

自動計算システム **GRACE** を用いた 電子・陽子散乱のためのイベント ジェネレータ開発

阿部 哲郎

高エネルギー加速器研究機構

《 目次 》

- 1) 研究の動機
- 2) GRACE システム
- 3) 電子・陽子散乱への応用
- 4) 計算例
- 5) まとめ

研究の動機

電子・陽子散乱実験においては

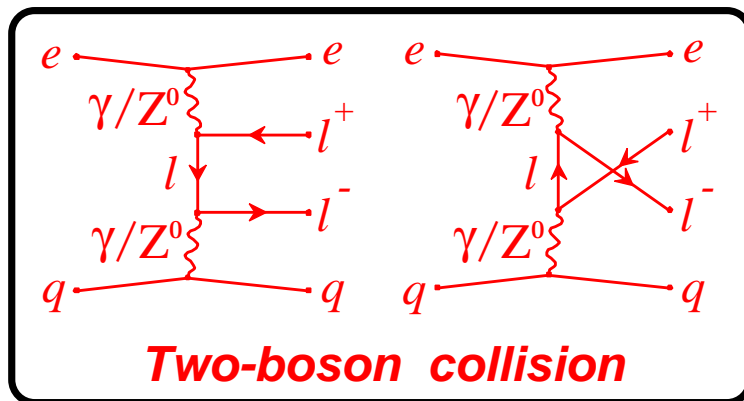
電弱相互作用による**レプトン対生成イベント**: $ep \rightarrow eX l^+l^-$

が様々な物理解析で**重要なバックグラウンド**となる。

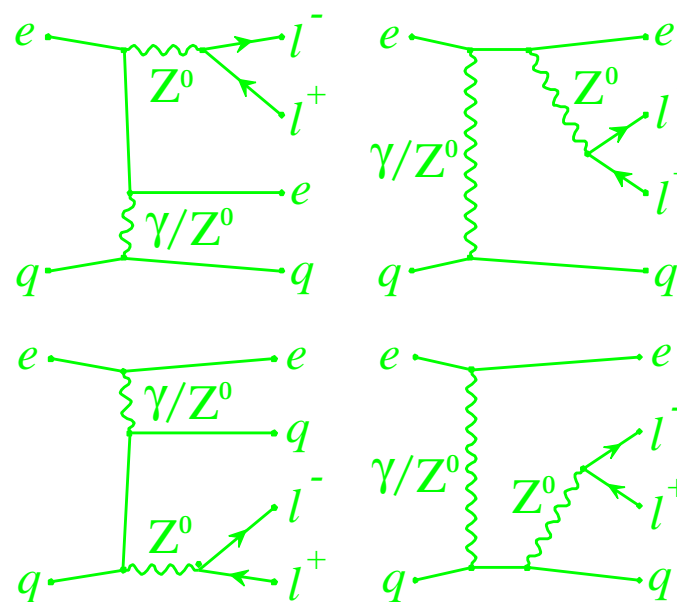
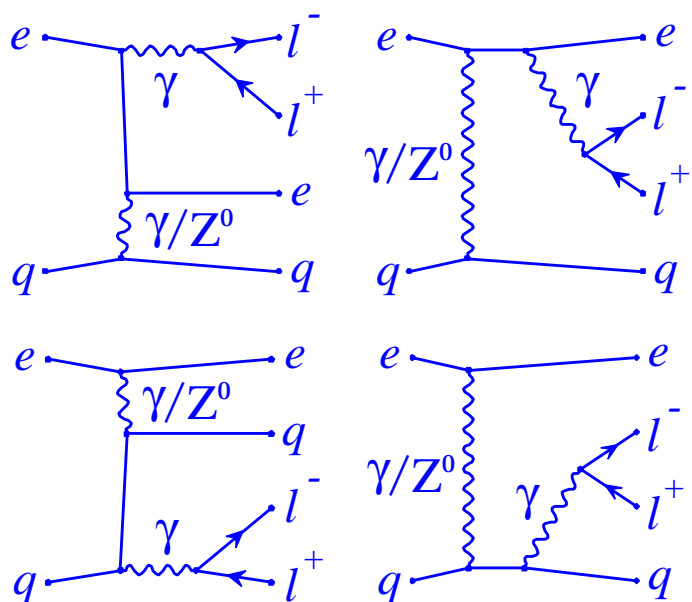
< 物理解析の例 >

- Exclusive $J/\psi, \Upsilon (\rightarrow l^+l^-)$ production
- Charged-current scattering ($ep \rightarrow \nu X$)
- Lepton flavor violation ($ep \rightarrow \mu X$)
- W ($\rightarrow l\nu$) production
- その他、新物理の探索等

電弱理論における 3 種類の ファインマン ダイアグラム



Two-photon process is dominant in most of phase space.



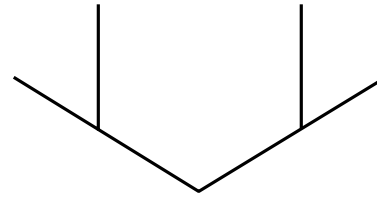
Z⁰ production

≪ 既存のシミュレータプログラム ≫

	LPAIR [*]	TRIDENT [†]
計算法	Exact ME × PS with a numerically stable formula to avoid gauge cancellations	Exact ME from REDUCE
安定性	Stable in whole phase space	Unstable at low scattering angles
ダイアグラム	Two-photon process only	All in QED: two-photon process, internal γ -conversion, $e^{\pm}e^{\pm}$ interference
陽子破壊	By JETSET (always)	Non
偏極電子ビーム	Not supported	Not supported
ウェイト	Unweighted ($\equiv 1$)	Weighted
その他	Used by H1 and ZEUS	Never used

*, † : See PHYSICS at HERA vol.3 (1991)

