

Approche expérimentale.

Nous disposons, en ce tournant du siècle, d'un grand nombre d'observations astronomiques et de résultats expérimentaux fiables qui donnent à la théorie de la Relativité Restreinte une base extrêmement solide. Deux catégories de phénomènes sont concernées : d'une part les propriétés de la vitesse de la lumière dans le vide, et d'autre part les relations entre vitesse, énergie et masse d'un objet.

1. La vitesse de la lumière dans le vide ne dépend pas de la fréquence.

Pour étudier les propriétés de la lumière, on a au fil des âges, utilisé deux méthodes: la plus ancienne consiste à lire dans les astres, la plus récente est d'effectuer des expériences de laboratoire.

Un exemple contemporain de la première est l'observation des pulsars. Ces objets célestes, découverts en 1968 par Jocelyn Bell, sont le résidu d'explosion de Supernovas. De petite taille, ils sont extrêmement denses: la masse du soleil dans une sphère de 10 km de diamètre, et possèdent un fort moment dipolaire magnétique. L'axe du dipôle ne coïncide pas avec l'axe de rotation de l'astre dont le rayonnement parvient jusqu'à nous, à la manière de la lumière d'un phare, sous forme d'impulsions régulièrement espacées.

Célébrissime est le pulsar de la nébuleuse du Crabe, vestige d'une explosion qui fut observée en 1054. Il a la particularité d'émettre sur un très large spectre électromagnétique encadrant le domaine visible. Le spectre s'étend sur au moins 13 décades: des ondes radios aux rayons γ , reçus simultanément sous la forme d'impulsions de durée Δt inférieure à 3 millisecondes (Figure I-1). La variation relative de vitesse des ondes électromagnétiques sur tout le spectre observé, a une limite supérieure:

$$\frac{\Delta v}{c} \leq \frac{c \Delta t}{D}$$

où D est la distance de l'astre. Les données du pulsar du Crabe sont :

$$\Delta t = 2.6 \cdot 10^{-3} \text{ s.}$$

$$D = 2 \text{ kiloparsecs} = 6 \cdot 10^{19} \text{ m.}$$

Il en résulte l'inégalité :

$$\frac{\Delta v}{c} \leq 1.3 \cdot 10^{-14}$$

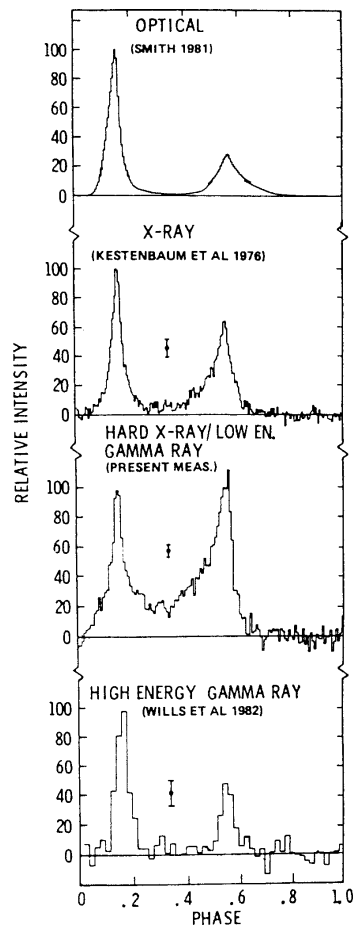


Figure I-1

Courbes de luminosité pour différentes fréquences du rayonnement détecté. (G.J. Fishman in Frontiers in Cosmic Physics, R.B. Mendell, A.I. Mincer ed. Ann. N.Y. Academy of Sciences, 655-1992-309). Le parfait synchronisme entre les signaux reçus montre l'indépendance de la vitesse de la lumière vis à vis de la fréquence.

