

# KEK-PS E391a 実験における U-boson 探索

加藤 泉

平成 20 年 2 月 10 日

## 概要

2003 年、 $\gamma$  線観測衛星 INTEGRAL に搭載されている Ge 検出器 SPI において、銀河中心から飛来する大量の  $511\text{keV}$ - $\gamma$  線が観測された。その  $\gamma$  線は、一秒間に  $10^{43}$  個の陽電子生成に相当する膨大な量であり、既知の天体現象では説明が困難とされている。素粒子論的な可能性としては、数  $\text{MeV}/c^2 \sim 100\text{MeV}/c^2$  程度の軽い暗黒物質を仮定し、その対消滅 ( $dm + dm \rightarrow e^+ + e^-$ ) により陽電子が生成され、その結果として大量の  $\gamma$  線を生成している機構が提案されている。観測された  $\gamma$  線のピーク幅が  $3\text{keV}$  以下と非常に狭いことや、電子、陽電子からの制動輻射の計算値と観測値の比較から陽電子は低エネルギーで生成された可能性が高く、そのため暗黒物質は  $100\text{MeV}$  以下程度の軽い粒子であることが要求されている。また、暗黒物質の対消滅を媒介する際には未知の Boson “ $X$ ” ( $dm + dm \rightarrow X \rightarrow e^+ + e^-$ ) が必要となる。その  $X$  の候補の一つとして大統一理論で予言される extra-U(1) symmetry 起因の U-boson で可能性が指摘されている。

そこで、新粒子  $X$  を探索するために 2004 年 2 月から 2005 年 12 月にかけて高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で行われた、 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊分岐比測定実験 (KEK-PS E391a 実験) のエネルギー較正用標的 Run のデータを利用し解析を行った。E391a 検出器は 576 本の pure CsI カロリメータとそれを囲む鉛/シンチレータのサンドイッチカロリメータにより  $K_L$  崩壊領域を完全にカバーしており、高効率 ( $\geq 99.9\%$ ) で電子、陽電子そして  $\gamma$  線を検出できる。エネルギー較正は、 $K_L$  崩壊領域上流部に Al ターゲットを設置しビーム中性子と Al との相互作用による大量の  $\pi^0$  を生成させデータ収集を行っている。

本解析では、短寿命の新粒子 “ $X$ ” つまり U-boson が Al ターゲットで生成され  $X \rightarrow \gamma + \gamma$  または  $X \rightarrow e^+ + e^-$  に崩壊することを想定し解析を行う。解析方法としては、CsI 検出器で 2 cluster が検出されたイベントを選び出し、測定された位置とエネルギーから 2 cluster による不変質量を再構成する。そして、CsI の直前におかれた Charged veto により 2 cluster が  $2\gamma$  か  $e^+e^-$  かの判断をしてから background の除去を行った。Background 除去の手順は次の通りである。この解析は  $X$  が 2 粒子に崩壊することを前提としているので、VETO Counter によって  $K_L$  の  $3\pi$  崩壊や中性子による多重  $\pi^0$  生成を低減させ、終状態が 2 粒子になるイベントのみを選択する。次に CsI 検出器で検出される cluster の形、エネルギー、時間から中性子によって作られるハドロニックシャワーを低減させる。また、2 cluster が重なり 1 cluster に見えてしまうイベント (fusion)、 $\mu$  による cluster を低減させ、最後に運動学的な条件により  $K_L$  崩壊全般の除去をする。

Background の除去を行ってから残ったイベントと MC を比較することにより、残ったイベントの主な Background は  $\text{Ke3}(K_L \rightarrow \pi^\pm e^\mp \nu_e)$  であることがわかった。この Ke3 を減らすべく、 $X \rightarrow e^+ + e^-$  崩壊モードで  $P_T > 0.2\text{GeV}/c$ 、 $X \rightarrow \gamma + \gamma$  崩壊モードで  $P_T > 0.16\text{GeV}/c$  という条件をいれ、再度 Background の除去を行い、“ $X$ ” (U-boson) の断面積の上限値を  $10^{-5}\text{barn}$  (90% Confidence Level) と得ることができた。

