

LE SOLEIL ET LES RAYONS COSMIQUES

par

J. DAUDIN

INTRODUCTION

Les preuves d'une intervention solaire dans le rayonnement cosmique se multiplient avec les années. Déjà le 6^e Rapport de cette commission en présentait de nombreux exemples [1]. Il est vrai, en retour, que des effets d'abord attribués au Soleil ont été reconnus depuis d'origine atmosphérique : le champ magnétique général ne paraît plus nécessaire pour interpréter les oscillations périodiques ni la coupure (cut off) des énergies au-dessous de 2 Bev (10^9 électrons volts). Mais il est probable que le Soleil émet continuellement des rayons cosmiques. Du point de vue théorique, on est de plus en plus tenté de le regarder comme leur source principale pour des raisons d'économie : répartis uniformément dans la seule Galaxie, ils représenteraient une énergie du même ordre que l'énergie cinétique désordonnée des étoiles [2], ce qui ne manquerait pas d'entraîner des conséquences imprévisibles pour toute l'Astrophysique. Il paraît donc sage d'établir d'abord les bases et de se faire une idée de la nature et de l'énergie du rayonnement primaire qui pénètre dans l'atmosphère et rapidement se multiplie et se transforme entièrement.

RAYONNEMENT PRIMAIRE

a) *Nature*. — Sont d'abord exclues toutes les particules instables connues ou à trouver (mésons, neutrons, etc...) à cause des longs

parcours des primaires. Les travaux faits en ballon [3] à environ 3/10 d'atmosphère ont permis d'étudier les effets de latitude (qui dépendent du nombre total des particules chargées) et les effets est-ouest (qui dépendent du signe de leur charge) et d'aboutir à une proportion de primaires négatifs égale à $-0,12 \pm 0,15$.

Les essais d'orientation au cours de vols plus élevés en ballon ou en V_2 (aerobees ou rockets) sont moins nets [4] probablement à cause de l'albedo élevé des rayons cosmiques à l'entrée de l'atmosphère [5] (Renvoi sous grand angle de particules secondaires qui retombent sur la Terre à de grandes distances et sous des angles interdits aux primaires).

La multiplication en cascades des rayons γ , électrons et positrons, fournit un moyen de les identifier. La chambre d'ionisation avait donné une limite supérieure de 6 puis 4 % [6] pour ces particules au sommet de l'atmosphère. La chambre de Wilson envoyée en ballon [7] à 0,02 atmosphère a réduit cette proportion (55° latitude Nord) à 0,2 % au plus parmi les primaires (1).

Les particules primaires ont un caractère pénétrant [8]. Leur ionisation est très voisine de l'unité [4]. Elles produisent des désintégrations nucléaires et des gerbes pénétrantes comme les protons.

La découverte d'une faible proportion de noyaux lourds [9] est venue confirmer l'hypothèse suivant laquelle les protons, noyaux les plus simples et les plus répandus, constituaient la majeure partie des primaires.

b) Noyaux lourds. — En 1947, les émulsions photographiques envoyées en ballon (94.000 pieds = 14 g/cm²), ont montré des traces fortement ionisantes émettant de nombreux électrons δ , se terminant toujours vers le bas, diminuant rapidement avec l'altitude, fortement collimatées autour de la verticale, que les progrès de la technique ont permis d'identifier comme des noyaux primaires dont les plus lourds sont ceux du fer ($Z = 26$) élément évidemment extra-atmosphérique (exceptionnellement sur 600 noyaux on a trouvé un $Z = 40$) [10]. La chambre de Wilson,

(1) L'énergie transportée par les photons primaires de 4 à 90 Mev serait inférieure au millième de l'énergie primaire totale (PERLOW, KISSINGER, *Phys. Rev.*, **81**, 552, 1951).

les compteurs, ont confirmé la présence de 20 à 30 % de particules α (He $^{++}$) [10, 11]. A 30° de latitude géomagnétique nord les flux sont les suivants, en particules/m² seconde-stéradian [12] :

	PRO- TONS	He $^{++}$	C, N, O	Na, Si, P	S, Ca	Fe
Numéro atomique Z	1	4	6 - 8	11 - 15	16 - 20	26 \pm 2
Flux des noyaux	356	90	3,5 \pm 0,6	0,65 \pm 0,2	0,25 \pm 0,8	0,1 \pm 0,03
Flux des nucléons libres ou en noyaux	356	360	49	18	7	3

Le filtrage par le champ terrestre et le parcours dans les émulsions permettent d'affirmer que ces noyaux sont entièrement dépouillés de leurs électrons.

En détail, les noyaux les plus fréquents seraient :

C, N (?), O, Mg, Si, Ne, Al.

On voit que l'abondance relative des noyaux est en rapport étroit avec leur abondance dans les corps célestes. Seul, l'hélium serait insuffisamment représenté : son ionisation plus difficile et moins complète le défavoriserait au début de l'accélération.

Ces noyaux lourds emportent une proportion considérable de l'énergie primaire et sont responsables des gerbes nucléaires les plus puissantes [13].

En principe, ces noyaux pourraient par impact sur des noyaux d'hydrogène interstellaire et en subissant des désintégrations de grande énergie, donner à eux seuls le flux de protons nécessaires. Mais ces collisions devraient engendrer aussi de nombreux Li, Be, et B primaires dont le nombre est inférieur à 10 % ; donc les noyaux lourds primaires n'ont subi que peu de collisions et leur source est proche [14].

c) *Effet de latitude.* — Le champ magnétique terrestre joue le rôle d'un spectrographe magnétique ou d'un filtre passe-haut, renvoyant dans l'espace les particules de faible énergie, n'admettant les autres que sous certains angles (cônes admis de Störmer), parfaitement transparent seulement pour les très fortes énergies.

La courbure d'une trajectoire dans un champ magnétique est maxima lorsque la vitesse est perpendiculaire à ce champ. Il s'en suit que le flux vertical des rayons cosmiques est filtré au maximum à l'équateur géomagnétique où le champ est horizontal. Lorsqu'on se déplace de l'équateur aux pôles magnétiques, des énergies de plus en plus faibles peuvent parvenir dans l'atmosphère. La courbe de latitude géomagnétique fournit donc le spectre d'énergie des particules primaires pourvu que l'on connaisse pour chaque latitude la valeur de l'énergie primaire minima dans une direction donnée.

La courbe de latitude au niveau de la mer (minimum de 10 % à l'équateur même) a fourni historiquement la première preuve de la charge des particules primaires. Mais la superposition du filtre atmosphérique au filtre géomagnétique éteint presque entièrement cet effet. Et par une ironie de la nature — on s'en est aperçu ces derniers temps — les effets atmosphériques variables avec la latitude géographique (niveau isobarique de production moyenne des mésons, hauteur de ce niveau, température à ce niveau [15, 16, 17])

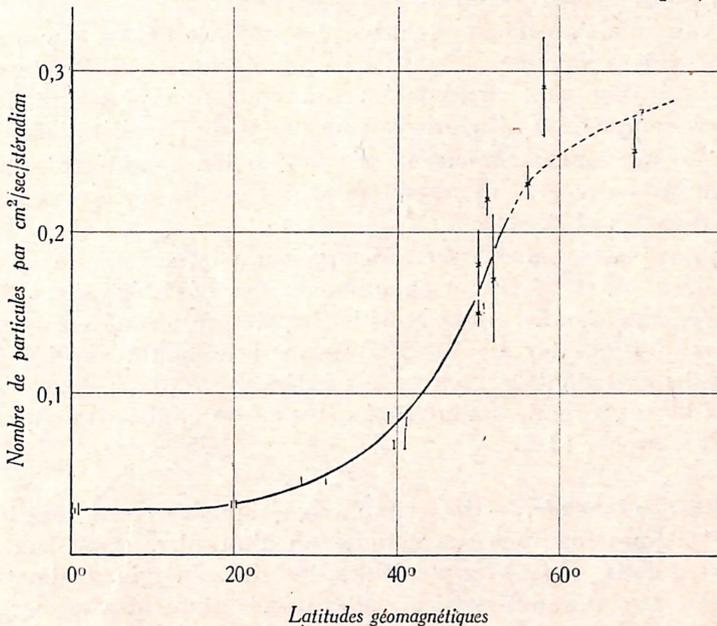


FIG. 1

Variation du rayonnement primaire avec la latitude géomagnétique.
Résultats rassemblés par Winckler, Slix et Dwight. *Phys. Rev.* 79, 656 (1950).

sont du même ordre de grandeur que l'effet géomagnétique, mais se compensent mutuellement pour le laisser apparaître avec une heureuse politesse [18]. Les expériences au sommet de l'atmosphère en ballon sonde ou en V_2 ont donc fourni les seuls résultats valables. La figure 1 montre la variation du flux vertical avec la latitude (le flux total est beaucoup plus faussé par l'albedo). Au delà de 45° environ, la courbe, au niveau de la mer, cesse de monter. C'est le célèbre coude attribué au champ magnétique solaire parce qu'il paraissait (à tort) indépendant de l'épaisseur du filtre-écran atmosphérique.

Bien que les mesures relativement anciennes en avion [19, 20] aient déjà fait douter de l'existence d'un coude net à 45° , c'est récemment que l'on a prouvé une augmentation de 52° à 69° . Cette unique observation à 69° [21] faite en ballon à 15 g/cm^2 de pression atmosphérique, paraît en outre suggérer un aplatissement progressif de la courbe vers 58° N .

