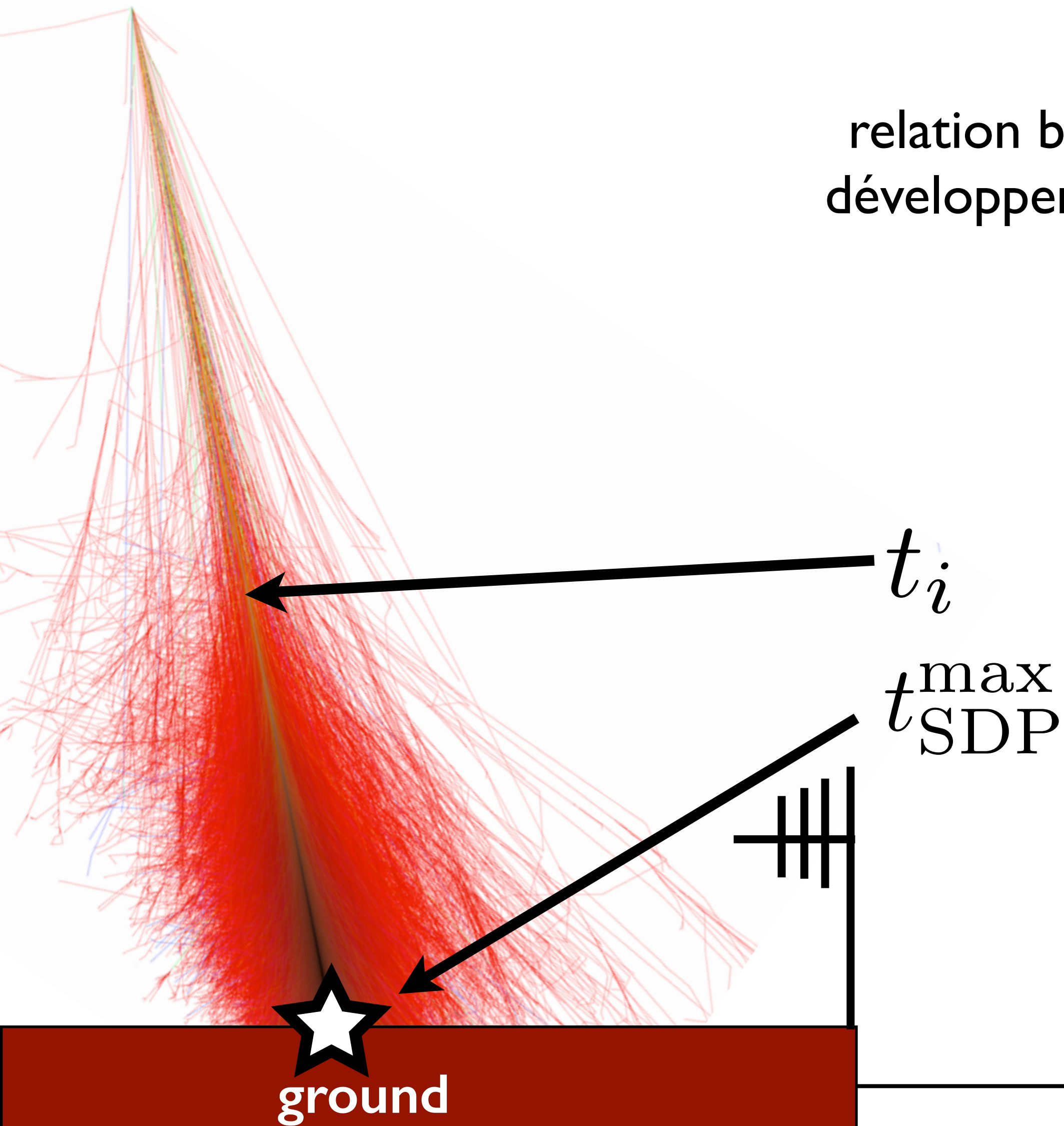
$$t_i$$



Signal de mort subite : timing absolu

relation bijective entre le temps d'un observateur et le développement de la gerbe (loin de l'anneau Cherenkov)