# 目次

<b>第 1 章 U-boson が候補になりうる実験事実</b>	<b>9</b>
1.1 $\gamma$ 線観測衛星 INTEGRAL による超高輝度 $\gamma$ 線源の発見	9
1.2 素粒子論的可能性 : U-boson	10
1.3 原子核遷移実験からの手がかり	10
1.4 U-boson の coupling constant	10
1.5 今回の実験の目的	10
<b>第 2 章 KEK-PS E391a 検出器における U-boson 探索実験</b>	<b>15</b>
2.1 KEK-PS E391a 実験	15
2.2 KEK-PS E391a 検出器	15
2.3 U-boson 探索のためのデータ採取	15
<b>第 3 章 実験データの解析</b>	<b>17</b>
3.1 信号の解析方法	17
3.2 背景事象の低減	17
3.3 解析 1 $\sim$ Low $P_T$ を含めた領域 $\sim$	17
3.3.1 Event Selection	17
3.3.2 モンテカルロとの比較	17
3.4 解析 2 $\sim$ High $P_T$ のみの領域 $\sim$	17
3.4.1 Event Selection	17
3.4.2 モンテカルロとの比較	17
3.5 結果	17
3.6 考察	17
<b>第 4 章 結果</b>	<b>19</b>
<b>第 5 章 考察</b>	<b>21</b>
<b>付 録 A 符号化マスク</b>	<b>23</b>
<b>付 録 B Feldman Cousins factor</b>	<b>25</b>



## 図 目 次

1.1	$\gamma$ 線観測衛星 INTEGRAL . . . . .	9
1.2	511keV $\gamma$ 線 peak . . . . .	9
1.3	SPI 検出器の断面図 . . . . .	11
1.4	角度相関 . . . . .	12
1.5	検出器 . . . . .	13



# 表 目 次

1.1 宇宙論的陽電子生成過程 . . . . .	10
---------------------------	----





# 第1章 U-bosonが候補になりうる実験事実

## 1.1 $\gamma$ 線観測衛星 INTEGRAL による超高輝度 $\gamma$ 線源の発見

$\gamma$  線観測衛星 INTEGRAL (International Gamma Ray Astrophysics Laboratory) とは、1993 年にヨーロッパ宇宙機構 (ESA) によって承認された、 $3\text{keV}$  から  $10\text{MeV}$  のエネルギー領域における  $\gamma$  線天文学に向けた衛星である [1]。NASA のコンプトン  $\gamma$  線衛星、ロシアのシグマ  $\gamma$  線望遠鏡 (SIGMA) を搭載した GRANAT 衛星に続くことを目指し 2002 年の 10 月 17 日にカザフスタンから打ち上げられた。INTEGRAL には X 線検出器 JEM-X、可視光領域の光学モニター OMC そして  $\gamma$  線検出器の IBIS と SPI が搭載されている。

SPI は符号化マスクをつけた Ge 半導体検出器であり、測定エネルギー範囲は  $20\text{keV}$  から  $8\text{MeV}$  である。厚さ  $7\text{cm}$  の 19 個の Ge 検出器と約  $5\text{cm}$  の厚さの BGO シールドカウンターから成り、面積は約  $500\text{cm}^2$  で、スターリング冷凍機で  $85\text{K}$  に冷却されている [2] 図 1.1。その  $\gamma$  線観測衛星 INTEGRAL の SPI 検出器によって、2003 年に銀河中心から  $511.06^{+0.17}_{-0.19}\text{keV}$  の超高輝度の  $\gamma$  線が観測された (図 1.2) [3]。それは 1 秒間に  $10^{43}$  個の陽電子生成に相当する膨大な量であり、観測された line 幅は  $2.95^{+0.45}_{-0.51}\text{keV}$  (FWHM) と、とても狭いものであるため陽電子は低エネルギーで生成された可能性が高い。また、 $511\text{keV}$   $\gamma$  線のピークは非相対論的な電子と陽電子からできている [7]。



図 1.1:  $\gamma$  線観測衛星 INTEGRAL

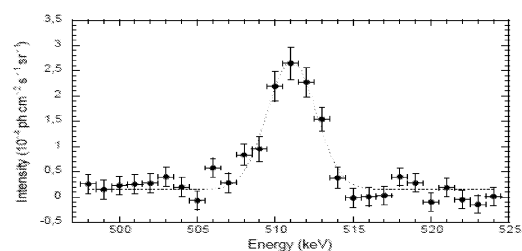


図 1.2:  $511\text{keV}$   $\gamma$  線 peak

膨大な陽電子生成を宇宙論的な側面から説明をするために考えられる現象を表 1.1 に示した。まずはじめに考えられるのは、新星、超新星、ウォルフ・ライエ星そして漸近巨星分枝星原子核合成の  $\beta^+$  崩壊による陽電子生成である。しかし、原子核合成の計算に大きな不確定さがあるために確実な理由とは言えない。二番目は宇宙線中の陽子とイオンが相互作用をし  $\pi^+$  が生成されその  $\pi^+$

processes	$\langle\gamma\rangle$
$N^* \rightarrow N+e^+$	few
$N+p \rightarrow \pi^+ \rightarrow e^+$	$\geq 60$
$N+N' \rightarrow N^* \rightarrow N+e^+$	$\geq \text{few}$
$e+B \rightarrow \gamma + B \rightarrow e^+e^-$	$\sim 10^6\text{-}10^8$
$\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$	$\geq \text{few}$

