Propriétés du champ électrostatique

13/11/2026

Liaison avec le champ gravitationnel

Pascal DUBOIS

Mots-clés : champ gravitationnel ; gravitation ; interaction gravitationnelle ; rayon de Schwarzschild ; champ électrostatique ; champ électrique ; interaction électrostatique ; charge ; désintégration du neutron ; proton ; électron ; neutrino ; rayon du proton ; constante de structure fine.

Résumé :

La démarche adoptée pour construire le champ gravitationnel peut être transposée au champ électrostatique : l'interaction électrostatique résulte d'un échange d'énergie entre les particules chargées et le champ global qu'elles créent.

Comme le champ gravitationnel, le champ électrostatique est caractérisé par son énergie et son rayon d'action limite ; il est périodiquement rafraîchi par des ondes assurant l'échange d'énergie entre charges et champ.

L'attribution d'une énergie négative aux champs électrostatiques permet d'expliquer la répulsion des charges de même signe et l'attraction des charges opposées. D'autre part, le partage de l'énergie d'interaction entre les particules chargées implique que l'énergie du champ électrostatique d'une particule est proportionnelle à l'énergie du champ gravitationnel de cette particule.

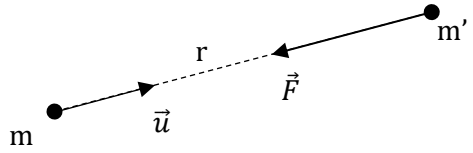
L'analyse de la désintégration du neutron libre permet précisément de dériver la création des champs électrostatiques du proton et de l'électron de l'énergie d'interaction du champ gravitationnel associé à ces deux particules. L'interprétation que nous proposons n'oblige pas à faire appel à l'émission d'un antineutrino électronique : l'énergie finale de l'électron résulte de la perte d'énergie subie lors de l'éloignement dans le champ électrostatique.

S'agissant du proton, le rayon limite du champ électrostatique peut être identifié au rayon mesuré par les expériences de diffusion.

Les paramètres du champ (énergie et rayon) associé au proton ou à l'électron sont variables en fonction de l'énergie des particules, mais caractérisés par leur produit qui est, lui, constant. Cette constance traduit la constance du ratio entre fréquence énergétique des ondes et fréquence de rafraîchissement. Ce ratio peut être assimilé à la constante de structure fine.

1. Propriétés du champ gravitationnel

Dans la théorie de la gravitation newtonienne, l'attraction gravitationnelle est modélisée par l'intermédiaire d'un champ vectoriel proportionnel à la masse source du champ et variant en raison inverse du carré de la distance à celle-ci. La force exercée entre deux sources est égale au produit de la masse d'une source par le vecteur champ attaché à l'autre source :



$$\vec{F} = m' \vec{G}(\vec{r}) = - (Gmm'/r^2) \vec{u} \qquad (1.1)$$

Nous avons proposé une nouvelle approche énergétique de la gravitation[1] conservant le principe de décroissance en $1/r^2$. En revanche :

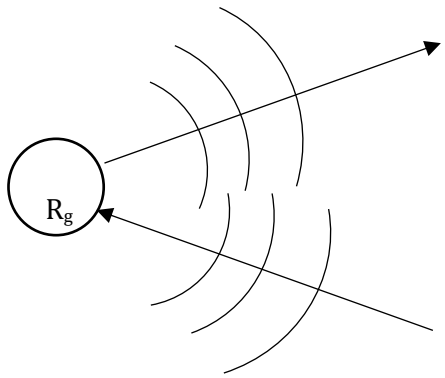
- ce ne sont plus les masses au repos des sources gravitationnelles qui sont prises en compte, mais leurs énergies totales ;
- l'énergie au repos varie lorsque la distance entre les sources varie.

Le champ gravitationnel, qui a une réalité physique, est considéré comme une distribution d'énergie dans l'espace entier, exception faite d'une boule de rayon R_g centrée sur la source (ce qui permet de conserver une valeur finie à l'énergie totale du champ W_g).[2] L'énergie contenue dans une coque sphérique de rayon r et d'épaisseur dr s'écrit :

$$dW_c = (R_g/r^2) W_g \, dr \qquad (1.2)$$

Un rafraîchissement du champ s'effectue de façon périodique à partir de deux ondes gravitationnelles sphériques se déplaçant à la vitesse de la lumière [3] :

- l'une propageant depuis la source de l'énergie qu'elle cède progressivement au champ ;
- l'autre propageant vers la source l'énergie qu'elle prélève sur le champ.



A la limite R_g du champ, chaque onde transporte une énergie égale à l'énergie de la source (W). A la distance r de la source, l'énergie transportée vaut :

$$W(r) = (R_g/r) W \qquad (1.3)$$

A chaque rafraîchissement du champ, l'émission et la réception d'énergie se font de façon alternée en un temps :

$$T = R_g/\mathbf{c}. \qquad (1.4)$$

[4]

[1] Cf note « Une autre approche de la relativité ».
[2] Cf note « Champ gravitationnel, Principe fondamental de la dynamique et Mécanique quantique ».
[3] Ces ondes ne sont pas de même nature que celles qui sont définies dans la théorie de la relativité générale.
[4] La note citée en [2] montre que ce choix permet d'établir l'équation fondamentale de la dynamique à partir du champ gravitationnel.

Le choix de prendre l'énergie maximale transportée par les ondes gravitationnelles égale à l'énergie de la source [5] conduit à prendre pour limite d'extension du champ le rayon de Schwarzschild [6]:

$$R_g = 2\ G\ W/\ \mathbf{c}^4 = 2\ Gm/\mathbf{c}^2 \qquad (1.5)$$

Pour $r \gg R_g$ on peut considérer que la relation (1.1) reste valable :

$$\vec{F} = (W'/\mathbf{c}^2)\ \vec{G}(\vec{r}) = -\ (G\ W\ W'/\ \mathbf{c}^4\ r^2)\ \vec{u} \qquad (1.6)$$

L'interaction gravitationnelle consiste en un échange d'énergie entre les sources gravitationnelles et le champ global créé par ces sources.

