講演原稿。 ...物理...，Aug. 14, 1937

Heavy Quantaの理論に就て。

On the Theory of ~~the~~ Heavy Quanta
(On the Interaction of Elementary Particles. II)

Cosmic Ray 中に Electron と Proton の中間の mass をもった charged particle が存在することが略ゝ確実になって来た。すると それに対する理論が問題になって来る。*

この理論は ~~[illegible]~~ 消極的に Cosmic Ray に関する諸実験の結果と矛盾 ~~[illegible]~~ しないことが必要であるのは勿論であるが、同時に積極的に ~~[illegible] nuclear Nucleus~~ 原子核構造 ~~[illegible]~~ の問題 ~~[illegible]~~ 他の方面 [illegible] 統一出来るならば更に喜ばしいことである。

~~[illegible]~~ 先年発表した論文* から new particle の存在が、原子核の理論の結果として予想され ~~[illegible]~~ 最近 Oppenheimer and Serber*, Stückelberg* 等も之に触れ、又同様な推論を引き続き行って居る。~~[illegible]~~ 小生も最近 出した論文* に 小生の理論から要求される量子が Cosmic Ray 中の新粒子に他ならぬと考へて 少くとも qualitative には諸実験結果と矛盾しないことを述べておいた。

それについて更にもう少し詳しく述べる

§ Energy Loss of Heavy Quanta passing through Matter.