どちらも不完全

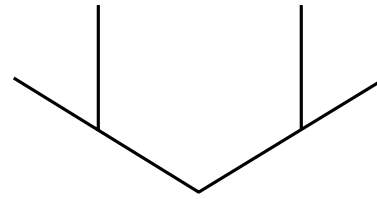


- 厳密なマトリクス エLEMENT
- 可能なすべてのダイアグラム
- 数値的安定性
- 正確な陽子破壊シミュレーション
- 偏極電子ビームに対する計算機能

を備えた新しいイベント ジェネレータが必要

《 問題点 》

- ダイアグラムの個数が多い（最大 48 個）
- マトリクスエレメント中の様々な特異性
- ゲージキャンセレーションによる丸め誤差



GRACEシステムによる自動計算の使用

GRACEシステム

⇒ e^+e^- の物理 (特に CERN/LEP2 実験) において成功を納めた

⇒ ファインマン振幅の自動計算システム

⇒ 使用手順

1. モデルファイル、摂動の次数、始 / 終状態、の指定

2. **すべての可能なダイアグラム**が自動生成される

3. Helicity 振幅を計算するための Fortran コードが自動生成される

⇒ **厳密なマトリクスエレメントに基づいた計算**

⇒ **偏極電子ビームの場合も計算可能**

4. BASES による数値積分

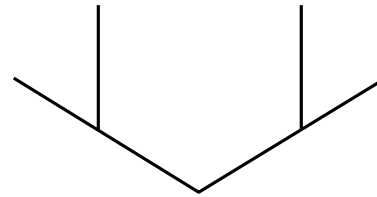
⇒ **数値的安定性**

5. SPRING によるイベント生成

⇒ **イベントジェネレータ**

GRACE システムは、

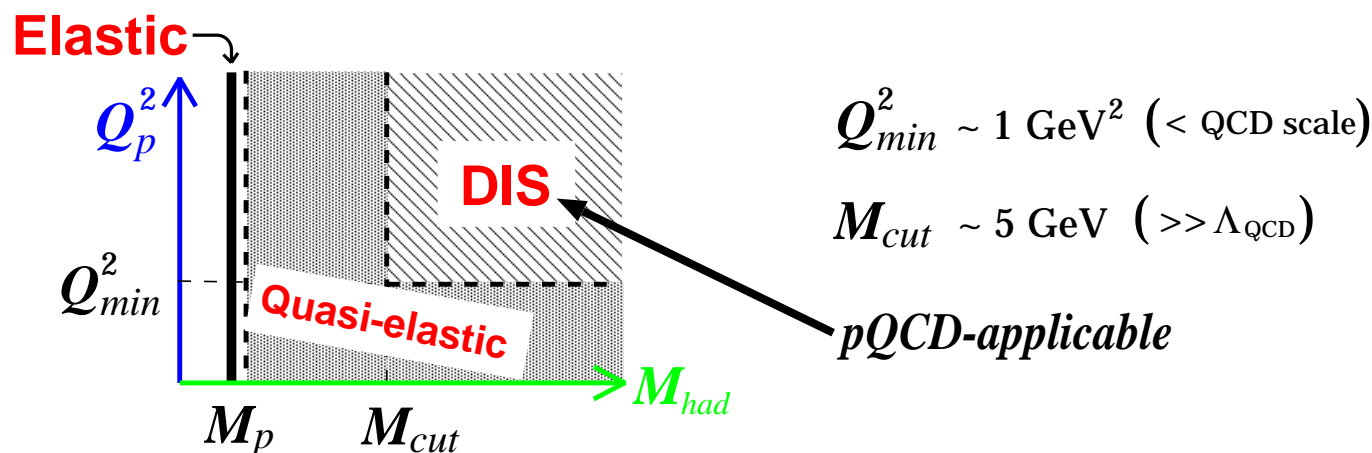
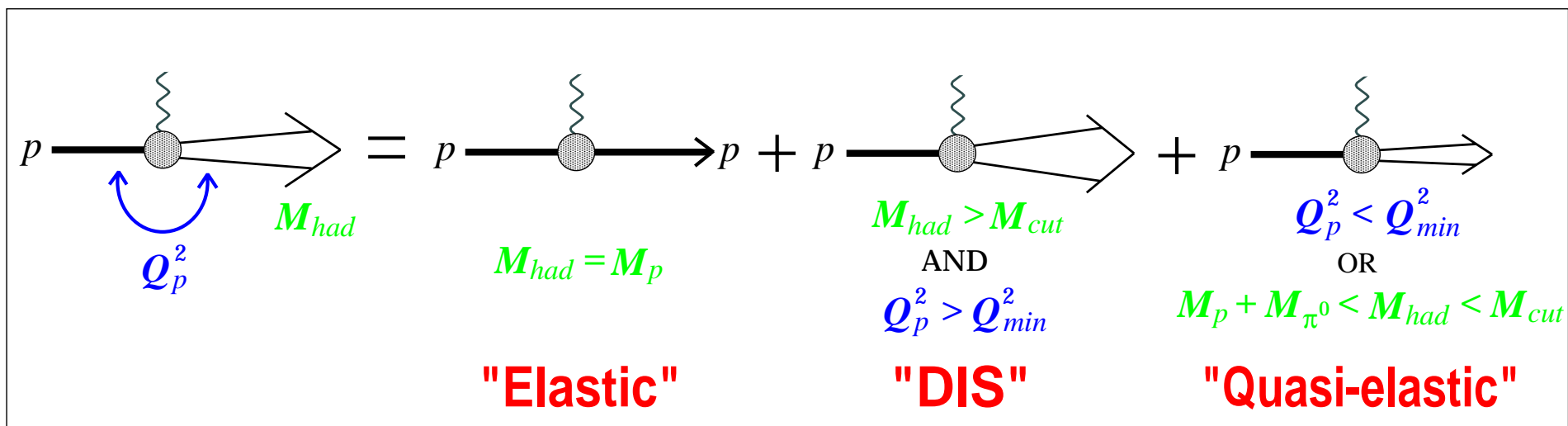
- 主に e^+e^- 散乱で使用されてきた
- 基本的粒子のみを含む