Ce champ global s'obtient, comme dans la gravitation newtonienne, par addition vectorielle des champs individuels. En chaque point du champ résultant, la densité d'énergie est proportionnelle au carré de la norme du vecteur champ :[7]

$$\delta E(r,r') = k \parallel \vec{G}(\vec{r}) + \overrightarrow{G'}(\overrightarrow{r'}) \parallel^2 = k \parallel \vec{G}(\vec{r}) \parallel^2 + k \parallel \overrightarrow{G'}(\overrightarrow{r'}) \parallel^2 + 2k\ \vec{G}(\vec{r})\ \overrightarrow{G'}(\overrightarrow{r'}) \qquad (1.7)$$

Le terme $2k\ \vec{G}(\vec{r})\ \overrightarrow{G'}(\overrightarrow{r'})$ représente l'énergie d'interaction s'ajoutant à l'énergie des champs des sources supposées isolées. Le choix d'une valeur positive pour k ($k = 1/\ 4\pi G$) conduit à donner une énergie positive au champ gravitationnel ainsi qu'à la variation de l'énergie d'interaction lorsque les sources se rapprochent. L'énergie d'interaction étant transférée aux sources, l'énergie de ces dernières augmente ce qui explique leur attraction.[8]

L'expression de l'énergie d'interaction du champ, opposée à la valeur de l'énergie potentielle[9], fait apparaître un facteur 2 par rapport à l'expression newtonienne. Cela en raison de la variation de l'énergie au repos :

$$E_{ig} = 2\ G\ W\ W'/\ \mathbf{c}^4\ r \qquad [10] \qquad (1.8)$$

[5] La note citée en [2] montre que ce choix permet de faire jouer à l'onde gravitationnelle résultante le rôle de l'onde pilote imaginée par louis de Broglie.

[6] Cela n'est pas étonnant puisque, dans la comparaison faite entre notre approche de la gravitation et la théorie de la relativité générale, nous nous référons à la métrique de Schwarzschild, qui est précisément définie à l'extérieur de la sphère de rayon R_g.

[7] cf. note « Champ gravitationnel, Principe fondamental de la dynamique et Mécanique quantique », paragraphe 1.2.2. Interaction de deux sources.

[8] cf. note « Champ gravitationnel, Principe fondamental de la dynamique et Mécanique quantique », paragraphe 1.3.2. Sources en interaction : échanges d'énergie entre sources et champ (reproduit en annexe).

[9] Avec un potentiel nul à l'infini.

[10] Expression valide pour $r \gg R_g$.

2. Construction du champ électrostatique

2.1. Analogie avec le champ gravitationnel

La force s'exerçant entre deux charges fixes q et q' est donnée par la loi de Coulomb, qui s'écrit de façon analogue à la loi donnant l'attraction gravitationnelle :

$\vec{F} = q' \vec{E}(\vec{r}) = (qq'/ 4\pi\varepsilon_0 r^2) \vec{u}$ $\vec{E}(\vec{r})$ étant le vecteur champ électrostatique. (2.1)

La première différence par rapport à l'interaction gravitationnelle tient au fait que les charges se présentent sous forme de charges élémentaires qui ne peuvent pas être fusionnées. On s'intéressera donc à l'interaction entre charges élémentaires de valeur (e) positive ou négative.

Deuxièmement, les charges de même signe se repoussent tandis que les charges de signes contraires s'attirent. Pour expliquer la répulsion des charges de même signe, il est nécessaire de choisir le coefficient k négatif dans la formule (1.7) transposée au champ électrostatique :

$$\delta E(r,r') = k \| \vec{E}(\vec{r}) + \overrightarrow{E'}(\overrightarrow{r'}) \|^2 = k \| \vec{E}(\vec{r}) \|^2 + k \| \overrightarrow{E'}(\overrightarrow{r'}) \|^2 + 2k \vec{E}(\vec{r}) \overrightarrow{E'}(\overrightarrow{r'}) \quad (2.2)$$

Cela conduit à un champ électrostatique d'énergie négative pour une charge isolée.
Le choix $k = -\varepsilon_0/2$ donne à l'énergie d'interaction du champ créé par deux charges une valeur opposée à celle de l'énergie potentielle.

Comme pour le champ gravitationnel, le phénomène d'attraction ou de répulsion des charges suppose un échange d'énergie entre charges et champ par l'intermédiaire d'ondes de rafraîchissement. Mais une troisième différence doit être signalée : on ne peut pas associer a priori une énergie à une charge donnée, comme on le fait pour la masse d'une source gravitationnelle.[11] Et les charges restent invariables, à la différence de l'énergie des sources du champ gravitationnel.

L'énergie moyenne W_q du champ électrostatique représente la moitié de l'énergie W échangée par les ondes sortantes. Si, en raison d'une interaction entre charges, l'énergie des ondes entrantes diffère de W, la différence sera transmise aux particules porteuses de charge. Seule cette différence modifie l'énergie totale des particules et explique l'attraction ou la répulsion.

Dernière différence, si les charges sont mobiles, il est nécessaire d'introduire le champ magnétique lié à leur déplacement.[12] Notons toutefois que le champ magnétique n'implique pas d'échange d'énergie avec les sources.

[11] Cf paragraphe 2.3. L'énergie du champ électrostatique d'une particule est proportionnelle à l'énergie du champ gravitationnel de cette particule.
[12] Cf note « Champ magnétique. Liaison avec le champ électrostatique ».
Dans le cas du champ gravitationnel, l'effet du champ gravitomagnétique est trop faible pour être pris en considération, sauf à des vitesses relativistes.

En raisonnant pour construire le champ électrostatique de la même façon que nous l'avons fait pour le champ gravitationnel, on obtient les caractéristiques reportées dans le tableau suivant :

	Champ gravitationnel [13]	***Champ électrostatique***
Champ créé par une source gravitationnelle ou une charge élémentaire isolée		
Vecteur champ	$\vec{G}(\vec{r}) = -(GW/\mathbf{c}^2 r^2)\,\vec{u}$	$\vec{E}(\vec{r}) = (e/4\pi\varepsilon_0 r^2)\,\vec{u}$
Densité d'énergie du champ [14]	$\delta W_g(r) = (R_g/4\pi r^4) W_g$ $= (1/4\pi G)(G\,W/\mathbf{c}^2 r^2)^2$	$\delta W_q(r) = (R_q/4\pi r^4)\,W_q$ $= -(\varepsilon_0/2)(e/4\pi\varepsilon_0 r^2)^2$ [15]
Relation entre rayon et énergie du champ	$R_g W_g = GW^2/\mathbf{c}^4$ (2.3)	$R_q W_q = -e^2/8\pi\varepsilon_0$ (2.4)
Energie du champ	$W_g = W/2$ [16]	*Voir ci-dessous*
Rayon du champ	$R_g = 2GW/\mathbf{c}^4$ rayon de Schwarzschild	*Voir ci-dessous*
Périodicité de rafraîchissement	$T_g = 2R_g/\mathbf{c}$	$T_q = 2R_q/\mathbf{c}$
Champ créé par deux sources gravitationnelles ou deux charges élémentaires		
Energie d'interaction	$Ei_g = 2\,G\,W\,W'/\mathbf{c}4\,r_0$ (2.5) $(r_0 \gg R_g)$	$E_{iq} = -e\,e'/4\pi\varepsilon_0 r_0$ [17] (2.6)

Energie et rayon du champ électrostatique : ces deux paramètres sont liés par la relation (2.4).
Quelle énergie doit-on donner aux champs des charges positives et négatives ?
Nous examinerons ce point au paragraphe 2.3 (Partage de l'énergie d'interaction) et au chapitre 3 (Désintégration du neutron libre).