第一に specific ionization の問題は 既によく知られて居る proton の場合から mass を変へれば出て来る。

即ち kinetic energy を $\frac{m_u}{M}T$ にしたものに等しい。

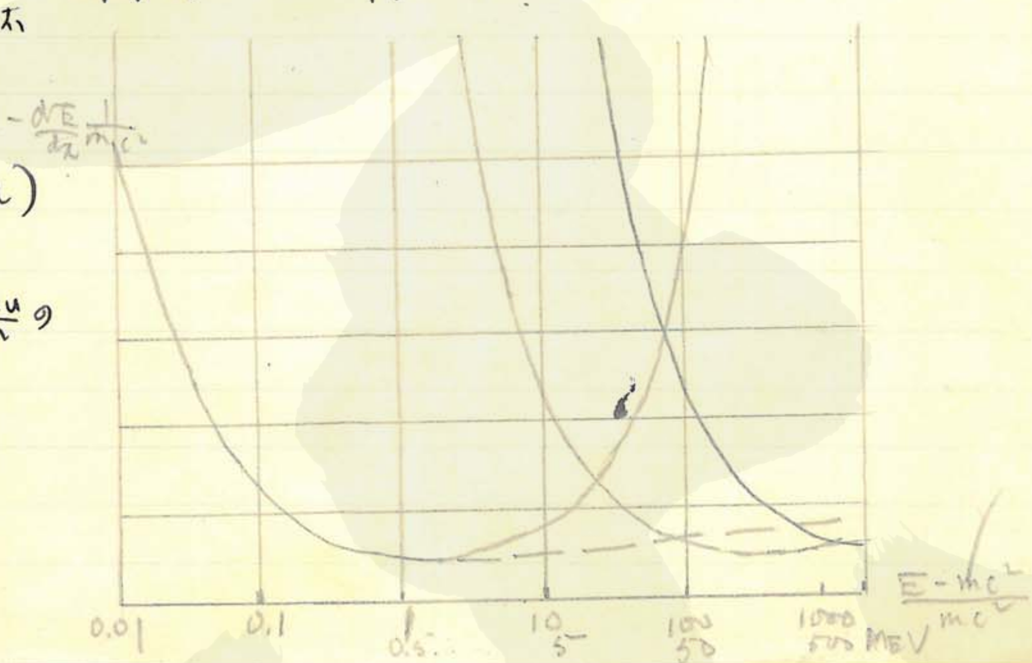
従って track が太くなるのは 10^7eV 程度からである。

$(\frac{m_u}{M}\cong\frac{1}{10}$ として$)$

Energy loss が $\frac{m_u}{M}$ の比であるから

$$\int_0^E \frac{dE}{\left(\frac{dE}{dx}\right)} = R_E^{m}$$

$$\int_0^{E'} \frac{dE'}{\left(\frac{dE'}{dx}\right)} = R_{E'}$$



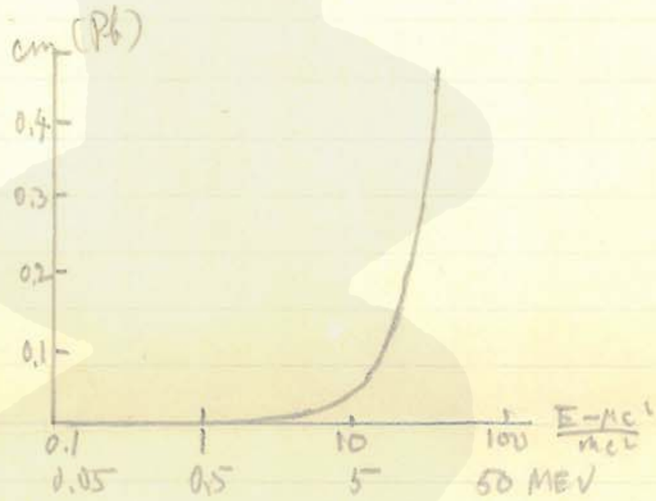
Heavy Quanta

$$R_{\frac{m_u}{M}T} = \int_0^{\frac{M}{m_u}T} \frac{d(\frac{M}{m_u}T)}{\frac{d(\frac{M}{m_u}T)}{dx}} = \cancel{\int \frac{dT}{}}$$

$$= \int_0^{T} \frac{d(\frac{m_u}{M}T)}{\frac{d(\frac{m_u}{M}T)}{dx}} = \frac{m_u}{M}\int_0^{T} \frac{dT}{\left(\frac{dT}{dx}\right)_{proton}}$$

$$R_{\frac{m_u}{M}T} = \frac{m_u}{M} R_{T(proton)}$$

$$R_T = \frac{m_u}{M} R_{\frac{M}{m_u}T(proton)}$$



~~Exp~~ この場合は ionization による
~~cross~~ range の fluctuation が
小さい筈である.
この外に, i) radiative energy loss
による electron の $\frac{1}{40000}$ 程度であるが, 之は一般に問題にならぬ.

ii) nuclear scattering
Compton-scattering の analogy から
$\left(\frac{g^2}{Mc^2}\right)^2$ for quantum energy $\ll Mc^2$
$\left(\frac{e^2}{mc^2}\right)^2\left(\frac{1}{200}\right)^2 \cong 10^{-30}$ a smaller

iii) Electronic Scattering. 之は小さい
iV) Nuclear Capture
之は high speed の時は問題にならない 10^{-29}
$10^7 \sim 10^6$ eV になると相当大きくなる.

Reichweite cm

Luft	eV 10^6	10^7	10^8	10^9	10^{10}
Electron	3 ~~80~~	4.3×10^3	$3.3\cdot10^4$	$2.7\cdot10^5$	$2.3\cdot10^6$
Proton	1.3	100	$6\cdot10^3$	$2.3\cdot10^5$	$3.4\cdot10^6$
H-Quantum	10	$6\cdot10^2$	$2.3\cdot10^4$	$3.4\cdot10^5$	

Pb			cm.		
Electron	0.06	0.72	5.5	44	370
Proton	$3\cdot10^{-4}$	$1.7\cdot10^{-2}$	1.0	40	360
Heavy Quantum	~~10~~ 0.17	0.1	4	36	

$\boxed{\text{Range-Energy Relation}}$

$$R_U(E) = \int_0^E \frac{dE}{f_U(E)} = \int_0^E \frac{dE}{f_p\left(\frac{M}{m_U}E\right)} = \frac{m_U}{M}\int_0^{\frac{M}{m_U}E} \frac{dE'}{f_p(E')} = \frac{m_U}{M} R_p\left(\frac{M}{m_U}E\right)$$

§ Heavy Quantum の Elementary Properties

i) $\pm e$ の両方があり得ること。

ii) mass の値は大体 $200m$ 程度であろうが、正確な値は実験的に定める必要あり。之から nuclear force の range がきまる。

iii) spin は 0 or integer. これは photon と同じ様に色んな場合について計算して見ねばわからぬ

iv) ~~longitudinal field~~ four vector $U_0, \tilde{U}$ の間に ~~関係は~~ ~~密度~~

~~$\frac{1}{c}\frac{\partial U_0}{\partial t} + \operatorname{div}\tilde{U} = 0$~~