複合粒子 (陽子) とその相互作用を GRACE システムに導入

電子・陽子散乱への応用

3つのプロセスに分類

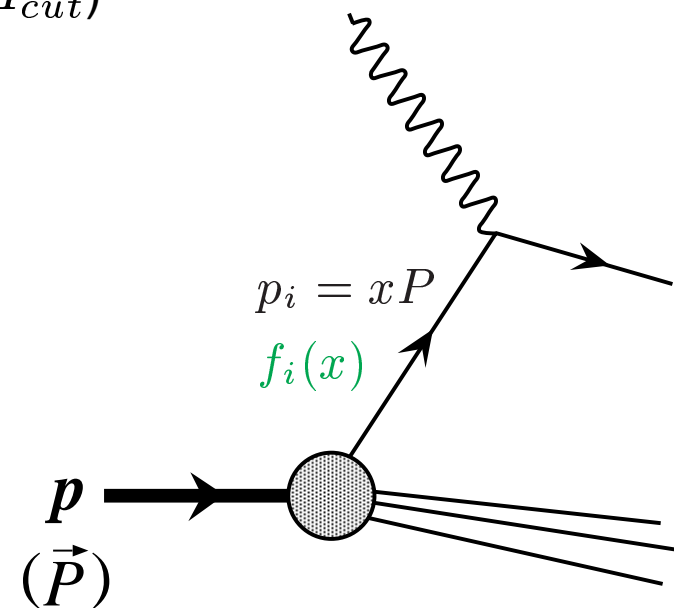
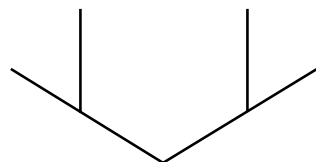


Deep Inelastic Scattering ($Q_p^2 > Q_{min}^2$ & $M_{had} > M_{cut}$)

⇒ クォーク・パートンモデルを使用

⇒ eq 散乱: $\sigma_{eq(i) \rightarrow eq(i)l+l-}(\tilde{s})$ (← GRACE)

⇒ パarton密度関数: $f_i(x)$ (← PDFLIB)



$$\sigma_{ep \rightarrow eXl+l-}(s) = \sum_{i:quark} \int dx f_i(x) \sigma_{eq(i) \rightarrow eq(i)l+l-}(\tilde{s})$$

⇒ パartonレベルの情報を PYTHIA へインターフェイス (→ 完全な終状態)

Elastic ($M_{had} = M_p$) → モデルファイルの変更

⇒ 新粒子: “陽子” の定義

- ⇒ Spin = 1/2
- ⇒ Charge = +1
- ⇒ Mass = 0.93827231 GeV
- ⇒ Color: singlet

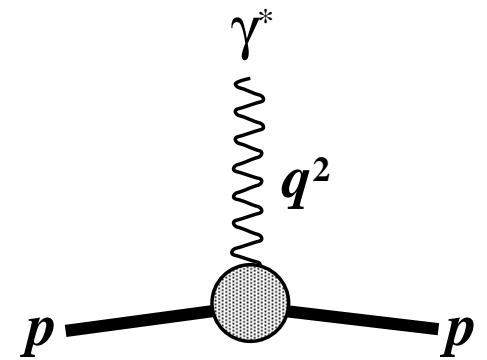
⇒ $pp\gamma$ vertex の定義

$$\Gamma_{pp\gamma}^{\mu} = e_p \left(F_1(q^2) \gamma^{\mu} + \frac{\kappa}{2M_p} F_2(q^2) i\sigma^{\mu\nu} q_{\nu} \right)$$

$$F_1(q^2), F_2(q^2) : \text{Independent formfactors}$$

$$\kappa : \text{Anomalous magnetic moment of proton}$$

$$\begin{pmatrix} G_E(q^2) \\ G_M(q^2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_1(q^2) + \frac{\kappa q^2}{4M_p^2} F_2(q^2) \\ F_1(q^2) + \kappa F_2(q^2) \end{pmatrix}$$

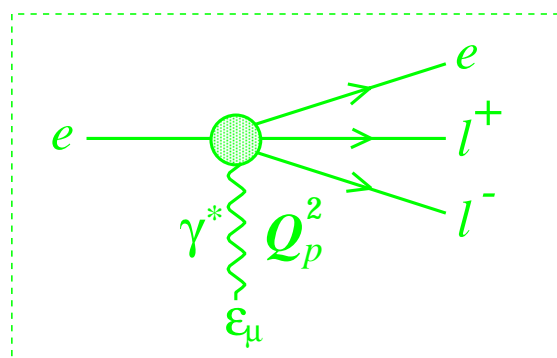


Dipole-Formfactor

$$G_E(q^2) = \frac{1}{\left(1 - \frac{q^2}{0.71}\right)^2} = \frac{G_M(q^2)}{\mu_p}$$

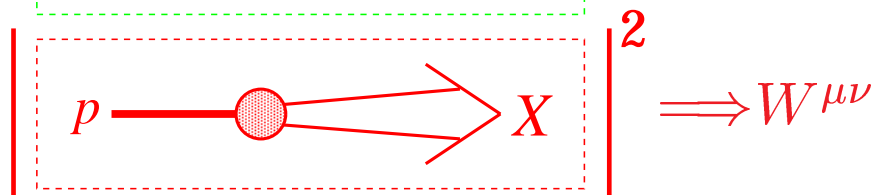
Quasi-elastic ($Q_p^2 < Q_{min}^2$ or $M_p + M_{\pi^0} < M_{had} < M_{cut}$)