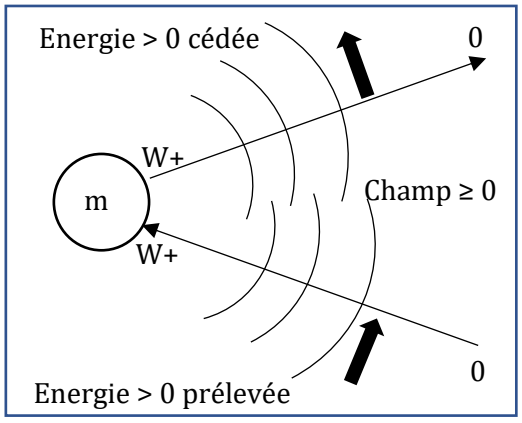
Périodicité du rafraîchissement : le choix $T_q = 2R_q/\mathbf{c}$ est proposé par analogie avec le champ gravitationnel. Il sera également discuté au paragraphe 2.3.

[13] Il s'agit du champ gravitationnel proposé dans notre nouvelle approche.
[14] La densité d'énergie du champ peut s'exprimer de deux façons :
- d'une part à partir du rayon et de l'énergie totale du champ,
- d'autre part à partir du carré du vecteur champ.

[15] Comme nous l'avons expliqué plus haut, W_q a une valeur négative.
[16] W_g est la valeur moyenne de l'énergie du champ gravitationnel.
[17] En ce qui concerne l'énergie d'interaction, on peut admettre que la relation (2.4) donnant E_{iq} est valable quel que soit la distance r_0 entre les charges en raison de l'invariance de ces dernières, rappelée plus haut.

2.2. Charges en interaction

Commençons par rappeler le schéma de rafraîchissement adopté pour le champ gravitationnel et comment nous expliquons l'attraction des sources gravitationnelles par un échange d'énergie entre source et champ.

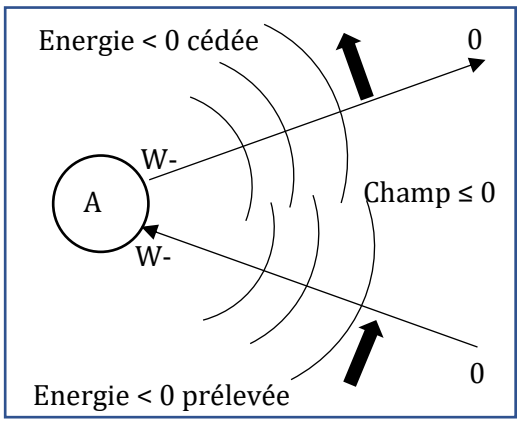


Champ gravitationnel

L'énergie du champ est positive. L'énergie des ondes varie entre W+ et 0 ; les ondes sortantes **cèdent** de l'énergie positive, les ondes entrantes en **prélèvent**.
En cas d'interaction de deux sources, chaque onde entrante prélève de l'énergie positive sur le champ créé par l'autre source. Cette énergie prélevée augmente lorsque les sources se rapprochent (ce qui correspond à une variation d'énergie d'interaction positive). Le transfert de cette énergie aux sources explique l'attraction.

Pour étendre au champ électrostatique ce type d'analyse, il est nécessaire d'introduire non seulement un champ d'énergie négative (oscillant entre W- et 0), mais aussi des ondes de rafraîchissement cédant ou prélevant une énergie positive ou négative. La distinction entre deux types de champ s'effectue de la façon suivante :

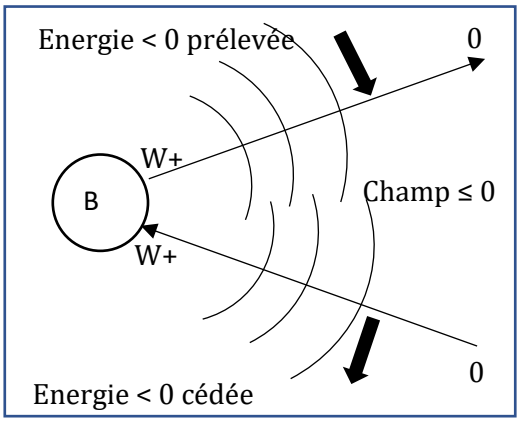
- pour le type A , les ondes sortantes (d'énergie négative W-) cèdent cette énergie au champ, les ondes entrantes en prélèvent pour ramener l'énergie du champ à 0;
- pour le type B , les ondes sortantes (d'énergie positive W+) prélèvent l'énergie W- sur le champ, les ondes entrantes en cèdent pour ramener l'énergie du champ à W-.



Champ électrostatique de type A

Ce cas est l'exact opposé du champ gravitationnel.
L'énergie du champ est négative. L'énergie des ondes varie entre W- et 0 ; les ondes sortantes **cèdent** de l'énergie négative, les ondes entrantes en **prélèvent**.
En cas d'interaction de deux champs de type A, chaque onde entrante prélève de l'énergie négative sur le champ créé par l'autre charge. L'énergie prélevée augmente en valeur absolue lorsque les charges se rapprochent (ce qui correspond à une variation d'énergie d'interaction négative). Le transfert de cette énergie négative aux particules portant les charges explique la répulsion.

Champ électrostatique de type B



L'énergie du champ est négative. L'énergie des ondes varie entre W+ et 0 . Les ondes sortantes **prélèvent** de l'énergie négative, les ondes entrantes en **cèdent**.

