Zeitschrift: Verhandlungen der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft = Actes de la Société Helvétique des Sciences Naturelles = Atti della Società Elvetica di Scienze Naturali

Herausgeber: Schweizerische Naturforschende Gesellschaft

Band: 131 (1951)

Artikel: Les grandes gerbes atmosphériques des rayons cosmiques

Autor: Auger, Pierre

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-90478

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Les grandes gerbes atmosphériques des rayons cosmiques

Par

PIERRE AUGER (Paris)

Le titre par lequel cette conférence est annoncée peut paraître bien spécialisé puisqu'il ne mentionne qu'un seul des aspects de cette nouvelle branche de la physique corpusculaire qui porte le nom prestigieux et romantique de rayons cosmiques. Je m'en voudrais pourtant de ne vous entretenir que d'un sujet aussi étroit, quelle que soit son importance, et je me permettrai de développer à ce propos des considérations plus générales, sur les rayons cosmiques eux-mêmes, et sur divers aspects de méthodologie scientifique dont leur histoire fournit des exemples particulièrement frappants.

Ainsi dans l'origine même de ces études on peut déjà trouver un enseignement. On peut en placer le début en 1900 lorsque ELSTER et GEITEL ainsi que CTR. WILSON montrèrent l'existence d'une conductibilité électrique incoercible dans les gaz de leurs électromètres. On savait déjà à cette époque, qui paraît bien reculée aux physiciens nucléaires d'aujourd'hui, que les ions étaient les responsables nécessaires de toute conduction électrique dans les gaz. Il fallait donc trouver une cause continuelle de production d'ions, et le premier mouvement tendait à attribuer au gaz lui-même cette production qui devenait ainsi «spontanée». Mais la spontanéité n'a pas de chance dans le domaine scientifique, qu'il s'agisse de génération ou d'ionisation. Bientôt il fut démontré que la cause était extérieure, et qu'il fallait en chercher l'origine première au-delà de l'atmosphère.

Cette cause extérieure, une fois reconnue son existence à la suite des travaux de GOCKEL, de HESS, de KOLHÖRSTER, fut étudiée par des chercheurs de plus en plus nombreux, répartis dans le monde entier. Ils utilisèrent successivement, et aussi simultanément, les diverses techniques de la physique corpusculaire, les chambres d'ionisation, les compteurs de GEIGER-MULLER, les chambres à détente avec ou sans champs magnétiques, les plaques photographiques. Il est intéressant de remarquer que toutes ces techniques existaient à la fin de la première guerre mondiale, et qu'il ne restait qu'à les améliorer et les utiliser dans les conditions optima. Mais aussi à chaque nouveau perfectionnement, à chaque nouveau groupement ou changement de condition d'utilisation

a correspondu une découverte amenant un progrès souvent décisif. Peut-être y a-t-il là aussi un enseignement important à tirer des faits historiques. Bien se servir des outils que nous possédons déjà est quelquefois plus essentiel que de tenter désespérément d'en inventer de tout nouveaux. Nous aurons l'occasion de le démontrer à plusieurs reprises.

Parcourons rapidement les étapes de l'avancement de nos connaissances dans ce domaine. On peut distinguer une première période s'étendant jusqu'en 1930, au cours de laquelle les instruments utilisés étaient les chambres d'ionisation et les compteurs. Ces techniques permirent de découvrir d'abord l'effet d'altitude et l'effet barométrique, qui sont les conséquences de l'absorption par l'atmosphère du rayonnement étudié. Puis la nature corpusculaire d'une partie importante de ce rayonnement, par la méthode des coïncidences, enfin la nature chargée de ces corpuscules, grâce à la variation de leur nombre avec la latitude.

Mais il manquait encore un grand nombre de données. Ni l'énergie ni la nature des corpuscules n'était connue. La disposition géométrique des trajectoires non plus, malgré que leur direction générale ait été reconnue en gros comme verticale. Ce sont des arrangements techniques nouveaux qui devraient apporter ces renseignements.

D'abord le groupement des appareils. Tous ceux qui ont touché de près ou de loin le champ d'études cosmiques connaissent ces figures schématiques qui couvrent les pages des articles ou de traités. Un rond de petites dimensions, souvent centré d'un point, figure un compteur. Un rectangle figure un écran, de plomb en général. Un grand rond, c'est une chambre de WILSON, quelquefois c'est d'ailleurs un grand rectangle. Et ces éléments sont arrangés de mille façons différentes suivant les auteurs et suivant ce qu'ils cherchent. Quelques-uns de ces arrangements sont devenus classiques: citons le télescope, consistant en deux, trois (ou plus) compteurs de GEIGER-MULLER situés dans un même plan, séparés par des écrans, souvent orientables par rapport à la verticale. Le berceau, composé de trois compteurs ou plus, parallèles mais non dans le même plan, et auxquels se superposent généralement des écrans de plomb. La chambre commandée de BLACKETT et OCCHIALINI, dans laquelle le fonctionnement de la détente est déclenchée par le passage des rayons cosmiques dans un groupement de compteurs. Nous en verrons bien d'autres, mais voyons tout de suite ce que ces premiers arrangements peuvent nous fournir comme renseignements.