- ⇒ ソフトプロセスが多い → クォーク・パートン模型は使えない
- ⇒ より一般的な式: $d\sigma \sim L_{\mu\nu} W^{\mu\nu}$ で計算する自動計算システムを開発



← helicity amplitudes from GRACE

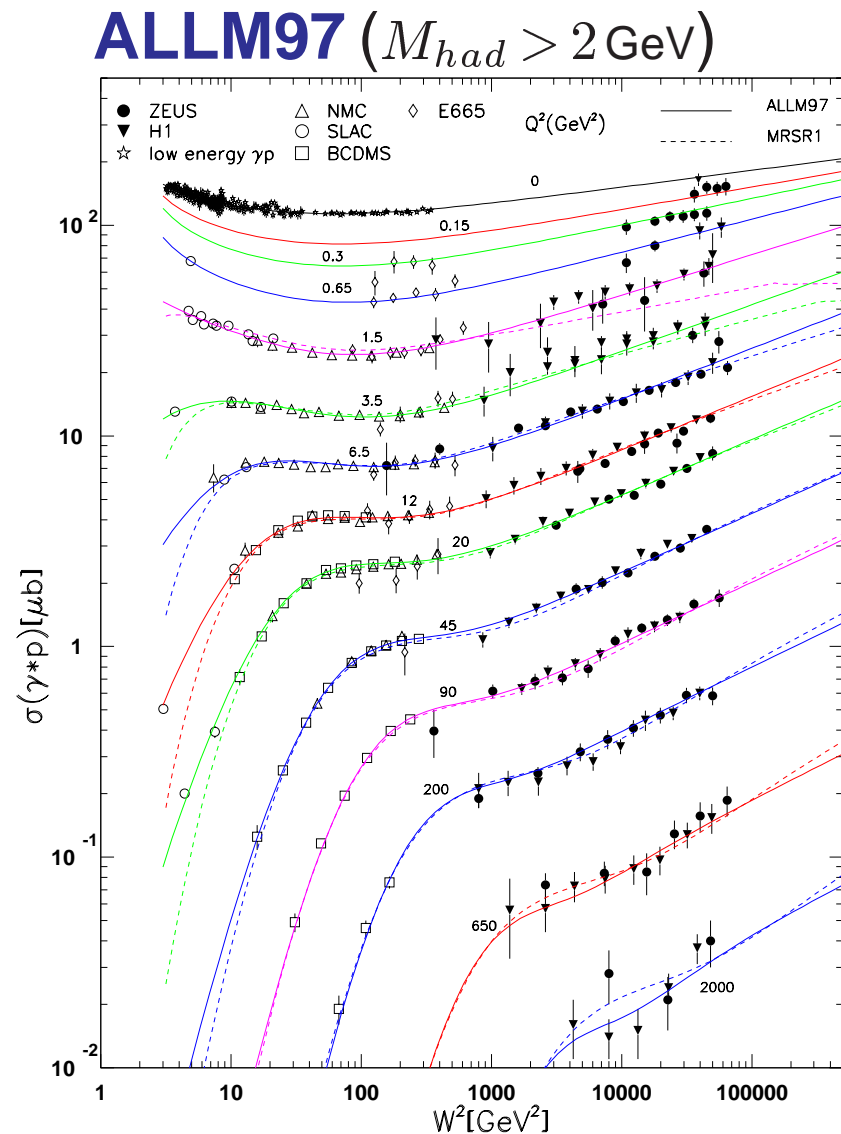
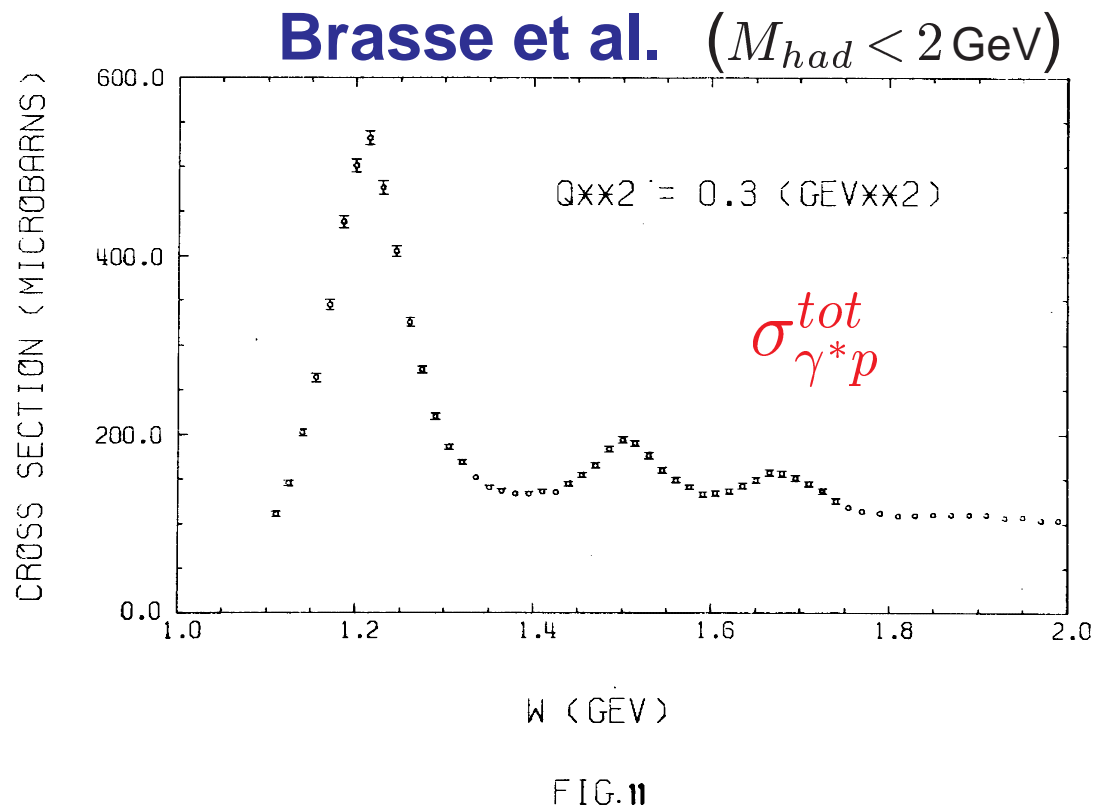
$$\equiv l_\mu \implies L_{\mu\nu} \sim l_\mu l_\nu^*$$