Les neutrons engendrent la majeure partie des explosions nucléaires de faible énergie (LORD, *Phys. Rev.*, **81**, 901, 1951 et WHITE, *Phys. Rev.*, **82**, 204, 1951) et ces deux phénomènes présentent le plus grand effet de latitude (émulsions et chambre d'ionisation [22, 23, 24]). A 80.000 pieds, les protons augmentent d'un facteur 3 entre 28° et 54° nord et les neutrons d'un facteur 5,2. A 60.000 pieds, l'intensité des neutrons double encore entre 55° et 69° . Les primaires compris entre 1 et 8 Bev engendrent peu de mésons et beaucoup de neutrons. Ceux-ci demeurent jusque dans la basse atmosphère les meilleurs témoins du flux primaire de basse énergie. Ils engendrent sans doute les protons isolés sur lesquels Morand et ses collaborateurs ont observé de grands effets est-ouest et de latitude.

Les particules lourdes croissent d'un facteur 3,5 de 30° à 53° de latitude géomagnétique. La proportion des différents noyaux, mal connue, ne change pas beaucoup [12].

d) *Spectre d'énergie.* — Si la radiation primaire est isotrope et si l'on connaît le cône permis pour chaque énergie [25, 26], on peut passer de la courbe de latitude au spectre d'énergie, c'est-à-dire à la fonction $S(E) dE$ qui donne le nombre de primaires d'énergie comprise entre E et $E + dE$. La latitude n'est pas en rela-

tion avec l'énergie mais avec le moment rapporté à la charge $\frac{p c}{e}$, qui est exprimé en unité spéciale, le störmer, valant 59 Bev (59.10^9 électrons-volts). Il représente le moment d'une charge unité tournant le long de l'équateur géomagnétique dans le champ terrestre.

Sachant que les primaires ont une charge 1(H⁺) ou 2(He⁺⁺) on a, par une méthode qui comporte quelque incertitude aux latitudes intermédiaires (pénombre), le spectre d'énergie indiqué dans la figure 2.

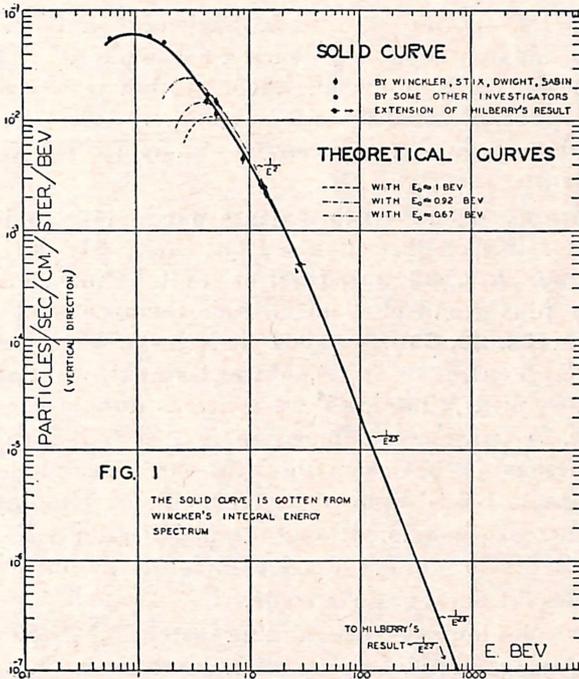


FIG. 2. - Comparaison de la formule théorique pour le spectre d'énergie du proton avec les résultats expérimentaux (d'après *Physical Review*)

En le représentant par la formule

$$S(E) dE = S_0 E^{-\gamma} dE$$

γ vaut 2 en moyenne entre 2 et 14 Bev [27, 28] et + 2,8 est sa valeur asymptotique pour les énergies très élevées (mésons très

pénétrants, gerbes de l'air). Entre 1,4 et 14 Bev/nucléon $\gamma \neq +1,65$ [29] pour les noyaux lourds, qui ont donc une répartition spectrale voisine de celle des protons. Au-dessous de 1,5 Bev, le spectre s'aplatit encore. Ce spectre d'énergie n'est pas identique à celui qui avait été obtenu en mesurant l'ionisation totale dans toute l'atmosphère aux différentes latitudes, car toute l'énergie primaire ne passe pas sous forme d'ionisation [28]. La moitié environ est perdue sous une forme non détectable (neutrinos) et en proportion croissante avec l'énergie primaire.

A l'équateur géomagnétique, le flux d'énergie sous forme de rayons cosmiques serait de 2,16 Bev/cm²/s et à 40° de 3,40 Bev/cm²/s [28].

On peut donc estimer à 4 Bev/cm²/sec le flux d'énergie primaire total avant filtrage par le champ terrestre et à 10⁻¹² erg/cm³ la densité d'énergie sous forme de rayons cosmiques au voisinage de la Terre (1 Bev = 10⁹ev = 1,6 · 10⁻³ erg).

FAITS EXPÉRIMENTAUX. — VARIATIONS IRRÉGULIÈRES

a) *Orages magnétiques.* — En dehors des orages, les rayons cosmiques subissent des fluctuations incessantes et irrégulières de faible amplitude (quelques % au plus). Forbusch [30] a montré il y a dix ans que ces fluctuations sont universelles et peuvent être rendues entièrement parallèles sur toute la Terre moyennant un facteur ρ de réduction variable avec la station.

TABLEAU I

STATION	LATITUDE	ALTITUDE	ρ
Cheltenham (U. S. A.)	50° N	72 m	1,11
Teoloyucan (Mexique)	30° N	2285 m	1,58
Huancayo (Pérou)	1° S	3350 m	1,00
Christchurch (Nouvelle-Zélande)	48° S	8 m	1,05
Hafelekar (Autriche)	48° N	2300 m	1,59

On voit que ces fluctuations universelles augmentent avec la latitude et surtout avec l'altitude. Elles affectent davantage les rayons de faible énergie. La corrélation entre ces fluctuations et

celles du champ terrestre par les jours magnétiquement calmes, si elle est probable pour certains, n'a pas été retrouvée expérimentalement [31].

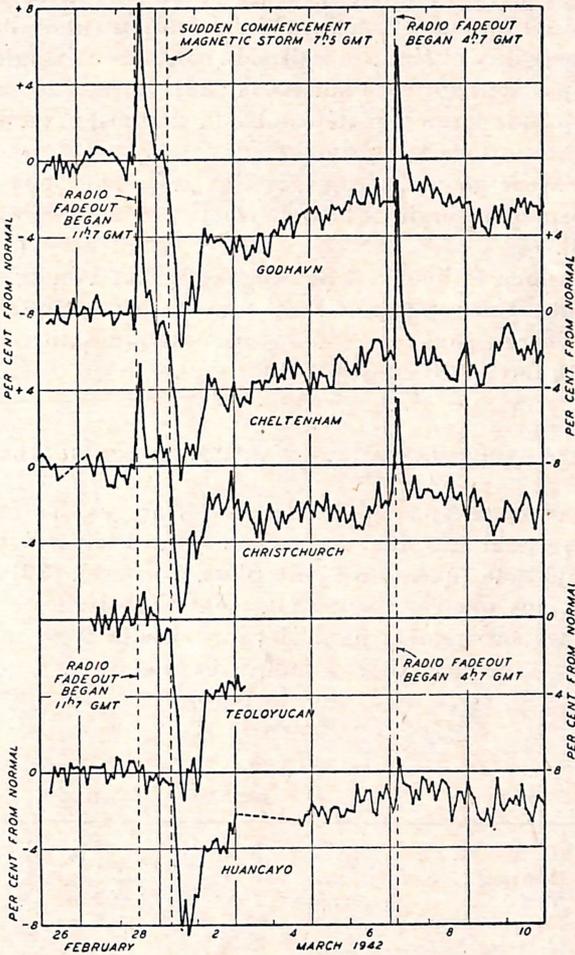


Fig. 3 -- Augmentation de l'intensité des rayons cosmiques les 28 février et 1^{er} mars 1942 (d'après *Physical Review*)

Le parallélisme entre les stations se retrouve lors des orages magnétiques. La figure 3 montre que la baisse enregistrée le

1^{er} mars 1942 a été simultanée et a revêtu la même amplitude relative de Godhavn à Christchurch, ce qui pourrait être l'effet d'une compensation entre la latitude et l'altitude de ces différentes stations. En effet, les baisses semblent plus marquées avec l'altitude, puisque le 26 juillet 1946 la baisse était de 18 % dans la stratosphère et 6 % au Mont Wilson [32]. Deux autres traits communs de ces baisses de rayons cosmiques sont la brutalité de la chute, en général associée au commencement soudain de l'orage et la lenteur de la restitution, qui prend environ une semaine pour être complète. Toutes les autres caractéristiques sont variables. Il faut remarquer que les effets des orages magnétiques sont fréquemment superposés à des effets atmosphériques dont il est difficile de les débrouiller [33]. Le 1^{er} mars 1941, la baisse a précédé l'orage magnétique [34, 35]. Le 26 juillet 1946, le 12 mai 1949, la baisse a commencé au milieu de l'orage. Les grands orages du 21 août 1937 et du 4 juillet 1941 sont restés sans effet. Les 5 et 6 février 1946 une baisse de 6 % a été enregistrée à Londres sans orage [1]. Le 16 février et le 2 mars 1947, les variations relatives des rayons cosmiques et de H (composante horizontale du champ terrestre) auraient été de même signe et de signe opposé [36].