Le télescope définit une direction lorsque tous ses éléments sont traversés simultanément par une particule, d'où son nom. La décroissance du nombre de traversées quand les écrans augmentent d'épaisseur mesure l'absorption des particules. Le changement de ce nombre avec l'orientation du plan indique la distribution dans l'espace de leurs directions d'origine. Il a été ainsi prouvé que certains corpuscules cosmiques pouvaient pénétrer un mètre de plomb, ce qui conduisait à leur attribuer une énergie extraordinairement élevée. Il a été aussi démontré qu'ils provenaient surtout de la verticale, avec une distribution en cloche autour de cette direction, enfin qu'ils venaient en plus grand

nombre de l'ouest que de l'est, ce qui conduit à leur attribuer une charge positive. Je n'insiste pas sur les variations autour du thème du télescope, par exemple en déplaçant un des compteurs hors du plan principal, en plaçant les écrans dans la partie supérieure ou inférieure, en les prenant larges ou étroits. Tous ces arrangements sont capables d'apporter des renseignements utiles. Ils peuvent aussi faire perdre un temps infini aux chercheurs sans grande utilité et cela a été certes un des défauts principaux de ces recherches.

Le télescope peut être associé à une chambre de WILSON, ou chambre à détentes, et alors la trajectoire de la particule elle-même qui donne lieu à la coïncidence peut-être observée sous forme d'une trace de brouillard. C'est une des grandes satisfactions du physicien, après avoir déduit de quelques chocs électriques qu'il devait y avoir des particules suivant tel trajet, de les apercevoir ensuite exactement là où elles doivent se trouver, exactes au rendez-vous. L'emploi de deux chambres simultanément déclenchées, permet enfin d'apercevoir la trace des particules avant et après la traversée d'un écran épais, et d'obtenir ainsi la conviction que c'est bien une seule et même particule qui déclanche le télescope et qui traverse donc, sans être même déviée de façon observable, plusieurs décimètres de plomb.

Le berceau, contrairement au télescope, ne peut pas être déclenché par une seule particule. Il définit essentiellement un groupe. C'est grâce à cet arrangement que les «gerbes» ont été observées par ROSSI: ce sont ces groupements de particules produites secondairement dans des écrans de plomb par les corpuscules qui traversent l'atmosphère. Le nombre de coïncidences s'accroît considérablement quand l'écran est placé, et elles ne peuvent être dues qu'à des faisceaux divergents, prenant naissance dans l'écran. L'adjonction d'une chambre de WILSON, ici aussi, permet d'observer visuellement les traces, et de se convaincre de l'existence réelle de ces «gerbes» ou même de ces «averses» de particules.

La chambre de WILSON peut enfin être placée dans un champ magnétique. L'avantage de cette méthode est considérable puisqu'elle permet d'obtenir une évaluation de l'énergie par la mesure de la courbure de la trajectoire. Egalement précieux est l'aspect même de cette trace, précisé par le comptage du nombre de gouttelettes qui la composent: de ce comptage peut se déduire l'intensité de l'ionisation déterminée par la particule, ce qui renseigne efficacement sur sa nature, sa charge et sa masse. Appliquée aux gerbes, cette méthode y a démontré la présence d'un nombre égal de particules positives et négatives et établi sur des bases indiscutables la théorie de la création par paires des électrons. Appliquée aux télescopes elle a permis la mesure précise des énergies des particules et de leurs pertes au passage des écrans.

La deuxième période peut ainsi être limitée aux années de 1930 à 1937, pendant lesquelles s'est précisée cette image corpusculaire du rayonnement. C'est pendant cette période que les chercheurs ont exploré toute la surface du globe, les hauteurs de l'atmosphère, les profondeurs de la mer et de la terre, à la recherche de renseignements nouveaux sur

leurs chers rayons. C'est ce que l'on peut appeler la période héroïque. Elle a ses morts, dans les crevasses des glaciers, dans les accidents de ballons. Elle a donné l'occasion à de nombreux physiciens de montrer qu'ils étaient animés des mêmes qualités que les explorateurs de tous les temps, et d'écrire quelques chapitres admirables de l'histoire de la volonté de l'homme de pénétrer les secrets de la nature. Je ne veux citer qu'un exemple, celui des premières ascensions stratosphériques de Piccard et Cosyns, dont le retentissement a été mondial.

On peut fixer la troisième période, qui s'étend jusqu'à aujourd'hui, à la découverte du méson. Cette introduction d'une particule absolument nouvelle est venue éclairer soudainement une foule de problèmes restés sans solution depuis de nombreuses années. Elle n'a pas limité son retentissement au domaine des seuls rayons cosmiques, mais a aussitôt joué un rôle prédominant dans toute la physique atomique et nucléaire. Elle a aussi été la première de toute une famille de particules nouvelles, dont l'apparition a élevé à 21 le nombre des particules dites élémentaires ou fondamentales, et dont est constitué notre univers.

Il faut rendre cette justice aux théoriciens que c'est l'un d'entre eux qui a le premier proposé l'existence de telles particules intermédiaires entre l'électron et le proton. L'histoire de la physique est pleine de ces alternances de domination entre la théorie et l'expérience, l'une dépassant l'autre puis se laissant dépasser à son tour. C'est l'expérience qui a forcé la théorie à renoncer à l'indivisibilité de l'atome, en découvrant la radioactivité. C'est elle qui a obligé les théoriciens de l'électricité à décomposer leur fluide en électrons, qui les a conduits dans les voies de la relativité. C'est la théorie qui a prévu la première l'électron positif et le méson, prévisions suivies immédiatement de leur vérification expérimentale. Cette émulation féconde entre la théorie et l'expérience forme la mécanique même de l'avancement de notre science.