表 1.1: 宇宙論的陽電子生成過程

が  $e^+$  に崩壊する。 $\pi^+$  崩壊の positron peak は  $\sim 30\text{MeV}$  である。三番目は宇宙線とイオンが相互作用を起こしたあとに陽電子を放出して崩壊する。イオンが静止状態か運動状態かにより、ごくわずから励起イオンにおよそ等しい Lorentz factor を持った陽電子が生成される。四番目はパルサーの電磁カスケードによる陽電子生成である。しかしこれは大きな Lorentz factor を持つ。最後は  $2\gamma$  が対消滅し電子陽電子に崩壊する過程だが、その  $2\gamma$  は microquasar、活動銀河核、 $\gamma$  線バーストなどからくる  $2\gamma$  と思われる [4]。以上のように宇宙論的に膨大な陽子生成を考えることは、大きな不確定があること、または生成された陽電子に Lorentz factor があることから、難しい。

## 1.2 素粒子論的可能性：U-boson

$511\text{keV}\gamma$  線を説明するために、宇宙を構成する質量・エネルギーの 22% [5] を占める暗黒物質の対消滅を仮定すると、暗黒物質の対消滅により非相対論的な電子と陽電子が生成され、その陽電子との対消滅により  $511\text{keV}\gamma$  線が生成可能になる [6]。また暗黒物質がマヨラナ粒子でなくディラック粒子だとすれば暗黒物質の対消滅に中性の boson を媒介しなくてはならない、その候補に挙げられる粒子は大統一理論で必要になる extra-U(1) gauge boson (U-boson) である。

暗黒物質には対消滅に必要な断面積の範囲、

$$\langle\sigma_{ann}V_{rel}/c\rangle Br^{ee} = 8 \sim 10\text{pbarn} \quad (1.1)$$