En moyenne, le rapport des variations relatives $\frac{\Delta I}{I} / \frac{\Delta H}{H}$ est de 15 :

la variation des rayons cosmiques est supérieure à celle du champ terrestre d'un ordre de grandeur. L'étude de 14 orages suggère que les orages magnétiques « polaires » sont plus efficaces que ceux du type « équatorial » [37].

b) *Taches solaires.* — Les auteurs ne sont pas entièrement d'accord sur cette corrélation. Cependant il semble que le passage de taches importantes au méridien soit accompagné en général d'une baisse qui atteint son minimum quelques jours après (0,4 % environ) [31, 58]. Exceptionnellement, le 27 mars 1945, une baisse brusque de 8 % sans orage magnétique s'est produite sans autre fait notable que le passage au méridien d'une tache moyenne [38]. Le moment magnétique des taches paraît mieux en opposition de phase avec l'intensité des rayons cosmiques que leur surface [39]. Une corrélation est également possible avec la vitesse de variation de l'activité magnétique des taches, mais son interprétation est

obscur. Enfin il existe une corrélation de $-0,48$ avec l'indice des facules.

c) *Eruptions chromosphériques.* — On possède maintenant 5 exemples d'une augmentation brutale des rayons cosmiques lors d'une éruption chromosphérique. La figure 3 indique le déroulement des phénomènes dans cinq stations différentes le 28 février 1942 et le 7 mars 1942. L'accroissement a suivi l'éruption et le fadeout radio en quelques dizaines de minutes. Il s'est produit également sur la face obscure de la Terre.

L'éruption du 25 Juillet 1946 a été signalée dans le précédent rapport [41, 42]. A Manchester [43], l'augmentation fut de l'ordre de 17 % sur une 1/2 heure avec maximum entre 18 h et 18 h 30 m; au Mont Wilson, 18% [32]; maximum atteint 2 h 20 m après le début de l'éruption et du fadeout. Leur croissance comme leur décroissance furent exponentielles.

Le 10 mai 1949, une forte éruption ne produisit qu'une augmentation de 1 % sur la composante molle à Amsterdam, rien sur la composante dure; aucun effet à Boulder Dam (1.800 mètres, 49° N) [44], mais 50 % d'augmentation 20 heures après à 95.000 pieds sur les désintégrations nucléaires[45] (1).

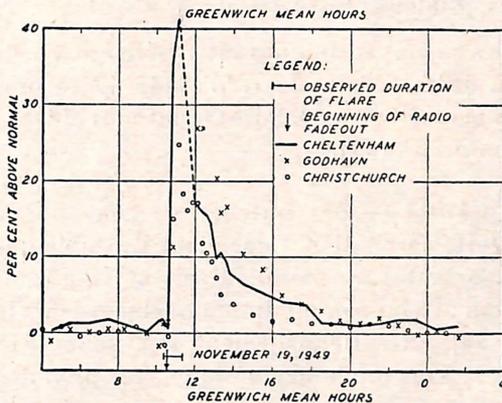


FIG. 4 — Comparaison des augmentations du 19 novembre 1949 à différentes stations (d'après *Physical Reviews*)

(1) Accroissement plus faible, de 15 %, sur le rayonnement global à 100.000 pieds, nul au-dessous de 55.000 pieds. L'agitation radiosolaire était encore forte à ce moment (POMERANTZ, *Phys. Rev.*, **81**, 731, 1951).

Le 19 novembre 1949 [46,47], une éruption intense se produit de 10 h 30 m à 12 h 09 m à 2° S et 70° W solaires. Le rayonnement radio du Soleil subit à 10 h 30 m un accroissement qui culmine à 10 h 34 m, s'efface à 11 heures et est suivi à 11 h 37 m d'un deuxième maximum et d'une agitation beaucoup plus faible après 12 heures (*Fig. 4*). La croissance des rayons cosmiques, simultanée avec l'extinction radio, a commencé 10 minutes après l'éruption. (Voir tableau II).

Les traits caractéristiques de cette éruption « cosmique » signalée en premier lieu par Dauvillier [48] sont :

a) Comme celle du 7 mars 1942, elle n'a été suivie ni d'une baisse des rayons cosmiques, ni peut-être d'un orage magnétique associé.

b) Le début est très raide ; à Ottawa [49], le maximum est atteint en 6 minutes.

c) La décroissance, sauf accidents secondaires, est exponentielle.

d) L'augmentation est presque nulle, si réelle, à l'équateur, suggérant une faible énergie pour les primaires ou plus précisément un spectre d'énergie très décroissant.

e) Le maximum est atteint au bout de 6 minutes à une 1/2 heure environ, mais il apparaît qu'il n'a pas partout la même amplitude à la même latitude et qu'il se produit à des heures variables. Pour toute une série de stations, l'heure du maximum se situe un peu avant 11 heures ; pour les autres vers midi. On remarque que ces deux maxima suivent d'une demi-heure les deux maxima des émissions radio du Soleil. Un crochet paraît se retrouver vers 14 heures sur plusieurs tracés. Peut-être est-il associé aux parasites radio de 12 h 10 m. On peut se demander s'il n'y a pas des pinceaux variés atteignant la Terre en des régions distinctes. En particulier, à cause des différences d'orientation par rapport aux cônes de Störmer et au champ terrestre aux différents points d'observation.

f) La variation croît très vite en altitude [50] ; le flux émis par le Soleil est environ douze fois supérieur à Climax à ce qu'il est au niveau de la mer. Ce facteur est douteux et probablement trop petit à cause de la différence notable de latitude magnétique entre les deux stations de Cheltenham et de Climax qui sont utilisées pour étudier la variation du flux en altitude. La radiation

TABLEAU II
ERUPTION DU 19 NOVEMBRE 1949

STATION	LATITUDE géo- magnétique	ALTITUDE	INSTRUMENT	BLINDAGE	DÉBUT	MAX.	HEURE du maximum	FLUX SOLAIRE supplémentaire
Resolute [49] ..	83° N	18 m	Compteurs (isolés et en coïncidence) ..	10 cm. Pb	11 h	13 %	11 h 45 m	?
Godhavn [50] .	80 N	9	Chambre d'ionisation	12 cm. Pb	10 h 45 m	27 %	12 h?	65 min. de flux normal
Ottawa [49] ...	57° N	110	Compteurs (isolés) ...	non blindés	10 h 48 m	65 %	10 h 54 m	45 min. de flux normal
			Compteurs (isolés) ..	10 cm. Pb	10 h 48 m	55 %		
			Télescope compteurs.	45 cm. Pb		75 %		
Manchester [51]	60° N	0?	Télescope compteurs à 45° nord et sud ..			12 %	entre 11 h et 12 h	
			Compteurs à neutrons		10 h 50 m	550 %	11 h 45 m	20 heures de flux
Amsterdam [54]	59° N	0	Ch. d'ionisation	non blindée		1 %?		négligeable
			Ch. d'ionisation ...	12 cm. Fe	10 h 30 m	7 %	12 h	13 min. de flux
			Ch. d'ionisation	110 cm. Fe		néant		nul

TABLEAU II (suite)
ERUPTION DU 19 NOVEMBRE 1949

STATION	LATITUDE géo- magnétique	ALTITUDE	INSTRUMENT	BLINDAGE	DÉBUT	MAX.	HEURE du maximum	FLUX SOLAIRE supplémentaire
Cheltenham [50]	50° N	72 m	Ch. d'ionisation ...	12 cm. Pb	10 h 45 m	43 %	11 h 05 m	60 min. de flux
Bagnères [48] ..	48° N	550 m	Ch. d'ionisation ...	nue	11 h 30 m	3,6 %	12 h	4 min. de flux
Climax [50] ...	48° N	3.500 m	Ch. d'ionisation ...	12 cm. Pb	10 h 45 m	180 %	10 h 55 m	4 heures de flux
Tokyo [52]	25°,4 N	0 m?	Ch. d'ionisation ...	10 cm Pb+30 ciment		4 %		
			Télescope compteurs (ouverture $\pm 86^\circ$).	grande surface	10 h 48 m	4 %	11 h 10 m	3 min. de flux
Nagoya [53] ...			Télescope compteurs.	12° de demi-angle		15 %		
			Télescope compteurs.	40° de demi-angle		6 %		
Huancayo [50] .	1° S	3.350 m	Ch. d'ionisation ...	12 cm. Pb			? en tout cas très faible	
Christchurch[50]	49° S	8 m	Ch. d'ionisation ...	12 cm. Pb	10 h 45 m	25 %	11 h	34 min. de flux

Remarques : L'amplitude du maximum comme les heures sont rendues incertaines par le mode d'enregistrement. Les intervalles entre 2 lectures consécutives sont variables d'un observateur à l'autre de deux minutes à une heure, durée assez considérable par rapport à celle du phénomène. En outre, avec des compteurs, on peut choisir des faisceaux plus ou moins ouverts ce qui change l'énergie moyenne des particules enregistrées et donc l'effet de l'éruption.

productrice devrait donc être absorbée avec un libre parcours moyen de 137 g/cm^2 . Ceci suggère qu'il s'agit d'une composante nucléonique d'énergie faible, qui serait également responsable de l'accroissement énorme du flux des neutrons à Manchester [51] et n'atteindrait pratiquement pas l'équateur.

