

$\gamma\gamma$ コライダーでのヒグス検出¹

渡部 勇

お茶の水女子大学 理学部

〒112 東京都文京区大塚 2-1-1

(1996年2月2日受理)

アブストラクト

将来の $\gamma\gamma$ コライダーにおいて、現実的なルミノシティ・偏極分布を考えることによって、intermediate mass Higgs の検出効率が、十分高い事が示される。特に、ヒグスの質量に合わせて、 $\gamma\gamma$ コライダーの衝突エネルギーを調節してやる事で、検出効率が劇的に向上する事を明示する。

1 序

$\gamma\gamma$ コライダーは、1980年代始めに旧ソ連の研究者によって発案された [1]。最近では、将来の e^+e^- 衝突型線形加速器がかなり実現性を高めてきたので、それを改造する選択肢として真剣に考えられる様になってきた [2, 3]。

特に $\gamma\gamma$ コライダーで重要なのは、ヒグス生成である [4]。質量の有る荷電粒子のループを通じて起こるこの過程は、ヒグス質量のポールを叩く事によって一般に大きな反応断面積を持ち、 $\gamma\gamma$ コライダーは言わば「ヒグス工場」となり得る事が期待されている。

¹素粒子奨学生応募論文 (1995年度)

ヒグス粒子の質量の大小によって、崩壊過程が大きく変わるので、その検出方法も質量による。標準模型のヒグス粒子は、既に LEP 実験による質量の下限が 58.4 GeV と与えられている [5]。ヒグス質量が約 140 GeV より軽い場合 (intermediate mass Higgs) には、ヒグスは主に $b\bar{b}$ 対に崩壊し、それより重い場合は主に W^+W^- 対、次いで ZZ 対、 $t\bar{t}$ 対に崩壊する。前者の場合は b クォーク対のタギングによって、後者の場合は二つの Z ボソンの再構成によって [6]、ヒグス粒子を同定するのが自然である。

軽い場合のヒグス同定は、従来は次のように考えられていた。シグナルとなる $b\bar{b}$ 対発生には、ヒグスを通さないツリーレベルの寄与があつて、これがヒグスの情報に対する雑音になり得る。しかし、ヒグスのピークの幅は keV 程度と非常に狭いので、精度良く $b\bar{b}$ 系の不変質量を測定できれば、かなりの雑音を落とすことができる。しかも、ヒグス生成は衝突する 2 光子の全角運動量が 0 でないと発生しないのに対し、雑音となる $b\bar{b}$ 対 (更には b クォークへの同定間違いとなりうる $c\bar{c}$ 対) の最低次の寄与は、クォーク質量が無視できる高エネルギーでは、ヘリシティ保存により、全角運動量 0 では発生しない。 $\gamma\gamma$ コライダーでは、衝突する光子の偏極状態をかなり自由に調節出来ることが期待されたので、これによって、ヒグス同定の雑音除去は簡単であると思われた。

しかし、これらの単純な期待に対して、近年幾つかの見直しが行なわれた。先ず、Éboli et al.[7] は、光子中のクォーク・グルオン分布 [8] によって、いわゆる「分解光子」過程が雑音に寄与する事を指摘した。彼等は、今までに発表されている光子中のパートン分布関数を用いて、雑音をヒグス信号と比較しており、幾つかの単純な過程の後、最高に楽観的な状況でも、光子衝突のエネルギー 500 GeV での実験では、信号は雑音よりも小さく、僅かに 7σ 程度の $b\bar{b}$ 事象の増加としてしか捕らえられないと結論している。Jikia et al.[9] では、250 GeV で同様の計算をしており、ヒグス質量 100 GeV 以上では、分解光子雑音はヒグス信号より少なくなる事を示している。ただし、文献 [7, 9] 共、彼等は無偏極光子の分布関数をそのまま無反省に偏極光子の衝突に適用している。実験的には、偏極を考慮した分布関数は知られていないので、これはある意味で、現時点では止むを得ない。Abraham[10] は、ヒグス信号と競合する様な分解光子事象の持つパートンの光子に対するエネルギー比は、狭い範囲に限定される事に着目し、比が光子の偏極によって決まる適当な定数で近似出来ると仮定した。その結果、雑音過程の断面積は、定数によって 2 倍程