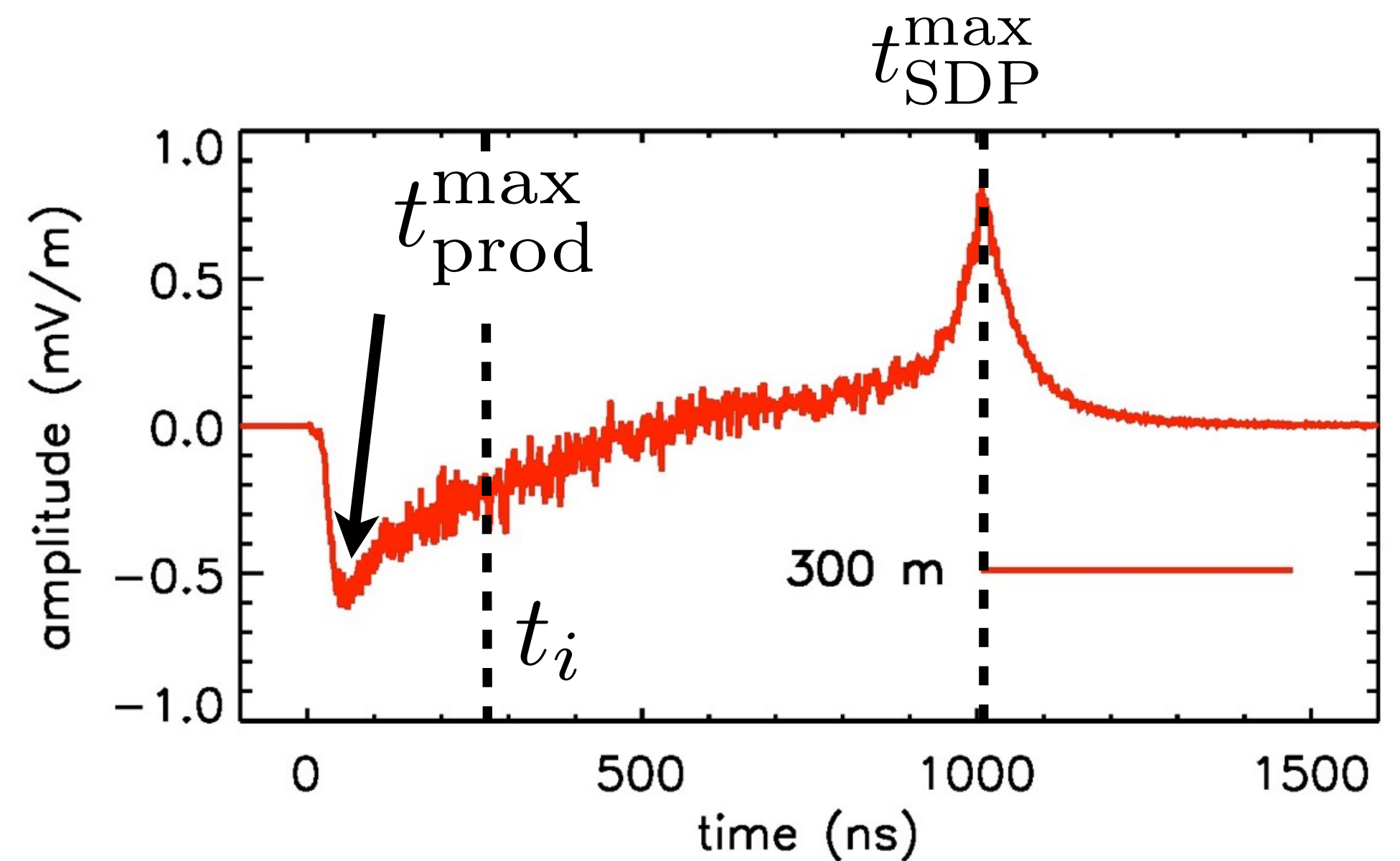
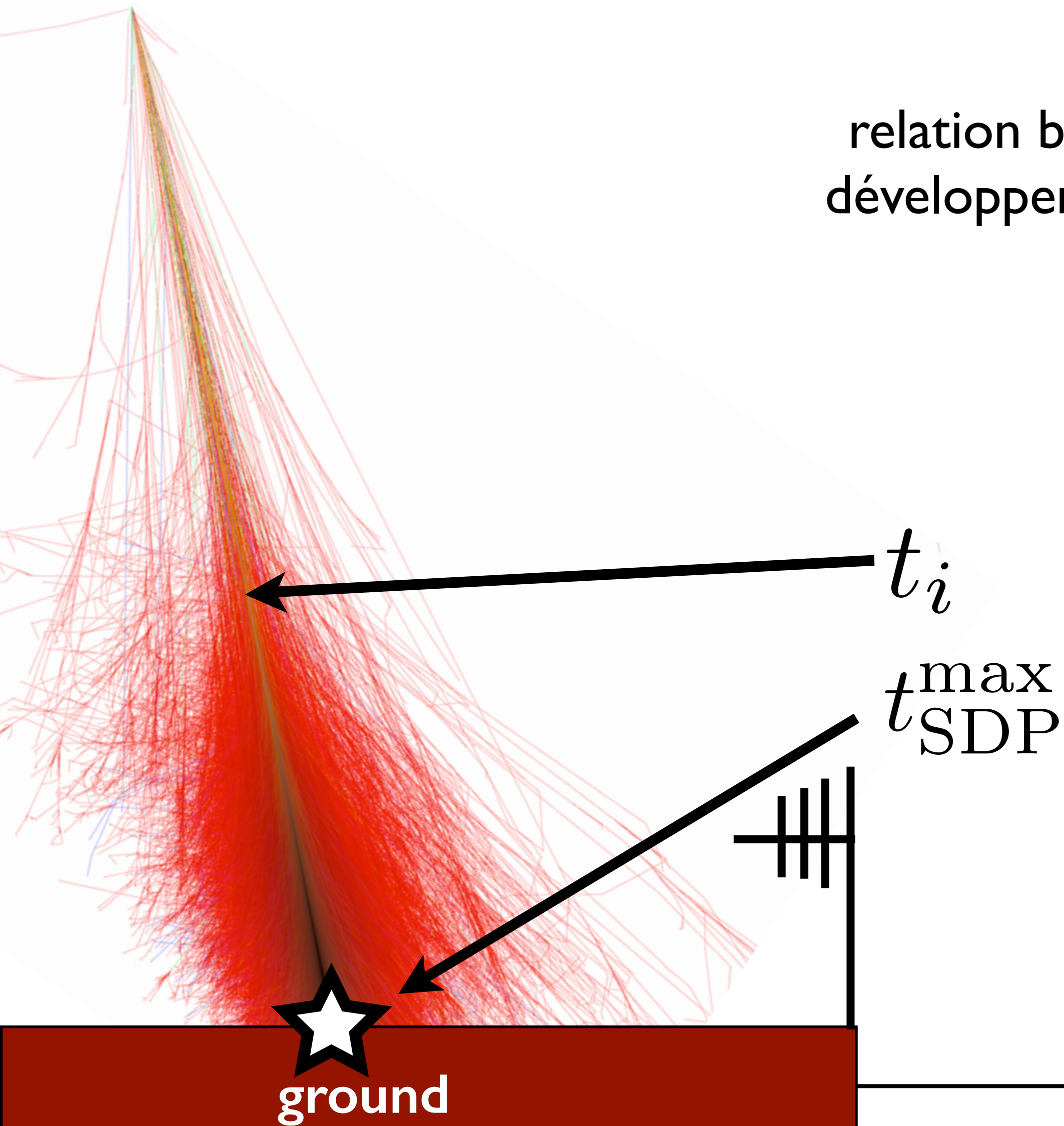
$$t_i$$



Signal de mort subite : timing absolu

relation bijective entre le temps d'un observateur et le développement de la gerbe (loin de l'anneau Cherenkov)