En dehors d'événements aussi remarquables, certains observateurs ont constaté en 1947 [54] de nombreuses augmentations moindres des rayons cosmiques après des éruptions chromosphériques (toujours accompagnées comme le 19 novembre 1949 d'un petit crochet de la composante horizontale du champ terrestre). Le délai est de 1 à 2 heures après l'éruption. D'autre part, la corrélation entre l'émission radio et le rayonnement cosmique de faible énergie étudié dans la stratosphère, a également été mise en évidence pendant une période d'agitation solaire [55]. Les neutrons paraissent particulièrement sensibles à ces fluctuations même dans l'atmosphère moyenne ou au niveau de la mer.

FAITS EXPÉRIMENTAUX. — VARIATIONS PÉRIODIQUES

Depuis 1933, des enregistrements ont été entrepris pour étudier les périodicités des rayons cosmiques au niveau du sol. Elles ont toutes de très faibles amplitudes. Un certain nombre sont d'origine atmosphérique (comme bon nombre de variations irrégulières) et le départ n'est pas toujours aisé à faire. La période de 27 jours est évidemment solaire.

a) *Période de 27 jours.* — Son amplitude est de 0,15 à 0,4 %, suivant les observateurs et les modes de dépouillement.

La corrélation prévue entre les rayons cosmiques et les taches inspira la recherche d'une variation récurrente et non périodique. Suivant la méthode de Chree [56] on sélectionne les 5 jours d'intensité maxima dans le mois et on les prend pour origine des temps. On note les intensités des jours précédents et suivants. On additionne toutes les séries ainsi obtenues. S'il y a récurrence, des pics secondaires apparaissent à intervalles réguliers. Pour le magnétisme, les pics secondaires vont en s'amortissant. Au contraire, pour le rayonnement cosmique, il n'y a pas d'amortissement et les tracés ont une allure sinusoidale qui paraît indiquer une onde vraie.

TABLEAU III

STATION	DATES	METHODE	AMPLITUDE	PHASE
Hafelekar [40]	1932-33-34	Bessel	0,3 %	68° le 23-9-32
Cheltenham [40]			0,2 %	
Teoloyucan [40]			0,2 %	
Huancayo [40]			0,2 %	
Christchurch [40]			0,2 %	
Abisko (66,5°) [57]	9-32 au 7-33	Bessel	0,36 %	
Teoloyucan [56]	4-37 au 10-38	Chree	0,3 %	
Boulder Dam [39]		Chree	0,2 %	
Cheltenham [59]	1938-48	Bessel	0,1 %	
Hafelekar [58]			1936-37	
Mount Stromlo [31]	9-35 au 8-40	Diagramme des phases	0,5 %	30°
		Bessel	0,12 % ± 0,05	80°
		Chree	0,2 %	variable
			0,12 %	

Les dernières observations au moyen du diagramme des phases [58, 31] suggèrent une vraie périodicité mais souvent brusquement rompue. Les rotations solaires 1416, 1418, donnent une phase de 200°. Dans l'année 1937, l'activité solaire efface la périodicité. La faible valeur trouvée de 1938 à 1948 peut provenir de la trop longue durée d'observation [59]. La méthode de Chree appliquée aux petits bursts (petites désintégrations nucléaires observées à la chambre d'ionisation blindée par 12,5 cm de Pb) paraît indiquer des fluctuations récurrentes de 27 jours (qui peuvent être une onde vraie sans amortissement) très élevées (3 à 4 %) [60].

En résumé il paraît s'agir d'une onde quasi-périodique dont la phase passe par des périodes de stabilité, par des sauts brusques et même par des époques de dérive, qui altèrent la valeur de la période. L'activité solaire influe sur la période et sur l'amplitude.

Puisque le champ solaire ne fournit pas d'explications satisfaisantes, il serait très séduisant [61] d'attribuer à cette onde une origine atmosphérique en la rapprochant de la corrélation négative avec l'indice des facules (flocculi du Ca) (— 0,48). Un tiers des mésons qui parviennent aux appareils au sol sont créés entre 25 et 50 km de haut c'est-à-dire dans la moitié supérieure de la couche de l'ozone. Les variations de 27 jours de l'émission ultra-

violette du Soleil sont en rapport avec les facules ; elles entraîneraient une onde de 27 jours dans la température et donc dans la densité de la couche de l'ozone. Une variation de 20° à 40 km de haut déplacerait suffisamment le niveau de production moyenne des mésons d'énergie assez élevée.

Comme l'effet de température découvert par Blackett, analysé par Duperier, l'onde des rayons cosmiques de 27 jours résulterait du trajet plus long imposé à ces particules avant d'arriver au sol et de la probabilité plus élevée d'une désintégration spontanée. Cette onde ne devrait affecter ni les mésons de faible énergie ni les particules de très grande énergie créés plus bas ou plus haut (à moins que n'intervienne la désintégration spontanée du méson π intermédiaire entre les gerbes nucléaires et le méson μ pénétrant).

Le retard de quelques jours des rayons cosmiques sur l'activité ultraviolette du Soleil s'expliquerait par l'inertie thermique de l'atmosphère. Cette interprétation n'est pas forcément contradictoire avec l'observation de Hogg : le passage des taches n'aurait d'effet que dans le cas où il est suivi de perturbations géomagnétiques [31].

b) Onde diurne. — Une onde diurne avec maximum dans l'après-midi est connue depuis 1938 [62]. Son amplitude (0,3 % environ) et sa phase paraissent constantes entre 40° S et 50° N. Ce seul fait rend improbable l'action variable du champ solaire (sans effet à l'équateur).

Duperier [63] a pu préciser ces résultats. Il obtient une amplitude 0,22 % en novembre-décembre et 0,45 % en juillet-août et un maximum à 15 heures en mars et 20 heures en juillet-août-septembre. En 1933-1935 des résultats semblables avaient été obtenus en Afrique du Sud. Cette variation peut se décomposer en un vecteur d'amplitude variable et de phase constante et un vecteur d'amplitude constante et de phase variable en un an. Ce deuxième vecteur d'amplitude 0,21 % avait été considéré comme représentant une variation sidérale [63, 64]. Mais des mesures récentes en Australie ont montré qu'il était en opposition de phase dans l'hémisphère sud [65]. Il est donc également solaire et pourrait dépendre de l'orientation de la Terre par rapport au Soleil.

Des expériences capitales ont été faites à Stockholm [66] en 1942 puis reprises en 1947-1948-1949 à Stockholm et à Manchester [67]. On enregistrait simultanément le rayonnement cosmique avec des télescopes identiques inclinés l'un à 45° vers le nord et l'autre à 45° vers le sud. Le télescope nord vise dans la direction de l'axe du monde. Le télescope sud dans une direction variable. La différence des deux enregistrements est exempte de tout effet atmosphérique. La composante nord a la même amplitude (0,2 %) et la même phase moyenne fixe (13 h 15 m) aux deux localités. La composante sud a une phase variable. La différence nord-sud, maxima à 9 heures du matin, minima à 17 h 30 m, a une amplitude 0,12 % à Manchester et 0,11 % à Stockholm.

Il y a une variation saisonnière. Les jours de grande variation diurne ont tendance à se suivre. Pendant certaines périodes, une variation diurne différente peut s'établir (par exemple du 24 au 27 décembre 1947).

Cet accord remarquable prouve définitivement que la variation diurne n'est pas uniquement atmosphérique. Cela est confirmé par l'observation suivante [31, 53, 61] : le maximum diurne se produit plus tôt les jours magnétiquement perturbés (de 45 minutes à 3 heures). Cette variation de phase est analogue à celle qui se produit pour la variation diurne du magnétisme terrestre pendant les jours agités.

c) *Onde semi-diurne.* — Mais la composante diurne en partie atmosphérique est accompagnée d'une onde semi-diurne. Non décomposée, l'onde globale grossièrement constante sur toute la Terre présente une opposition de phase frappante avec la variation journalière de la pression barométrique aussi bien à Londres [38] qu'à Java [62]. L'amplitude variable de la composante (12 heures) est de l'ordre de 0,2 %. Il se pourrait que les mésons de grande énergie varient en sens opposé [69]. Cette onde pose des problèmes délicats de dynamique atmosphérique [70] (Pekeris) afin de connaître les amplitudes des marées aux altitudes où naissent les mésons radioactifs.

Les télescopes nord-sud de Dolbear et Elliott enregistrent une différence (0,1 %) également sur les ondes semi-diurnes, ce qui semble prouver que la composante astrophysique diurne n'est pas sinusoidale.

d) *Variation diurne des primaires.* — Les observations brèves et discontinues au sommet de l'atmosphère se prêtent moins bien à ces études, mais ont livré deux résultats capitaux :

1° à 30.000 pieds [72] : la différence jour-nuit est $0,12 \pm 0,83\%$ pour le rayonnement global ;

à 50.000 pieds [73] : l'effet diurne est inférieur à 1 % pour la radiation ionisante et à 3,5 % pour les γ et les neutrons [60] ;

à 70.000 pieds (52° et 69° N) [74, 75] : il est inférieur à 3 %.