がある [8]。

## 1.3 原子核遷移実験からの手がかかり

## 1.4 U-boson の coupling constant

## 1.5 今回の実験の目的

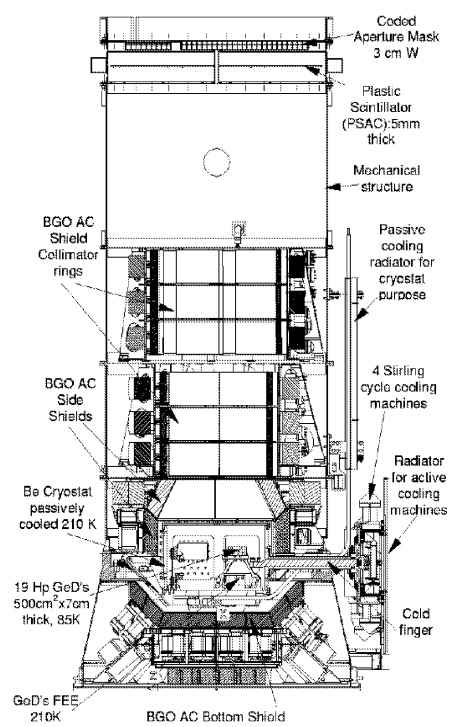


図 1.3: SPI 検出器の断面図

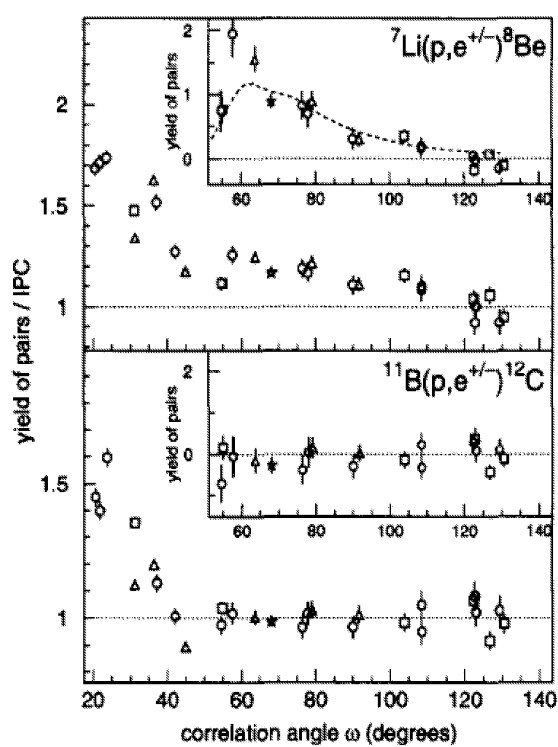


図 1.4: 角度相関

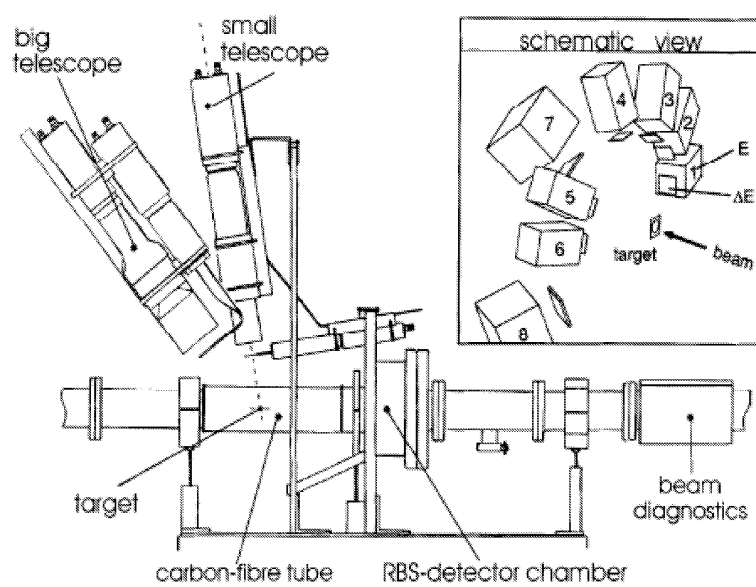


図 1.5: 検出器



## 第2章 KEK-PS E391a検出器における U-boson探索実験

### 2.1 KEK-PS E391a実験

### 2.2 KEK-PS E391a検出器

### 2.3 U-boson探索のためのデータ採取





## 第3章 実験データの解析

### 3.1 信号の解析方法

### 3.2 背景事象の低減

### 3.3 解析1 ～Low $P_T$ を含めた領域～

#### 3.3.1 Event Selection

#### 3.3.2 モンテカルロとの比較

### 3.4 解析2 ～High $P_T$ のみの領域～

#### 3.4.1 Event Selection

#### 3.4.2 モンテカルロとの比較

### 3.5 結果

### 3.6 考察



## 第4章 結果



## 第5章 考察



## 付 録 A      符号化マスク

符号化マスクとは X 線または *gamma* 線が透過しない厚さの金属板に、適当な大きさの入射孔を適当な位置に、適当な数あけたものをいう。マスクの下に 2 次元の位置検出型観測器を適当な距離離して平行に取り付ける。いろいろな方向から入射する天体からの放射は検出器上の入射方向に対応する位置にマスクの影が投影される。マスクのパターンの相関を求めると入射方向に相当する位置でピークとなる。相関の強度分布が像を表すことになる。IBIS と JEM-X には URA (uniformly redundant array) マスクと最適符号化システム (OCAS) が採用されている [2]。





## 付 録 B    Feldman Cousins factor



## 関連図書

- [1] G.Vedrenne *et al.*. “SPI:The spectrometer aboard INTEGRAL” A&A 411,L63-L70 (2003)
- [2] 槇野文命、“科学衛星と宇宙ステーション”、岩波書店
- [3] P.Jean *et al.*. “Early SPI/INTEGRAL measurements of 511 keV line emission from the 4<sup>th</sup> quadrant of the Galaxy ”、arXiv:astro-ph/0309484 (2003)
- [4] C.D.Dermer and R.J.Murphy “ ANNIHILATION RADIATION IN THE GALAXY ”、arXiv:astro-ph/0107216 (2001)
- [5] “ パリティ、2007、11月号 ”、丸善
- [6] Shou-hua Zhu “ U-boson at BES III ”、arXiv:astro-ph/0701001 (2006)
- [7] Natalia Borodatchenkova *et al.*. “Probing MeV Dark Matter at Low-Energy  $e^+e^-$  Colliders ”、arXiv:hep-ph/0510147 (2006)
- [8] P.FAYET “ LIGHT DARK MATTER<sup>a</sup> ” arXiv:hep-ph/0408357 (2004)