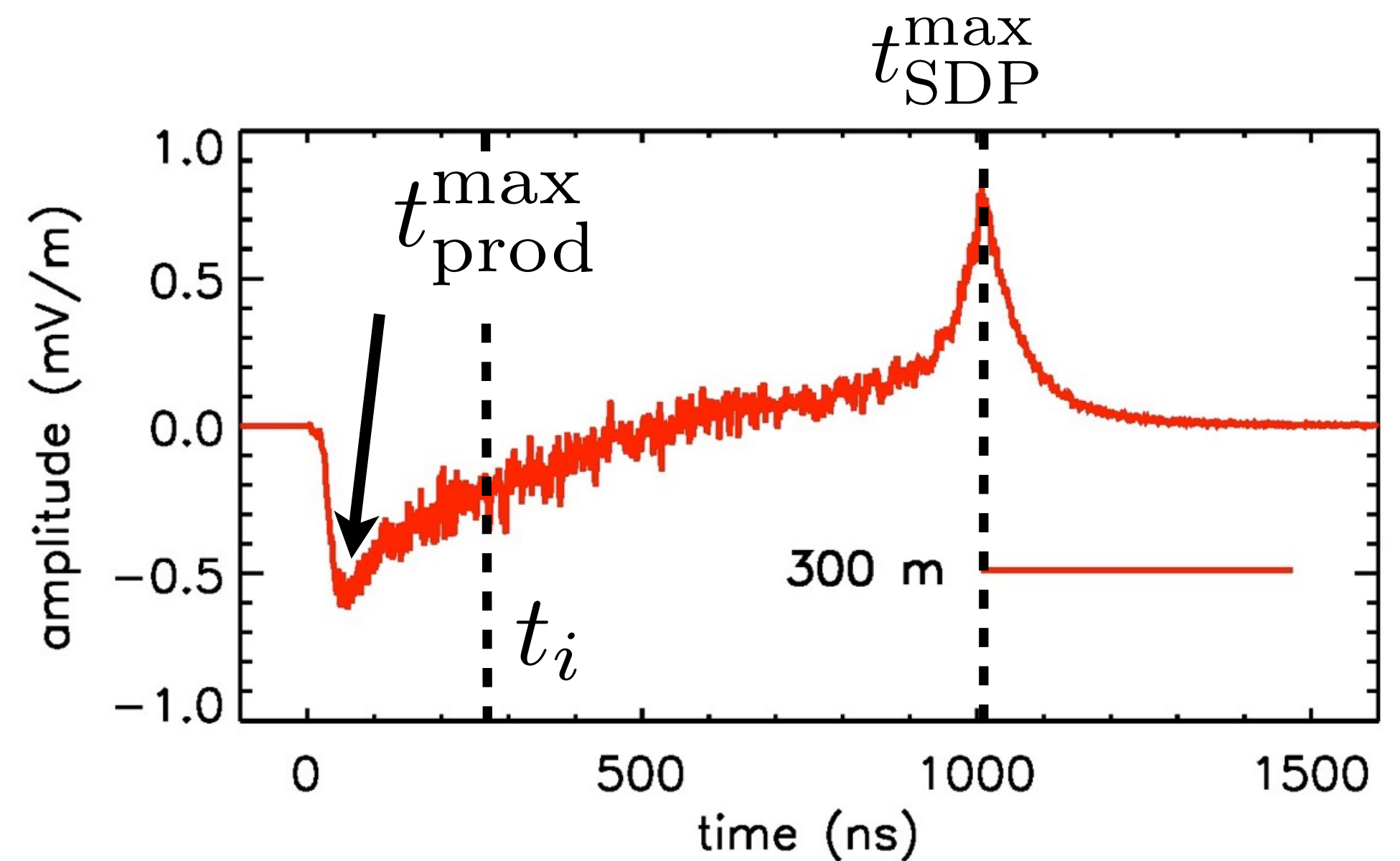
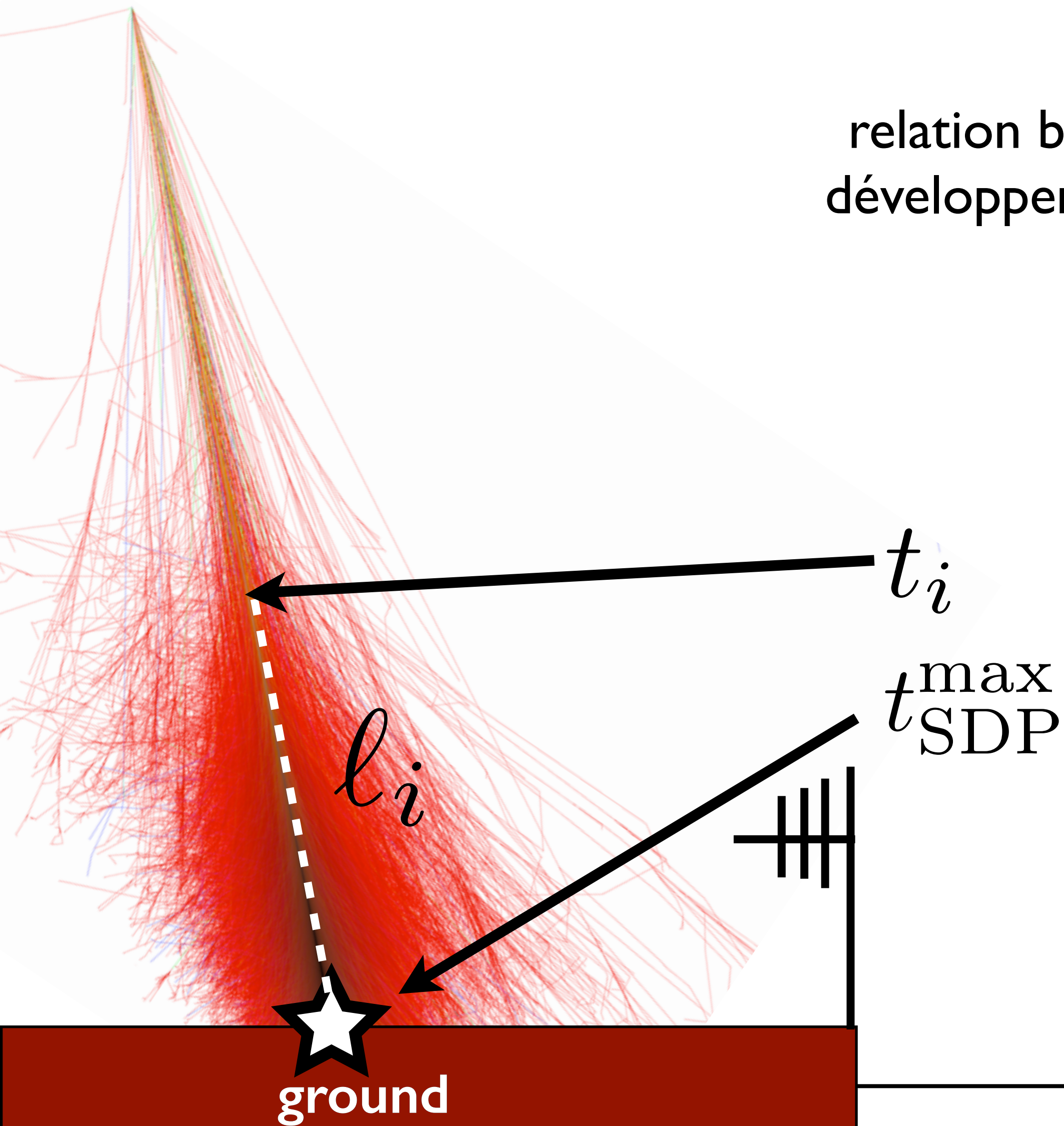
t_i