Interaction de deux charges B1 et B2 :

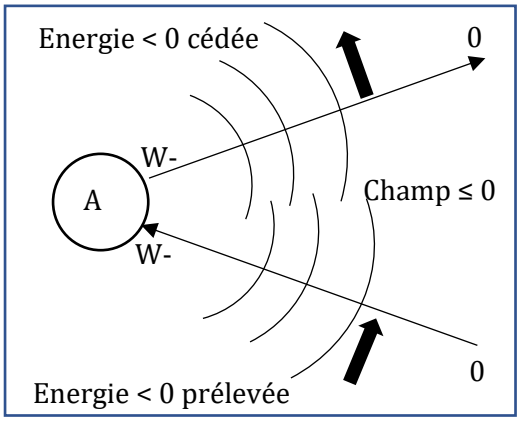
B1 prélève une énergie (ΔW-) sur le champ de B2, elle prélève donc (W-) - (ΔW-) sur son propre champ.

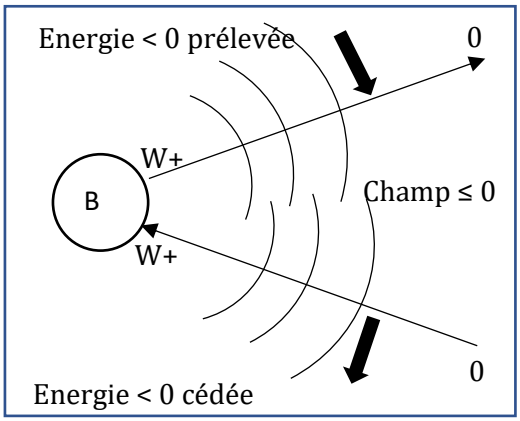
De ce fait, le champ de B1 passe de (W-) à (ΔW-). Pour ramener cette valeur à (W-), l'onde entrante cède une énergie égale à (W-) - (ΔW-), son énergie passe de 0 à (W+) + (ΔW-).

Il y a transfert d'une énergie négative (ΔW-) vers la particule portant la charge B1. Il en est de même, de façon concomitante, pour la particule portant la charge B2.

Plus les charges sont proches, plus l'énergie prélevée et cédée aux champs est grande, plus l'énergie transférée est négative. Il y a répulsion.

Attraction entre charge de type A et charge de type B





L'onde sortante liée à la charge B prélève une énergie (ΔW-) sur le champ de A (= W-), qui prend la valeur (W-) - (ΔW-). L'onde entrante de A prélève cette énergie pour ramener la valeur du champ à 0. Il en résulte un transfert d'énergie égal à - (ΔW-) _donc > 0_vers la particule portant la charge A.

L'onde entrante liée à la charge A prélève une énergie (ΔW-) sur le champ de B, qui prend la valeur (W-) - (ΔW-). L'onde sortante de B prélève l'énergie (W-) sur ce champ, qui passe donc à - (ΔW-). Pour ramener cette valeur à (W-), l'onde entrante cède une énergie égale à (W-) + (ΔW-), son énergie passe de 0 à (W+) - (ΔW-). Il en résulte un transfert d'énergie égal à - (ΔW-) _donc > 0_vers la particule portant la charge B.

La variation d'énergie d'interaction est positive lors du rapprochement des charges. Il y a attraction entre les particules portant les charges de type A et B.

En reproduisant le raisonnement tenu pour le champ gravitationnel [18] et en tenant compte du fait que le produit $R_q W_q$ est invariant, on vérifie que l'on obtient bien la valeur d'énergie d'interaction donnée par la formule (2.6) :

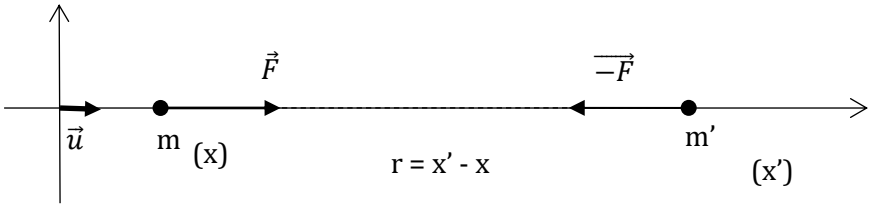
$$E_{iq} = - e e'/ 4\pi\varepsilon_0 r_0$$

Nous allons l'expliciter ci-après.

2.3. Partage de l'énergie d'interaction

Comment l'énergie d'interaction se partage-t-elle entre les deux charges ?

Commençons par rappeler le raisonnement tenu pour étudier l'attraction de deux masses m et m', séparées d'une distance r, sous l'effet de la gravitation ou de l'attraction électrostatique.



Désignons par m et m' les masses (au sens einsteinien : $m = W/\mathbf{c}^2$, $m' = W'/\mathbf{c}^2$, W et W' représentant l'énergie totale), par q et q' les charges, et par $\vec{v}$ et $\overrightarrow{v'}$ leurs vitesses.

Le système est considéré comme isolé. Plaçons-nous dans le référentiel où la quantité de mouvement totale est nulle à l'instant initial de l'interaction ($m_0 \overrightarrow{v_0} + m'_0 \overrightarrow{v'_0} = 0$). Nous considérons en outre que l'effet magnétique est négligeable.

La force d'attraction est : $\vec{F} = (K/r^2)\ \vec{u}$ avec : $K = G\, m\, m'$ pour l'attraction gravitationnelle

$K = - q\, q'/ 4\pi\varepsilon_0$ pour l'attraction électrostatique

En application du principe fondamental de la dynamique :

$$\vec{F} = (K/r^2)\ \overrightarrow{u} = d(m\ \vec{v})/dt = - d(m'\ \overrightarrow{v'})/dt \qquad (2.7)$$

De l'équation (2.7) on déduit par intégration : $m\ \vec{v} = - m'\ \overrightarrow{v'}$ (2.8)

(ce qui traduit la conservation de la quantité de mouvement).

La variation d'énergie cinétique de chacune des masses s'écrit :

[18] cf. note « Champ gravitationnel, Principe fondamental de la dynamique et Mécanique quantique », paragraphe 1.3.2. Sources en interaction : échanges d'énergie entre sources et champ (reproduit en annexe).
Du fait de l'invariance du produit $R_q W_q$, l'énergie du champ électrostatique est identique pour les champs des deux charges à une même distance de celles-ci.

$$dW = \vec{F}\ \vec{v}\ dt \qquad \text{et} \qquad dW' = -\vec{F}\ \overrightarrow{v'}\ dt \quad [19] \qquad (2.9)$$

(2.8) et (2.9) → $m'\, dW' = m\, dW$

Et donc : $dW = (m'/(m + m'))(dW + dW')$

$dW' = (m/(m + m'))(dW + dW')$

Puisque $r = x' - x$, on a : $dr/dt = dx'/dt - dx/dt = (\overrightarrow{v'} - \vec{v})\ \vec{u}$

Compte tenu de (2.9) : $dW + dW' = -\vec{F}\ (\overrightarrow{v'} - \vec{v})\ dt = -K/r^2\, dr$

$$dW = -(m'/(m + m'))\,(K/r^2)\, dr \qquad (2.10)$$

$$dW' = -(m/(m + m'))\,(K/r^2)\, dr \qquad (2.10')$$

La variation d'énergie cinétique totale est égale à $-(K/r^2)\, dr$, soit :

$-(G\, m\, m'/r^2)\, dr$ dans le cas de l'attraction gravitationnelle,

$(q\, q'/4\pi\varepsilon_0 r^2)\, dr$ dans le cas de l'attraction électrostatique.