Les grands accélérateurs offrent une autre façon de faire des comparaisons entre les vitesses que des rayonnements à des fréquences différentes ont dans le vide. Le principe est de mesurer le temps écoulé entre le départ à une extrémité d'une base de temps de vol de longueur connue et l'arrivée à l'autre extrémité. Un accélérateur linéaire comporte toujours un long tube à vide qui se prête bien à une telle expérience. En voici un exemple:

Le S.L.A.C. (Stanford Linear Accelerator) est un accélérateur linéaire d'électrons de près de 4 km de long. En 1972 (B.C. Brown, G.E. Masek, T. Maung, E.S. Miller, H. Ruderman,

W. Vernon, *Phys. Rev. Lett.* **30**-1973-763) on a utilisé des paquets d'électrons de 11 G.e.V.¹ qui produisent soit des γ de 7 G.e.V. au moins par bombardement d'une cible de cuivre escamotable, soit de la lumière visible (2 e.V.) par rayonnement synchrotron lorsqu'ils sont défléchis par un aimant, une fois la cible retirée (figure I-2).

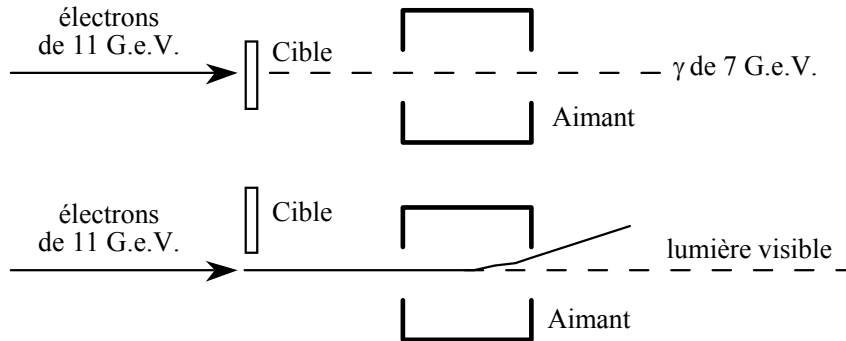


Figure I-2. Schéma des dispositifs créateurs de photons.

L'aimant défecteur placé après la cible sert à éjecter les particules chargées hors du tube qui n'est plus alors parcouru que par du rayonnement. La détection est placée à 1433 m de la source.

Les γ sont détectés par créations de paires électrons positrons dans une 2ème cible de cuivre. Les positrons de haute énergie sont dirigées par un 2ème aimant défecteur vers un compteur Cerenkov à gaz, émetteur de lumière visible, qu'un miroir renvoie sur une photocathode suivie d'un multiplicateur d'électrons (tube P.M.).

Pour détecter le rayonnement synchrotron visible, on escamote la 2ème cible et on la remplace par un prisme qui envoie cette lumière vers le même dispositif miroir/détecteur (figure I-3).

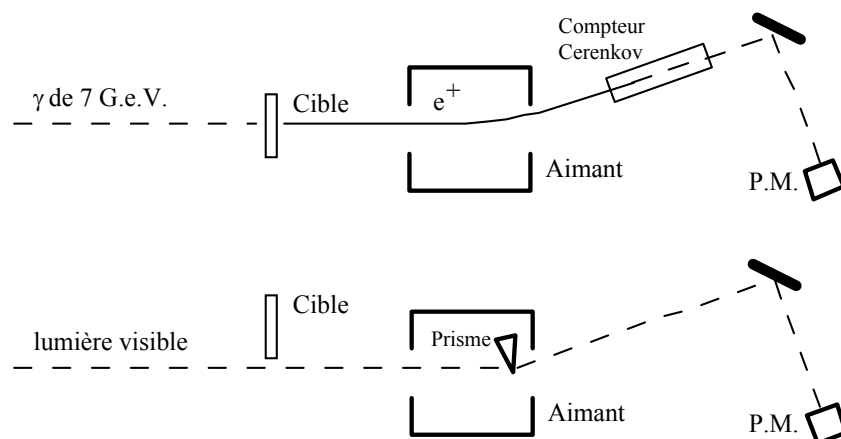


Figure I-3. Schéma des dispositifs détecteurs de photons.

¹ L'énergie est le produit de la tension d'accélération par la charge élémentaire. On l'exprime en multiples de l'unité électron-Volt ($1 \text{ e.V.} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J.}$, $1 \text{ G.e.V} = 10^9 \text{ e.V.}$).