度の不定性がある事が示されている。

一方、Borden et al.[11] は、 $\gamma\gamma \rightarrow b\bar{b}g (c\bar{c}g)$ 過程では、2光子の全角運動量が0でもヘリシティ保存による断面積の抑制が起こらない事に注目し、これらのうち、終状態が2ジェットの様に見える分を雑音に含めた。彼等の結論は、特に $\gamma\gamma \rightarrow c\bar{c}g$ が信号と同程度の雑音となるが、いくつかの kinematical cuts を行なえば、十分信号を取り出せるようになるというものである。Jikia et al.[9] は、同様に $\gamma\gamma \rightarrow b\bar{b} (c\bar{c})$ 過程に対する輻射補正を行っており、特に $b\bar{b}$ 対生成の輻射補正が大きい事を見出している。

これらの近年の仕事は、それまでの常識的な期待が修正されなければならない事を示した点で、重要である。しかしながら、これらは衝突光子のルミノシティ分布・偏極分布を考慮されていない²。 $\gamma\gamma$ コライダーでは、衝突する2光子重心系の元の e^+e^- コライダーに対するエネルギー比によって、特に偏極分布が急激に変化することが知られている [12]。ヒグスの信号も雑音も、この衝突光子の偏極状態に強く依存するので、これを考慮に入れた計算を行わなければならない。

そこで、この論文では、ルミノシティ分布・偏極分布を考慮に入れた計算で、intermediate mass Higgs を検出するための方法を論じる。そのために、先ず次の節で $\gamma\gamma$ コライダーのルミノシティ分布・偏極分布について概観し、その後具体的な断面積の計算結果を提示する。最後に、様々な実験上の設定を仮定して、信号と雑音を比較する。

2 ルミノシティ分布と偏極分布

$\gamma\gamma$ コライダーでの理想的なルミノシティ分布は、図1の様になる [12]。これを見ても判る通り、ルミノシティの最大値は元の e^+e^- コライダーのエネルギーの8割弱の所にある³。 $(1/L_{\gamma\gamma}) \cdot (dL_{\gamma\gamma}/dz)$ の値は、 $z = 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ のそれぞれに対して、1.08, 0.99, 1.41, 2.42 である。

一方、各エネルギー比での平均偏極分布は、図2の様になる。この図から判るのは、 $\gamma\gamma$ コライダーでの衝突する光子同士の偏極が純粹であるのは、エネルギー比がやはり0.8付

²文献 [7] のみ、ルミノシティ分布だけが考慮されている。

³この図では、多重散乱等のビーム生成上の複雑な過程を無視して、単純化した計算を採用しているの
で、実際の分布は z の小さな所でもっと増える。

近の所だけだと言う事である。偏極の積 $P_1 \cdot P_2$ の値は、 $z = 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ のそれぞれに対して、 $-0.72, -0.63, 0.57, 0.99$ である。

つまり、高いルミノシティを維持しつつ、純粋な偏極状態の光子衝突で雑音を減らすには、ヒグスの質量が元の e^+e^- コライダーのエネルギーの約 8 割になるように調節すべきである事が結論付けられる。

3 反応断面積

ヒグス信号の生成断面積は、非常に幅が狭くて高いピークを形成しているので、Breit-Wigner の近似が適用できる。

(i). $\gamma\gamma \rightarrow H \rightarrow b\bar{b}$

実際の生成事象数は、

$$N_{\gamma\gamma \rightarrow H \rightarrow b\bar{b}} = \frac{1}{L_{\gamma\gamma}} \frac{d L_{\gamma\gamma}}{dz} \Big|_{\text{pole}} \frac{1}{\sqrt{s_{e^+e^-}}} \left[4\pi^2 (1 + P_1 P_2) \frac{\Gamma_{H \rightarrow \gamma\gamma} Br_{H \rightarrow b\bar{b}}}{m_H^2} \right] L_{\gamma\gamma}$$

となる。つまり、右辺の最後の $L_{\gamma\gamma}$ を除いた部分が、実効的な反応断面積と言う事になる。

一方、それに対する雑音は、上のヒグス事象の不変質量の測定精度で区別出来ない分だけが利いてくる。 $\gamma\gamma$ コライダーでは、衝突する光子の重心エネルギー分布が図 1 に示される通り広いので、終状態の粒子全てを捕まえて、衝突エネルギーを求めなければならない。そこで、解析に用いる事象は、 b クォーク・ \bar{b} クォーク共にハドロニックな物に限るとし、その時の測定精度を ± 10 GeV と仮定した。