$$W^{\mu\nu} = W_1 \left(-g^{\mu\nu} + \frac{q^\mu q^\nu}{q^2} \right) + W_2 \frac{1}{M_p^2} \left(p^\mu - \frac{p \cdot q}{q^2} q^\mu \right) \left(p^\nu - \frac{p \cdot q}{q^2} q^\nu \right)$$

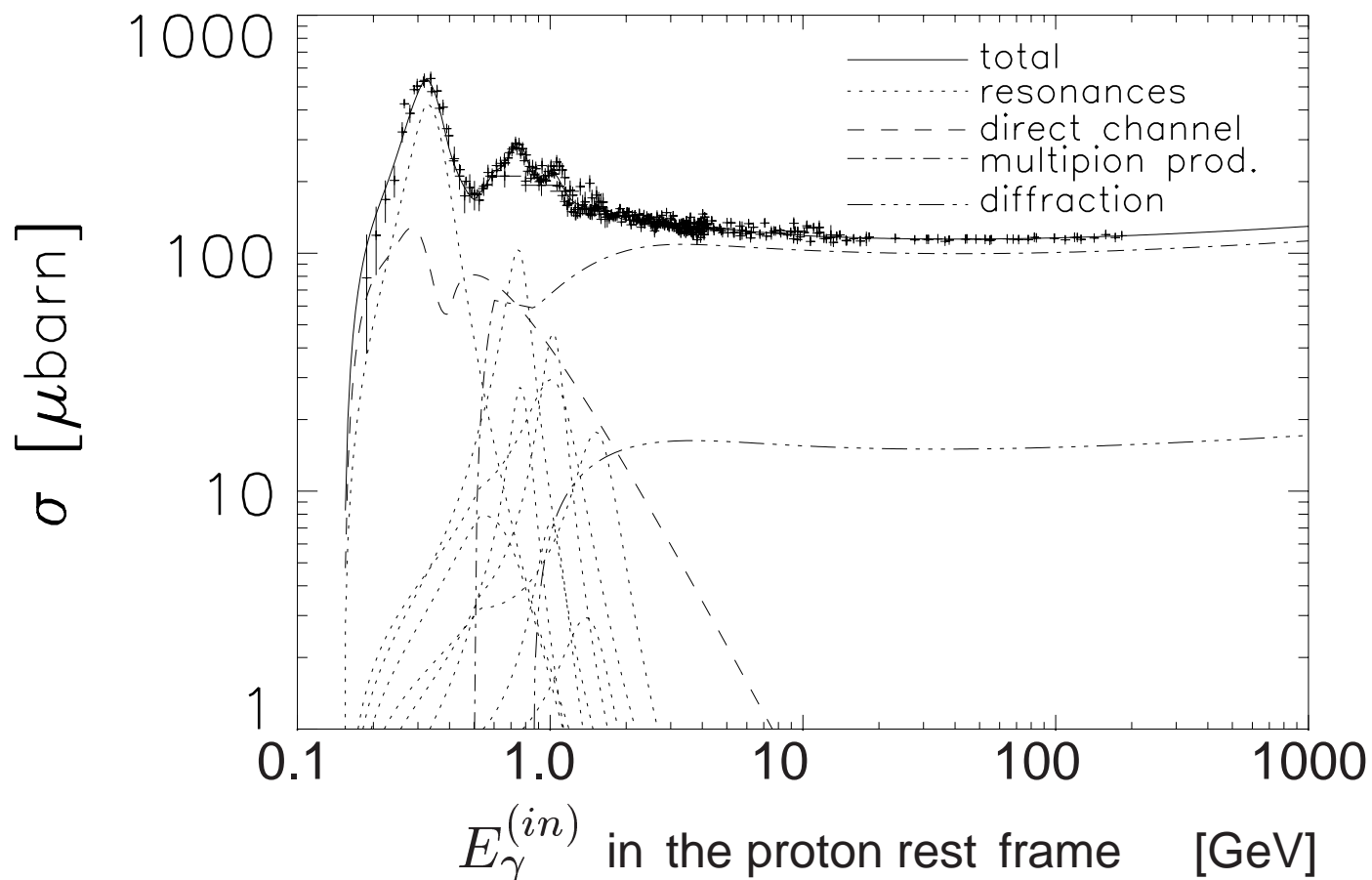
- ⇒ 陽子構造関数 W_1, W_2 : 実験データに基づくパラメトリゼーション

2 種類のパラメトリゼーションを使用



陽子破壊シミュレーション

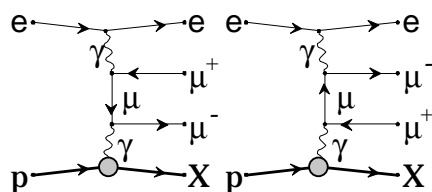
by

SOPHIA(Computer Physics Communications **124**, 290 (2000))

LPAIR ジェネレータとの比較

Process : $ep \rightarrow eX\mu^+\mu^-$

- at the HERA energy
- with the two-photon diagrams only:



- with the same structure functions

《 Detector cuts 》

- CutA — $15^\circ < \theta_\mu < 164^\circ$, $E_\mu > 2 \text{ GeV}$
(for both muons)
- CutB — $15^\circ < \theta_\mu < 164^\circ$, $E_\mu > 2 \text{ GeV}$
(for both muons)
& $15^\circ < \theta_e < 164^\circ$, $E_e > 4 \text{ GeV}$
(for scattered electrons)

0.1% の精度で一致 !

