

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

Facultad de Ciencias

Grado de Física

Trabajo Fin de Grado

Desarrollo de Prácticas Informáticas para el campo Física de Partículas

Código del TFG: **FS23-28-FSC**Tipo de TFG: **Trabajo Docente**

Autor: Unai Garrido Ramírez



6 Septiembre de 2024

Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYQCTPH6IY	Fecha	06/09/2024 15:06:24
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.		
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ		
Url de verificación	https://sede.uco.es/GOnceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYQCTPH6IY	Página	1/51



Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que han contribuido de manera significativa a la realización de este trabajo de fin de grado.


En primer lugar, me gustaría agradecer profundamente a mis tutores, el Profesor Jorge Berenguer Antequera y el Profesor David López Durán, por su apoyo y atención durante la realización de este trabajo. Sus conocimientos y consejos han sido fundamentales para llevarlo a cabo. Gracias por, siempre que habéis podido, estar disponibles para resolver mis dudas y contribuir a mi crecimiento académico.

Agradezco también a la Universidad de Córdoba por proporcionarme el material educativo e instalaciones con objeto de facilitarme la realización de mis estudios.

Quisiera extender mi gratitud a mis compañeros y amigos, quienes me han brindado su apoyo, compartiendo y contrastando ideas constantemente, lo que nos ha llevado a empujarnos mutuamente hasta el final de esta etapa.

Finalmente, quiero agradecer de corazón a mi familia. A mis padres, Daniel y Mayte, por su amor incondicional, por creer en mí y por todos los sacrificios posibles e imposibles, que han hecho para que yo pueda alcanzar esta meta. A mis abuelos y al resto de mi familia, por su apoyo y por ser una fuente constante de ánimo y alegría. Sin ustedes, este logro no habría sido posible.

Gracias a todos por ser parte de este importante capítulo de mi vida. Este logro es tanto mío como suyo.

Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYOQCTPH6IY	Fecha	06/09/2024 15:06:24	
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.			
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ			
Url de verificación	https://sede.uco.es/GOnceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYOQCTPH6IY	Página	2/51	

Índice general

Índice general	2
Resumen. Palabras clave	3
Abstract. Keywords	4
1. Contexto Docente	5
2. Justificación del trabajo docente	6
3. Objetivos	9
4. Desarrollo del material docente	10
Conclusiones	13
Conclusions	14
Bibliografía	15
Anexo I: Programa informático elaborado en C++	16
Anexo II: Recurso docente elaborado	19

Resumen

En este TFG se ha abarcado el desarrollo de una práctica informática que contribuye al conjunto de materiales docentes en el campo de la física Nuclear y de partículas, en el marco de la asignatura Física Nuclear y de Partículas, impartida en el cuarto curso del grado de Física de la universidad de Córdoba.


Para llevar esto a cabo se pretende que el alumnado use el software libre Pythia, con objetivo de reproducir y simular ciertas situaciones que les ayudaran a afianzar los conceptos de la asignatura.

En este trabajo se expondrá un protocolo de prácticas el cual será usado por el alumnado de cara a la realización de las prácticas. En este se abarcarán temas y conceptos tales como principios de conservación, parámetros de impacto, distribución angular de partículas, entre otras magnitudes involucradas en las experiencias de colisiones, con objeto de maximización de la comprensión conceptual de la asignatura. Junto con este protocolo, también se implementará la guía del profesor, que ayudará al docente a guiar las simulaciones y aconsejar al alumnado.

En el cuerpo de este trabajo se discutirán el contexto educativo, describiendo la asignatura y el perfil de los estudiantes a quienes están dirigidas las prácticas informáticas. A continuación, se presenta la justificación del trabajo docente, explicando los motivos que llevaron a la realización de este Trabajo de Fin de Grado y los objetivos que se buscan alcanzar. Por último se detallará el desarrollo del material educativo y se incluirá un anexo con el recurso educativo elaborado.

Palabras clave: Física Nuclear y de Partículas; Software libre Pythia; Leyes de conservación; Distribución angular de partículas.

Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYQCTPH6IY		Fecha	06/09/2024 15:06:24	
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.				
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ				
Url de verificación	https://sede.uco.es/GOnceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYQCTPH6IY		Página	4/51	



Abstract

In this study, we have addressed the problem of the lack of implementation of laboratory practices or computer practices in the field of Nuclear and Particle Physics, within the framework of the subject with the same name taught in the fourth year of the Physics degree at the University of Córdoba.


To achieve this, it is intended that students use the free software Pythia to reproduce and simulate certain situations that will help them reinforce the concepts of the subject.

In this work, one practice protocol will be presented, which will be used by the students for the realization of the practices. This will cover topics and concepts such as conservation laws, angular distribution of particles, among other particle colliding concepts, with the aim of maximizing the conceptual understanding of the subject. Along with this protocol, a teacher guide will also be implemented, which will help the teacher guide the simulations and advise the students.

The body of this work will discuss the educational context, describing the subject and the profile of the students for whom the computer practices are intended. Then, the justification for the teaching work is presented, explaining the reasons that led to the realization of this Final Degree Project and the objectives that are sought to be achieved. Finally, the development of the educational material will be detailed and an annex with the developed educational resource will be included.

Keywords: Nuclear and Particle Physics; Free software Pythia; conservation laws; Particle colliding.

Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYZEWOQCTPH6IY		Fecha	06/09/2024 15:06:24	
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.				
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ				
Url de verificación	https://sede.uco.es/GOnceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYZEWOQCTPH6IY		Página	5/51	



CAPÍTULO 1

Contexto Docente

El contenido de este Trabajo Fin de Grado consiste en la elaboración de unas prácticas de laboratorio o prácticas informáticas para la asignatura de Física Nuclear y de Partículas.

Esta asignatura se imparte en el cuarto curso del Grado de Física de la UCO, y se imparte tanto en español como en inglés dentro del módulo bilingüe perteneciente al Plan de Plurilingüismo de la UCO. A esta le corresponden 6 créditos, que se dividen en 60 horas de trabajo presencial en clases de teoría y problemas. Los contenidos de la asignatura abarcan diversos conceptos sobre Física Nuclear y de Partículas como las propiedades de los núcleos atómicos y sus números cuánticos nucleares, radiactividad y dosimetría, modelos nucleares, el núcleo del deuterón, la clasificación de partículas fundamentales mediante el Modelo Estándar y el Modelo Quark, así como las leyes de conservación (simetría CP, teorema CPT), entre otros.

La asignatura presenta carácter obligatorio, dividiéndose así la evaluación en tres partes bien diferenciadas: el 75 % será destinado a el examen final que se divide en una parte de teoría y otra de problemas o práctica, el resto se divide en un 15 % de actividades propuestas con carácter presencial y el restante 10 % corresponde a la elaboración de las prácticas informáticas y sus correspondientes Informes.

Las clases de laboratorio de la asignatura están destinadas para grupos de aproximadamente 30 personas, impartándose usualmente en el Aula interactiva del Edificio de Gobierno (Paraninfo) del Campus Rabanales.

Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYQCTPH6IY	Fecha	06/09/2024 15:06:24
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.		
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ		
Url de verificación	https://sede.uco.es/GOnceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYQCTPH6IY	Página	6/51



CAPÍTULO 2

Justificación del trabajo docente

Los experimentos en Física Nuclear y de Partículas enfrentan importantes limitaciones debido a su elevado coste, que se entiende como parte del desarrollo y mantenimiento de instalaciones como aceleradores de partículas, reactores nucleares y detectores avanzados que requieren inversiones multimillonarias. Estas infraestructuras no solo demandan un gasto inicial considerable, sino que también implican costos continuos para su operación, mantenimiento y actualización, por lo que este tipo de experimentos son imposibles de replicar en las instalaciones de una universidad.

Debido a esto, de normal se proponen simulaciones por ordenador para estudiar el comportamiento de las partículas fundamentales. Estas simulaciones ofrecen numerosas ventajas para replicar experimentos en física de partículas, especialmente considerando los altos requisitos económicos expuestos anteriormente.