Un jeu de caches amovibles stratégiquement placés permet de n'avoir ni γ de 7 G.e.V. ni lumière synchrotron dans le tube à vide, afin de mesurer le bruit de fond de l'installation.

La technique même de l'accélérateur linéaire procure les moyens de repérer avec précision, par rapport à une base de temps commune, les instants d'émission et de détection des deux sortes de rayonnement. On a ainsi obtenu des temps de vol identiques aux erreurs de mesure près : $4.3 \cdot 10^{-6} \text{ s.} \pm 2.5 \cdot 10^{-11} \text{ s.}$ sur 1433 m, ce qui donne

$$\frac{\Delta c}{c} = 6 \cdot 10^{-6}$$

précision qui reste inférieure à celle des observations astronomiques. Mais la concordance est suffisante pour affirmer que dans tous les cas d'observation ou de mesure, on a trouvé une vitesse de la lumière dans le vide indépendante de la fréquence.

2. La vitesse de la lumière dans le vide n'obéit pas à la règle habituelle de composition des vitesses.

En 1810, Arago eut la surprise de constater qu'un prisme dispersait avec les mêmes angles pour les mêmes couleurs (longueur d'onde) la lumière d'une source proche et immobile et la lumière d'une étoile lointaine. Il s'attendait à ce que le mouvement d'entraînement (orbital) de la terre modifie la vitesse de phase v_φ des ondes donc l'indice de réfraction $\eta = \frac{c}{v_\varphi}$.

L'observation des étoiles doubles, sur une suggestion de De Sitter (*Proc. Amsterdam Acad.* 16-1913-395), apporte des éléments chiffrés. Dans un tel système, deux astres brillants tournent autour de leur centre d'inertie. Lorsque la terre se trouve dans le plan des orbites, il est possible de déterminer la vitesse de l'un ou l'autre des partenaires en mesurant le déplacement Doppler des raies spectrales de la lumière émise par chacun d'eux.

L'effet Doppler concerne la fréquence d'une source en mouvement par rapport à un observateur. Soit une onde plane monochromatique émise par cette source. La phase

$$\phi = \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t$$

ne dépend pas du référentiel dans lequel on observe la propagation de l'onde: invariance par changement de repère. Admettons que l'écriture précédente de la phase corresponde au référentiel R d'un observateur immobile. La source a dans ce référentiel, une vitesse instantanée située dans le plan xOy et dont la composante suivant la ligne de visée prise pour axe des x est u. Les ondes se propagent dans la direction de Ox.

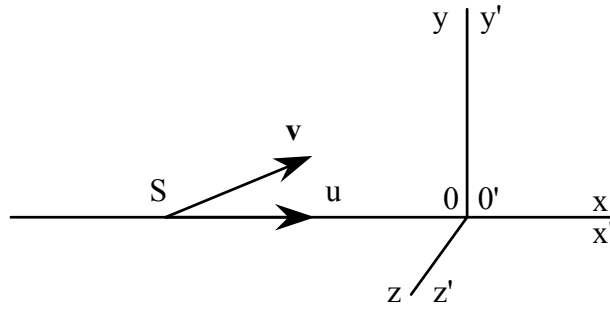


Figure I-4.

Dans le référentiel R' qui se déplace par rapport à R avec la vitesse u suivant Ox et dont l'origine O' coïncide avec O à l'instant t ,

$$\phi = k'x' - \omega't = kx - \omega t.$$

Or passant de R' à R au moyen de la transformation de Galilée, on obtient

$$x' = x - ut, \quad y' = y,$$

de sorte que

$$\phi = k'x' - \omega't = k'x - k'ut - \omega't = k'x - \omega'(1 + k'u/\omega')t = kx - \omega t.$$

La dernière égalité est vérifiée pour

$$k = k', \quad \omega = \omega'(1 + \varepsilon_{\pm}u/v'_{\phi})$$

où $v'_{\phi} = \frac{\omega'}{k}$ est la vitesse de phase dans le référentiel R' et

$\varepsilon_{\pm} = 1$ si k et u sont de même signe, la source se rapproche de l'observateur,
 $\varepsilon_{\pm} = -1$ si k et u sont de signes contraires, la source s'éloigne de l'observateur.