~~なる関係がある。(∵ $U\frac{\partial U}{\partial t}$~~

§ Nuclear Force の問題。

初めの formulation では、proton-neutron interaction は Heisenberg type でしかも spin parallel の時に attraction になる様にした。

併し理論と consistent にするためには Hamiltonian から出発せねばならぬ。

$$\overline{H}_U = \iiint H_U \, dv$$

$$H_U = \frac{\partial U}{\partial t} U^{\dagger} + \tilde{U}^{\dagger} \frac{\partial \tilde{U}}{\partial t} - L_U$$

$$L_U = \frac{1}{4\pi}\left\{ \frac{1}{c^2} \frac{\partial \tilde{U}}{\partial t} \frac{\partial U}{\partial t} - \operatorname{grad} \tilde{U} \operatorname{grad} U - \lambda^2 \tilde{U} U \right\}$$

$$U^{\dagger} = \frac{\delta L_U}{\delta \frac{\partial U}{\partial t}} = \frac{1}{4\pi c^2} \frac{\partial \tilde{U}}{\partial t}$$

$$\tilde{U}^{\dagger} = \frac{1}{4\pi c^2} \frac{\partial U}{\partial t}$$

$$U^{\dagger}(\vec{r}, t)\, U(\vec{r}', t) - U(\vec{r}', t)\, U^{\dagger}(\vec{r}, t) = -i\hbar\, \delta(\vec{r}, \vec{r}')$$

$$\tilde{U}^{\dagger}(\vec{r}, t)\, \tilde{U}(\vec{r}', t) - \tilde{U}(\vec{r}', t)\, \tilde{U}^{\dagger}(\vec{r}, t) = -i\hbar\, \delta(\vec{r}, \vec{r}')$$

$$H_U = 4\pi c^2\, \tilde{U}^{\dagger} U^{\dagger} + \frac{1}{4\pi} \operatorname{grad} \tilde{U} \operatorname{grad} U + \frac{\lambda^2}{4\pi} \tilde{U} U$$

$$\overline{H}_M = \iiint \tilde{\Psi} \left[\frac{\vec{p}^2}{2M} - \frac{g}{2}\left\{ \tilde{U}(\tau_1 - i\tau_2) + U(\tau_1 + i\tau_2) \right\} + \frac{D}{2}\tau_3 \right] \Psi \, dv$$

$$\overline{H} = \overline{H}_U + \overline{H}_M$$

$$\delta\tilde{U} : \quad -\frac{1}{4\pi} \operatorname{div} \operatorname{grad} U + \frac{\lambda^2}{4\pi} U - \frac{g}{2} \tilde{\Psi}(\tau_1 - i\tau_2)\Psi = 0$$

$$\delta\tilde{\Psi} : \quad \left\{ \frac{\vec{p}^2}{2M} + \frac{D}{2}\tau_3 - \frac{g}{2}\left\{ \tilde{U}(\tau_1 - i\tau_2) + U(\tau_1 + i\tau_2) \right\} \right\} \times \Psi = 0$$

これで見ると exchange force の符號は(I)と一致し Heisenberg の元の論文とは反対である。但し、それだけではまだ決定は論ぜられない。

次に Majorana force を導き出すには space vector $\vec{T}$ を考へ

$$\left\{\Delta - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2} - \lambda^2\right\}\vec{T} = -4\pi g\,\tilde{\Psi}\,\frac{\tau_1 - i\tau_2}{2}\vec{\sigma}\,\Psi$$

$$\left\{\quad ,, \quad\right\}\tilde{\vec{T}} = -4\pi g\,\tilde{\Psi}\,\frac{\tau_1 + i\tau_2}{2}\vec{\sigma}\,\Psi$$