Dans le cas de la gravitation, les parts d'énergie d'interaction affectées à chacune des masses :
$m'/(m + m')$ pour la masse m et $m/(m + m')$ pour la masse m'
sont bien celles qui ont été calculées à partir de l'échange d'énergie entre sources et champ. [20]

Dans le cas de l'interaction électrostatique, le partage de l'énergie d'interaction selon la même règle implique que la période de rafraîchissement du champ électrostatique soit inversement proportionnelle à la masse de la particule portant la charge.
En effet : $(1/m)/(1/m + 1/m') = m'/(m + m')$ et $(1/m')/(1/m + 1/m') = m/(m + m')$
Ces ratios s'appliquent à un prélèvement sur une même quantité d'énergie car le produit $R_q\, W_q$ est identique pour les deux charges élémentaires.

Puisque la période est proportionnelle au rayon du champ[21] et que l'énergie du champ est inversement proportionnelle à ce rayon, l'énergie du champ électrostatique est proportionnelle à la masse, donc à l'énergie du champ gravitationnel.

Cette proportionnalité entre l'énergie du champ électrostatique et l'énergie du champ gravitationnel associé à la particule porteuse de la charge incite à expliquer la création du champ électrostatique à partir du champ gravitationnel. C'est ce que nous allons faire au chapitre suivant consacré à l'analyse de la désintégration du neutron libre.

[19] Rappelons que, dans le cas gravitationnel, cette variation ne représente que la moitié de la variation d'énergie totale, l'autre moitié provenant de la variation de la masse au repos.
[20] cf. note « Champ gravitationnel, Principe fondamental de la dynamique et Mécanique quantique », paragraphe 1.3.2. Sources en interaction : échanges d'énergie entre sources et champ (reproduit en annexe).
[21] cf. tableau du paragraphe 2.1.

3. Désintégration du neutron libre

A partir du phénomène de désintégration du neutron libre, peut-on proposer une explication de l'apparition du champ électrostatique ?

La désintégration du neutron libre est présentée comme un processus faisant intervenir l'interaction faible, au cours duquel un neutron (n) non lié à d'autres nucléons se désintègre spontanément en un proton (p), un électron (e-) et un antineutrino électronique ($\bar{\nu}$ -) :

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}^- \qquad (3.1)$$

L'énergie de désintégration Q est égale à la différence des énergies au repos avant et après réaction :

$$Q = (m_n - m_p - m_é)\, c^2 = 0{,}782 \text{ MeV} \qquad (3.2)$$

Q est convertie en énergie cinétique qui se répartit entre l'électron et l'antineutrino. [22]

Notons que c'est le constat expérimental de la variabilité de l'énergie cinétique de l'électron qui a conduit à imaginer l'existence du neutrino emportant une partie de l'énergie.

3.1. Création du champ électrostatique

Nous désignerons par :

- m et m' les masses (relativistes) du proton et de l'électron,
- W_q et R_q l'énergie moyenne et le rayon du champ électrostatique du proton,
- $W_{q'}$ et $R_{q'}$ l'énergie moyenne et le rayon du champ électrostatique de l'électron.

Nous imaginons que la création du champ électrostatique résulte du mécanisme suivant :

- La dissociation proton-électron initie une interaction gravitationnelle caractérisée par une énergie d'interaction E_{ig}, qui a pour contrepartie la création d'un champ d'énergie négative $W^- = - E_{ig}$.

- L'interaction gravitationnelle n'est pas opérante (en raison de la présence du champ W-), elle donne naissance à l'interaction électrostatique. Le champ W- donne naissance aux champs W_q et $W_{q'}$:

  $$W_q + W_{q'} = W^- = -E_{ig}$$

  et l'énergie d'interaction électrostatique résulte du transfert de tout ou partie de l'énergie d'interaction gravitationnelle :

  $$E_{iq} = E_{ig} - X$$

- A grande distance (emplacement de mesure), l'énergie du système proton - électron est réduite de E_{iq} du fait de l'éloignement des deux particules l'une par rapport à l'autre.

[22] Dans cette analyse classique, on suppose qu'en raison de la conservation de la quantité de mouvement, l'énergie cinétique transférée au proton est très faible.

Le processus est figuré sur le schéma ci-dessous :

Origine	Distance d'ordre R_g	Distance $R_X >> R_g$	Grande distance
Neutron seul	Dissociation proton - électron Energie d'interaction gravitationnelle	Champ électrostatique	Mesure de l'énergie cinétique de l'électron $E_{cé}$
$\mathbf{m_n}$	$\mathbf{m_1}$ ○ $\mathbf{m_1'}$ Energie d'interaction E_{ig} Champ $W^- = - E_{ig}$	$\mathbf{m_1}$ ○ $\mathbf{m_1'}$ Dissociation du champ W^- Energie d'interaction $E_{iq} = E_{ig} - X$	$\mathbf{m_2}$ $\mathbf{m_2'}$ ○ Energie d'interaction nulle $X = E_{cé}$

(nous supposons que l'électron s'éloigne radialement du proton) Notation : $\mathbf{m} = m\,\mathbf{c}^2$

Les hypothèses faites conduisent à écrire :

$$E_{ig} = \mathbf{m_n} - \mathbf{m_p} - \mathbf{m_é} = Q$$

$$\mathbf{m_1} + \mathbf{m_1'} = \mathbf{m_n} \qquad \mathbf{m_2} + \mathbf{m_2'} = \mathbf{m_n} - E_{iq}$$

$$\mathbf{m_2} \approx \mathbf{m_p} \rightarrow \mathbf{m_2'} = \mathbf{m_n} - \mathbf{m_p} - E_{iq} = \mathbf{m_n} - \mathbf{m_p} - E_{ig} + X = \mathbf{m_é} + X$$

$X = E_{cé}$ énergie cinétique mesurée de l'électron

Et : $E_{iq} = E_{ig} - E_{cé}$

L'énergie attribuée à l'antineutrino peut être identifiée à l'énergie d'interaction électrostatique $\mathbf{E_{iq}}$.