又、 b クォークの同定は、バーテックス検出器を用いることで、 c クォークとの間違いを除いて十分効率良く行なえる事が期待できるので、

(ii). $\gamma\gamma \rightarrow b\bar{b}$

(iii). $\gamma\gamma \rightarrow b\bar{b}(g)$

(iv). $\gamma\gamma \rightarrow c\bar{c}$

(v). $\gamma\gamma \rightarrow c\bar{c}(g)$

だけが雑音になり得る過程であるとした。ここで括弧付きの g は、ビームパイプ方向に抜けて行って見えないグルオンである。ここでは簡単のため、実験室系で $|\cos\theta|$ が 0.8 以上のパートンは検出されず、それ未満のパートンは検出されるとした。又、JADE タイプのジェット同定手順 [13] を想定し、 y_{cut} が 0.02 よりも 2 つのパートンが接近したら、その事象はきれいな $b\bar{b}$ 事象とは見なされないので勘定しない事にした。計算には、HELAS [14] と BASES25 [15] を使用して、ヘリシティ振幅で数値的に最低次だけ求めた。

コライダーのエネルギーは、興味あるヒグス質量の範囲を考慮して、 $\sqrt{s_{e^+e^-}} = 150 \text{ GeV}$ に設定した。結果は表 1 にまとめてある。特徴的なのは、 c クォークの断面積が圧倒的に大きいと言う事で、 $m_H = 120 \text{ GeV}$ 以外では、ヒグスの断面積よりも大きくなっている。ヒグス信号の方は、 m_H が下がると急激に実効断面積が落ちているが、これは主にルミノシティの減少と偏極度の減少による。

反応 (ii), (iii) について、観測される $b\bar{b}$ 対の不変質量と実験室系でのラピディティの分布を図 3, 4 に示す。反応 (ii) では、ラピディティの大きな所に大きな寄与があることが判る。一方、反応 (iii) では、小さな z で少なめのラピディティの所に大きな寄与があり、大きな z では殆ど断面積がゼロになっている。

尚、この様な大きな z での光子衝突では、分解光子の寄与は十分小さいことが知られている [9]。従って、ここではこれ以上考えない事とする。

4 検出効率

実際の実験で期待できる事象数を求めるには、もう少し実際の実験テクニック上の仮定が必要である。最も重要なのは、 $b\bar{b}$ 対の同定効率と $c\bar{c}$ 対の $b\bar{b}$ への間違い確率である。ここでは、それぞれ 80% と 5% を仮定した。 b, c クォークのハドロニック崩壊の分岐比を考慮に入れると、実際に検出される分に対応する反応断面積は、表 2 の通りとなる。

この結果を見ても、コライダーのエネルギーをうまくヒグスに合わせる事が大切かが判る。 $m_H = 120 \text{ GeV}$ では、S/N 比 15 が達成されており、105 GeV の 0.6 と比べて劇的な差が在る。

実際の事象数は、 $\gamma\gamma$ コライダーのルミノシティを仮定しなければならない。Yokoya [16]

によれば、偏極させない場合の値であるが、 $z > 0.38$ で年間 3.1 fb^{-1} が達成可能である。これは、本論分の $L_{\gamma\gamma}$ に直せば、約 10 fb^{-1} に値する。従って、 $m_H = 120 \text{ GeV}$ のヒグスは、純度 93% で年間 1000 事象生成する事が出来る。これは、 $\gamma\gamma$ コライダーが、正にヒグス粒子の工場として機能する事の証明である。

5 結論

現実的な $\gamma\gamma$ コライダーのルミノシティ・偏極分布を考えることによって、intermediate mass Higgs の検出効率が、十分高い事が示された。特に、ヒグスの質量に合わせて、 $\gamma\gamma$ コライダーの衝突エネルギーを調節してやる事で、検出効率が劇的に向上する事が示された。本文中で仮定した、様々な実験上のパラメータは、今後の検出器の R&D と共により精度の高い値にとって変わるべきだが、議論の本質は、それにあまり左右されない。

謝辞

有益な議論をしてくださった、名島隆一氏、高橋徹氏に感謝します。又、牟田泰三氏、菅本晶夫氏、萩原薫氏と、お茶の水女子大学理学部素粒子論研究室の皆さんの、日頃のご支援に併せて感謝致します。