En estas prácticas se proponen varias simulaciones a través de un software de simulación de colisiones de alta energía llamado Pythia8, cuya versión fue obtenida en la página Pythia.org. Las simulaciones que veremos están completamente adaptadas parcialmente a los conocimientos que se abarcan en el temario de la asignatura, ya que estas mezclan conceptos ya vistos junto con algunos otros importantes que se introducen. La práctica ha sido realizada bajo la supervisión de los docentes de la asignatura a la que va destinada.

En los protocolos se proponen cuestiones claras y concisas y al mismo tiempo algunas más abiertas, con objetivo de hacer al alumnado demostrar todo lo que han

Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYQCTPH6IY	Fecha	06/09/2024 15:06:24
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.		
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ		
Url de verificación	https://sede.uco.es/GOnceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYQCTPH6IY	Página	7/51



aprendido respecto a las colisiones de partículas.

En el trabajo también se han desarrollado las guías del profesor, para que no haya ninguna duda a la hora de contestar las preguntas realizadas y el profesor pueda guiar al alumno en caso de duda.


Podemos enumerar varias de las ventajas que nos brinda usar este tipo de simulaciones. Evitamos trabajar con materiales nucleares y equipos de alta energía, ya que pueden ser peligrosos.

Obtenemos también una mayor flexibilidad y versatilidad, ya que una simulación nos permite cambiar rápidamente las condiciones del experimento, como la energía de colisión de las partículas, el tipo de colisiones o la configuración del detector. Esta flexibilidad facilita la exploración de una amplia gama de escenarios para el diseño y desarrollo de experimentos que permitan corroborar resultados teóricos.

Se puede destacar también la posibilidad de llevar simulaciones que permitan explorar escenarios extremos, proporcionando nueva información valiosa sobre fenómenos en el marco de la física de partículas bajo condiciones difíciles e imposibles de replicar en la realidad.


Las simulaciones desarrolladas en este TFG están programadas en un software basado en C++, lo que permite una gran portabilidad, ya que pueden ser compiladas y ejecutadas en una amplia variedad de plataformas y sistemas operativos haciendo uso de una máquina virtual. Esto permite que, si el alumno o alumna quiere repetir alguno de los apartados de los protocolos, pueda hacerlo sin problema desde cualquier otro lugar.

Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYOQCTPH6IY		Fecha	06/09/2024 15:06:24	
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.				
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ				
Url de verificación	https://sede.uco.es/GOnceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYOQCTPH6IY		Página	8/51	



A lo largo de la trayectoria en el Grado de Física se espera que el alumnado adquiriera numerosas habilidades transversales las cuales le ayudarán a enfrentarse a problemas en el futuro, en concreto esta experiencia o práctica está diseñada para trabajar las siguientes competencias:

- CB1 - Capacidad de análisis y síntesis.
- CB2 - Capacidad de organización y planificación.
- CB3 - Comunicación oral y/o escrita.
- CB4 - Capacidad de gestión de la información.
- CB5 - Resolución de problemas.
- CB8 - Aprendizaje autónomo.
- CB9 - Creatividad.
- CB11 - Sensibilidad hacia temas medioambientales.
- CE1 - Conocimiento y comprensión de los fenómenos y de las teorías físicas más importantes.
- CE2 - Capacidad de estimar órdenes de magnitud para interpretar fenómenos diversos.
- CE5 - Capacidad de modelado de fenómenos complejos, trasladando un problema físico al lenguaje matemático.
- CE7 - Capacidad de transmitir conocimientos de forma clara tanto en ámbitos docentes como no docentes.

Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYOQCTPH6IY	Fecha	06/09/2024 15:06:24	
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.			
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ			
Url de verificación	https://sede.uco.es/GOnceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYOQCTPH6IY	Página	9/51	

CAPÍTULO 3


Objetivos

Este Trabajo de Fin de Grado tiene un objetivo claramente marcado, Desarrollar una práctica de ordenador en el campo de la Física de Partículas con simulaciones para el estudio de diferentes escenarios de colisión a altas energías utilizando el software especializado Pythia8.2. Como objetivo consecuente se encuentra formar al alumnado matriculado en la asignatura Física Nuclear y de Partículas, además de ayudarles en el afiance de conceptos relacionados con esta asignatura y algunas cursadas anteriormente.

Se ha realizado un protocolo de prácticas para los alumnos que cursan la asignatura en castellano y otro para los que la cursan en Inglés además de las correspondientes guías del profesor en ambos idiomas.

1. Simulación de colisiones de partículas a altas energías usando el software Pythia8.
2. Simulating high energy particle collisions using Pythia8 software.
3. Guía del Profesor: Simulación de colisiones de partículas a altas energías usando el software Pythia8.
4. Professor Guide: Simulating high energy particle collisions using Pythia8 software.

Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYQCTPH6IY		Fecha	06/09/2024 15:06:24	
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.				
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ				
Url de verificación	https://sede.uco.es/GOnceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYQCTPH6IY		Página	10/51	



CAPÍTULO 4

Desarrollo del material docente


Primero, se barajó la posibilidad de utilizar diferentes aplicaciones de simulación para la realización de las prácticas. Finalmente, se decidió usar el software Pythia8, ya que brindaba sencillez a la hora de ejecutar cada programa informático y permitía su uso en Linux, y por tanto, en los ordenadores de las instalaciones de la UCO.

En el archivo que se descarga de la web oficial del software, se encuentra una carpeta con diferentes programas informáticos ejecutables que contienen distintos tipos de experimentos de colisión entre partículas. Al no encontrar ninguno que pareciera lo suficientemente orientativo y claro, se decidió elaborar un nuevo fichero desde cero, basándome en la respuesta que ofrecía el programa al ejecutar los demás, pero adaptándolo al enfoque que queríamos darle a la práctica.

Además de esto, se elaboró un fichero de comandos adaptado al alumnado que realiza la práctica, para que pudieran cambiar y modificar las variables del experimento de manera más directa y clara.

El fichero en el que se encuentra nuestro experimento nos brinda muchísima información, suficiente para realizar un análisis cualitativo y cuantitativo al jugar con los parámetros. Con todo esto, se estima y propone que la realización de la práctica dure entre 2:30 h y 3 h, ya que los alumnos tendrán que contrastar información y razonar sobre las diferentes cuestiones que se exponen en el protocolo.

Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYQCTPH6IY		Fecha	06/09/2024 15:06:24	
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.				
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ				
Url de verificación	https://sede.uco.es/GOnceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYQCTPH6IY		Página	11/51	



En segundo lugar, se procedió a la realización del protocolo de prácticas. Para su desarrollo, nos basamos en la bibliografía de la asignatura.

Usualmente, en el proceso de impartición de los contenidos de la asignatura no se llega a abarcar el tema de colisiones entre partículas por falta de tiempo. Por lo tanto, se comienza con una introducción teórica de los conceptos en los que se basa la experiencia, además de una breve introducción para contextualizar la situación del experimento que se va a estudiar.

Seguidamente, se realizó la batería de preguntas, entre las que se incluyen cuestiones introductorias para que el alumno analice la respuesta y entienda qué está viendo en la simulación, junto con cuestiones de carácter cuantitativo con el objetivo de que el alumno calcule y comprenda conceptos y magnitudes asociadas al experimento. Por último, se encuentran cuestiones cualitativas con el propósito de dar rienda suelta al alumno para que razone sobre los resultados obtenidos en la práctica.


Como añadido, se han elaborado diferentes apéndices: uno para la correcta instalación del programa, tanto en dispositivos de la UCO como en dispositivos externos o con otro sistema operativo; y otro a modo de tutorial con indicaciones sobre cómo realizar representaciones en Gnuplot del tipo histograma, ya que en la batería de preguntas aparecen cuestiones que conllevan la realización de este tipo de representaciones.