L'apparition du méson n'était pas réellement imprévue. Les expériences d'absorption avaient démontré à satiété que les corpuscules cosmiques ne pouvaient pas être seulement de nature électronique, et que beaucoup d'entre eux avaient une masse supérieure. Mais une des caractéristiques les plus remarquables du méson n'avait pas été prévue, je veux dire sa radioactivité. Cette propriété de la particule nouvelle de se décomposer spontanément en donnant naissance à un électron et sans doute à une de ces particules fantômatiques, inventées pour les besoins de la cause, que l'on a appelées neutrinos, a permis l'interprétation de toute une série d'anomalies et de bizarreries dans les mesures d'intensité du rayonnement cosmique, en altitude, en profondeur et en direction. On comprend tout de suite comment les effets de cette décomposition diffèrent d'une absorption ordinaire si on considère qu'il s'agit là d'une véritable absorption par le temps, ou plutôt par l'espace puisque ceux-ci sont reliés par la vitesse de la particule en mouvement. Des écrans denses, comme le plomb, absorbent par leur masse. Des écrans légers comme l'atmosphère, absorbent par leur masse et aussi par leur étendue qui donne l'occasion à la particule de disparaître spontanément.

Une autre conséquence du caractère éphémère des mésons est leur nature nécessairement secondaire. Ils ne peuvent pas provenir de grandes distances, car quelques dizaines de kilomètres de parcours les tuent. La nature des corpuscules primaires, de ceux qui atteignent les premiers notre atmosphère venant des confins du cosmos, voilà ce qui devenait alors le problème principal, non encore résolu à l'heure actuelle je dois le dire, quoique l'hypothèse des protons primaires soit encore la plus solide.

A partir de l'établissement de la réalité des mésons prévus par YUKAWA, le développement de la science des rayons cosmiques devient de plus en plus touffu et il n'est plus possible d'en donner un compte rendu un tant soit peu complet au cours d'une conférence comme celle-ci. Il faut se limiter à une branche de cette science nouvelle, et je choisirai celle indiquée dans le titre, les gerbes, et spécialement les grandes gerbes de l'atmosphère.

Reprenant l'image générale que possédait la physique des rayons cosmiques en 1936, nous remarquerons qu'elle permettait de diviser le domaine entier de ces rayons en deux portions nettement distinctes, celui de la composante molle et celui de la composante dure. Vous voudrez bien excuser ces expressions figurées qui sont traditionnelles, et qui signifient simplement que la première composante est facilement absorbée et ne traverse pas plus de quelques centimètres de plomb, alors que la seconde n'est pas complètement arrêtée par un mètre de cette matière. Nous manquons de mots, au cours du développement de la science, et cette difficulté peut être résolue de deux manières différentes: inventer de nouveaux mots, généralement à l'aide d'une accumulation de racines grecques, et c'est ce que font les sciences les plus éloignées dans la classification d'AUGUSTE COMTE, chimie, biologie, sociologie; ou bien conférer à des mots anciens des sens nouveaux très particuliers, et c'est ce que font les sciences mathématiques et physiques. Aucune des solutions n'est parfaite, car si les textes mentionnant la karyokinèse, la polyploïdie ou les corps hétérocycliques paraissent impénétrables à beaucoup de personnes, ceux qui traitent du poids d'une expression mathématique ou de la dureté d'une particule, moins rebutants d'abord, sont en réalité tout aussi hermétiques pour le profane.

Nous savons maintenant que la composante dure est formée de mésons isolés, créés dans l'atmosphère à des altitudes de l'ordre de 20 à 30 km. La composante molle constituée d'électrons et de photons, est formée localement puisque son pouvoir de pénétration est faible. Les relations réciproques de ces composantes ont posé un problème majeur, non encore résolu entièrement. L'énergie représentée par ces composantes n'est pas directement reliée à leur «dureté» c'est-à-dire leur pouvoir de pénétration. Des mésons de faible énergie, quelques millions de volts, traversent plus de plomb que des électrons portant des milliards de volts. On ne peut donc pas affirmer à priori que l'une descende de l'autre, et elles sont sans doute toutes deux secondaires d'une autre espèce de corpuscules primaires, probablement des particules plus lourdes. Les protons sont

les plus en faveur, les neutrons étant éliminés à cause de leur radioactivité qui ne leur permet de subsister que quelques minutes.

Cette question de l'énergie présente d'ailleurs une importance particulière lorsque l'on aborde le problème de l'origine possible de ce rayonnement primaire, ce problème devenant de plus en plus ardu au fur et à mesure de l'accroissement de l'énergie maximum observée. En effet, si nous examinons quelques unes des théories proposées pour expliquer la formation des rayons cosmiques, nous voyons qu'elles peuvent se classer en deux catégories. Celles dans lesquelles l'énergie est fournie aux corpuscules au cours d'un seul acte et celles où cette énergie leur est communiquée progressivement. Dans la première hypothèse, il faut qu'un atome tout entier disparaisse, se transformant en énergie cinétique, et celle-ci se portant sur une seule particule élémentaire. Un calcul simple montre que l'atome le plus lourd connu, celui de l'uranium, fournirait à un électron une énergie de quelque deux cents milliards de volts s'il se détruisait en entier. Mais c'est là le maximum admissible puisque la destruction d'un corps plus complexe, moléculaire par exemple, ne pourrait concentrer son énergie sur une particule unique, du moins dans l'état actuel de la théorie.

Les théories d'accélération continue n'ont pas ce caractère de prévoir un maximum, et ce sera sans doute une manière de les distinguer. Les mesures ou évaluations de l'énergie des particules cosmiques ont été basées sur des procédés de plus en plus indirects au fur et à mesure de l'accroissement de celle-ci. S'il suffit, lorsque l'énergie d'une particule ne dépasse pas quelques centaines de millions de volts, de soumettre la chambre de Wilson qu'elle traverse à un champ magnétique puissant pour obtenir, grâce à la mesure de la courbure de sa trajectoire une mesure de cette énergie, la méthode ne donne plus de résultat valable lorsque la courbure devient trop faible pour être mesurée.

