

重イオン衝突での陽電子エネルギー分布 の異常ピークとその解釈について

愛知教育大・物理 松田正久

I 重イオン衝突実験の概要

重イオン衝突(ビーム粒子と標的は $^{238}_{92}\text{U}$, $^{232}_{90}\text{Th}$, $^{247}_{96}\text{Cm}$ の組み合わせで, ビームのエネルギーはクーロン障壁のエネルギー程度(核子あたり約 6 MeV))で放出される陽電子のエネルギー分布に鋭いピークが観測されている。¹⁾ 原子核と電子のクーロン力による束縛問題を相対論的に解けば, $Z \geq 137$ では解はないが, 実際には原子核の歪りを考慮して, $Z \geq 173$ ではその最内殻の電子のエネルギー準位が, $-m_e c^2$ よりも低くなり, その結果, もしこの準位が空いていれば, 真空=負エネルギーの電子の海から電子がこの空席に自発的に移動し, 結果として, 負エネルギーの電子の孔=正エネルギーの陽電子が放出されることが「真空崩壊」として予想されていた。²⁾ 上記実験は, 重イオン同士の衝突により, 瞬間的に $Z > 173$ の状態を作り出し, この機構により放出される陽電子を観測することを目的になされたものである。

自発的放出機構による陽電子の持つ特徴として,

- ① ピークのエネルギー値は $Z = Z_1 + Z_2$ の 20 乗に比例し,
- ② その強度は Z の 70 乗に比例し,
- ③ 反応時間が 10^{-21} 秒程度であること,

から陽電子のエネルギー巾は数百 KeV 等が予想された。

一方実験は, これらの予想に反し,

- ① ピークの位置は, Z によらず一定 ($\sim 350 \text{ KeV}$)
- ② ピークの巾は $75 \sim 85 \text{ KeV}$ と狭い
(これは単色の陽電子のエネルギーがドプラー効果で広がったと考えられる)
- ③ ピークの断面積は約 $10 \mu\text{b/sr}$ で, 衝突重イオンの散乱角度に依存しない
- ④ 陽電子と同時に計測された電子のエネルギー (E_{e-}) 分布にも, $E_{e-} \cong E_{e+} \cong 380 \pm 15 \text{ KeV}$ に鋭いピークが見られる。
- ⑤ 又, 予備的結果として, 2 mm の厚さのフレーム(飛行時間で 10^{-10} 秒に相当)で, バックグラウンドの陽電子をカットすれば, 巾 100 KeV で $E_{e+} \cong 380 \text{ KeV}$ にピークが出る。

以上の結果は, 自発放出機構による陽電子はバックグラウンドに隠され, 実験の特徴, とりわけ ①, ②, ④, ⑤ の特徴は, 重イオン衝突による強い電場の下で, 中性の粒子が生成され, それが $\tau \sim 10^{-10}$ 秒で電子-陽電子対に崩壊するとすれば説明できる。

II 標準的 axion として説明できるか?

こうした中性粒子の候補としては, axion やヒグススカラーがある。一般的に議論が, Schafer らによってなされている。³⁾ この粒子 X を偽スカラーとして, e^\pm , r との相互作用を次式で与える。(以下の議論で $m_X = 1.7 \text{ MeV}$ とする)

$$L = g_e \bar{e} \gamma_5 e X + \frac{f}{2m_X} F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu} X \quad (1)$$

これより

$$\Gamma(X \rightarrow 2e) = \frac{g_e^2}{8\pi} m_X \left(1 - \frac{4m_e^2}{m_X^2}\right)^{1/2} \quad (2)$$

$$\Gamma(X \rightarrow 2r) = \frac{f^2}{16\pi} m_X \left(\text{電子のループによる時は, } f^2 = \frac{\alpha^2 g_e^2}{4\pi} \left(\frac{m_X}{m_e}\right)^2\right) \quad (3)$$