Revenons à l'étoile double, plus précisément à celui des deux astres situé le plus loin du centre d'inertie. En A sur la figure I-5, il s'éloigne d'un observateur terrestre ce qui provoque un déplacement vers le rouge, en B diamétralement opposé, il se rapproche : déplacement vers le bleu.

Par rapport à la pulsation ω_S de la source, la pulsation ω_T reçue par un observateur terrestre est :

$$\omega_T = \omega_S \left(1 + \frac{u}{c} \right)$$

où u est la composante algébrique de la vitesse suivant l'axe étoile-double \rightarrow Terre. Soit R le rayon de l'orbite et Ω la vitesse angulaire, alors

$$u = -\Omega R \sin \Omega t.$$

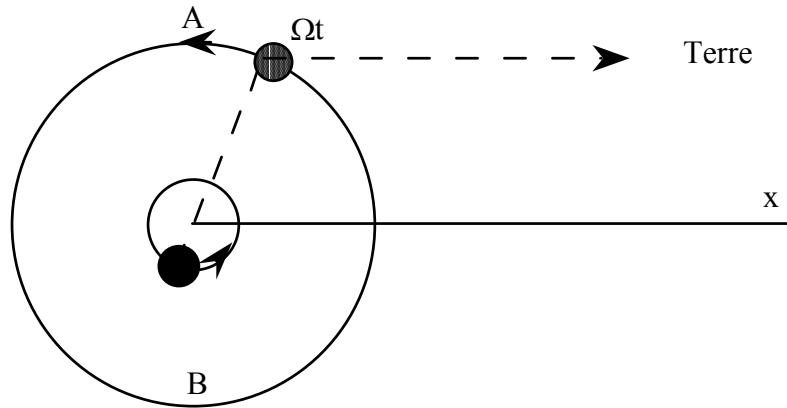


Figure I-5.

Si la vitesse de la lumière dépend du mouvement de la source, le trajet étoile double \rightarrow Terre sur la distance d prend un temps : $\frac{d}{c+u}$, plus long lorsque la source s'éloigne de la Terre que lorsqu'elle s'en approche. Si t_S est l'instant d'émission, l'observateur terrestre reçoit la lumière au temps:

$$t_T = t_S + \frac{d}{c+u} = t_S + \left(1 - \frac{u}{c}\right) \frac{d}{c}$$

lorsque, cas général, on a $u \ll c$. La fréquence reçue par l'observateur terrestre est alors :

$$\omega_T = \omega_S \left(1 - \frac{\Omega R}{c} \sin \Omega t_S\right) = \omega_S \left[1 - \frac{\Omega R}{c} \sin \Omega \left(t_T - \frac{d}{c} - \frac{\Omega R d}{c^2} \sin \Omega t_S\right)\right].$$

Posant

$$\tau = t_T - \frac{d}{c},$$

et négligeant les termes d'ordre supérieur, le déplacement Doppler relatif s'écrit:

$$- \frac{\Omega R}{c} \sin \left(\Omega \tau - \frac{\Omega^2 R d}{c^2} \sin \Omega \tau \right)$$

La modulation de la fréquence par $\frac{\Omega^2 R d}{c^2} \sin \Omega \tau$ produit une déformation caractéristique de la sinusoïde comme le montre la figure I-6:

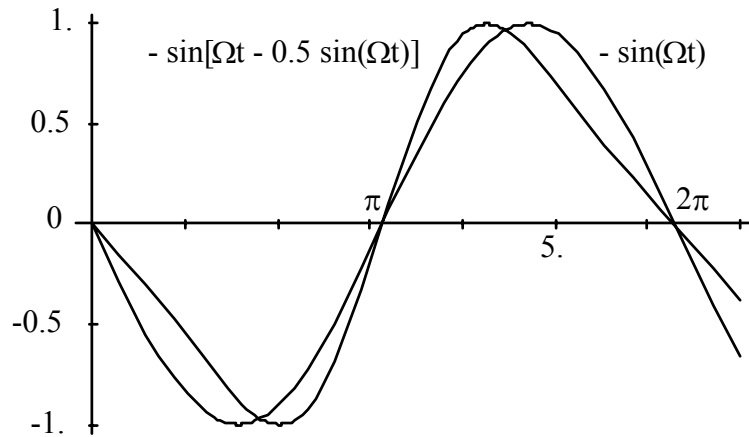


Figure I-6.