En application de la formule (2.6), on peut considérer que l'interaction électrostatique devient opérante à partir d'une distance entre proton et électron égale à :

$$R_X = (e^2/ 4\pi\varepsilon_0) /(E_{ig} - E_{cé})$$

3.2. Caractéristiques des champs du proton et de l'électron

Nous allons calculer les valeurs de l'énergie et du rayon des champs du proton et de l'électron :

$$W_q R_q = W_{q'} R_{q'} \rightarrow W_{q'} = (R_q/R_{q'}) W_q = (m'/m) W_q$$ [23]

A la distance R_X : $W_q + W_{q'} - = -E_{ig} \rightarrow W_q (1 + m'/m) = -E_{ig}$

$$W_q = - (m/(m + m')) E_{ig} \quad (3.3) \qquad \text{et} \qquad W_{q'} = - (m'/(m + m')) E_{ig} \quad (3.3')$$

avec : $m \approx m_p$ et $m' = m_n - m \approx m_n - m_p$

[23] cf. paragraphe 2.3. La période de rafraîchissement (et donc R_q et $R_{q'}$), est inversement proportionnelle à la masse de la particule.

D'où il résulte : $W_q = -\,0{,}99862\ E_{ig}$ et $W_{q'} = -\,0{,}00137\ E_{ig}$ (3.4)

Compte tenu de l'équation (2.4), les rayons des champs valent :

$$R_q = 0{,}72083\ 10^{-15}/\ E_{ig} \quad \text{et} \quad R_{q'} = 0{,}52542\ 10^{-12}/\ E_{ig} \qquad (3.5)$$

(E_{ig} étant exprimé en MeV et R_q et $R_{q'}$ en mètre)

Avec $E_{ig} = Q = 0{,}782$ MeV :

Champ du proton : $W_q = -\,0{,}781$ MeV **$R_q = 0{,}921\ 10^{-15}$ mètre** (3.6)

Champ de l'électron : $W_{q'} = -\,1{,}07\ 10^{-3}$ MeV $R_{q'} = 0{,}671\ 10^{-12}$ mètre (3.6')

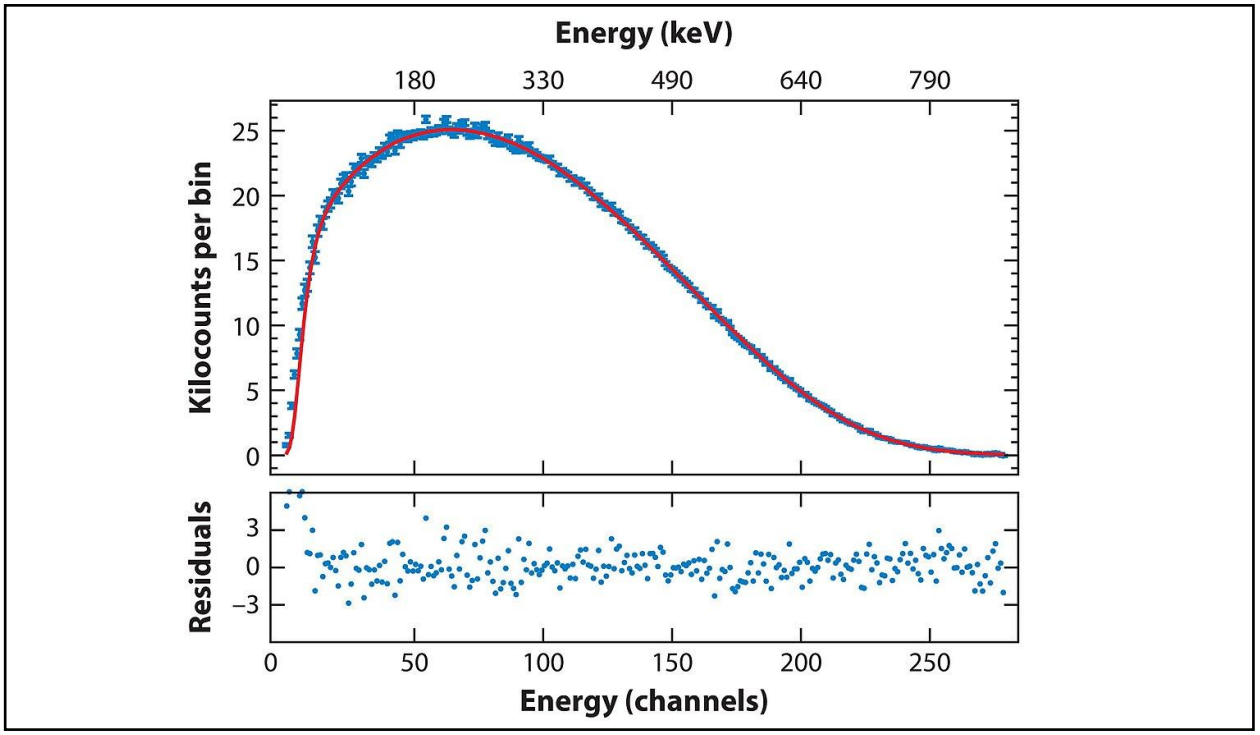
La valeur de R_q peut être comparée au rayon de charge du proton, déterminé expérimentalement :

$$\mathbf{R_p = 0{,}83\ 10^{-15}\ mètre} \qquad (3.7)$$

L'écart de 10% entre les résultats (3.6) et (3.7) conduit à s'interroger sur la valeur attribuée à l'énergie de désintégration Q:

a) Mesure de l'énergie cinétique de l'électron

Le graphique ci-dessous donne la distribution de l'énergie cinétique de l'électron tirée d'une expérience. [24]



On constate que l'énergie maximale n'est pas de 0.782 MeV mais de 0,872 MeV. (3.8)

[24] Figure extraite de la thèse de C. M. Roick *" Particle Detection and Proton Asymmetry in Neutron Beta Decay "* Physik Department. Technische Universität München. 14/08/2018.

b) Détermination de Q à partir du calcul de E_{ig} :

- si l'on retient la distance R_g (rayon limite du champ gravitationnel du proton) pour le calcul de E_{ig},
- et si l'on suppose que les lois de la gravitation formulées pour les conditions de champ faible, sont valables dans toute l'étendue de ce dernier,[25]

on obtient par le calcul la valeur suivante de l'énergie d'interaction gravitationnelle :

$$E_{ig} = (\exp(1) - 1)(m_{é}\,\mathbf{c}^2) = \underline{0,878\ \text{MeV}} \quad [26] \qquad (3.9)$$