参考文献

- [1] I. F. Ginzburg, G. L. Serbo and V. I. Tel'nov, *Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, **34** (1981) 514 [*JETP Lett.*, **34** (1982) 491]; *Nucl. Instrum. Methods*, **205** (1983) 47.
- [2] I. F. Ginzburg, G. L. Kotkin, S. L. Panfil, V. G. Serbo and V. I. Telnov, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, **219** (1984) 5.
V. I. Telnov, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, **A294** (1990) 72.
- I. Endo, *Proc. of the Second Workshop on Japan Linear Collider (JLC)*, KEK, November 6-8, 1990, pp. 323, ed. S. Kawabata, KEK Proceedings 91-10 (1991).

- [3] D. L. Borden, D. A. Bauer and D. O. Caldwell, *SLAC preprint*, SLAC-PUB-5715 (1992).
- [4] R. Najima, *Proc. of the Third Meeting on Physics at TeV Energy Scale*, KEK, September 28-30, 1989, pp. 112, ed. K. Hidaka and C. S. Lim, KEK Report 90-9 (1990).
T. L. Barklow, *SLAC preprint*, SLAC-PUB-5364 (1990).
E. E. Boose and G. V. Jikia, *Phys. Lett.*, **B275** (1992) 164.
- [5] ALEPH collab., Buskulic et al., *Phys. Lett.*, **B285** (1993) 309.
Particle Data Group, L. Montanet et al., *Phys. Rev.*, **D50** (1994) 1173.
- [6] G. V. Jikia, *Phys. Lett.*, **B298** (1993) 224.
- [7] O. J. P. Éboli, M. C. Gonzalez-Garcia, F. Halzen and D. Zeppenfeld, *Phys. Rev.*, **D48** (1993) 1430.
- [8] E. Witten, *Nucl. Phys.*, **B120** (1977) 189.
- [9] G. Jikia and A. Tkabladze, to be published in *Proc. of the Workshop on Gamma-Gamma Colliders*, LBL, March 28-31, 1994: hep-ph/9406428 (1994).
- [10] K. J. Abraham, *Phys. Lett.*, **B316** (1993) 365.
- [11] D. L. Borden, V. A. Khoze, W. J. Stirling and J. Ohnemus, *Phys. Rev.*, **50** (1994) 4499.
- [12] Y. Yasui, I. Watanabe, J. Kodaira and I. Endo, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, **A335** (1993) 385.
- [13] JADE collab., W. Bartel et al., *Z. Phys.*, **C26** (1984) 93.
- [14] H. Murayama, I. Watanabe and K. Hagiwara, *HELAS: HELicity Amplitude Subroutines for Feynman Diagram Evaluations*, KEK Report 91-11 (1992).

- [15] S. Kawabata, *Comput. Phys. Commun.*, **41** (1986) 127.
- [16] H. Yokoya, *Proceedings of the First Meeting on e gamma/gamma gamma Colliders*, KEK, September 28-29, 1993, pp. 1, ed. I. Watanabe and T. Takahashi, KEK Proceedings 93-18 (1994).

表1 ヒグス過程とその雑音過程の反応断面積。

反応過程	ヒグス質量			
	75 GeV (Z=0.5)	90 GeV (0.6)	105 GeV (0.7)	120 GeV (0.8)
$\gamma\gamma \rightarrow H \rightarrow b\bar{b}$	8.3 fb	22 fb	94 fb	235 fb
$\gamma\gamma \rightarrow b\bar{b}$	148 fb	137 fb	75 fb	12 fb
$\gamma\gamma \rightarrow b\bar{b}(g)$	12 fb	4.6 fb	0.9 fb	0 fb
$\gamma\gamma \rightarrow c\bar{c}$	2400 fb	2210 fb	1150 fb	59 fb
$\gamma\gamma \rightarrow c\bar{c}(g)$	468 fb	308 fb	153 fb	0 fb