D'autres méthodes que celle de la courbure peuvent heureusement être employées. D'abord celle de l'absorption. On peut évaluer la perte d'énergie que subit une particule telle qu'un méson lorsqu'elle traverse des écrans de plomb ou de sol. Comme cette perte est à peu près proportionnelle à la masse traversée, au moins dans un intervalle d'énergie assez grand, on peut conclure de l'observation de tels mésons au-dessous d'écrans très considérables, à une valeur minimum de l'énergie que possédaient ces particules à l'entrée dans cet écran. Des mésons ont été observés jusqu'à des profondeurs de plusieurs centaines de mètres de sol, correspondant à des dizaines de mètres de plomb. L'énergie initiale devait dans ce cas dépasser la dizaine de milliards de volts qui constitue la limite supérieure de la méthode de courbure magnétique. Les plus grandes profondeurs où l'observation a encore pu être faite, de l'ordre de mille mètres de sol correspondent à plus de 10^{11} électrons volts, donc atteignent l'énergie maximum que la désintégration d'un atome d'uranium peut communiquer à un électron, sans toutefois la dépasser. On voit l'intérêt qu'il y a à trouver des méthodes qui puissent aller plus loin.

Nous tournant maintenant vers la composante molle, photo-électronique dans son ensemble, nous voyons que les mesures indiquent en général des énergies relativement faibles, de l'ordre des dizaines de millions de volts lorsqu'il s'agit des branches des gerbes, c'est-à-dire de la majorité des particules présentes dans les appareils. Mais ici ce qui nous intéresse n'est pas tant la valeur de l'énergie d'une des particules composant la gerbe, mais celle de la gerbe tout entière puisqu'il s'agit là d'une manifestation multiple mais dont la source est unique. Pour effectuer une telle évaluation, il nous faut entrer un peu plus en détail dans le mécanisme de la constitution de ces gerbes.

Le phénomène principal est celui de la création des électrons par paires, positif et négatif, création qui a lieu lorsqu'un photon d'énergie supérieure à un million de volts électrons passe au voisinage d'un noyau atomique. Il est d'autant plus probable que la charge du noyau est grande, cette charge agissant par le carré de sa valeur. Elle donne naissance à des électrons dont l'énergie cinétique est équivalente à l'énergie du photon, déduction faite de l'énergie nécessaire à la création des masses des deux électrons, soit ½ million de volts électrons pour chaque. On sait que Dirac a donné de ce phénomène un modèle qui peut se décrire en termes très simples en imaginant la présence constante d'une infinité d'électrons dans des niveaux d'énergie négatifs. La marche des événements peut alors se dérouler de la façon suivante. Un noyau de charge Ze est approché par un photon d'énergie $E=h\nu$ et nous indiquons la présence d'un électron dans un des niveaux négatifs d'énergie $-U$ par exemple. Dans l'état final l'électron a été sorti de son niveau négatif et porté à un niveau positif correspondant, c'est-à-dire projeté avec une vitesse telle que son énergie cinétique plus son énergie de masse au repos égalent U. En même temps un «trou» apparaît dans les niveaux négatifs, c'est le positron qui est projeté avec une énergie totale de $E-U$. Il est clair dans cette image que si le «trou» rencontre dans ses déplacements un «électron» ordinaire, le second tombe dans le premier et disparaît ainsi en tant que matière, l'énergie disponible étant restituée à l'espace sous la forme de photons (deux en l'espèce, car il faut conserver l'impulsion et il n'y a pas de noyau lourd pour absorber le surplus de celle-ci).

Les photons donnent naissance à des électrons, mais ceux-ci peuvent à leur tour redonner des photons par le phénomène du freinage. Ici encore la présence d'un noyau lourd est essentielle: c'est en passant dans son champ électrique que l'électron perd soudain une partie de son énergie cinétique sous la forme d'un photon dit «de freinage». Ces deux effets de freinage et de création de paires se succèdent à un rythme rapide lorsqu'un flot d'électrons et de photons traverse la matière, et surtout de la matière dense. Ils donnent lieu à une multiplication en nombre en même temps qu'à une dégradation en énergie, et déterminent l'apparition d'une «gerbe».

Il faut ajouter deux effets secondaires mais dont l'importance s'accroît au fur et à mesure de la dégradation de l'énergie moyenne des

branches de la gerbe, ce sont l'effet COMPTON par lequel un photon entrant en quelque sorte en collision avec un électron lui communique une partie de son énergie, et la diffusion élastique par laquelle un électron est dévié dans sa direction par son passage auprès d'un noyau atomique. Il n'y a pas de formation de photons, ou plutôt un photon virtuel est produit puis réabsorbé, de sorte que l'énergie de l'électron reste la même si sa direction est changée. Ce dernier phénomène est le principal responsable de la dispersion en direction des branches de la gerbe.

Les calculs détaillés du développement des gerbes ont pu être faits par divers auteurs, et ils conduisent à une description assez simple à condition d'utiliser des étalons de grandeur spéciaux, dits «unités de rayonnement». Ainsi les épaisseurs d'écrans doivent être évalués avec ces étalons et alors deux écrans de même épaisseur en unités de rayonnement sont équivalents dans leur action sur les gerbes qui les traversent. L'énergie des branches de ces gerbes est également exprimée simplement en multiples d'une énergie dite énergie critique. Indiquons comme exemple les longueurs équivalentes de ½ cm de plomb, ½ m d'eau, 300 m d'air atmosphérique normal. Les énergies critiques pour les mêmes matières sont 10 millions, 150 millions et 120 millions de volts électrons.