L'exemple fourni par les deux partenaires de l'étoile double Castor C (figure I-7) est une des nombreuses observations astronomiques qui n'ont jamais permis de mettre en évidence un écart significatif à la sinusoïde (A.H. Joy, R.F. Sanford, *Astrophys. J.* **64**-1926-250). On conclut qu'à 10^{-6} près la vitesse de la lumière est indépendante de celle de la source.

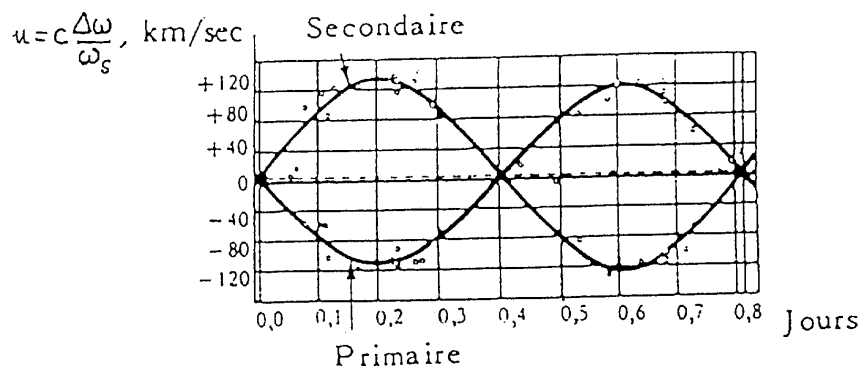


Figure I-7.

Des expériences faites auprès des grands accélérateurs de particules confirment ce résultat. La technique est encore celle du temps de vol. Au CERN (Centre Européen de Recherches Nucléaires à Genève) par exemple, on a mesuré la vitesse de rayons γ provenant de la désintégration de pions neutres (T. Alväger, F.J.M. Farley, J. Kjellman, I. Wallin, *Phys. Lett.* **12**-1964-260). Ces particules produites dans l'impact de protons de haute énergie, 19 G.e.V., sur des cibles en Béryllium, donnent naissance avec une probabilité de 99% à deux γ

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma.$$

Les pions neutres ont un temps de décroissance moyen de $0.84 \cdot 10^{-16}$ s. On observe les γ dans une direction faisant un angle de 6° avec celle des protons incidents. Des aimants sont placés sur leur trajet afin de d'éliminer les particules chargées. Les protons sont répartis en paquets (bunches) de quelques nanosecondes ($1 \text{ ns} = 10^{-9}\text{s}$) toutes les 105 ns. Les π^0 , d'énergie supérieure à 6 G.e.V., et les γ sont émis avec cette même périodicité temporelle ce qui permet

des mesures de vitesse par temps de vol entre deux détecteurs situés aux points A et B, loin ($\approx 100\text{m}$) de la source, et à 31,45 m l'un de l'autre distance telle que le temps mis pour la parcourir à la vitesse c soit égal à celui qui sépare deux paquets de protons, et que l'on déplace ensuite en A' et B' ($AA'=B'B$).

La vitesse de la source est égale à $0.99975 c$. La vitesse de la lumière (γ de 6 G.e.V.) qu'elle émet est égale à 10^{-5} près à celle mesurée lorsque la source est fixe.

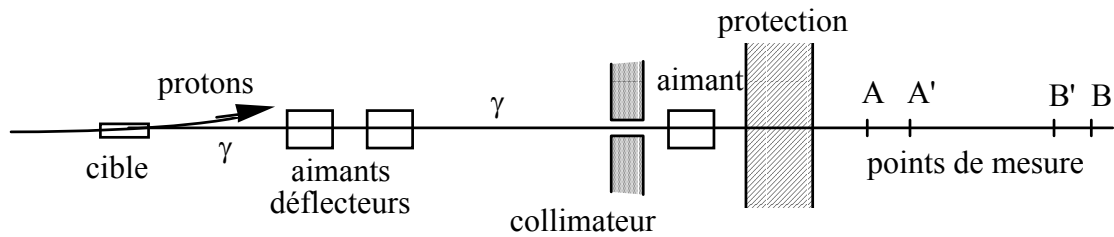


Figure I-8.