Signal de mort subite : timing absolu

relation bijective entre le temps d'un observateur et le développement de la gerbe (loin de l'anneau Cherenkov)

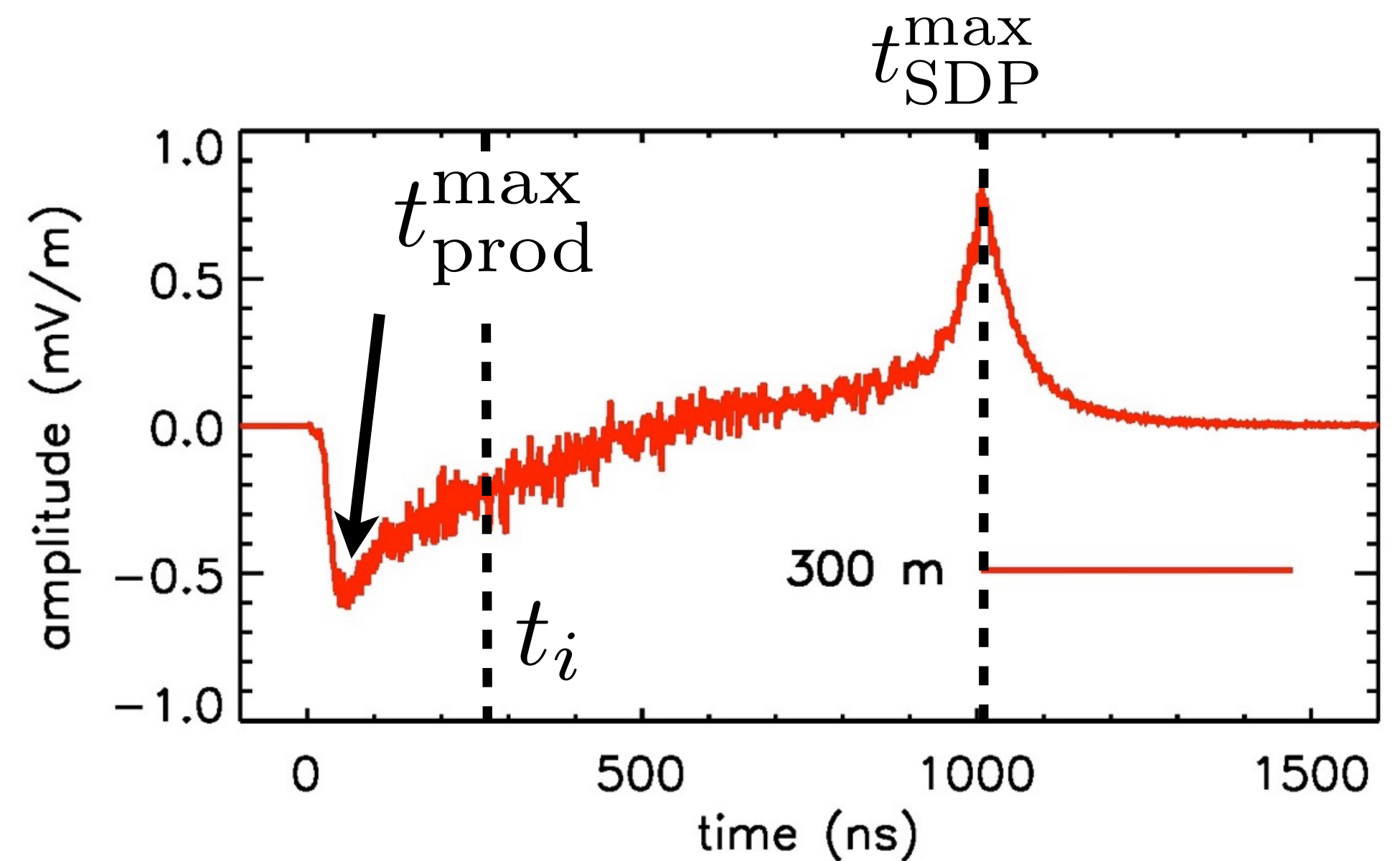
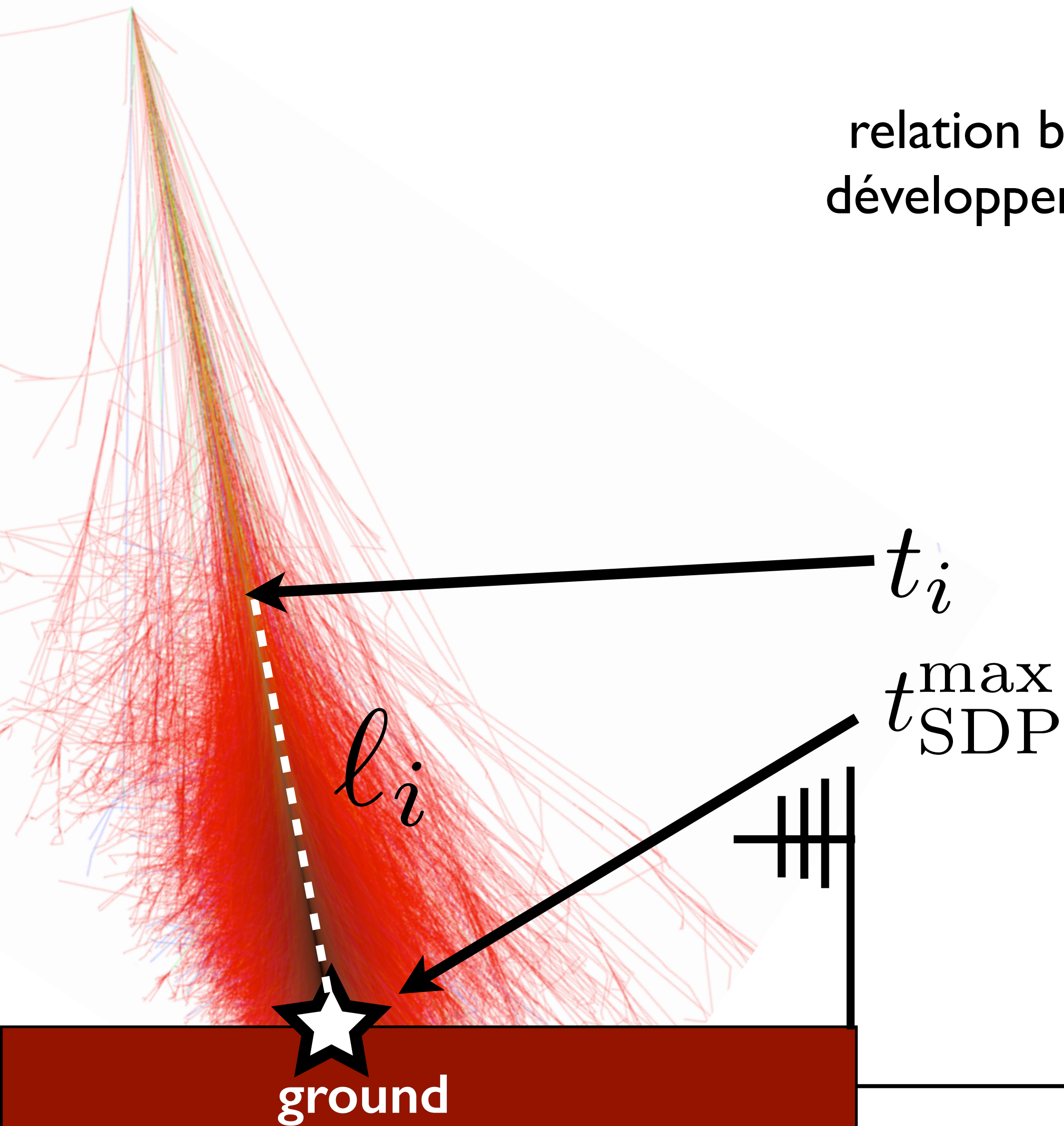
t_i