Elastic (in unit of pb)

	This method	LPAIR
No cut	$9.742(\pm 0.003) \times 10^4$	$9.736(\pm 0.003) \times 10^4$
CutA	$8.493(\pm 0.005) \times 10$	$8.496(\pm 0.008) \times 10$
CutB	$6.094(\pm 0.008) \times 10^{-1}$	$6.091(\pm 0.005) \times 10^{-1}$

DIS

	This method	LPAIR
No cut	$9.463(\pm 0.002) \times 10^2$	$9.464(\pm 0.002) \times 10^2$
CutA	$3.651(\pm 0.005) \times 10$	$3.649(\pm 0.004) \times 10$
CutB	$4.311(\pm 0.005) \times 10^{-1}$	$4.313(\pm 0.004) \times 10^{-1}$

Quasi-elastic

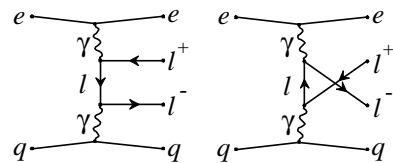
	This method	LPAIR
No cut	$7.029(\pm 0.003) \times 10^3$	$7.025(\pm 0.002) \times 10^3$
CutA	$4.855(\pm 0.005) \times 10$	$4.846(\pm 0.004) \times 10$
CutB	$4.254(\pm 0.004) \times 10^{-1}$	$4.255(\pm 0.004) \times 10^{-1}$

計算例

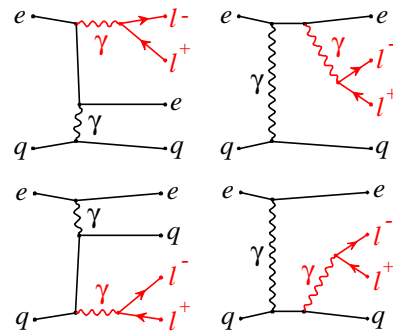
Process: $e^+ q \rightarrow e^+ q \mu^+ \mu^-$

- at the HERA energy
- with the QED diagrams:

Two-photon

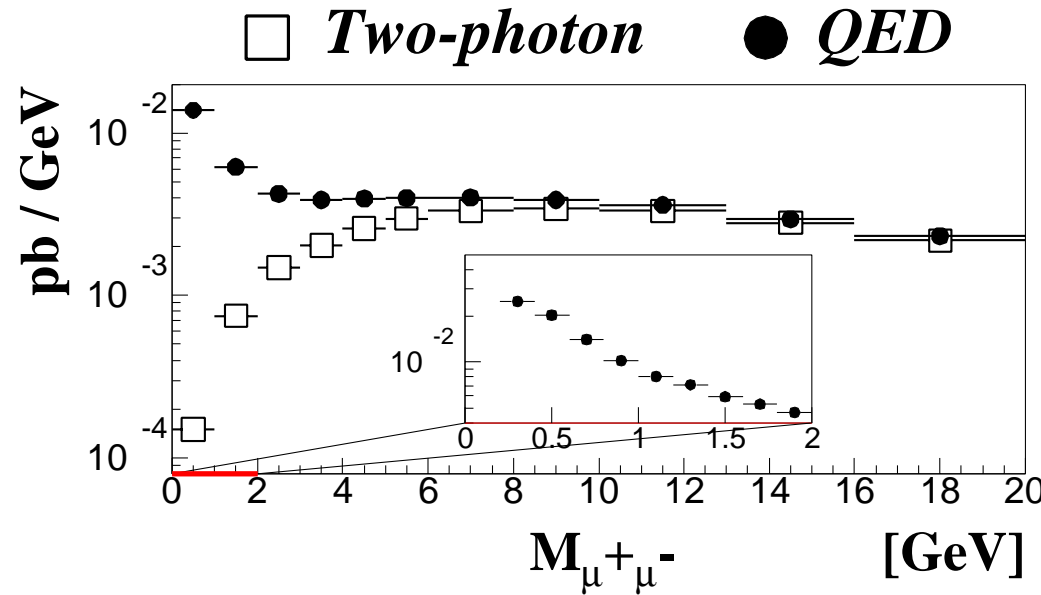


Internal photon conversion



Detector cuts for **single- μ + jet**

$18^\circ < \theta_\mu < 160^\circ$ & $P_t > 5 \text{ GeV}/c$
 (for at least one muon) &
 $P_{tq} > 15 \text{ GeV}/c$ & $\theta_q > 10^\circ$



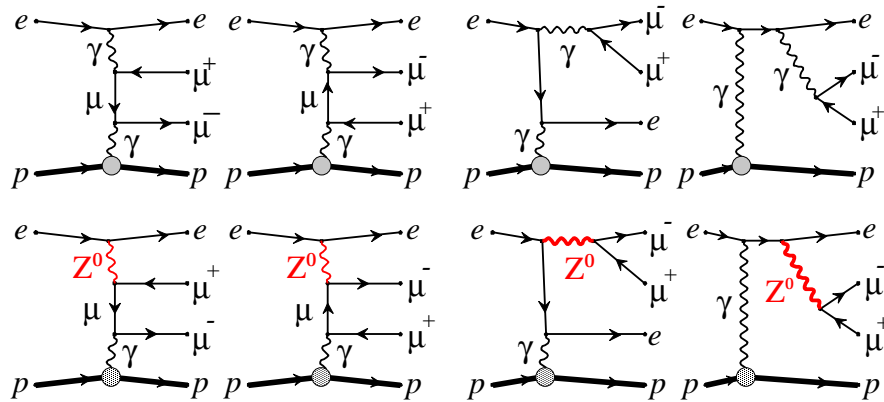
$$\Delta\sigma = 0.05 \text{ pb}$$

LPAIR にはない効果が見える！

Z^0 の効果

Process: $e^+ p \rightarrow e^+ p \mu^+ \mu^-$

- at the HERA energy
- with the EW diagrams:

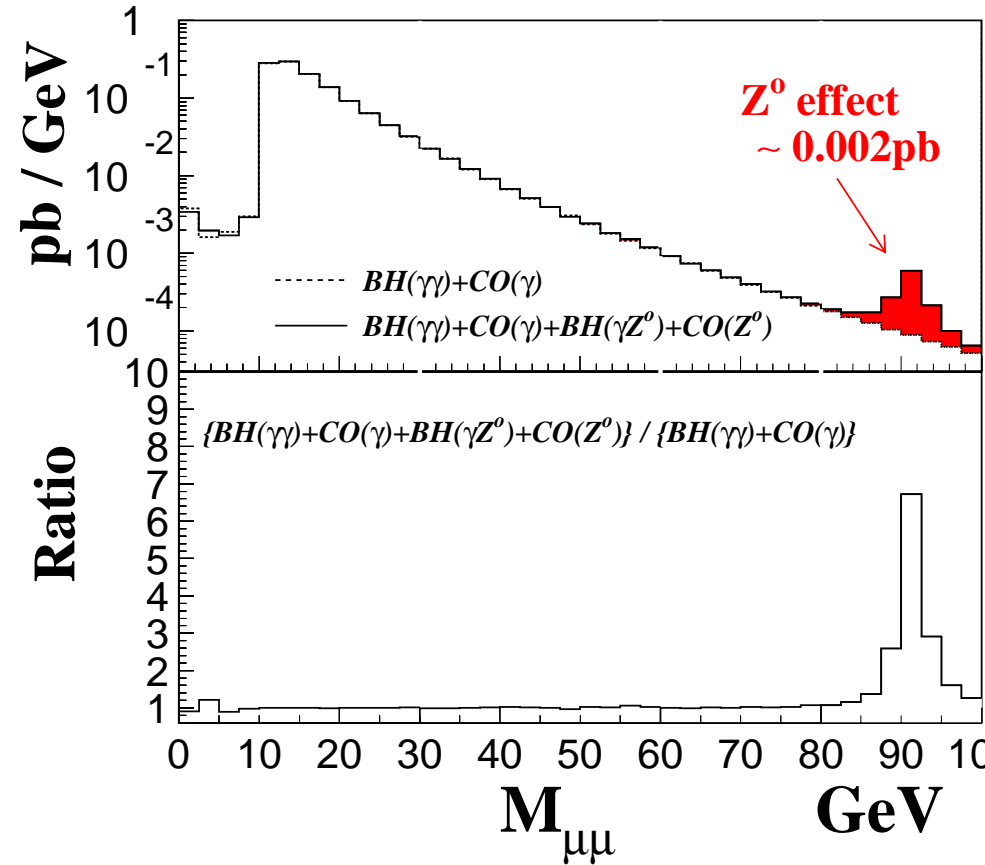


Detector cuts for di-muon

$$15^\circ < \theta_\mu < 164^\circ \ \& \ P_t > 5 \text{ GeV}/c$$

(for both muons)

Clear Z^0 signal!



GRAPE

GRAce-based generator for Proton-Electron collisions



GRAPE-Dilepton (Version 1.1)

A generator for dilepton production in ep collisions

Tetsuo Abe

Department of Physics, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8654, Japan

Received 24 April 2000; received in revised form 4 October 2000

Abstract

GRAPE-DILEPTON is a Monte Carlo event generator for dilepton production in ep collisions. The cross-section calculation is based on the exact matrix elements in the electroweak theory at tree level. The dilepton productions via $\gamma\gamma$, γZ^0 , $Z^0 Z^0$ collisions and via photon internal conversion are taken into account. In addition, the effects of the Z^0 on/off-shell production are also included. The relevant Feynman amplitudes are generated by the automatic calculation system GRACE. The calculation of the proton vertex covers the whole kinematical region. This generator has an interface to PYTHIA and SOPHIA to obtain complete hadronic final states. This program can be downloaded from the CPC Program Library under catalogue identifies <http://www-zeus.desy.de/~abe/grape/>. © 2001 Elsevier Science B.V. All rights reserved.

PROGRAM SUMMARY

Title of program: GRAPE-DILEPTON (v1.1)

Catalogue identifier: ADNR

Program Summary URL: <http://cpc.cs.qub.ac.uk/summaries/ADNR>

Program obtainable from: CPC Program Library, Queen's University of Belfast, N. Ireland and from <http://www-zeus.desy.de/~abe/grape/>

Operating system under which the program has been tested: UNIX

Programming language used: Fortran77

Memory required to execute with typical data: 7 Mwords for integrations, 9 Mwords for event generations

E-mail address: abe@helios.kek.jp (T. Abe).

Number of bytes in distributed program, including test data, etc.: 999 438

Distribution format: tar gzip file

Keywords: Dilepton, lepton-pair, ep collision, Bethe-Heitler, Z boson, dipole form factor, hadron tensor, lepton tensor, structure function, parton density, GRACE

Nature of physical problem

A precise estimation of the cross-section of the electroweak dilepton production in ep collisions is required in various physics analyses, where 8–48 Feynman diagrams can contribute.

Method of solution

The automatic calculation system GRACE is used to obtain all of the relevant helicity amplitudes. The phase space is divided into the

GRAPE ホームページ since 1999

<http://research.kek.jp/people/tabe/grape/>

GRAPE

GRACE-based generator for Proton-Electron collisions

FAQ

(Up-to-date information and news are put in this page.)