Schéma du dispositif expérimental de la mesure de la vitesse de la lumière émise par une source mobile.

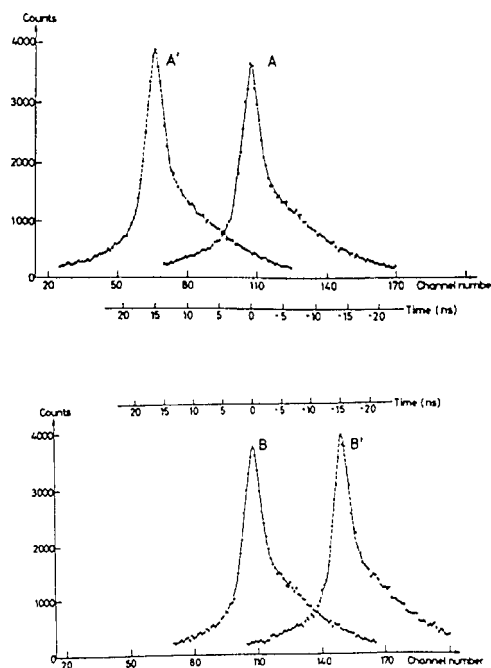


Figure I-9.

Comptages en fonction du temps aux points de mesure A, A', B, B'.

La distance AB fait que les γ reçus en B en provenance de l'interaction d'un certain paquet d'électrons arrivent en même temps qu'en A ceux résultant de l'interaction du paquet suivant (zéro de l'échelle des temps).

Ainsi, mesures en laboratoires et observations astronomiques concordent aussi sur l'indépendance de la vitesse de lumière vis à vis des changements de référentiel. Les étoiles doubles observées étant réparties de façon quelconque dans le ciel, on en conclut que la vitesse de la lumière ne dépend pas non plus de la direction (isotropie).

3. Energie et vitesse d'un objet matériel.

Energie et quantité de mouvement (impulsion) sont des grandeurs importantes en mécanique en raison des lois de conservations qui leurs sont associées. Jusqu'en 1905, on admettait que la masse m (inerte) d'un objet en mouvement est une constante, énergie cinétique E_C et impulsion p étant reliées entre elles par:

$$(3-1) \quad E_C = \frac{p^2}{2m}.$$

Or il existe des expériences dans lesquelles on mesure indépendamment énergie cinétique et impulsion.

Lorsqu'on dispose d'accélérateurs de particules il est relativement facile de mesurer par temps de vol la vitesse des objets accélérés. Les électrons, très légers, se prêtent bien à ce genre d'expérience.