Une gerbe jeune contient plus d'électrons que de photons, et beaucoup d'électrons d'énergie supérieure à l'énergie critique. Quand elle a traversé de nombreuses unités de radiation, elle passe par son maximum puis vieillit. Les photons dépassant les électrons en nombre, ces derniers tombent au-dessous de l'énergie critique, et alors, en quelques unités de radiation, c'est la fin.

On peut dire qu'une gerbe qui débute avec des électrons possédant cent fois l'énergie critique meurt en dix unités de radiation. S'ils possédaient 10 000 fois cette énergie, il faudrait trente unités pour la tuer. Prenons un exemple qui nous servira tout à l'heure: l'atmosphère représente près de trente unités de radiation puisque la pression atmosphérique est celle de 8 km d'air normal. Un électron de 10 000 fois 100 millions de volts c'est-à-dire 10^{12} volts, ou mille milliards, en entrant dans cette atmosphère donnerait une gerbe qui viendrait mourir exactement au niveau de la mer. Seuls des électrons beaucoup plus énergiques donneraient un effet notable à ce niveau, ainsi avec 10^{14} à l'entrée, il y aurait encore dans la gerbe 10 000 particules d'énergie supérieure à l'énergie critique lorsque le niveau de la mer serait atteint.

La théorie des gerbes a donné lieu à des nombreuses vérifications expérimentales, dont nous n'examinerons ici que les plus importantes. ROSSI lui-même, dans ses premières expériences, avait étudié l'évolution moyenne des gerbes dans un écran de plomb en superposant à trois compteurs en berceau des plaques de plus en plus épaisses de ce métal. Il avait obtenu une courbe présentant une partie croissante, correspondant au développement de la gerbe jeune, un maximum et une décroissance correspondant à la décadence de la gerbe vieillie. La position de ce maximum est, en gros, d'accord avec les calculs. On a pu montrer également que des écrans de différentes substances, dont l'épaisseur

était équivalente en unités de radiation, avaient des effets semblables. Les mesures statistiques du spectre d'énergie des électrons des gerbes ont donné des répartitions qui correspondent bien aux calculs. Enfin des observations directes à la chambre de Wilson ont permis de suivre, dans leur passage à travers une série de plaques de plomb, le développement complet d'une gerbe née d'un électron initial unique. On voit un faisceau étroit sortir de la première, devenir plus fourni après la seconde, atteindre une importance maximum après la troisième pour se dissiper complètement à la cinquième.

Il arrive que dans des photographies de détentes le nombre de branches de gerbes soit tel que l'atmosphère de l'appareil en soit complètement rendue laiteuse. Nous avons ainsi obtenu dès 1945 une photographie contenant plus de 300 trajectoires. D'autres auteurs en ont montré de plus riches encore. Il s'agit là évidemment d'une gerbe spécialement dense, dont l'ionisation est telle qu'elle peut correspondre à des millions d'ions dans un litre de gaz. De telles apparitions soudaines de très nombreuses charges dans les chambres d'ionisation ont été observées pour la première fois par HOFFMANN, et portent le nom de chocs d'HOFFMANN (ou de «bursts» en anglais, HOFFMANNstöße en allemand). Leur étude, en particulier celle de la variation de leur nombre avec l'épaisseur des écrans superposés à l'appareil de mesure, donne des résultats tout à fait analogues à ceux obtenus pour les gerbes. Elle conduit à penser que ce sont des gerbes denses, déterminées localement par des électrons de grande énergie: la difficulté est de comprendre comment de tels électrons sont arrivés, ou nés ainsi dans les appareils, sans toujours être accompagnés par un grand nombre de leurs collègues, si j'ose dire. L'interprétation des chocs isolés exige en réalité d'admettre que le responsable initial est une particule «dure», c'est-à-dire un méson isolé, lequel donne naissance à un électron de grande énergie par choc direct (knock on électron) ou à un photon de très courte longueur d'onde par freinage soudain dans le champ d'un noyau. C'est cet électron ou ce photon qui sont alors à l'origine de l'intense nuage électronique. Je n'insiste pas ici sur d'autres espèces de chocs d'ionisation, dus à des particules lourdes et non à des électrons, et que l'on identifie avec les groupes de trajectoires observés dans les plaques photographiques, connues sous le nom d'étoiles. L'origine de ces étoiles se trouve dans un choc nucléaire d'un corpuscule cosmique de très grande énergie avec le noyau d'un atome de la matière qu'il traverse. Ce noyau est en quelque sorte «explosé» et ce sont ses fragments, protons et mésons, dont la trace s'imprime dans les émulsions. On peut ici aussi évaluer l'énergie totale dépensée dans un de ces chocs d'ionisation, en se basant sur le nombre d'ions ou plutôt de paires d'ions produits. On trouve que le nombre des chocs diminue quand leur énergie totale augmente, mais que des chocs de plus de cent milliards d'électrons volts sont encore observables. Nous rejoignons ainsi les énergies des particules isolées, et pouvons attribuer les chocs sous écrans épais à une action de celles-ci. Les chocs obtenus à l'air libre, ou sous écran mince, sont attribuables simple-

ment à des gerbes ou des portions de gerbes qui font partie de la composante molle.