2° En revanche [76, 77, 78], les noyaux lourds du rayonnement cosmique primaire ($Z > 10$) sont bien plus nombreux le jour. Le rapport jour/nuit est $2,55 \pm 0,26\%$, indépendant en gros de la valeur de Z , tandis que les désintégrations nucléaires ne montrent pas de variation journalière (1). L'asymétrie azimutale des noyaux lourds serait considérable. Cette variation est telle qu'elle pourrait rendre compte de la variation diurne astrophysique au niveau de la mer et des étranges effets d'orientation. En effet, le flux connu des noyaux lourds engendrerait environ 0,1 % de la radiation au niveau du sol, ce qui est l'ordre de grandeur de l'onde diurne. Ainsi s'expliquerait également que la variation diurne, contrairement à presque tous les effets connus, soit si peu sensible à l'altitude.

Nous allons maintenant discuter les conséquences de ces découvertes au sujet du champ dipolaire du Soleil.

INTERPRÉTATIONS

Champ dipolaire du Soleil. — Le coude de la courbe en latitude au niveau de la mer se trouve vers 40-50°. Les premières observations montraient qu'il ne se déplaçait pas en altitude (ce qui n'est pas exact, puisqu'au sommet de l'atmosphère il se trouve vers 58°). On ne pouvait donc l'attribuer au filtrage par l'atmosphère. Puisque le filtre du champ terrestre devenait plus transparent au nord et que le rayonnement cessait d'augmenter, on a songé au champ dipolaire du Soleil [79]. Il se trouve que l'énergie minima d'une particule arrivant des espaces interstellaires

(1) Selon NEY et THON (*Phys. Rev.*, **81**, 1069, 1951), le flux de α (He^{++}) pourrait subir une variation diurne parallèle et de plus faible amplitude.

et capable d'atteindre la Terre est 2 ou $3 \cdot 10^9$, si l'on admet le champ de Hale et un moment solaire de 10^{34} gauss/cm [80]. Or $2-3 \cdot 10^9$ e.v. est le « cut off » magnétique terrestre vers 55° . Ainsi, au nord de cette latitude, le champ solaire relayait le champ terrestre comme filtre.

Si l'on suppose en outre que l'axe magnétique du Soleil ne coïncide pas avec son axe géographique [81], on a les éléments d'une période de 27 jours. De plus, lorsque la verticale d'un lieu, au cours de la rotation de la Terre (au nord de 50°), passe dans le cône solaire permis, il doit y avoir une augmentation des rayons cosmiques, au moins au sommet de l'atmosphère [82]. L'augmentation doit débiter brutalement vers 6 heures du matin et se résorber très lentement dans la journée. D'où un effet diurne. Cet effet doit, il est vrai, être fortement atténué par la diffusion des particules dans le champ terrestre qui les renvoie sur des trajectoires solaires périodiques et remplit ainsi les cônes d'ombre solaires à 90 % [83, 84].

Par exemple, compte tenu de cette atténuation, à 6 heures du matin et à 52° , l'intensité primaire devrait être plus élevée de 7 % qu'à 69° [75].

Moyennant une disposition convenable de l'axe héliomagnétique, il ressortirait également des variations saisonnières annuelles.

Mais ce magnifique faisceau de preuves convergentes autour du champ solaire s'est dispersé aux quatre vents.

a) Les orages magnétiques terrestres font également sentir leurs effets et avec la même intensité [85] vers 80° de latitude géomagnétique nord (Godhavn) [86], là où le champ solaire devrait seul filtrer;

b) le spectre d'énergie des primaires n'est pas coupé brusquement par le champ solaire mais s'aplatit progressivement jusqu'à 1,5 Bev [87]; ne continuerait-il pas à s'aplatir au-dessous ? Le coude de la courbe de latitude serait dû à l'absence réelle ou à la rareté de primaires d'énergie inférieure à 1,5 Bev ;

c) en fait, le plateau n'est pas horizontal au nord de 50° et l'augmentation paraît se poursuivre du moins jusqu'à 60° de latitude géomagnétique, lorsqu'on prend la précaution d'observer les primaires avant leur filtration par l'écran atmosphérique. Ajoutons que, d'après certaines observations à $3/10$ d'atmosphère, le coude de la courbe de latitude s'élèverait progressivement pour

les phénomènes nucléaires au cours des orages magnétiques [88, 89]. De tels déplacements spéciaux à une composante seraient décisifs contre le champ solaire ;

d) à l'équateur et jusqu'à 40°, le champ solaire est de toute façon sans effet, c'est le champ terrestre qui filtre : or on observe les ondes diurne et de 27 jours [90] ;

e) l'onde diurne est très inférieure à celle prévue non seulement au sommet de l'atmosphère, mais à 30.000 pieds, où elle devrait être de 2 % avec un moment de 10^{34} gauss/cm³ (calculs indépendants des précédents) [72].

De tous ces arguments, le premier, le plus ancien, qui porte sur des époques d'activité solaire très différente, mais est insuffisamment connu, me paraît le plus grave.

En fait, les rayons cosmiques ne doivent pas être actuellement influencés par un champ dipolaire supérieur au 1/20 de la valeur de Hale et l'argument a) semble exclure qu'il fût supérieur à cette valeur il y a neuf ans.

Interprétation des orages magnétiques. — La découverte des accroissements brusques a introduit quelque confusion dans ce problème. Alfvén a proposé [91, 92, 93] une interprétation simultanée des accroissements et de la baisse. Les jets de matière ionisée se propageant dans le champ solaire doivent être polarisés électriquement par rapport à un observateur au repos. Lorsque la Terre pénètre dans le jet du côté négatif, son potentiel devient plus négatif et des rayons cosmiques positifs en grand nombre peuvent l'atteindre. Lorsqu'elle sort du côté positif, l'élévation de son potentiel arrête un plus grand nombre de rayons. Cette explication se heurte à deux objections préliminaires :

a) Les variations de potentiel de l'ordre de 10^9 volts devraient avoir un effet beaucoup plus faible à l'équateur sur un rayonnement de grande énergie (10^{10}) qu'aux latitudes élevées ($E = 2 \cdot 10^9$ par exemple) ; or les baisses sont du même ordre sur toute la Terre ;

b) les augmentations se produisent avec un faible retard sur les éruptions, tandis que les baisses se produisent avec le même retard que les orages [94].

Les baisses des rayons cosmiques associées aux orages magnétiques constituent certainement un phénomène distinct. Il n'y a pas d'ailleurs relation de cause à effet entre orages et baisse des

rayons cosmiques, qui ne coïncident ni exactement ni régulièrement, mais probablement une cause commune. D'autre part, la restitution des rayons toujours lente, de l'ordre de 3 à 4 jours et d'allure exponentielle, paraît bien typique d'un retour libre à un état électromagnétique stable, retour caractérisé par une constante de temps assez bien définie comme l'amortissement débute en général au milieu de l'orage, mais se maintient après sa fin [31]. Chapman a suggéré que des corpuscules solaires (ou des courants lancés par le champ électrique du jet solaire), tournaient dans le plan équatorial à une distance de sept rayons terrestres environ. Ce courant annulaire exerce un champ additionnel qui s'ajoute à l'extérieur de l'anneau au champ terrestre, s'en retranche à l'intérieur et filtre ainsi plus efficacement les rayons cosmiques tout en diminuant H. Des différences dans l'intensité, les dimensions, la disposition des jets corpusculaires [95], peut-être aussi les courants ionosphériques induits, pourraient expliquer la grande variété des circonstances d'un orage à l'autre et la faiblesse des effets géomagnétiques par rapport aux effets cosmiques. La question ne paraît pas avoir évolué ces dernières années.

A la suite des expériences [88, 89], on doit considérer comme possible que les orages magnétiques déforment le spectre d'énergie primaire en augmentant la fréquence des faibles énergies au détriment des énergies moyennes.

Eruptions solaires cosmiques. — La plupart des auteurs [96] admettent l'émission réelle de rayons cosmiques par le Soleil, dont l'énergie maxima le 19 novembre 1949 devait approcher de 10 Bev et dont l'intensité peut atteindre une particule /cm²-sec.

Pour abrégé, nous laisserons de côté la théorie de Swann [97] et celle de Menzel, Salisbury [98] et MacMillan [99]. La première prévoit l'accélération de particules par l'effet « bêtatron » de taches solaires de champ variable et non par les éruptions elles-mêmes ; la deuxième, par l'action d'ondes électromagnétiques solaires de quelques cycles par seconde. Toutes deux se heurtent à la grande conductivité de l'atmosphère solaire. Leurs traits les plus positifs paraissent repris dans le tableau proposé par Kiepenheuer. Celui-ci a suggéré [100] une interprétation qui n'est pas très différente mais dispense d'imaginer des ondes électro-

magnétiques dans un milieu conducteur. Comme les accélérateurs terrestres, le Soleil ne peut évidemment accélérer qu'un très petit nombre de particules en milieu presque vide. Un jet corpusculaire ⁽¹⁾ émis par une éruption en un point où le champ de la tache ou des taches bipolaires est presque tangentiel, transporte au cours de son trajet à travers la couronne ce champ magnétique « gelé », c'est-à-dire un système de courants le long des génératrices du jet. En pénétrant dans l'espace interplanétaire au bout de quelques dizaines de minutes, il introduit une puissante perturbation magnétique qui suscite dans une couche mince (effet de peau) de la matière interplanétaire des forces électromotrices. Si l'énergie magnétique est égale à l'énergie cinétique, le champ gelé est de 1 gauss pour $v = 10^8$ cm/sec et $\rho = 10^5$ ions/cm³. La f. em. induite sera de l'ordre de $10^{-8} \times$ longueur ($4 \cdot 10^{11}$ cm) \times diamètre (10^{10} cm). $\frac{dH}{dt} = 10^{10}$ à 10^{11} volts. Le nombre des ions

interplanétaires accélérés sera si faible qu'ils pourront acquérir des énergies de cet ordre le long des génératrices du jet, soit vers la Terre, soit vers le Soleil. D'après ces données, il est facile de comparer l'énergie cinétique totale du jet à l'énergie sous forme de rayons cosmiques. Elle est 10^6 fois plus grande. Le rendement de l'accélérateur est déplorable, donc raisonnable.

