Polarisation du CMB

B. Revenu

21 juin 2000

1 Pourquoi le CMB est-il polarisé ?

1.1 Diffusion Thomson

L'univers est essentiellememt rempli — à l'époque de l'émission du CMB — de photons, de baryons, d'électrons et de matière noire. L'interaction dominante à cette époque, celle qui fait que les photons, électrons et baryons sont très fortement couplés est la diffusion Thomson, dont la section efficace s'écrit :

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \propto |\epsilon.\epsilon'|^2$$

où ϵ et ϵ' sont les 2-vecteurs caractérisant l'état de polarisation des photons entrant et sortant respectivement. À partir de l'expression de cette section efficace, on peut dire que le photon sortant sera d'autant plus favorisé qu'il sera dans un état de polarisation proche de celui du photon entrant (car on maximise alors le produit scalaire des deux vecteurs polarisation). Par exemple, dans la Figure 1,

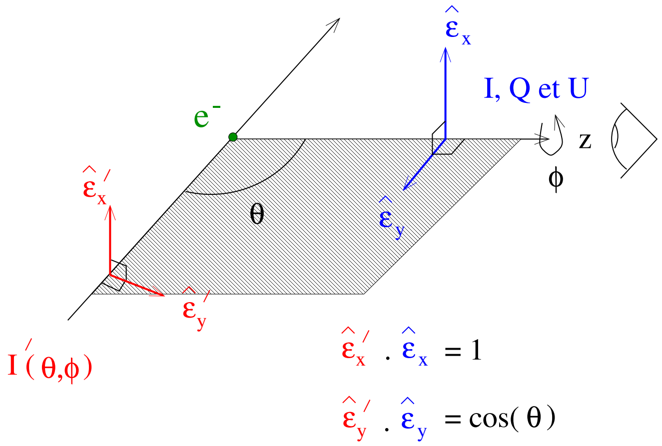

Figure 1: Diffusion Thomson d'un photon par un électron ; le photon sortant ayant un état de polarisation proche de celui du photon entrant est favorisé.

on voit que la composante du champ électrique sur $\vec{x}$ et sur $\vec{x}'$ ne sera pas atténuée ($\epsilon'_x.\epsilon_x = 1$) alors que la composante sur $\vec{y}$ et sur $\vec{y}'$ sera multipliée par un facteur plus petit que 1 : $\cos\theta$. On peut dire schématiquement que la polarisation sur $\vec{x}$ est transmise alors que celle sur $\vec{y}$ est atténuée (ou coupée selon la valeur de θ). L'interaction ne peut pas produire de polarisation si l'électron est éclairé par des photons non polarisés et distribués de façon homogène et isotrope.

Cela ne sera pas le cas si la distribution des photons n'est pas isotrope, comme c'est le cas à l'époque de l'émission du CMB. Prenons par exemple le cas de la Figure 2. La diffusion d'un photon entrant par la gauche va laisser passer la polarisation verticale alors que celle d'un photon entrant par en haut va laisser passer la polarisation horizontale. Si les intensités des photons entrants "gauche" et "haut" sont égales, alors les composantes verticales et horizontales du champ électrique du photon sortant seront aussi égales, on n'observe alors pas de polarisation. Par contre, si les intensités sont différentes (par exemple plus intense pour les photons entrant par la gauche), la composante verticale du champ électrique du photon sortant sera plus grande que la composante horizontale : on peut ainsi "fabriquer" de la polarisation linéaire. Il faut donc une *anisotropie quadrupolaire* dans la distribution des photons pour créer de la polarisation linéaire. Or de tels quadrupôles sont présents dans le CMB : fluctuations de densité, vorticité du fluide photons-baryons et ondes gravitationnelles. Ces simples considérations nous invitent à croire que le CMB est polarisé. Selon les différents modèles cosmologiques envisagés, on

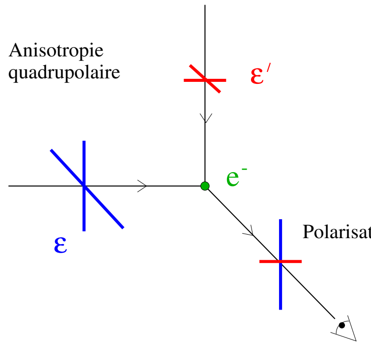

Figure 2: Diffusion des photons par un électron. Une anisotropie quadrupolaire dans le flux de photons engendre une polarisation linéaire dans le rayonnement détecté par l'observateur.

trouve des taux de polarisation relativement peu différents. On s'attend à ce que le CMB soit polarisé à un niveau d'environ 10% des fluctuations de température. Nous allons préciser dans la prochaine section ce que cela signifie.