表2 ヒグス過程とその雑音過程の検出効率をかけた反応断面積。

反応過程	ヒグス質量			
	75 GeV (Z=0.5)	90 GeV (0.6)	105 GeV (0.7)	120 GeV (0.8)
$\gamma\gamma \rightarrow H \rightarrow b\bar{b}$	3.7 fb	9.7 fb	42.2 fb	105.2 fb
$\gamma\gamma \rightarrow b\bar{b}$	66 fb	61 fb	34 fb	5.3 fb
$\gamma\gamma \rightarrow b\bar{b}(g)$	5.2 fb	2.0 fb	0.4 fb	0 fb
$\gamma\gamma \rightarrow c\bar{c}$	67 fb	62 fb	32 fb	1.7 fb
$\gamma\gamma \rightarrow c\bar{c}(g)$	13 fb	8.6 fb	4.2 fb	0 fb
雑音総計	151 fb	134 fb	71 fb	7.0 fb
S/N 比	0.02	0.07	0.6	15

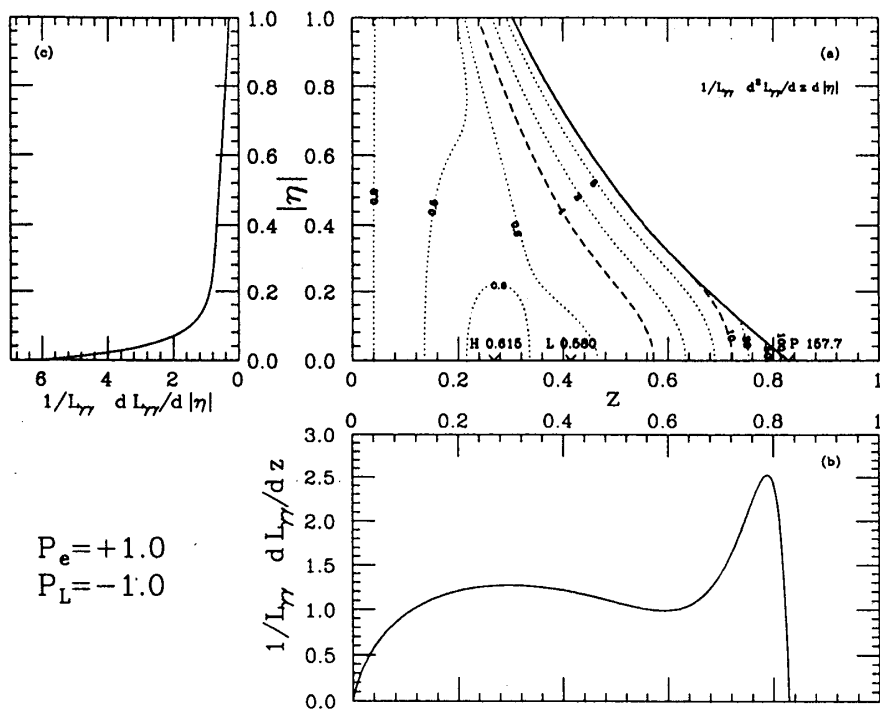


図1 $\gamma\gamma$ コライダーのルミノシティ分布。文献 [12] より。

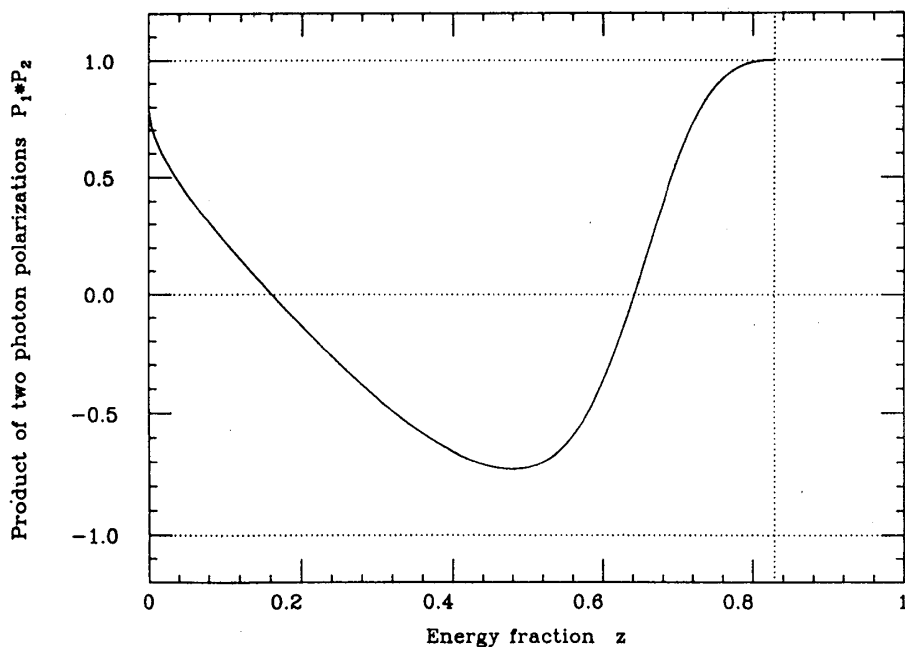


図2 $\gamma\gamma$ コライダーの衝突光子の偏極度の積の分布。

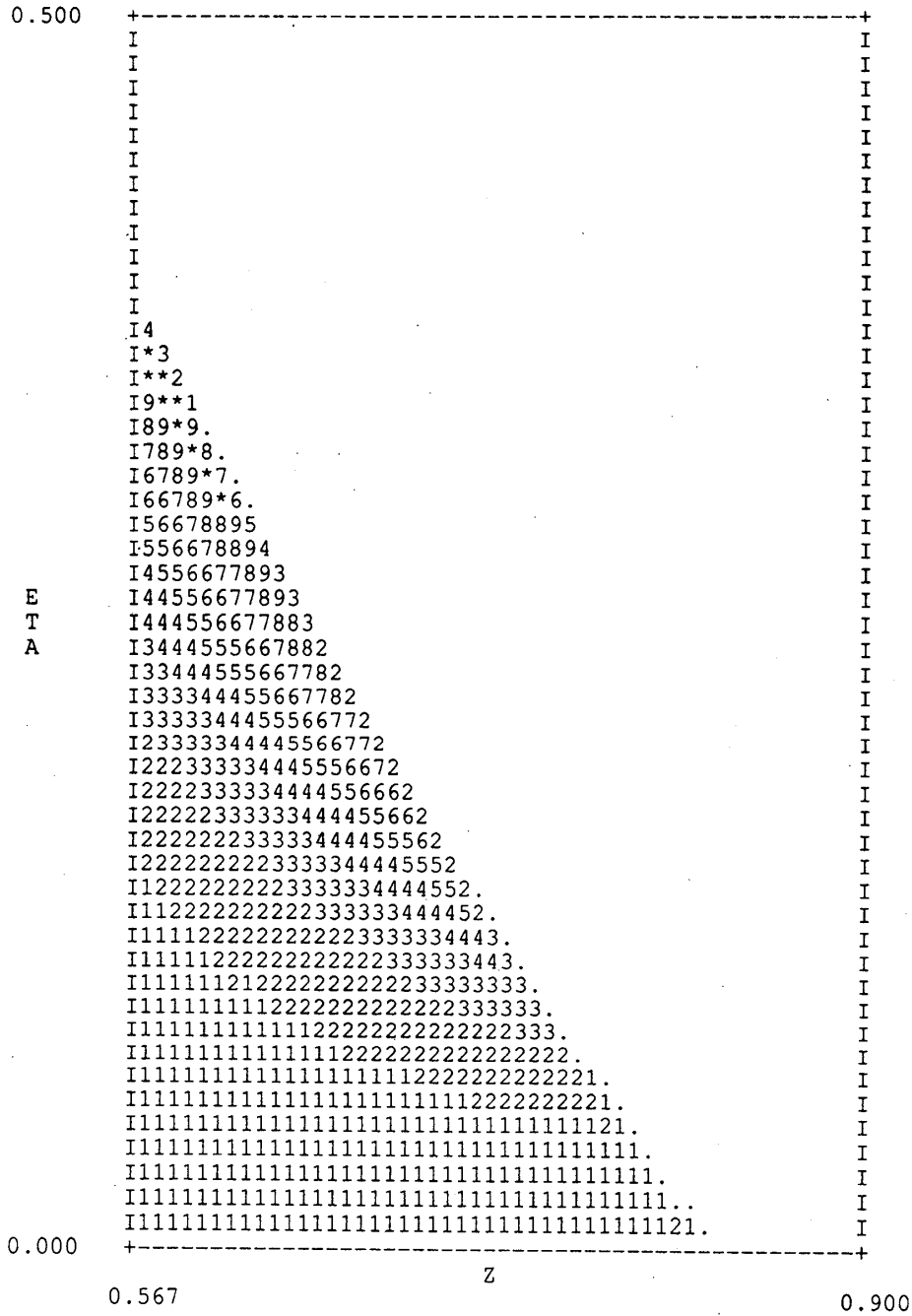


図3 $\gamma\gamma \rightarrow b\bar{b}$ 過程のエネルギー比・ラピディティ分布。数字は分布の高低を相対的な数字で示し、*印が一番高く、・は低い。