Signal de mort subite : timing absolu

relation bijective entre le temps d'un observateur et le développement de la gerbe (loin de l'anneau Cherenkov)

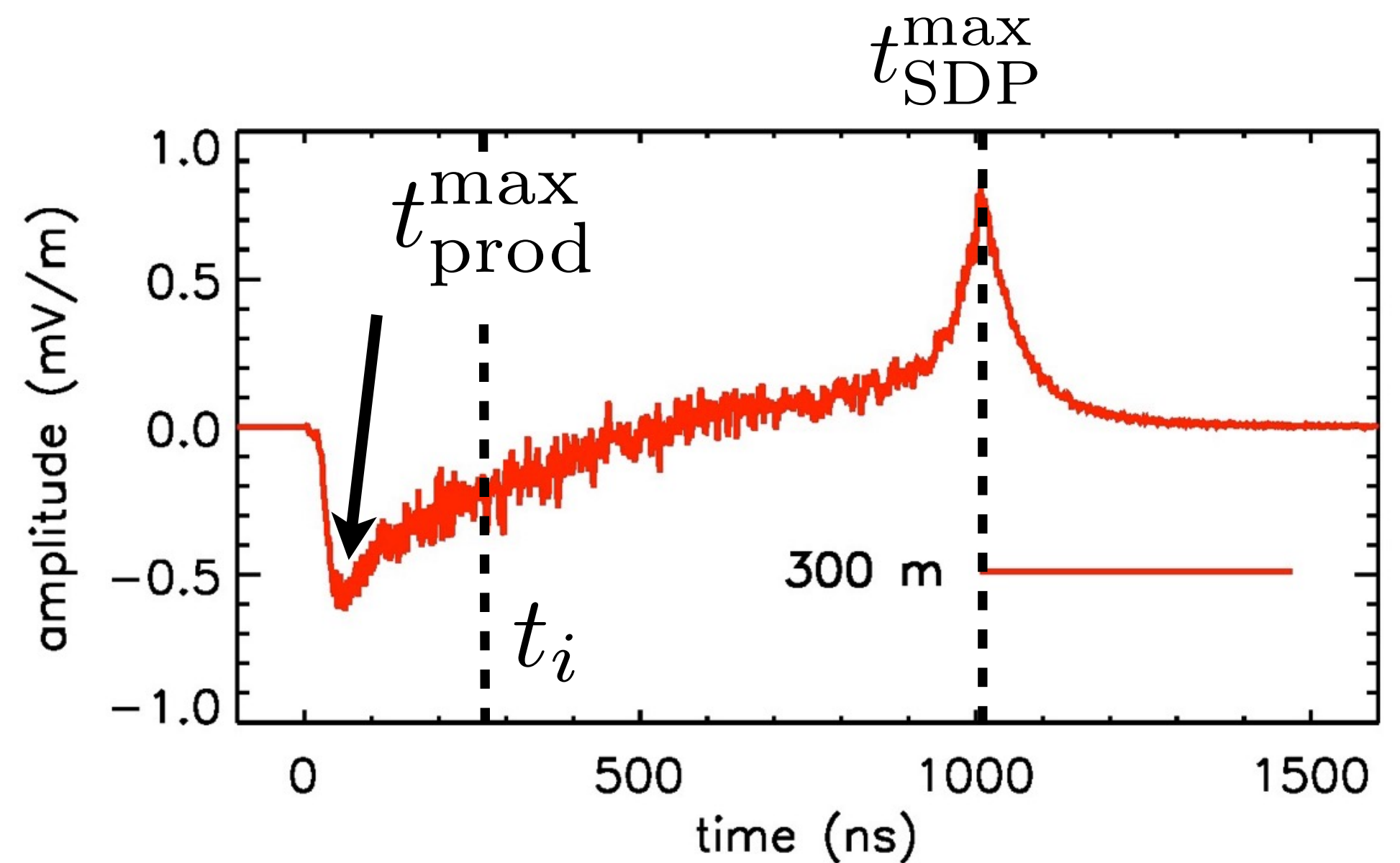
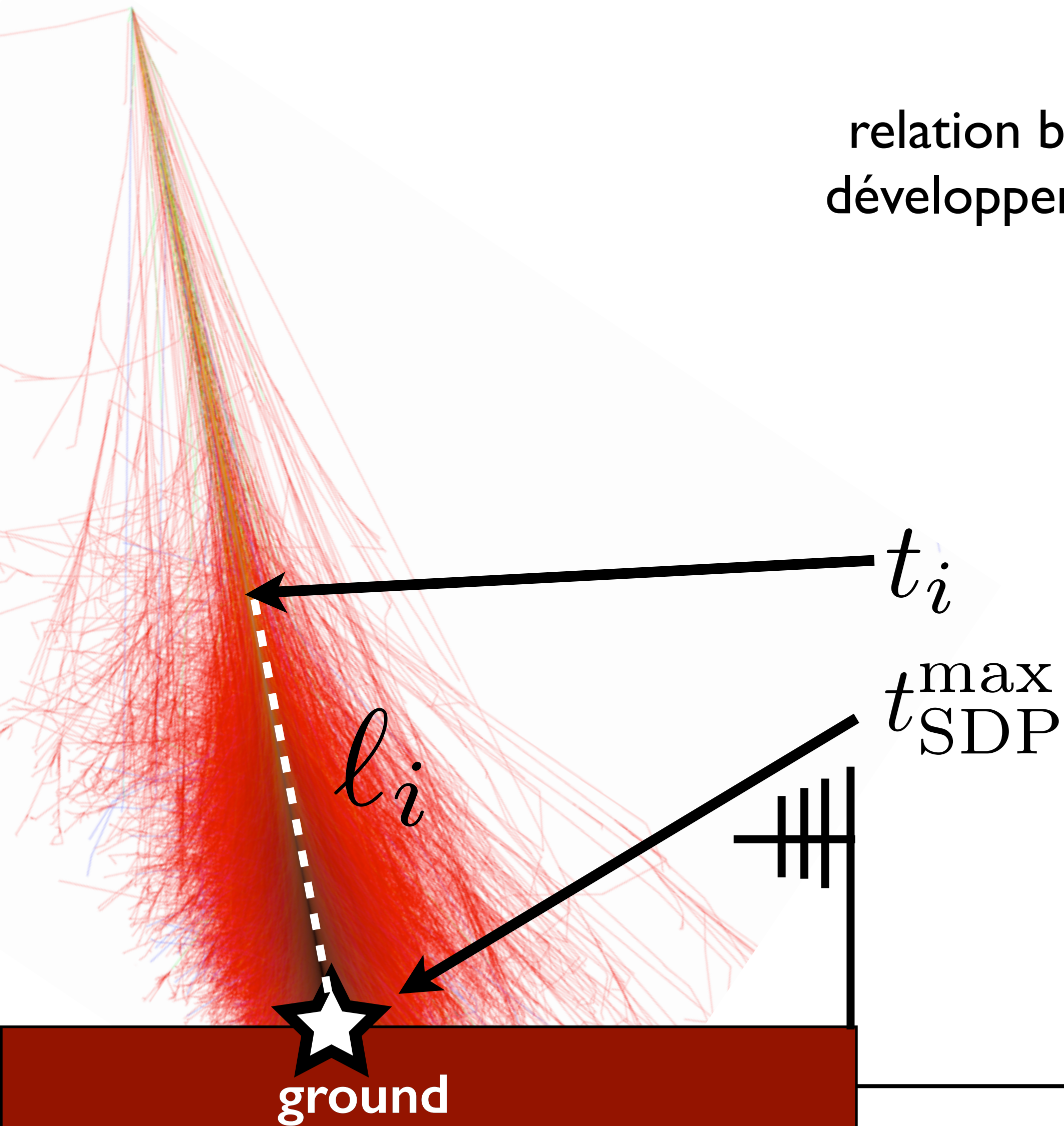
$$t_i \mapsto l_i$$