Il est naturel, étant donné le tableau que nous venons de présenter, de tenter d'étendre les investigations du côté des énergies plus élevées, ne serait-ce que pour s'assurer de l'existence de phénomènes simultanés, dus par conséquent à une particule unique dans leur origine première, et dont l'énergie totale dépasse celle qui résulterait d'une destruction atomique. Ensuite, pour l'établissement de la connaissance de toute théorie de l'origine des rayons cosmiques, la connaissance de l'extension du spectre d'énergie est essentielle. C'est dans cet esprit que la recherche de gerbes de plus en plus grandes, de plus en plus riches en particules et donc en énergie, a été faite dans plusieurs laboratoires, et en particulier dans le mien. Vous me permettrez d'insister un peu sur cet aspect spécial de la science des rayons cosmiques car il s'est développé considérablement depuis dix ans.

Le problème de la recherche de gerbes étendues est essentiellement celui de tout phénomène rare. Si l'observation est faite par compteurs en coïncidence, la difficulté sera d'éliminer les effets fortuits, lorsque leur nombre menace d'égaler celui des effets à mesurer. Si elle se fait avec la chambre à détentes, il ne faut pas prendre une proportion trop élevée de clichés inutiles, ce qui rendrait le travail impossible. La solution de ces difficultés se trouve, comme c'est souvent le cas, dans une amélioration technique, ici, l'augmentation du pouvoir de résolution des apapreils à coïncidence, ou, en d'autres termes, la réduction de la durée pendant laquelle doivent se produire les chocs dans les différents compteurs pour être comptés comme simultanés. En réduisant ce temps du dix millième de seconde au millionième de seconde, nous avons pu faire tomber à zéro, pratiquement, les coïncidences dues au hasard, et ne conserver ainsi que celles dues aux phénomènes réels recherchés.

L'expérience consiste alors tout simplement à mettre deux ou trois compteurs en coïncidence, et à écarter l'un d'entre eux, horizontalement, à des distances croissantes. Partant du «berceau» utilisé pour l'observation des petites gerbes ordinaires, on en augmente la largeur, et passe à des systèmes dits «à grande envergure»: 1 m, 10 m, 100 m et plus. Bien entendu ces systèmes sont alors disposés à l'air libre et c'est dans l'atmosphère qui les surmonte que doivent prendre naissance les effets multiples donnant lieu à une décharge simultanée des appareils. L'expérience montre, au niveau de la mer, que les gerbes très nombreuses du berceau (mettons cent par heure par exemple) se raréfient rapidement lorsque l'envergure dépasse 30 cm, et tombent à quelques unes par heure. C'est alors que l'élimination des effets fortuits devient nécessaire: si elle est faite, l'envergure peut être portée à plusieurs mètres, et les chocs étant significatifs on est certain de procéder à l'observation de gerbes nées dans l'atmosphère et dont les branches s'écartent les unes des autres de plusieurs mètres. Ce qui est remarquable surtout c'est que la décroissance, rapide de 30 cm à 2 m, devient de plus en plus lente, et que le changement entre 10 m et 20 m n'est que d'un facteur 2. Il est

difficile de dépasser cette envergure au niveau de la mer, le comptage n'étant pas assez élevé et c'est pourquoi les mesures ont été poursuivies en altitude. Tous les effets des rayons cosmiques augmentent rapidement avec l'altitude, mais les grandes gerbes ont dépassé tous nos espoirs, puisqu'en passant de Paris au Pic-du-Midi (altitude 3000 m) le nombre des gerbes devenait dix fois plus grand. Le nombre étant encore supérieur au Laboratoire des hautes altitudes du Jungfraujoch, nous avons songé à étendre les mesures à plusieurs centaines de mètres, nous verrons tout à l'heure la raison de cette tentative. Pour cela un problème nouveau se posait, résultant de la vitesse finie de transmission des signaux électriques le long des fils de connection des compteurs. Pour une distance de 300 m, la durée d'un tel trajet est de l'ordre de la microseconde, c'est-à-dire qu'elle rentre dans le temps de résolution des appareils à coïncidences. Deux signaux simultanés, provenant l'un d'un compteur proche de l'appareil à coïncidences, l'autre d'un compteur éloigné de 300 m, arrivent séparés par un intervalle de temps tel qu'ils ne sont plus comptés comme coïncidences. Nous avons alors installé sur la ligne courte un «retardeur» de chocs permettant de compenser cette différence, et de rétablir les coïncidences. Un autre avantage de ce dispositif est de permettre des contrôles très aisés, puisqu'il suffit d'introduire un retard arbitraire supérieur à une microseconde pour ne compter plus que les effets fortuits: on obtient alors par différence la valeur de l'effet réel.

Plaçant nos appareils dans le laboratoire, et un groupe de compteurs sur le glacier à 300 m de distance avec une ligne volante pour les relier, nous pûmes obtenir des chocs de coïncidences au rythme de 1,5 à 2 par heure, dus avec certitude à des gerbes couvrant 100 000 m² de leurs particules. Depuis ces mesures, des observateurs russes ont annoncé avoir atteint des envergures de 600 m à une altitude comparable.

Ainsi, à des intervalles moyens de l'ordre de quelques minutes en basse altitude, l'atmosphère est le siège du passage de très grandes gerbes photo-électroniques dont l'origine est certainement située dans l'air à très haute altitude. Les travaux qui ont suivi cette observation ont permis de préciser divers caractères intéressants de ces gerbes, en particulier ceux qui peuvent donner des indications sur leur énergie totale.