標準的 axion⁴⁾ では,

$$g_e = 2^{1/4} G_F^{1/2} m_e x \quad (x > 0 \text{ のパラメーター})$$

であり, これに対する制限は

$$K_e = \frac{1}{2} (g - 2) = a_{\text{QED}} + a_X$$

$$a_X = \frac{g_e^2}{32\pi^2} \left\{ \ln \frac{m_e^2}{m_X^2} + \left(1 - \frac{4m_e^2}{m_X^2}\right)^{-1/2} \right.$$

$$\left. \ln \frac{\left\{1 - \left(1 - \frac{4m_e^2}{m_X^2}\right)^{1/2}\right\} \left\{1 - \frac{2m_e^2}{m_X^2} + \left(1 - \frac{4m_e^2}{m_X^2}\right)^{1/2}\right\}}{\left\{1 + \left(1 - \frac{4m_e^2}{m_X^2}\right)^{1/2}\right\} \left\{1 - \frac{2m_e^2}{m_X^2} - \left(1 - \frac{4m_e^2}{m_X^2}\right)^{1/2}\right\}} \right\} \quad (4)$$

$$a_X = K_e - a_{\text{QED}} < 3 \times 10^{-11}$$

より,

$$g_e < 1.6 \times 10^{-4} \quad (x < 78) \quad (5)$$

又 I の特徴 (5) より, $10^{-12} \text{ s} \leq \tau_X \leq 10^{-10} \text{ s}$ とすれば,

$$1.1 \times 10^{-4} \geq g_e \geq 1.1 \times 10^{-5} \quad (54 \geq x \geq 5.4) \quad (6)$$

これは (5) と矛盾しない。

標準的 axion については, 幾つかの制限が今までの実験から得られている。⁵⁾ $V \rightarrow X + r$ による実験では, $\tau \gg 10^{-9} \text{ s}$ の仮定の下で,

$$B(\psi \rightarrow r + X) < 1.4 \times 10^{-5} \text{ より, } g_c < 3 \times 10^{-3} \text{ (} x > 2.0 \text{)} \quad (7)$$

$$B(r \rightarrow r + X) < 3 \times 10^{-4} \text{ より, } g_b < 2.1 \times 10^{-2} \text{ (} x < 1.0 \text{)} \quad (8)$$

が得られ, これらより $g_i \propto m_i$ だから

$$g_e < 2 \times 10^{-6} \quad (9)$$

となり, (6) と矛盾することから, X は標準的 axion とするには無理がある。⁶⁾ しかし, これまでの axion 探しは, $\tau > 10^{-9} \text{ s}$ の仮定でなされており,

$$10^{-5} < g_e < 2 \times 10^{-4} \text{ (} 10^{-10} \text{ s} < \tau_X < 3.10^{-13} \text{ s) で, } M_X \cong 1.7 \text{ MeV}$$

の標準的 axion ではない中性スピン 0 粒子の存在は実験的に排除されていない。

重イオン衝突での X 粒子生成は, それが電磁的相互作用によるとすれば, バックグランドによる $e^+ - e^-$ 生成より優位でなければならず, この条件は (5) 式と矛盾するという解析もある。⁷⁾ (図 1)

現在種々の試みが提起されているが,⁸⁾ 核理論も含めて更に解析を進める必要がある。実験的にもピーク位置の確定や, $Z < 173$ でのピークの存否, $e^+ - e^-$ 相関の精密測定, 寿命の確定など一層の発展が望まれる。

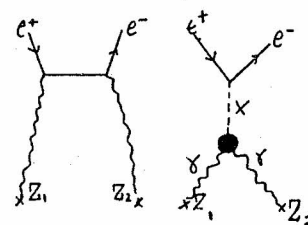


図 1

参考文献

- 1) J. Schweppe et al. Phys. Rev. Lett. **51** (1983), 2261
T. Cowan et al. ibid. **54** (1984), 1761, **56** (1986), 444
M. Clemente et al. Phys. Lett. **B137** (1984), 41
H. Tsertos et al. ibid. **B162** (1985), 273
- 2) 総合報告として
Quantum Electrodynamics of Strong Fields (ed. W. Greiner) (Plenum, NY, 1983) がある。
- 3) A. Schäfer et al. J. Phys. **G11** L69 (1985)
- 4) S. Weinberg Phys. Rev. Lett. **40** (1978) 223
F. Wilczek ibid. **40** (1978) 279
- 5) F. P. Calaprice et al. Phys. Rev. **D20** (1979), 2708
H. Faissner et al. Phys. Lett. **96B** (1980), 201
P. F. Jacques et al. Phys. Rev. **D21** (1980), 1206
CHARM Collaboration Phys. Lett. **157B** (1985), 458

- 6) A. B. Balantekin et al. Phys. Rev. Lett. **55** (1985), 461
- 7) M. Suzuki Preprint
- 8) A. Chodos and L. C. R. Wijewardhana Phys. Rev. Lett. **56** (1986), 302