Signal de mort subite : timing absolu

relation bijective entre le temps d'un observateur et le développement de la gerbe (loin de l'anneau Cherenkov)

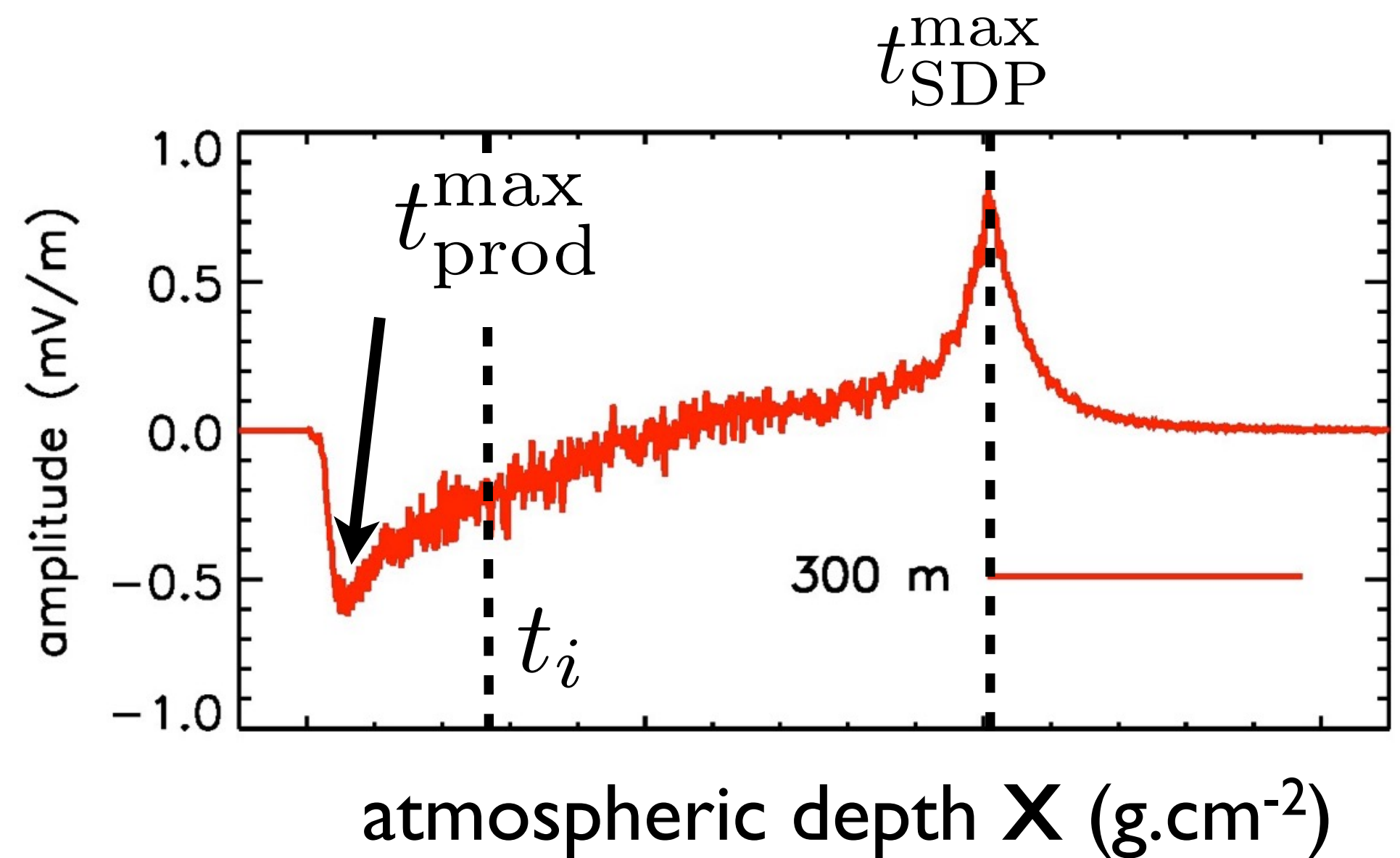
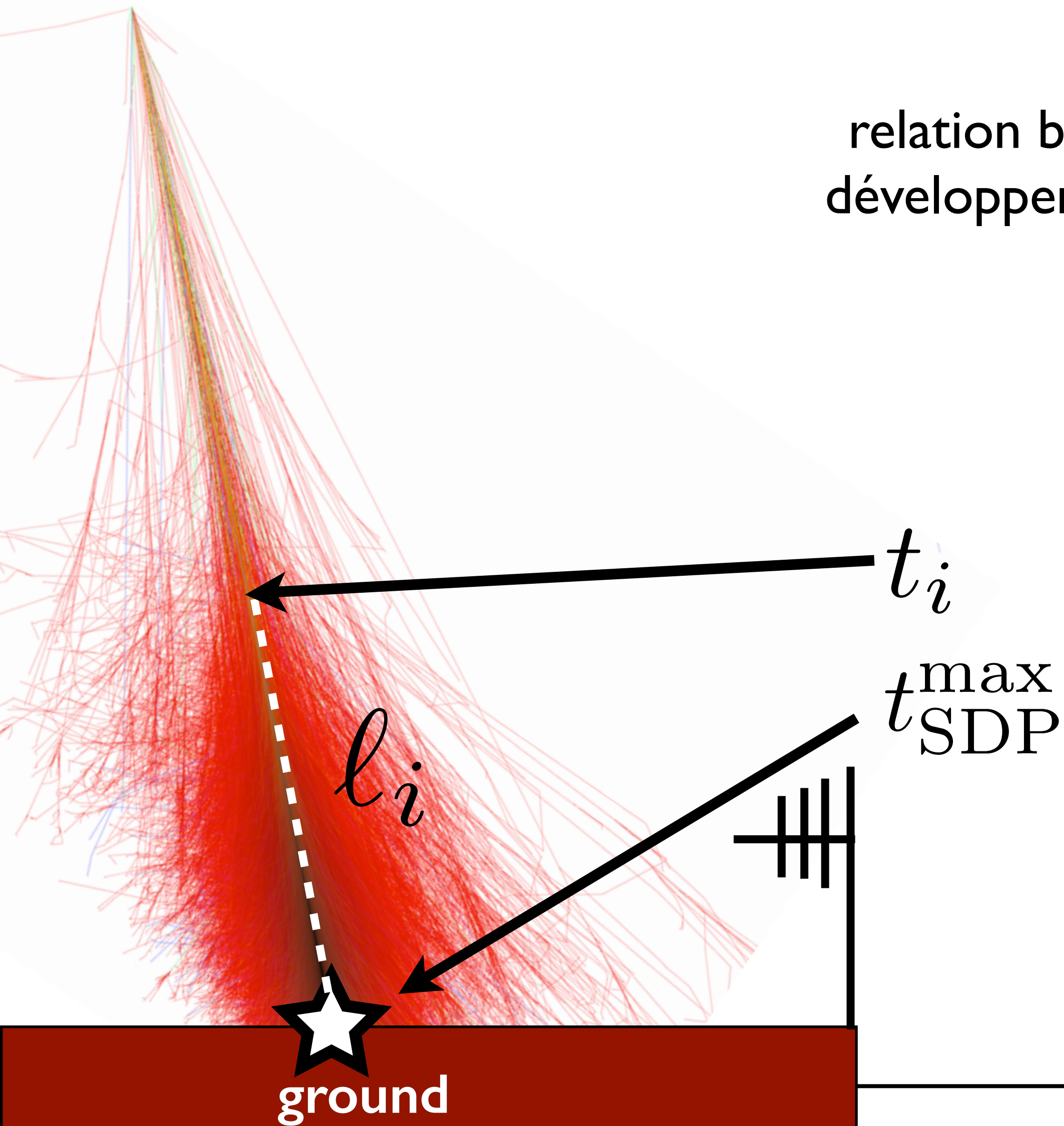
$$t_i \longmapsto l_i \longmapsto X_i$$