Les résultats (3.8) et (3.9) sont très proches. Supposons que l'écart d'énergie constaté ($0{,}096$ MeV = $0{,}878 - 0{,}782$) soit attribué à la masse au repos du neutron. [27] La reprise des calculs conduit à la valeur suivante pour le rayon du champ :

$$\mathbf{R_q = 0{,}823\ 10^{-15}\ mètre} \qquad (3.10)$$

Le rayon du champ peut alors être identifié au rayon de charge du proton R_p donné plus haut (3.7)**.**

Les relations (3.6) et (3.6') doivent être corrigées si l'on retient $\underline{E_{ig} = 0{,}878\ \text{MeV}}$:

Champ du proton : $W_q = -\,0{,}877$ MeV $\qquad R_q = 0{,}823\ 10^{-15}$ mètre $\qquad (3.11)$

Champ de l'électron : $W_{q'} = -\,1{,}29\ 10^{-3}$ MeV $\qquad R_{q'} = 0{,}557\ 10^{-12}$ mètre $\qquad (3.11')$

En conclusion, s'agissant de la désintégration du neutron libre, l'interprétation que nous proposons :

- **permet de dériver la création des champs électrostatiques du proton et de l'électron de l'énergie d'interaction du champ gravitationnel associé à ces deux particules ;**
- **n'oblige pas à faire appel à l'émission d'une troisième particule : l'énergie finale de l'électron résulte de la perte d'énergie qu'il subit en s'éloignant dans le champ électrostatique.**
- **donne la valeur du rayon du proton.**

Cette interprétation donne une réalité physique aux champs et suppose que la perte d'énergie d'interaction se traduit par un échange d'énergie avec ces derniers, par l'intermédiaire d'ondes assurant en permanence leur rafraîchissement.

Elle n'oblige pas à imaginer la création de particules emportant l'énergie d'interaction.

[25] cf. note « Extension des lois de la gravitation. Trous noirs. Décalage spectral gravitationnel »

[26] Avec $m_{é}\,\mathbf{c}^2 = 0{,}511$ Mev énergie au repos de l'électron.

[27] Cette majoration (de 0,01%) ne peut pas provenir de l'énergie cinétique du neutron : la distribution d'énergie expérimentale est obtenue à partir de la désintégration de neutrons ayant une énergie cinétique très faible (inférieure à 3 meV).

4. Discussion des propriétés du champ électrostatique

4.1. Rappel des caractéristiques du champ

*Récapitulons les caractéristiques du champ électrostatique lié à une charge élémentaire isolé*e :

Le champ peut être représenté de deux façons :

- par un vecteur champ électrique : $\vec{E}(\vec{r}) = (e/ 4\pi\varepsilon_0 r^2)\, \vec{u}$
- par une distribution d'énergie au-delà d'une sphère de rayon R_q centrée sur la charge, rafraîchie par un système d'ondes sphériques se déplaçant à la vitesse de la lumière.

La densité d'énergie du champ (négative) est donnée par la relation :

$$\delta W_q(r) = - (\varepsilon_0/2)(\vec{E}(\vec{r}))^2$$

L'énergie totale (moyenne) du champ W_q est liée au rayon R_q par la relation :

$$R_q\, W_q = - e^2/ 8\pi\varepsilon_0 \qquad (2.4)$$

Les ondes de rafraîchissement cèdent ou prélèvent alternativement une énergie négative, chacune pendant une durée égale à $R_q/\mathbf{c}$. La distinction entre charge positive et charge négative est liée au type de champ :

- champ de type A avec onde sortante cédant de l'énergie et onde entrante en prélevant ;
- champ de type B avec onde sortante prélevant de l'énergie et onde entrante en cédant.

L'énergie transportée par les ondes de rafraîchissement est positive pour le type B, négative pour le type A. A la limite R_q, elle vaut : $\pm 2\, W_q$.

A stade actuel de notre réflexion, il n'apparaît pas possible de déterminer à quelle charge positive ou négative il convient d'affecter le champ de type A ou B.

En cas d'interaction de deux charges e et e' distantes de r_0, la densité d'énergie d'interaction s'obtient à partir de la relation :

$$\delta E_{iq}(r) = - \varepsilon_0 \overrightarrow{E}(\vec{r})\, \vec{E}'(\overrightarrow{r'})$$

qui conduit à: $$E_{iq} = - e\, e'/ 4\pi\varepsilon_0 r_0 \qquad (2.6)$$

L'énergie d'interaction est négative pour deux charges de même signe, positive pour deux charges de signes contraires.

C'est le transfert de cette énergie aux particules portant les charges qui explique que l'on observe une répulsion ou une attraction. L'analyse de la répartition de cette énergie entre les particules montre que l'énergie des champs électrostatiques est proportionnelle à l'énergie des champs gravitationnels des particules portant les charges.

4.2. Variabilité du champ

Les relations (3.11) et (3.11'), donnant l'énergie des champs électrostatiques du proton et de l'électron, sont valables à la distance R_x de création de ces champs. A cette distance, l'électron a une énergie totale égale à $(m_n - m_p)\,\mathbf{c}^2$ correspondant à une énergie cinétique égale à E_{ig}. [28]

Lorsque l'énergie totale du proton ou de l'électron change, on doit considérer que les caractéristiques de leur champ électrostatique sont modifiées. En effet, au paragraphe 2.3 nous avons souligné la proportionnalité qui doit exister entre l'énergie du champ électrostatique et celle du champ gravitationnel. En introduisant l'énergie moyenne des champs gravitationnels du proton et de l'électron :

$$W_{gp} = m\,\mathbf{c}^2/2 \qquad \text{et} \qquad W_{gé} = m'\,\mathbf{c}^2/2$$

les relations (3.3) et (3.3') peuvent s'écrire :

$$W_q = -\,2\,(E_{ig}/m_n\,\mathbf{c}^2)\,W_{gp} \tag{4.1}$$

$$W_{q'} = -\,2\,(E_{ig}/m_n\,\mathbf{c}^2)\,W_{gé} \tag{4.1'}$$

Le coefficient de proportionnalité entre énergie du champ électrostatique et énergie du champ gravitationnel est :

$$K_{qg} = -\,2\,(E_{ig}/m_n\,\mathbf{c}^2) = -\,1{,}8687\;10^{-3} \tag{4.2}$$

Nous postulons qu'il s'applique quelle que soit la cause de la variation d'énergie.