D'après ce processus, des noyaux présents au bord de la couronne et probablement quelques électrons pourraient être accélérés. Le Soleil doit en outre émettre un flux continu de noyaux lourds « cosmiques » (variation diurne). Par quel mécanisme? quel rapport ce flux a-t-il avec les éruptions cosmiques? Questions encore pendantes. Jusqu'ici, on n'a décelé aucune augmentation des noyaux lourds primaires lors des « flares » du 10 mai 1949 et du 2 août 1950, alors que les désintégrations nucléaires de faible énergie étaient plus fréquentes ([46] et NAUGLE et ANDERSON, *Phys. Rev.*, **81**, 314, 1951).

Energie des rayons cosmiques. Quelques ordres de grandeur [102].
— Admettons une densité d'énergie de 10^{-12} ergs par cm³ sous forme de rayons cosmiques.

(1) L'émission d'une perturbation matérielle paraît confirmée par le mouvement des sources radio lors des « flares » (ELLISON, *Nature*, **167**, 941, 1951).

1° Si ceux-ci nous parviennent des autres corps célestes, leur énergie étant équivalente à celle transportée par la lumière des étoiles, le Soleil est un accélérateur extrêmement, anormalement faible, puisque son émission cosmique est sans rapport avec son émission lumineuse (1).

2° Si les rayons cosmiques diffusent dans les espaces intergalactiques avec la même densité, leur énergie totale vaut la 1/10.000^e partie de la masse de l'Univers ; aucune autre énergie actuelle ne peut leur être comparée et ne peut leur servir de source. Leur origine doit remonter au début de l'extension de l'Univers.

3° Si des champs magnétiques faibles confinent les rayons cosmiques dans la Galaxie, ceux-ci disparaîtraient par collision avec les noyaux d'H interstellaire avec un libre parcours moyen de 100 g/cm², donc au bout de 7.10⁷ années à raison d'un atome d'H par cm³. Les sources galactiques de rayons cosmiques doivent donc les renouveler dans le même laps de temps. La 1/10.000 partie de l'énergie produite par les étoiles y suffirait. C'est encore une fraction élevée, très supérieure au rendement de l'accélérateur solaire, fraction accrue d'un facteur 10 à 100 en l'absence de collision [14].

Pour que les champs magnétiques de la Galaxie (étoiles et nuages) puissent disperser suffisamment les rayons cosmiques et les empêcher de s'évader, il est nécessaire [103] que leur densité d'énergie soit supérieure à la densité d'énergie des rayons cosmiques

$$\text{soit : } \frac{H^2}{8\pi} = 10^{-12} \text{ ergs}$$

$$H > 5 \cdot 10^6 \text{ gauss}$$

Le libre parcours moyen entre deux dispersions magnétiques doit être assez court pour que le déplacement moyen d'une particule en 70 milliards d'années soit petit par rapport à l'épaisseur de la Galaxie. Ce libre parcours moyen devrait être inférieur à l'année et le nombre de diffusions supérieur à 10⁵ (2).

4° Si les rayons cosmiques sont enfermés au voisinage du Soleil dans un rayon de 1/3 d'année-lumière ($\rho = 3 \cdot 10^{17}$ cm), il suffit,

(1) Unsöld (*Phys. Rev.*, **82**, 857, 1951) note qu'il est également très faible émetteur pour la raie H α et pour les ondes radio.

(2) Peu probable selon Unsöld.

pour entretenir cette densité « cosmique » dans ce « petit » volume, d'une énergie égale à 10^{17} fois l'énergie solaire rayonnée. Une particule de 10^{14} e.v. aurait un rayon de courbure ρ de cette dimension dans un champ « souricière » de 10^6 gauss d'après la formule :

$$\text{Moment (e.v.)} = 300 \cdot H \cdot \rho$$

Origine solaire ou galactique? — Nous laisserons de côté la théorie [104] qui voit dans l'annihilation des atomes la source des rayons cosmiques, car elle fait appel à un processus improbable, sans donner les énergies nécessaires. L'accélération de particules par la pression de radiation des supernovae est aussi insuffisante [105, 106]. L'émission d'atomes neutres par cavitation est peu probable [107].

Dans la Galaxie, 3 sources possibles :

- les étoiles magnétiques variables [108, 109, 110] très efficaces, mais peu nombreuses ;
- les étoiles d'un type avancé, très nombreuses et peut-être plus « éruptives » que le Soleil [111] ;
- les nuages ionisés porteurs de champs magnétiques (théorie de Fermi) [112].

De toute façon le Soleil émet des rayons cosmiques. Sa contribution est très mal connue. D'après l'énergie émise dans les éruptions, on l'a évaluée à moins de 1 ‰ du total des rayons cosmiques [113]. En établissant une proportionnalité entre l'émission radio dans l'été 1947 et les fluctuations des rayons cosmiques dans la stratosphère, on a trouvé 15 % [55]. L'émission permanente de noyaux lourds ($Z > 10$) pourrait représenter 3 %.

Cette émission directe est certainement une faible fraction, parce que ses très grandes variations se répercutent très peu sur l'ensemble du rayonnement et que son spectre d'énergie ou sa composition (noyaux lourds) sont très différents. L'origine de l'ensemble des rayons cosmiques reste donc inconnue.

Les étoiles telles que le Soleil pourraient assurer par éruption l'injection d'ions dans un système d'accélération différent plus efficace. Du fait des pertes par ionisation aux faibles vitesses, les processus d'accélération lents ne peuvent agir que sur des particules déjà relativistes. Or, l'isotropie totale du rayonnement impose presque une échelle de temps longue. L'élimi-

nation des électrons par la lumière solaire ou stellaire et les ondes électro-magnétiques est également longue (100 années au voisinage du Soleil). Les théories « lentes » d'Alfvén ou de Fermi voient dans le rayonnement cosmique une forme d'énergie qui intervient dans la distribution générale de l'énergie.

1° Dans un milieu mouvant et supraconducteur, il y a équipartition entre l'énergie cinétique et l'énergie magnétique, d'où naissance de champs magnétiques attachés à la matière et de

l'ordre de 10^{-5} gauss.

$$\frac{H^2}{8\pi} = \frac{1}{2} \rho v^2$$

2° Les irrégularités du champ magnétique, ou mieux encore ses variations brusques, ont un effet accélérateur ou décélérateur, mais en moyenne il tend à y avoir accélération de façon à se rapprocher d'une équipartition de l'énergie entre champ magnétique et rayons cosmiques.

Dans la théorie de Alfvén [114], l'accélération se produit pour des particules tournant sur des orbites trochoïdales autour du Soleil. Les variations du champ solaire et du champ des taches accélèrent progressivement les ions injectés par les éruptions. Si le champ dipolaire est vingt fois inférieur au champ de Hale, l'énergie maxima qu'un proton peut acquérir sans s'évader du champ dipolaire solaire est de $2 \cdot 10^{12}$ e.v. et pour un noyau de fer 10^{14} e.v. L'accélération de Alfvén est plus rapide que celle de Fermi mais elle est limitée à une énergie modérée. On gagne à peine un facteur 10^2 par rapport aux énergies maxima observées dans l'éruption du 19 novembre 1949.

Il est vrai que le champ général (souricière), entraîné avec le système solaire en son mouvement dans la matière interstellaire, recueille les particules évadées du champ solaire et permettrait l'accumulation de particules produites depuis $5 \cdot 10^7$ années, période pendant laquelle le champ solaire a pu acquérir des valeurs très supérieures ⁽¹⁾. En outre, des accélérations de Fermi pourraient avoir lieu dans ce volume par choc sur nuages magnétiques.

Le spectre de puissance observé pour l'énergie des primaires ne paraît malheureusement créer de difficulté pour aucune théorie

(1) ARNOLD et LIBBY (*Science*, **110**, 678, 1949) ont montré que l'intensité des rayons cosmiques est restée stable depuis 20.000 ans.

cumulative dans laquelle l'énergie s'accroît exponentiellement avec le temps. Du fait des champs magnétiques et des longs trajets, l'isotropie des rayons cosmiques paraît assurée dans les deux hypothèses galactique ou solaire. Aucune variation galactique certaine n'a d'ailleurs été observée [115, 116].