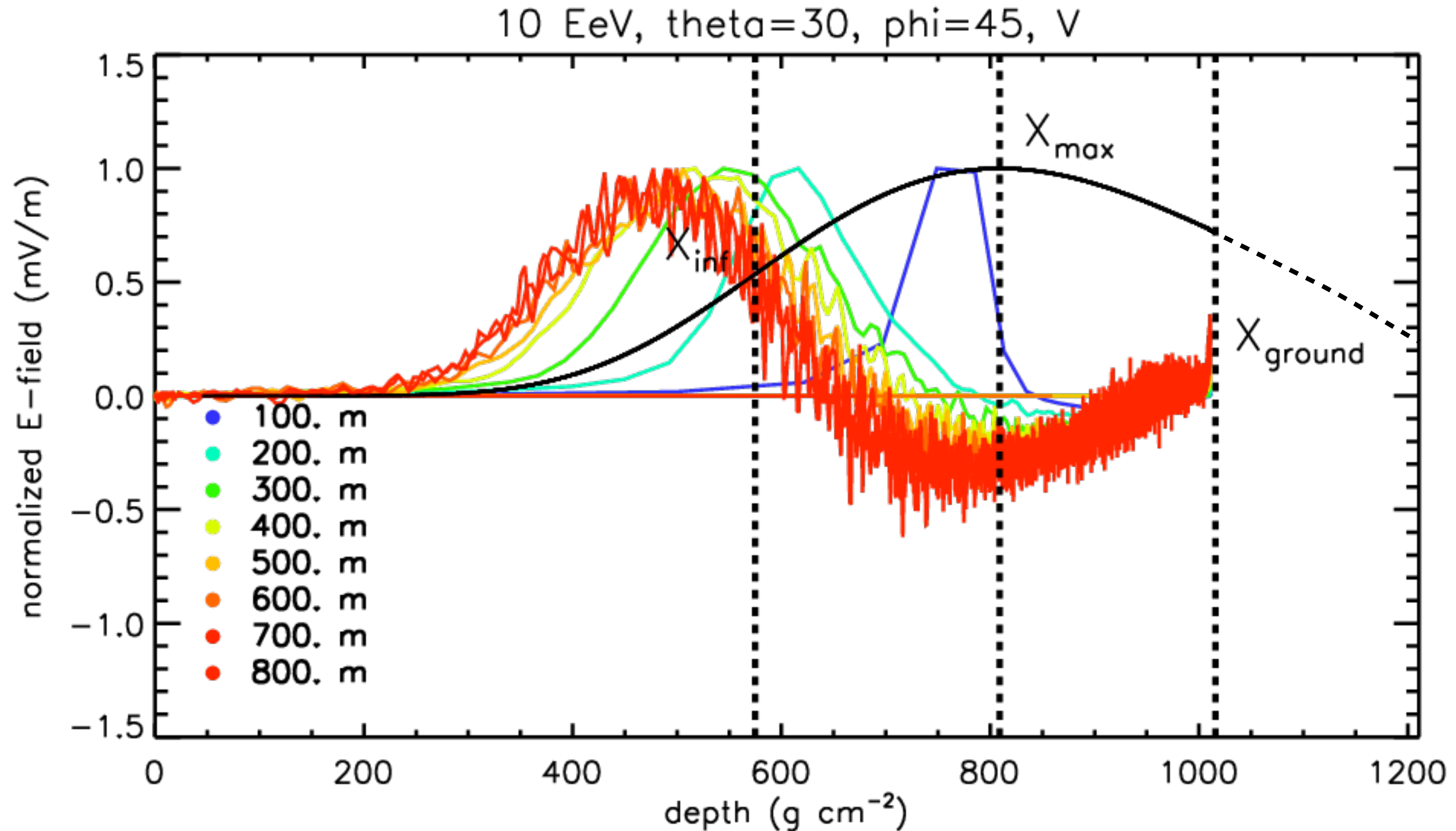
Signal de mort subite : timing absolu

relation bijective entre le temps d'un observateur et le développement de la gerbe (loin de l'anneau Cherenkov)

$$t_i \longmapsto l_i \longmapsto X_i$$

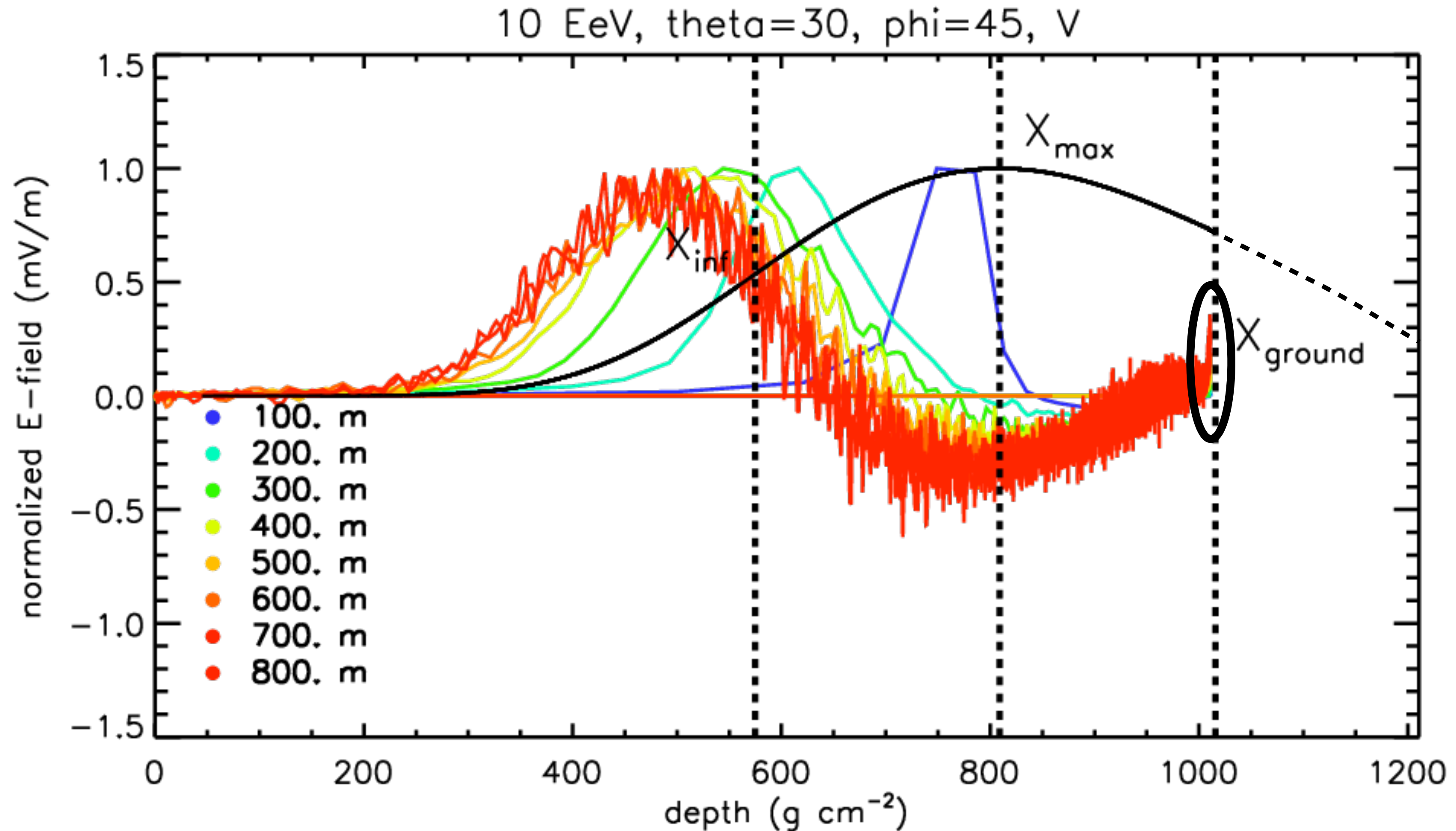


Signal de mort subite : timing absolu



D'après la simulation, le maximum de champ électrique est produit bien avant X_{max} (proche de X_{inf})

Signal de mort subite : timing absolu



D'après la simulation, le maximum de champ électrique est produit bien avant X_{max} (proche de X_{inf})

Bilan final