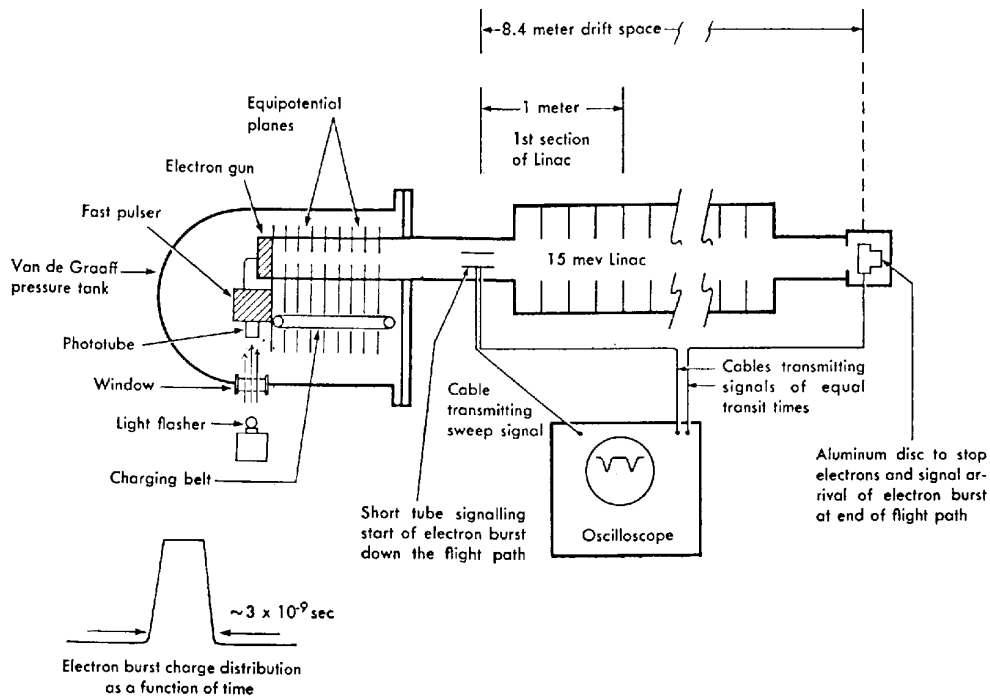


Figure I-10.

Mesure de la vitesse d'électrons accélérés.

La figure I-10 représente un dispositif (W. Bertozzi, *Am. J. of Phys.* **32**-1964-551), permettant de déterminer à la sortie d'un accélérateur de type Van de Graaff, le temps de vol donc la vitesse de paquets de courte durée ($3 \cdot 10^{-9}$ s) d'électrons d'énergie donnée. Les résultats obtenus sont rassemblés dans le tableau I-1 et comparés, pour chaque énergie, à la vitesse v_N calculée à partir de la formule habituelle de l'énergie cinétique:

$$(3-2) \quad E_C = \frac{mv_N^2}{2}.$$

On ne trouve pas la proportionnalité, prévue par la mécanique newtonienne, entre l'énergie cinétique, connue par la tension d'accélération, et le carré de la vitesse, mais celle ci tend asymptotiquement vers c lorsque l'énergie augmente. Les lois ordinaires de la mécanique ne s'appliquent donc pas lorsque les énergies particulières sont élevées.

Tableau I-1.

<i>Energie</i>	<i>vitesse mesurée</i>	<i>vitesse calculée par (3-1)</i>
M.e.V. (10^6 e.V.)	u/c	v_N/c
0.5	0.867	1.4
1	0.910	2
1.5	0.960	2.4
4.5	0.987	4.4
15	1.	8

Les techniques utilisées dans l'expérience précédente ne permettent pas d'accélérer les électrons au delà de 15 M.e.V. Il existe des machines beaucoup plus puissantes comme le SLAC. Le montage décrit au § 1 pour mesurer la vitesse de la lumière, peut aussi servir à mesurer celle des électrons. Les aimants disposés aux deux extrémités de la base de temps de vol courbent les trajectoires des électrons qui émettent alors du rayonnement synchrotron. La comparaison des temps d'émission fournit une détermination de la différence entre la vitesse de la lumière et celle des électrons. On a trouvé ainsi

$$\frac{\Delta t}{t} = \frac{u_e - c}{c} \sim -1.3 \cdot 10^{-6}$$

pour des électrons de 11 G.e.V.

Pour préciser la relation entre énergie et impulsion, un montage simple et compact (Sherwood Parker, *Am. J. of Phys.* **40**-1972-241) utilise comme objets en mouvement les électrons d'assez grande énergie, émis par une source radioactive β : du Strontium 90. Un champ magnétique uniforme oblige ces particules chargées à décrire des demi-cercles au bout desquels on les compte par un dispositif qui mesure en même temps leur énergie cinétique.