尚, $\tilde{\vec{T}}$ は次の wave eq. を満足すると考へる. そして,

$$L_T = \frac{1}{4\pi}\left\{\frac{1}{c^2}\frac{\partial\tilde{\vec{T}}}{\partial t}\frac{\partial\vec{T}}{\partial t} - \sum_i(\operatorname{grad}\tilde{T}_i \operatorname{grad} T_i) - \lambda^2\tilde{\vec{T}}\vec{T}\right\}$$

$$\vec{T}^{\dagger} = \frac{\delta L_T}{\delta\frac{\partial\vec{T}}{\partial t}} = \frac{1}{4\pi c^2}\frac{\partial\tilde{\vec{T}}}{\partial t}.$$

$$\tilde{\vec{T}}^{\dagger} = \frac{1}{4\pi c^2}\frac{\partial\vec{T}}{\partial t}.$$

$$H_T = 4\pi c^2\,\tilde{\vec{T}}^{\dagger}\vec{T}^{\dagger} + \frac{1}{4\pi}\sum_i(\operatorname{grad}\tilde{T}_i \operatorname{grad} T_i) + \frac{\lambda^2}{4\pi}\tilde{\vec{T}}\vec{T}$$

$$\overline{H}_M = \iiint \tilde{\Psi}\left[\frac{\vec{p}^2}{2M} + \frac{D}{2}\tau_3 - \frac{g}{2}\left\{\vec{T}(\tau_1 - i\tau_2)\vec{\sigma} + \tilde{\vec{T}}(\tau_1 + i\tau_2)\vec{\sigma}\right\}\right]\Psi\,dv$$

$$\overline{H} = \overline{H}_T + \overline{H}_M$$

$\delta\tilde{\vec{T}}$:

$$-\frac{1}{4\pi}\operatorname{div}\operatorname{grad}\vec{T} + \frac{\lambda^2}{4\pi}U - \frac{1}{4\pi c^2}\frac{\partial^2\vec{T}}{\partial t^2} - \frac{g}{2}\tilde{\Psi}(\tau_1 - i\tau_2)\vec{\sigma}\Psi = 0$$

$$\boxed{H = \mathrm{curl}\, A}$$

$$\cancel{\mathrm{grad}\, A}$$

$$\left.\begin{aligned} \mathrm{grad}\left(\mathrm{div}\vec{A} + \frac{1}{c}\dot{\phi}\right) &= \lambda^2 \vec{A} \\ \mathrm{div}\dot{\vec{A}} &= -\frac{1}{c}\ddot{\phi} - \lambda^2\phi \end{aligned}\right)$$

$$\begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix}$$

$$\left(\begin{aligned} iE_x &= \frac{\partial A_1}{\partial x_4} - \frac{\partial A_4}{\partial x_1} \\ H_x &= \end{aligned}\right)$$

従って interaction の形は

$$-\frac{g^2}{2}\left(\tau_1^{(1)}\tau_1^{(2)}+\tau_2^{(1)}\tau_2^{(2)}\right)(\vec{\sigma}_1\vec{\sigma}_2)\frac{e^{-\lambda r_{12}}}{r_{12}}$$

故に

$$\Psi_{sym}(\mathrm{coord})\quad \Psi_{sym}(\mathrm{spin})\quad \Psi_{anti}(\tau)$$

[illegible]

$$+\cancel{3}g^2\frac{e^{-\lambda r_{12}}}{r_{12}}$$

又

$$\Psi_{sym}(\mathrm{coord})\quad \Psi_{anti}(\mathrm{spin})\quad \Psi_{sym}(\tau)$$

$$3g^2\frac{e^{-\lambda r_{12}}}{r_{12}}$$

で共に repulsion になる。

故に deuteron の ground state は P-state (singlet) になる。
~~これでよいか~~ は実験の結果と矛盾するが、他に何か[illegible]かどうか わからぬ (nuclear spin は 1 になる)

§ Charge-Density, Current Density の Expression
§ Electromagnetic Field との Interaction.

§ Field Equation. Photon との analogy を徹底すれば、
Potential は 1階の式 ~~[illegible]~~ より field は2階の式に導かれねばならぬ。
div $\vec{E}$

§ β-Disintegration の問題.
Fermi の如くに K.U. にもいふことも出来るが, neutrino-electron に関して symmetric なる点が理論的にあまり面白くない.

§ Neutral Quanta の問題.
等 Like Particle Force, 及 Gamow-Teller Hypothesis
Kikuchi's {Electro-Electric Effect} 実

§ Cosmic Ray の Origin の問題.
非常に high temperature の star からは 通常の radiation electron, proton 等の他に high speed の heavy quantum も 多数に放出されるであろう.