Les régions où s'accroissent des rayons cosmiques sont certainement le siège d'une forte émission radioélectrique pour peu que quelques électrons (1 pour cent) [117] y parviennent à des énergies de 10^9 volts. Peut-être, les protons cosmiques très rapides peuvent-ils contribuer à ce rayonnement radioélectrique dans le champ intense de taches solaires ou de certains corps célestes [118]. On aura là un moyen de déterminer les lieux de production les plus actifs dans la Galaxie (nuages obscurs ou étoiles avancées). La grande intensité de la source du Sagittaire [116, 119] au centre de la Galaxie semble favorable à l'émission de rayons cosmiques par les étoiles avancées nombreuses dans cette région.

Mais il ne s'ensuit pas que les rayons cosmiques créés dans ces régions éloignées de la Galaxie nous parviennent en nombre important et que la presque totalité des rayons cosmiques ne soit pas solaire.

Observatoire du Pic du Midi.

Décembre 1950.

INDEX BIBLIOGRAPHIQUE

1. DUPRIER, Solar influences on cosmic rays. 6^e Rapport de la Commission pour l'étude des relations entre les phénomènes solaires et terrestres, 193, 1948.
2. FERMI, An hypothesis on the origin of cosmic rays. Conférence de Côme, *Nuovo Cimento*, 6 bis, 317, 1949.
3. NEHER, Correlation of geomagnetic cosmic ray effects. *Phys. Rev.*, 78, 674, 1950
4. SINGER, The primary specific ionisation and intensity of cosmic rays above the atmosphere. *Phys. Rev.*, 80, 47, 1950.
5. ROMERO, JUAREZ, OYARZABAL, GOMEZ, MEDINA, On the albedo of cosmic rays. *Phys. Rev.*, 80, 133 A, 1950.
6. HULZIZER, *Phys. Rev.*, 76, 164, 1949.
7. CRITCHFIELD, NEY, OLEKSA, The electrons in cosmic rays. *Phys. Rev.*, 79, 402, 1950.
8. WINCKLER, STROUD, SCHENK, Directional intensity of cosmic rays at high altitudes. *Phys. Rev.*, 74, 937, 1948.
9. FREIER, LOFGREN, NEY, OPPENHEIMER, BRADT, PETERS, Evidence of heavy nuclei in the primary cosmic radiation. *Phys. Rev.*, 74, 213, 1948.
10. FREIER, LOFGREN, NEY, OPPENHEIMER, The heavy component of primary cosmic rays. *Phys. Rev.*, 74, 1818, 1948.
11. POMERANTZ, HEREFORD, The detection of heavy particles in the primary cosmic radiation. *Phys. Rev.*, 76, 997, 1949.

12. BRADT, PETERS, The heavy nuclei of the primary cosmic rays. *Phys. Rev.*, **77**, 54, 1950.
13. PARKERS, PETERS, Large meson showers produced by primary cosmic rays. *Phys. Rev.*, **80**, 133, 1950.
14. PETERS, BRADT, On the abundance of light nuclei in the primary cosmic rays. *Phys. Rev.*, **80**, 133, 1950.
15. CLARKE, KORF, The latitude effect in cosmic rays at far southern latitudes. *Phys. Rev.*, **58**, 179, 1940.
16. GAST, LOUGHRIDGE, Latitude effect of cosmic rays above 50° N latitude. *Phys. Rev.*, **59**, 127, 1941.
17. KUPFERBERG, The cosmic rays as affected by the variation of air-mass distribution on the latitude. *Phys. Rev.*, **73**, 804, 1948.
18. DUPERIER, Latitude effect and pressure level of meson formation. *Nature*, **163**, 369, 1949.
19. BIEHL, MONTGOMERY, NEHER, PICKERING, ROESCH, Recent studies of cosmic rays. Latitude effect at high altitudes. *Rev. Modern Phys.*, **20**, 360, 1948.
20. BIEHL, NEHER, The latitude and longitude effects in cosmic rays over the U. S. and Canada at 30.000 feet. *Phys. Rev.*, **78**, 172, 1950.
21. POMERANTZ, Increase in the primary cosmic ray intensity at high latitudes and the non existence of a detectable permanent solar magnetic field. *Phys. Rev.*, **77**, 830, 1950.
22. SIMPSON, HUNGERFORD, The production of nuclear desintegrations and neutrons at the geomagnetic equator. *Phys. Rev.*, **77**, 847, 1950.
23. SIMPSON, URETZ, On the latitude dependence of nuclear desintegration and neutrons at 30.000 feet. *Phys. Rev.*, **76**, 569, 1949.
24. STAKER, A determination of the high altitude latitude dependence in cosmic ray neutron intensity. *Phys. Rev.*, **80**, 53, 1950 et **81**, 889, 1951.
25. VALLARTA, PERUSQUIA, OYARZABAL, The determination of the sign and energy spectrum of primary cosmic rays. *Phys. Rev.*, **71**, 393, 1947.
26. VALLARTA, On the energy of cosmic rays allowed by the Earth's magnetic field. *Phys. Rev.*, **74**, 1837, 1948.
27. Van ALLEN, GANGNES, The cosmic ray intensity above the atmosphere at the geomagnetic equator. *Phys. Rev.*, **78**, 50, 1950.
28. WINCKLER, STIX, DWIGHT, SABIN, A directional and latitude survey of cosmic rays at high latitude. *Phys. Rev.*, **79**, 656, 1950.
29. VALLARTA, On the energy spectrum of heavy nuclei in primary cosmic rays. *Phys. Rev.*, **77**, 419, 1950.
30. FORBUSCH, World wide changes in cosmic ray intensity. *Rev. Modern Phys.*, **11**, 168, 1939; *Phys. Rev.*, **54**, 975, 1938.
31. HOGG, Measurements of the intensity of cosmic rays. *Mem. Commonwealth Obs. Canberra*, 1949.
32. NEHER, ROESCH, Cosmic ray effects from solar flares and magnetic storms. *Rev. Modern Phys.*, **20**, 350, 1948.
33. WADA, Some problems to the study of cosmic ray intensity during magnetic storms. *Rep. Ionos. Res. Jap.*, **4**, 224, 1950.
34. DUPERIER, Cosmic rays and magnetic storms. *Nature*, **149**, 1942, 579.
35. SITTKUS, Beitrag zum Material über den Einfluss des magnetischen Sturmes vom 1. März 1941 auf die Ultrastrahlung. *Zeits. f. Naturw.*, **1**, 204, 1946.
36. SARNA, Magnetic storms and cosmic ray intensity. *Nature*, **164**, 588, 1949.
37. MIYAZAKI, Relation between intensity and geomagnetic storms. *Rep. Ionos. Res. Jap.*, **4**, 178, 1950.
38. DUPERIER, The geophysical aspect of cosmic rays. *Proc. Phys. Soc.*, **57**, 464, 1945.
39. BROXON, Magnetic moments of sunspots. *Phys. Rev.*, **75**, 606 et 612, 1949.
40. HESS, Significance of variations in cosmic ray intensity and their relation to solar, Earth-magnetic and atmospheric phenomena. *Rev. modern Phys.*, **11**, 153, 1939.

41. BUREAU, Eruptions chromosphériques solaires, rayonnement cosmique et phénomènes ionosphériques terrestres. 6^e *Rapport Commission pour l'étude des relations entre les phénomènes solaires et terrestres*, p. 60, 1948.
42. TUVE, Proposed research by the Department of Terrestrial Magnetism, Carnegie Institution of Washington. 6^e *Rapport Commission pour l'étude des relations entre les phénomènes solaires et terrestres*, p. 74, 1948.
43. DOLBEAR, ELLIOT, Cosmic ray intensity at Manchester and solar disturbances of July 25, 1946. *Nature*, **159**, 58, 1947.
44. BROXON, BOEHMER, Cosmic ray intensity following solar flare. *Phys. Rev.*, **78**, 411, 1950.
45. LORD, ELSTON, SCHEIN, Large fluctuations in the rate of production of nuclear disintegrations following a solar flare. *Phys. Rev.*, **79**, 540, 1950.
46. CLAY, JONGEN, Solar flare on November 19, 1949, and cosmic rays. *Phys. Rev.*, **79**, 908, 1950.
47. BUREAU, DAUVILLIER, L'éruption chromosphérique du 19 novembre 1949 et ses conséquences. *Ann. géophys.*, **6**, 77, 1950.
48. DAUVILLIER, Puissante émission solaire de rayons cosmiques. *Comptes rendus, Paris*, **229**, 1096, 1950.
49. ROSE, On the sudden increase in cosmic ray intensity on November 19, 1949. *Phys. Rev.*, **78**, 181, 1950.
50. FORBUSCH, STINCHCOMB, SCHEIN, The extraordinary increase of cosmic ray intensity on November 19, 1949. *Phys. Rev.*, **79**, 501, 1950.
51. ADAMS, A temporary increase in the neutron component of cosmic ray. *Phil. Mag.*, **41**, 503, 1950.
52. MIYAZAKI, WADA, KONDO, Sudden increase in cosmic ray intensity on November 19, 1949. *Rep. Ionos. Res. Jap.* **4**, 176, 1950.
53. SEKIDO, KODAMA, YAGI, Time variation of vertical cosmic rays. *Rep. Ionos. Res. Jap.*, **4**, 207, 1950.
54. CLAY, DIJKER, JONGEN, Solar flares and the origin of cosmic rays. Conférence de Côte. *Nuovo Cimento*, **6 bis**, 332, 1949.
55. DENISSE, Relations entre les émissions solaires radio et les rayons cosmiques. *Comptes rendus, Paris*, **228**, 467, 1949.
56. MONK, COMPTON, Recurrence phenomena in cosmic ray intensity. *Rev. Modern Phys.*, **11**, 173, 1939.
57. LOVERA, Sull' onda di 27 giorni nella radiazione cosmica ad Abisko. *Nuovo Cimento*, **1**, 137, 1943.
58. GHERI, STEINMAURER, Untersuchungen über die 27-tägige Welle der kosmischen Strahlung. *Terr. Magn.*, **52**, 343, 1947.
59. FORBUSCH, LANGE, Variation of cosmic rays and solar magnetic moment. *Bull. Amer. Phys. Soc.*, **24**, 1949.
60. BROXON, Recurrence phenomena in small cosmic ray bursts. *Phys. Rev.*, **70**, 424, 1946.
61. ROKA, Theorie der negativen Korrelation zwischen 27-tägiger Variation der kosmischen Strahlung und Ca Flocculi-Karakterzahlen. *Naturwiss.*, **1**, 24, 1949.
62. WOLLAN, Present status of solar and sidereal time variation of cosmic rays. *Rev. Modern Phys.*, **11**, 160, 1939.
63. DUPERIER, Solar and sidereal diurnal variation of cosmic rays. *Nature*, **158**, 196, 1946.
64. DUPERIER, Solar and sidereal six hourly variations of cosmic rays. *Nature*, **158**, 944, 1946.
65. HOGG, SIDERS, Variations of cosmic rays. *Nature*, **162**, 613, 1948.
66. MALMFORS, Recordings of cosmic rays. *Tellus*, **1**, 55, 1949.
67. DOLBEAR, ELLIOT, Directional measurements of the diurnal variations of cosmic ray intensity. *Proc. Phys. Soc.*, **63**, 137, 1950.
68. SEKIDO, YOSHIDA. *Rep. Ionos. Res. Jap.*, **4**, 37, 1950.
69. WOLTJER, The semi-diurnal component of cosmic ray intensity at Bandoeng, Java. *Physica*, **16**, 122, 1950.