Si l'électron est ramené à vitesse nulle ($W_{gé} = m_é\,\mathbf{c}^2/2$) [29], l'énergie et le rayon de son champ électrostatique ont pour valeur :

$$W_{q'} = -\,0{,}477\;10^{-3}\ \text{MeV} \qquad\qquad R_{q'} = 1{,}506\;10^{-12}\ \text{mètre} \tag{4.3}$$

Si l'énergie de l'électron est portée à une valeur très élevée, le rayon de son champ électrostatique peut être considérablement réduit. Par exemple le rayon devient inférieur à 10^{-17} mètre si l'énergie dépasse 77 GeV. L'augmentation de l'intensité du champ est mise en évidence par des expériences de collision à haute énergie.

4.3. Constante de structure fine

Par analogie avec le raisonnement tenu pour le champ gravitationnel, supposons que :

- la durée d'émission et de réception des ondes de rafraîchissement du champ soit égale à $R_q/\mathbf{c}$; la période de rafraîchissement vaut : $T_q = 2R_q/\mathbf{c}$
- l'énergie maximale (en valeur absolue) transportée par chaque onde soit égale à $\mathbf{h}\,\nu_q$; l'énergie moyenne du champ vaut : $|W_q| = \mathbf{h}\,\nu_q/2$

[28] Puisque nous supposons que l'interaction gravitationnelle est inopérante, la masse au repos n'est pas modifiée et l'énergie cinétique est donc égale à l'énergie d'interaction gravitationnelle initiale.
[29] Cela correspond au cas où $E_{iq} = E_{ig}$.

Considérons le produit de la période de rafraîchissement du champ par la fréquence (énergétique) des ondes de rafraîchissement :

$$T_q \nu_q = 4 R_q |W_q| / \mathbf{h}\, \mathbf{c} = e^2 / 2\pi\varepsilon_0 \mathbf{hc} \qquad (4.5)$$

En introduisant la constante de structure fine ($\alpha = e^2 / 2\varepsilon_0 \mathbf{hc}$), il vient :

$$T_q \nu_q = \alpha / \pi \qquad (4.6)$$

La relation (4.6) donne une interprétation physique simple de la constante de structure fine : celle-ci représente (au facteur 1/π près) le ratio entre fréquence énergétique et fréquence de rafraîchissement du champ électrostatique.

Remarque :
En ce qui concerne le champ gravitationnel, le produit analogue $T_g \nu_g$ n'est pas constant ; il varie comme le carré de l'énergie de la source :

$$T_g \nu_g = (4 G / \mathbf{hc}^5) W^2$$

Soit, en introduisant la masse de Planck ($m_P = (\hbar \mathbf{c} / G)^{1/2}$) et la masse relativiste :

$$T_g \nu_g = (2/\pi) (m/m_p)^2 \qquad (4.7)$$

Annexe_Extrait de la note :

Champ gravitationnel, Principe fondamental de la dynamique et Mécanique quantique

1.3.2. Sources en interaction : échange d'énergie entre sources et champ

Nous sommes maintenant en mesure de proposer un mécanisme d'échange d'énergie entre sources et champ gravitationnel expliquant l'énergie potentielle.

Nous considérons deux sources de masses m et m' séparées par une distance r_0.

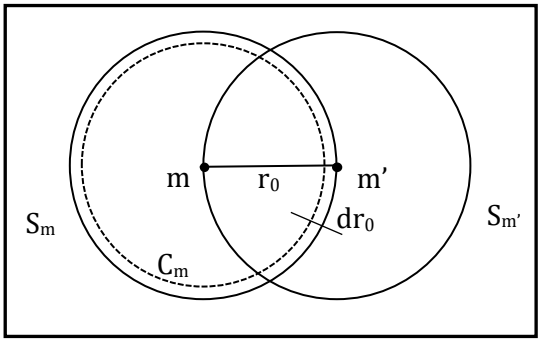


figure 2

Au paragraphe 1.2.1 nous avons vu que l'énergie d'interaction est nulle à l'intérieur des sphères S_m et $S_{m'}$ de rayon r_0. Cela veut dire que :

- la source m' n'interfère pas avec le champ de m à l'intérieur de la sphère S_m ;
- la source m n'interfère pas avec le champ de m' à l'intérieur de la sphère $S_{m'}$.

Supposons que les sources de masses m et m' se rapprochent l'une de l'autre d'une distance $|dr_0|$.

La variation d'énergie d'interaction est due au prélèvement d'énergie :

- de la source m' sur le champ, créé par m, contenu dans la coque C_m de centre m, rayon r_0 et épaisseur $|dr_0|$; l'énergie de cette coque vaut : $(R_g/r_0^2)\ W\ |dr_0|$; [30]

- de la source m sur le champ, créé par m', contenu dans la coque $C_{m'}$ de centre m', rayon r_0 et épaisseur $|dr_0|$; l'énergie de cette coque vaut : $(R_g'/r_0^2)\ W'\ |dr_0|$;

Pour la source m, le prélèvement d'énergie se fait en une durée T proportionnelle à l'énergie W; de même, pour la masse m', le prélèvement se fait en une durée T' proportionnelle à W'. Nous admettrons que le prélèvement d'énergie se fait en proportion des durées de prélèvement :

$$W/(W + W') \quad \text{et} \quad W'/(W + W').$$

Les énergies prélevées valent donc :

- pour la source m' : $(W'/(W+W'))(R_g/r_0^2)\ W\ |dr_0| = 2\ G\ (W^2W'/(W+W'))/\mathbf{c}^4r_0^2\ |dr_0|$ (1.16)

- pour la source m : $(W/(W+W'))(R_g'/r_0^2)\ W\ '|dr_0| = 2\ G\ (W'^2W/(W+W'))/\mathbf{c}^4r_0^2\ |dr_0|$

En raison du rafraîchissement continu des champs, l'énergie de ceux-ci est rétablie en permanence. Cela explique que l'on peut considérer l'énergie prélevée par une source sur le champ de l'autre comme une énergie d'interaction s'ajoutant aux énergies des champs des sources isolées.

La variation d'énergie d'interaction est la somme des deux termes ci-dessus, soit :[31]

$$dE_i = -\ 2\ (G\ WW'/\mathbf{c}^4r_0^2)\ dr_0 = -\ 2\ (G\ mm'/r_0^2)\ dr_0$$

[30] Pour déterminer l'énergie prélevée il faut prendre en compte la valeur maximale (W) de l'énergie du champ.
[31] On retrouve bien la valeur donnée par l'équation (1.13), tirée de la densité d'énergie du champ moyen.