2 Description quantitative de la polarisation

2.1 Les paramètres de Stokes

Un rayonnement polarisé linéairement peut se décrire en utilisant les *paramètres de Stokes*. Une onde polarisée peut s'écrire de la manière suivante :

$$\begin{aligned} E_x &= E_{0x} \sin(\omega t - \varphi_x) \\ E_y &= E_{0y} \sin(\omega t - \varphi_y) \end{aligned}$$

Le rayonnement est dit polarisé si $E_{0x}/E_{0y} = Cte$ et si $\varphi_x - \varphi_y = Cte$. Les paramètres de Stokes sont définis par :

$$I = E_{0x}^2 + E_{0y}^2 \tag{1}$$

$$Q = E_{0x}^2 - E_{0y}^2 = I \cos 2\xi \tag{2}$$

$$U = 2E_{0x}E_{0y} \cos(\varphi_x - \varphi_y) = I \sin 2\xi \tag{3}$$

où ξ définit la direction de la polarisation. On voit que l'on a la relation suivante entre I, Q et U :

$$I^2 = Q^2 + U^2.$$

Pour un rayonnement constitué d'un mélange de radiation polarisée et de radiation non polarisée peut être décrit par deux ensembles de paramètres de Stokes :

$$\left\{ I - \left(Q^2 + U^2\right)^{1/2}, 0, 0 \right\}$$

$$\left\{ \left(Q^2 + U^2\right)^{1/2}, Q, U \right\}$$

I désignant ici l'intensité *totale*. L'intensité polarisée est :

$$I_P = \sqrt{Q^2 + U^2}.$$

Lorsque l'on dit que le CMB est poalrisé à 10% des fluctuations de température du CMB, on entend que $I_p \sim 10\%$ $(\delta T/T)$ c'est-à-dire de l'ordre du μK.

2.1.1 Mesure des paramètres de Stokes par des polarimètres

Une propriété essentielle des paramètres de Stokes est qu'*ils ne sont pas invariants par rotation.* Considérons par exmple un système de référence constitué par deux axes orthogonaux e_x et e_y (voir Figure 3). Dans ce système de référence, ils sont définis par les relations 1, 2 et 3. Si l'on tourne les

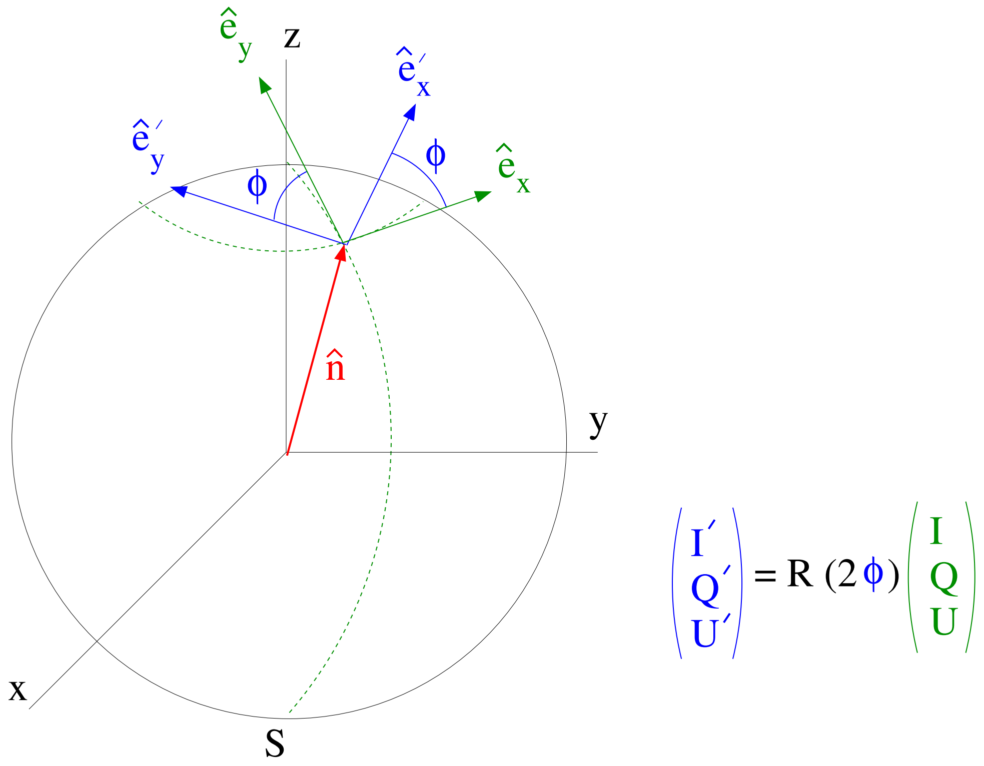

Figure 3:

axes du système de référence d'un angle ϕ, les paramètres de Stokes se tranforment selon :

$$I' = I \quad (4)$$
$$Q' = Q\ \cos 2\phi + U\ \sin 2\phi \quad (5)$$
$$U' = -Q\ \sin 2\phi + U\ \cos 2\phi. \quad (6)$$

On voit alors que I est une quantité scalaire — invariante par rotation — alors que Q et U sont des quantités "spinorielles" de rang 2. Ce terme technique signifiant que le doublet (Q, U) se tranforme selon :

$$(Q \pm iU)' = e^{\mp 2i\phi}(Q \pm iU). \quad (7)$$