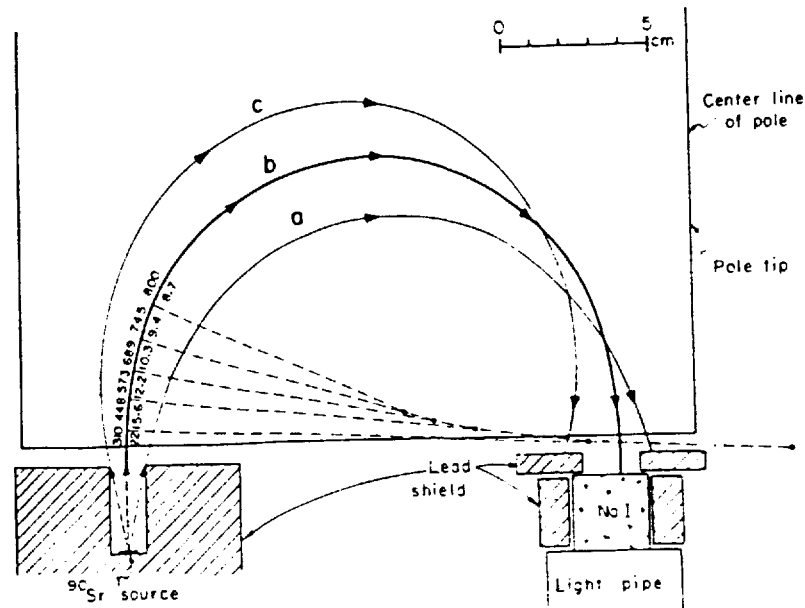


Figure I-11.

Une particule chargée dans un champ magnétique \mathbf{B} a une trajectoire circulaire de rayon

$$R = \frac{p}{qB} = \frac{mv}{qB}$$

où q est la charge, et dont le plan est orthogonal à la direction de \mathbf{B} . Dans l'expérience, les électrons sont collimatés de façon à donner à leur vitesse initiale une direction orthogonale à celle du champ magnétique. Le détecteur est disposé à une distance d (variable) de la source dans une direction également orthogonale au champ.

Fixer d revient à fixer R ($=d/2$) donc p par $p = qBR$. On mesure la hauteur des signaux, proportionnelle à l'énergie cinétique de l'électron incident, en fonction de la distance d entre source et détecteur, ce qui revient à mesurer E_c en fonction de p . Le résultat de cette expérience est présenté sur la figure I-12.

Lorsque l'énergie dépasse 2 Mev, la variation expérimentale (cercles pleins avec barres d'erreur) est plutôt :

$$E_c = pc - 0.5 \text{ M.e.V.}$$

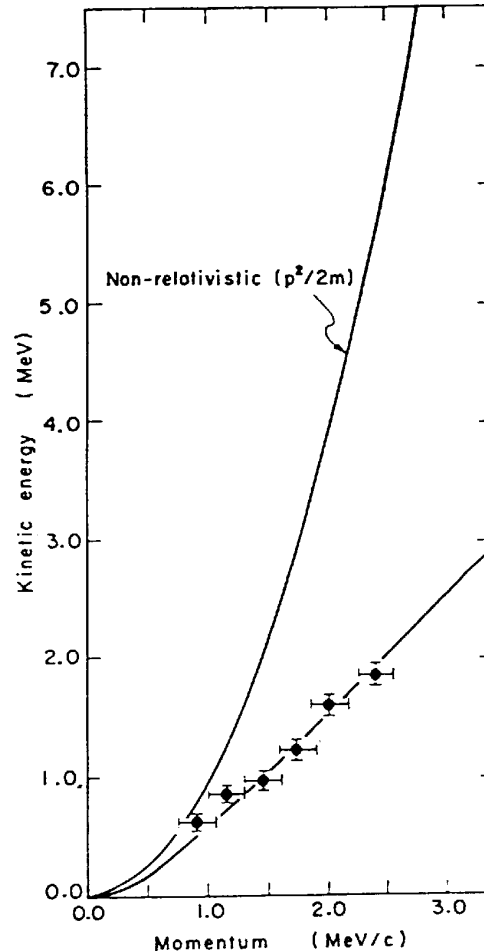


Figure I-12.

Cette relation, associée à l'existence d'une vitesse limite égale à c , n'est pas compatible avec une masse indépendante de la vitesse. Dans de telles expériences la masse apparaît comme le seul paramètre libre. Dépendrait elle de la vitesse?

Les expériences décrites dans les §§ 1 et 2 incitent à compléter le principe très ancien (Galilée), de l'égalité des référentiels d'inertie devant les lois de la physique par un principe d'invariance de la vitesse de la lumière. Comme on va le voir dans le chapitre suivant, une conséquence naturelle en est la transformation de Lorentz qui régit les changements de coordonnées entre référentiels en mouvement uniforme.