GRAPE-Dilepton_v1.1

Computer Physics Communications **136**: 126-147, 2001;
hep-ph/0012029
(HTML version)

Source code and manual (gzipped tar file):
v1.1c, v1.1d, v1.1e, v1.1f, v1.1g, v1.1h, v1.1i
Comments on the updates

Paper for the proceedings of the HERA MC workshop (WG70)
(HTML version)

Works in HERA MC workshop WG70 (QED: radiative effects)

Comments and questions to Tetsuo Abe (tabe@post.kek.jp)
(Last updated on Sep. 30, 2001)

現在 DESY/HERA 実験で広く使われている

⇒ **Lepton Flavor Violation** ($ep \rightarrow \mu X$)

⇒ by H1 and ZEUS

⇒ **J/ψ ($\rightarrow l^+l^-$) production**

⇒ Photoproduction: DESY-02-008 (hep-ex/0201043) [ZEUS collaboration]

⇒ Electroproduction: T. Abe, Ph.D. thesis (University of Tokyo)

⇒ **Deeply Virtual Compton Scattering** ($ep \rightarrow ep\gamma$ via $\gamma p \rightarrow \gamma p$)

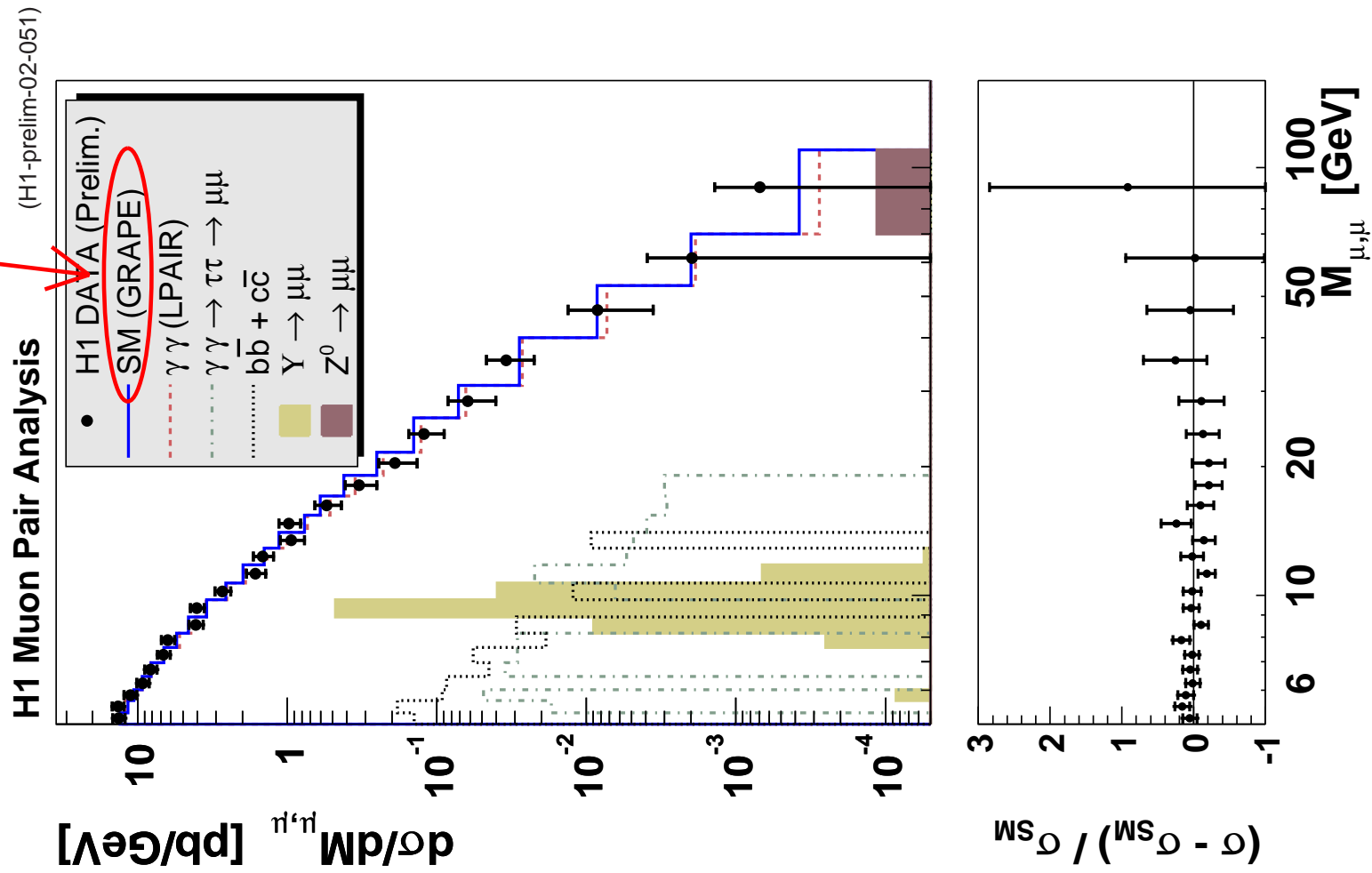
⇒ Physics Letters **B517** (2001) 47 [H1 collaboration]

⇒ EPS2001 paper 564 [ZEUS collaboration]

⇒ **Muon-pair Analysis**

⇒ **H1-prelim-02-051 (for DIS2002)** (→ plots)

標準理論モンテカルロとして使用されている



まとめ

- ⇒ **GRACE** システムを電子・陽子散乱に応用
 - ⇒ 複合粒子 (陽子) を組み込んだ
 - ⇒ LPAIR ジェネレータとの比較により、計算システムをチェック

- ⇒ レプトン対生成のイベント ジェネレータを製作
 - ⇒ Computer Physics Communications 誌にて公開
 - ⇒ DESY/HERA 実験で広く使用されている