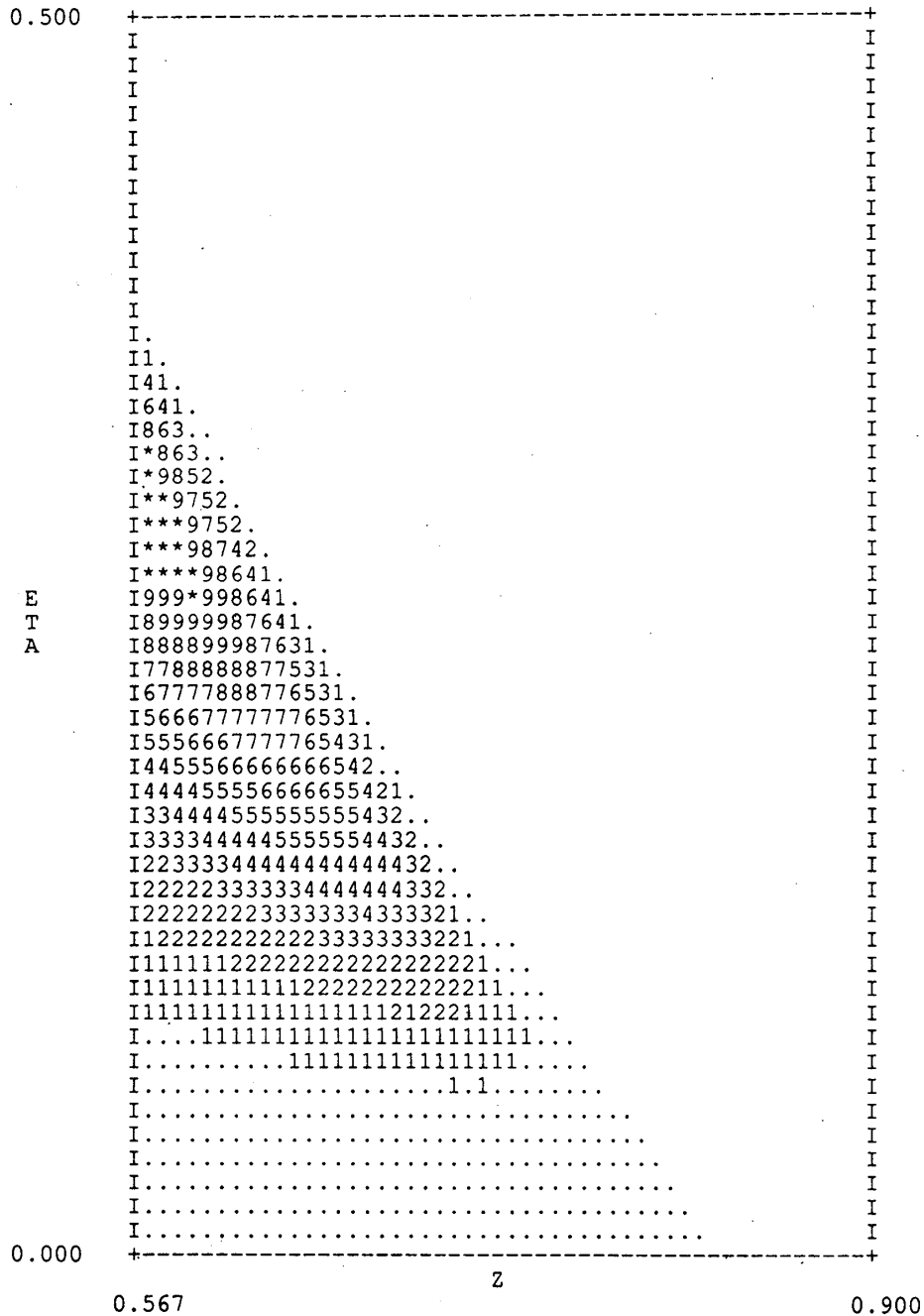


図4 $\gamma\gamma \rightarrow b\bar{b}(g)$ 過程のエネルギー比・ラピディティ分布。図3と同様。