Tout d'abord la densité des trajectoires par mètre carré de surface horizontale. Elle peut être évaluée par l'étude de la variation du nombre de gerbes observées en fonction de la surface des compteurs, et aussi du nombre de compteurs mis en coïncidences. Les valeurs trouvées changent avec l'envergure des gerbes, avec l'altitude du lieu d'observation, avec la disposition géométrique des compteurs qui favorise tantôt les gerbes les plus denses tantôt les moins denses. Elles vont de dix à mille particules par mètre carré. Des études plus détaillées effectuées par de nombreux auteurs ont permis d'attribuer aux grandes gerbes une distribution en densité de forme exponentielle. On peut dire que le nombre de gerbes de densité supérieure à une valeur déterminée varie comme la puissance —2,4 de cette densité. Ce type de distribution rappelle exactement celui des chocs d'Hoffmann, dont le nombre dé-

passant une énergie donnée varie comme une puissance tout à fait voisine de l'énergie. C'est encore une raison de rapprocher ces deux phénomènes.

Ensuite la question se pose de la structure des gerbes, c'est-à-dire de la distribution des trajectoires en densité horizontale pour chacune des gerbes observées. Le problème est important parce que si l'on veut déduire l'énergie totale de la gerbe de ces mesures de densité, il faut que celle-ci soit assez homogène sur toute la surface couverte. La théorie indique que des particules d'énergie élevée doivent s'entourer d'un faisceau de secondaires, de sorte que l'on peut s'attendre à trouver des foyers de concentration en densité, dans le cas où de telles particules de grande énergie se rencontreraient isolément. Mais d'autre part le calcul des fluctuations de densité ainsi réalisées ne fait pas prévoir qu'elles jouent un rôle considérable.

Une étude expérimentale de la distribution en densité a été faite par les méthodes de compteurs et aussi avec la chambre de WILSON. Une telle chambre, déclenchée par des compteurs placés à quelque distance donne des clichés très caractéristiques. Si les compteurs sont sur la chambre, on a des particules isolées. Si les compteurs sont loin de la chambre au-dessus l'un de l'autre, les clichés sont vides. S'ils sont loin l'un de l'autre, il y a une densité de trajectoires parallèles de l'ordre de cent par mètre carré. Avec les compteurs seuls on obtient des résultats analogues: deux compteurs éloignés progressivement l'un de l'autre donnent une courbe de coïncidences d'abord fort décroissante (petites gerbes locales) puis se stabilisent après 30 cm environ pour ne plus baisser que lentement ensuite. Si on associe à ces compteurs un troisième placé à un mètre le maximum initial pour les petites distances disparaît, et la courbe est entièrement plate, ou plutôt à faible pente. Tout ceci indique clairement l'absence dans les grandes gerbes de nombreux foyers de concentration. Il ne doit donc y en avoir qu'un, le centre de la gerbe, ou au moins un très petit nombre constituant en réalité des gerbes séparées. Dans ce ou ces centres serait alors rassemblée la plus grande partie de l'énergie, et seraient présentes les particules du plus grand pouvoir pénétrant.

Si nous nous en tenons pour l'instant à cette image, et que nous considérons les grandes gerbes comme des cascades, quelle est l'énergie totale qu'elles peuvent renfermer et qu'il faut attribuer à l'agent initial, unique, de leur formation ? Une méthode simple d'évaluation consiste à estimer le nombre de particules électroniques par le produit de la densité par la surface couverte, et de le multiplier par leur énergie moyenne. Les difficultés, ou plutôt les aléas d'une telle évaluation proviennent d'une part de l'incertitude au sujet de l'uniformité de la densité sur toute la surface, et d'autre part sur la valeur de l'énergie moyenne. Il faudrait aussi ajouter un terme pour la partie photonique, mais cela ne ferait que doubler au plus l'évaluation basée sur les électrons. Si l'on adopte le chiffre de cent par mètre carré, avec une surface couverte de 100 000 m carrés, on trouve 10^7 et l'énergie critique dans l'air étant de

10^8 électrons volts, le résultat atteindrait 10^{15}. On ne peut considérer cela comme la valeur moyenne, mais comme une valeur de l'énergie certainement présente dans les plus grandes des gerbes observées. Nous trouvons ainsi pour la première fois une énergie plus de mille fois supérieure à celle résultant de la destruction de l'atome d'uranium. Toute explication faisant intervenir un acte unique pour la création de l'agent initial paraît définitivement condamnée, sauf peut-être en utilisant une très audacieuse hypothèse que nous indiquerons tout à l'heure.

Une autre méthode d'évaluation consiste à admettre que les gerbes sont produites dans la partie supérieure de l'atmosphère et qu'elles traversent par conséquent une vingtaine d'unités de radiation. Dans ce cas, une gerbe contenant après cette traversée encore plus de 100 000 électrons, doit avoir été déclenchée par une particule initiale ayant plus d'un million de fois l'énergie critique. Pour l'air, cela donne 10^{13}. Pour une gerbe de plus d'un million d'électrons, ce qui paraît être fréquent, il faudrait au moins un facteur 10 de plus et nous nous trouvons avoisiner l'évaluation de tout à l'heure. On peut donc considérer comme assurée l'existence d'un agent porteur d'énergies de l'ordre de 10^{14} à 10^{15} électrons volts dans les parties supérieures de l'atmosphère, – soit cent mille milliards à un million de milliards.

Cette conclusion atteinte, il faudrait encore, pour bien comprendre le phénomène des grandes gerbes, s'assurer que leur structure correspond bien à celle de cascades, et sinon, étudier les causes de cette différence. Il faudrait ensuite examiner la nature de l'agent producteur et la région de l'atmosphère où cette production a lieu.

Le premier point a donné lieu à de nombreuses recherches, effectuées par des groupes italiens, américains et français. En résumé, il s'est montré que les grandes gerbes avaient la structure de cascades et suivaient des lois de distribution correspondant aux calculs théoriques de Molière. Mais la présence d'un pourcentage bien défini, environ 2 % de particules pénétrantes (mésons isolés), n'est pas explicable dans cette hypothèse de la cascade pure.