70. RAU, Halbtägige Periode der harten kosmischen Strahlung am Äquator *Zeits. f. Phys.*, **115**, 105, 1940.
71. NICOLSON, SARABHAI, The semi-diurnal variation in cosmic ray intensity. *Proc. Phys. Soc.*, **63**, 137, 1950.
72. DOLBEAR, ELLIOT, Cosmic rays and the magnetic field of the Sun. *Nature*, **165**, 353, 1950.
73. BERGSTRAHL, SCHROEDER, Cosmic ray diurnal effect. *Phys. Rev.*, **80**, 134, 1950 et **81**, 244, 1951.
74. PERLOW, KISSINGER, SCHROEDER, Cosmic ray diurnal effects at rocket altitudes. *Bull. Amer. Soc. Phys.*, **24**, 8, 1949.
75. POMERANTZ, VALLARTA, On the low energy spectrum of primary cosmic rays. *Phys. Rev.*, **76**, 1889, 1949.
76. LORD, SCHEIN, The intensity of primary heavy nuclei in the stratosphere at night. *Phys. Rev.*, **78**, 484, 1950.
77. NEY, FREIER, NAUGH, ANDERSON, Night time flux of heavy nuclei. *Bul. Amer. Phys. Soc.*, **25**, 15, 1950.
78. LORD, SCHEIN, Diurnal variation of the primary heavy nuclei. *Phys. Rev.*, **80**, 304, 1950 et **81**, 314, 1951.
79. JANOSSY, *Zeitschrift für Physik*, **104**, 430, 1937.
80. GHETING, The cut-off in the energy spectrum of primary cosmic rays. *Phil. Mag.*, **41**, 495, 1950.
81. VALLARTA, GODART, A theory of world-wide periodic variations of the intensity of cosmic radiation. *Rev. Modern Phys.*, **11**, 180, 1939.
82. DWIGHT, Solar magnetic moment and radiation diurnal variation of cosmic. *Phys. Rev.*, **78**, 40, 1950.
83. ALFVÉN, Solar magnetic field and diurnal variation of cosmic rays. *Phys. Rev.*, **75**, 1732, 1949 et **77**, 375, 1950.
84. SHANLEY, KANE, WHEELER, Influences on the cosmic ray spectrum of the heavenly bodies. *Phys. Rev.*, **80**, 135, 1950.
85. LOUGHRIDGE, GAST, Effect of magnetic storms upon cosmic rays at high latitudes. *Phys. Rev.*, **57**, 938, 1940.
86. LANGE, FORBUSCH, Further notes on the effect on cosmic ray intensity of the magnetic storm, March 1, 1942. *Terr. Magn.*, **47**, 331, 1942.
87. SINGER, VAN ALLEN, On the primary cosmic ray spectrum. *Phys. Rev.*, **80**, 133, 1950.
88. SIMPSON, The change in intensity of the nucleonic component during magnetic storms. *Phys. Rev.*, **80**, 135, 1950 et **81**, 639, 1951.
89. SWANN, A possible effect of the Sun upon cosmic radiation. *Phys. Rev.*, **71**, 485, 1947.
90. JANOSSY, LOCKETT, The solar magnetic field and the seasonal variations in the intensity of cosmic radiation. *Proc. Roy. Soc.*, **32**, 1941.
91. ALFVÉN, Changes in cosmic ray intensity associated with magnetic storms. *Nature*, **156**, 618, 1946.
92. ALFVÉN, The electromagnetic conditions in the vicinity of the Sun and the Earth. *6^e Rapport Commission pour l'étude des relations entre les phénomènes solaires et terrestres*, p. 95, 1948.
93. ALFVÉN, On the solar origin of cosmic rays. *Phys. Rev.*, **75**, 1732, 1949.
94. KULDIP, CHAND, CHADA, Sunspots and cosmic ray intensity. *Current science*, **18**, 191, 1949.
95. DAUVILLIER, Problèmes de géomagnétisme, Paris, 86, 1950.
96. FORBUSCH, Three unusual cosmic ray increases possibly dues to charged particles from the Sun. *Phys. Rev.*, **70**, 771, 1946.
97. FORBUSCH, GILL, VALLARTA, On the mechanism of sudden increases of cosmic rays with solar flares. *Rev. Modern Physics*, **21**, 44, 1949.
98. MENZEL, SALISBURY, The origin of cosmic rays. *Nucleonics*, 67, 1948.
99. McMILLAN, The origin of cosmic rays. *Phys. Rev.*, **79**, 498, 1950.

100. KIEPENHEUER, On the origin of the cosmic rays from the Sun. *Phys. Rev.*, **78**, 809, 1950.
101. BAGGE, Conférence de Côte. *Nuovo Cimento*, **6** bis, 327, 1949.
102. RICHTMYER, TELLER, On the origin of cosmic rays. *Phys. Rev.*, **75**, 1729, 1949.
103. DUNGEY, HOYLE, Origin of cosmic rays. *Nature*, **162**, 888, 1948.
104. MILLIKAN, Present status of the evidence for the atom annihilation hypothesis. *Rev. Modern Physics*, **21**, 1, 1949.
105. SPITZER, On the origin of heavy cosmic ray particles. *Phys. Rev.*, **76**, 583, 1949.
106. WOLFE, ROUTLY, WIGHTMAN, SPITZER, The acceleration of dust grains by supernovae. *Phys. Rev.*, **79**, 1020, 1950.
107. DARWIN, Source of the cosmic rays. *Nature*, **164**, 1112, 1949.
108. BABCOCK, Magnetic variable stars as source of cosmic rays. *Phys. Rev.*, **74**, 489, 1948.
109. RYLE, Evidence for the stellar origin of cosmic rays. *Proc. Phys. Soc.*, **62**, 491, 1949.
110. TERLITZKY, Sur l'origine des rayons cosmiques (*en russe*). *J. Phys. Th. exp. URSS*, **19**, 12, 1949.
111. UNSÖLD, Origin of the radiofrequency emission and cosmic radiation in the Milky Way. *Nature*, **163**, 489, 1949.
112. FERMI, On the origin of cosmic radiation. *Phys. Rev.*, **75**, 1169, 1949.
113. EHMERT, *Zeits. f. Naturw.*, **3a**, 264, 1948.
114. ALFVÉN, On the solar origin of cosmic rays. *Phys. Rev.*, **77**, 375, 1950.
115. FORRO, Compton getting effect of cosmic rays. *Bull. Amer. Phys. Soc.*, février 1949.
116. VALLARTA, Galactic rotation effect and the origin of the cosmic radiation. *Rev. Modern Phys.*, **21**, 356, 1949.
117. KIEPENHEUER, Cosmic rays as the source of general galactic radio-emission. *Phys. Rev.*, **79**, 738, 1950.
118. KWAL, Les ondes radioélectriques émises par les protons rapides dans les champs magnétiques intenses et la corrélation entre les rayons cosmiques et les bruits radioélectriques du Soleil et de la Galaxie. *Comptes Rendus, Paris*, **231**, 1057, 1950.
119. FAN, On the origin of cosmic radiation. *Phys. Rev.*, **79**, 912, 1950.

Voir également les articles suivants :

- FOSTER, EVANS, A new cosmic ray geomagnetic relation. *Phys. Rev.*, **51**, 545, 1942.
 GNEVISHEV, On the nature of solar corpuscles. *Russian Astr. Jour.*, **25**, 109, 1948.
-