Le second point est moins satisfaisant encore puisque la présence d'électrons est à peu près exclue parmi les corpuscules du rayonnement primaire à son entrée dans l'atmosphère. Comment ces électrons de très haute énergie peuvent-ils prendre naissance à partir des protons primaires ou des mésons auxquels ceux-ci donnent naissance par choc nucléaire ? C'est en somme toute la question de la composante molle, dont les grandes gerbes représentent une portion peut-être fort importante.

Nous avons vu que des mésons de grande énergie pouvaient donner par choc des électrons également très énergiques. Ils peuvent aussi se décomposer par radioactivité en donnant de tels électrons. Mais la probabilité de décomposition en vol pour des mésons très énergiques est très faible. Les chances de produire des chocs assez directs sont faibles également, et c'est pourquoi depuis quelques années le rôle d'un méson à vie courte ou à grande interaction électronique a été invoqué. Le

méson pourrait être créé lors des chocs nucléaires et se décomposer ou donner une forte proportion de chocs électroniques. Il semble bien que les mésons π, au moins les π neutres, doivent avoir une vie très courte, de l'ordre de 10^{-14} secondes.

Les observations dans les plaques photographiques montrent parfois, associés dans les étoiles de grande énergie avec les trajectoires des protons, des faisceaux étroits de particules de très grande vitesse, dites relativistes, contenant essentiellement des mésons. Ce sont eux qui par leur décomposition et leurs chocs viendront ensuite constituer la composante électronique qui est absente du phénomène nucléaire direct. Mais l'observation la plus probante peut-être a été faite tout récemment par MARSCHACK et son école, à l'aide d'un bloc de vingt plaques photographiques à émulsion épaisse (100 μ), séparés par des plaques de cuivre de 3 mm. Dans la septième plaque à partir du haut a eu lieu un choc nucléaire d'une extrême violence, provoqué par un élément corpusculaire dirigé à 60° de la verticale. Il donne lieu à un faisceau initial de quinze particules serrées, et 21 de diffusion vingt fois plus forte. Puis plus loin, vers la douzième plaque on voit quinze faisceaux électroniques dont l'examen conduit à évaluer l'énergie à $2{,}10^{11}$ électrons volts chacun, soit $3{,}10^{12}$ au total. Un méson neutre doit s'être décomposé après 2,5 cm de parcours, donnant deux faisceaux de deux dix millièmes de radian d'écartement, d'énergie évaluée à 10^{12} chacun, ce qui, tenu compte de la relativité, donnerait une durée de vie de 10^{-14} au méson. Un autre méson neutre donne des résultats voisins. Au total, l'évaluation de l'énergie conduit à près de 10^{14} électrons volts.

Il semble bien qu'il y ait là une confirmation éclatante de la valeur extrêmement élevée de l'énergie des grandes gerbes, car ce phénomène nucléaire est forcément l'origine d'une gerbe cascade de 10^{14} ev. qui se développe dans sa descente à travers l'atmosphère. Il est clair aussi qu'un certain nombre de mésons μ vont se trouver mêlés aux électrons, comme l'expérience l'exige d'ailleurs. Etant donné le très faible écart angulaire des faisceaux initiaux, la gerbe va se constituer comme une distribution régulière autour d'une direction centrale, le centre de la gerbe ne dépassant pas quelques mètres de diamètre.

Je m'en voudrais d'insister plus longtemps sur les détails de ce phénomène des grandes gerbes qui n'est, je le répète, qu'un des rameaux de la branche scientifique nouvelle des rayons cosmiques. Il présente le caractère très moderne de battre un record, un record mondial, et de devoir le tenir sans doute pour longtemps: celui de l'énergie. Il impose ainsi à toute théorie de l'origine des rayons cosmiques une sérieuse épreuve. Les théories de désintégration d'atomes lourds ne tiennent pas. Certains auteurs avaient été jusqu'à proposer l'existence d'une antimatière, composée de protons négatifs et d'électrons positifs: des granules macroscopiques de cette matière, comme les parcelles de fer ou de pierre qui constituent les étoiles filantes, arrivant dans l'atmosphère subiraient soudain l'annihilation de tous leurs atomes simultanément. Mais cette théorie elle-même ne tient pas devant la preuve fournie par MARSCHACK,

que la grande gerbe prend naissance dans un choc nucléaire isolé. Il ne reste guère que les théories de l'accélération des particules dans des champs magnétiques variables comme ceux des taches solaires.

Mais il est probable que nous n'attendrons plus longtemps la solution de ce problème particulier et que nous nous tournerons aussitôt vers d'autres qui surgiront en foule puisqu'il est reconnu que l'avancement des sciences accélère régulièrement son mouvement depuis deux siècles. Il y a une vertu dans cette accélération, celle de pallier à l'ennui de vieillir, puisque chaque année apporte une plus riche moisson de nouveautés, mais cela a aussi quelque chose de vertigineux. Si l'on contemple le chemin parcouru depuis cinquante ans, on constate qu'il est au moins équivalent à celui parcouru pendant le siècle précédent. Doublant encore, les 25 années qui viennent doivent donner autant, ainsi que les douze années suivantes, et ainsi de suite. L'an 2000 ne serait alors atteint qu'asymptotiquement, et dans une fièvre toujours montante. Mais on peut espérer que les hommes auront assez d'esprit pour éviter cette catastrophe et sauront se tourner à temps vers d'autres problèmes, non aussi scientifiques, mais qui attendent toujours leur solution: la stabilité économique, la paix. C'est le souhait que je forme pour la nouvelle génération, celle qui verra se lever l'aube du XXIe siècle.