En tercer lugar, se ha desarrollado una guía para el profesor, compuesta por diferentes imágenes aclaratorias y descripciones sobre cada punto del protocolo, con el objetivo de que el profesor la consulte en caso de que el alumnado encuentre alguna dificultad durante la realización de la práctica. Esta guía se propone únicamente como herramienta orientativa y no resolutive; es decir, se espera que el profesor tenga flexibilidad al escuchar las diferentes interpretaciones propuestas por el alumnado y, en caso de considerarlas erróneas, les guíe haciendo uso de esta.


Como complemento al trabajo y aprovechando las habilidades en lengua inglesa existentes, también se ha realizado el protocolo adaptado para el alumnado del grupo de inglés, ya que la asignatura se encuentra en el módulo bilingüe.

Para el desarrollo de todo este material, he contado con diversas reuniones con los dos tutores del trabajo de fin de grado, en las cuales he sido orientado en esta tipología de trabajo de fin de grado y asesorado por su parte en aspectos teóricos

Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYQCTPH6IY		Fecha	06/09/2024 15:06:24	
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.				
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ				
Url de verificación	https://sede.uco.es/GOnceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYQCTPH6IY		Página	12/51	



y de programación.

Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYSEWYOQCTPH6IY	Fecha	06/09/2024 15:06:24	
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.			
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ			
Url de verificación	https://sede.uco.es/GOnceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYSEWYOQCTPH6IY	Página	13/51	


Conclusiones

El propósito central de este Trabajo de Fin de Grado ha sido llevar a cabo prácticas informáticas para la asignatura de Física Nuclear y de Partículas. Para ello, se han elaborado protocolos de prácticas y las correspondientes guías para el profesor, tanto en español como en inglés, aplicadas a las simulaciones y eventos proporcionados por el software en el que nos centramos, Pythia.

A través del uso de este simulador, los alumnos podrán impulsar su capacidad de razonamiento crítico, respondiendo a supuestos reales reproducidos y simulados en el programa, lo que les ayudará a afianzar los conceptos de la materia. También se busca ofrecer mayor libertad y flexibilidad en las respuestas, con el objetivo de observar qué tipo de conclusiones son capaces de obtener el estudiantado al aplicar los conocimientos de la asignatura.

La filosofía de este tipo de aprendizaje consiste en reproducir con la mayor precisión posible las propiedades de las colisiones obtenidas experimentalmente y, además, llegar a conclusiones sobre las nuevas partículas resultantes en estos eventos y sus propiedades.

Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYQCTPH6IY		Fecha	06/09/2024 15:06:24	
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.				
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ				
Url de verificación	https://sede.uco.es/GOnceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYQCTPH6IY		Página	14/51	




Conclusions

The central objective of this Final degree project has been to develop computer-based practical exercises for the Nuclear and Particle Physics course. To achieve this goal, detailed protocols and teaching guides for the students and teacher have been prepared, both in Spanish and English. These guides are specifically designed for use with the Pythia simulation software, which provides a variety of relevant simulations and events for the subject matter.

The implementation of these practices using the Pythia simulator will allow students to strengthen their critical reasoning skills. By facing simulated scenarios that replicate real-world situations in particle accelerators, students will be able to apply the concepts learned in class and draw their own conclusions. In addition, it is aimed to encourage flexibility and freedom in their responses, allowing students to explore different approaches and perspectives.

The central philosophy of this style of learning lies in reproducing as accurately as possible the properties of collisions obtained in real experiments. This, in turn, will allow students to draw conclusions about the new particles resulting from these events and their properties.


Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYQCTPH6IY		Fecha	06/09/2024 15:06:24	
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.				
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ				
Url de verificación	https://sede.uco.es/GONceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYQCTPH6IY		Página	15/51	



Bibliografía

- [1] Guía docente asignatura Física Nuclear y de Partículas. 4º Curso del Grado de Física, Facultad de ciencias, Universidad de Córdoba (2023/2024).
- [2] Guía para el desarrollo del TFG según su tipología, 2024. https://moodle.uco.es/m2324/pluginfile.php/165572/mod_resource/content/5/Guia-desarrollo-TFG-%20marzo%202023.pdf
- [3] Página oficial del Programa que se ha usado. <https://pythia.org/>
- [4] Apuntes de la Universidad Autónoma de Madrid sobre representaciones en gnuplot. <http://www.qfa.uam.es/informatica/Informatica/gnuplot.pdf>
- [5] Bransden B.H.H., Joachain C.J. - The Physics of Atoms and Molecules (1983).pdf
- [6] Competencias grado de Física. Facultad de Ciencias, Universidad de Córdoba. <https://www.uco.es/ciencias/es/competencias-fisica>
- [7] Protocolos de las prácticas 1 y 2 de Física Nuclear y de partículas ya existentes.
- [8] Sistema de reserva de Aulas (Aula informática paranifo) <https://www.uco.es/sra/index.php?go=sra/r2000430/r2000430.html>
- [9] Aula Virtual (Moodle) 2023/2024 <https://moodle.uco.es/m2324/?>
- [10] Libro de Programación en C++. <https://cplusplus.com/files/tutorial.pdf>

Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYOQCTPH6IY		Fecha	06/09/2024 15:06:24
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.			
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ			
Url de verificación	https://sede.uco.es/GOnceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYOQCTPH6IY		Página	16/51



Anexo: Programa informático elaborado en C++

Este programa informático en C++ utiliza la biblioteca Pythia8, un software de simulación de eventos para la física de partículas, específicamente para generar y analizar eventos de colisiones de partículas.

A continuación se describe brevemente lo que hace el programa informático:

- Importación de Pythia8: Se incluye la cabecera de Pythia8 con el comando (include Pythia8/Pythia.h) y se usa el espacio de nombres Pythia8 para evitar tener que escribirlo explícitamente cada vez.

- Inicialización de Pythia: Se crea un objeto de la clase Pythia, que se inicializa con los parámetros de configuración leídos de un archivo llamado mymain01.cmd.

- Configuración de la simulación: Se determina cuántos eventos se van a simular leyendo el parámetro "Main:numberOfEvents" del archivo de configuración.

- Definición de histogramas: Se crean dos histogramas para analizar las partículas top:

pT: Histograma para el momento transversal de la partícula top (100 bins entre 0 y 500 GeV/c). eta: Histograma para la pseudorapidez de la partícula top (100 bins entre -5 y 5).


- Generación de eventos: En un bucle for, se generan los eventos de colisiones de partículas. Para cada evento:

Se busca la partícula top (ID=6) en el evento. Se imprimen en pantalla el momento transversal (pT) y la pseudorapidez (eta) de la partícula top. Estos valores se almacenan tanto en los histogramas como en un archivo de salida solopt.dat.

- Estadísticas y resultados: Al finalizar la simulación:

Se muestran estadísticas de los eventos simulados (pythia.stat()). Se imprimen los histogramas con los valores acumulados para pT y eta. En resumen, este programa informático simula eventos de colisiones de partículas, identifica las partículas top en los eventos y analiza su momento transversal y pseudorapidez, guardan-

Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYZEWOQCTPH6IY		Fecha	06/09/2024 15:06:24	
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.				
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ				
Url de verificación	https://sede.uco.es/GONceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYZEWOQCTPH6IY		Página	17/51	



do los resultados en un archivo de texto y generando histogramas para su análisis posterior.

```

1 // Headers and Namespaces.
2 // main01.cc is a part of the PYTHIA event generator.
3 // Copyright (C) 2021 Torbjorn Sjostrand.
4 // PYTHIA is licenced under the GNU GPL v2 or later, see
5 // COPYING for details.
6 // This is a simple test program. It fits on one slide in a talk
7 // It studies the charged multiplicity distribution at the LHC.
8
9 /*#include "Pythia8/Pythia.h"
10 using namespace Pythia8;
11 int main() {
12     // Generator. Process selection. LHC initialization. Histogram
13     cout<< "llega aqui"<<endl;
14     Pythia pythia;
15     pythia.readString("Beams:eCM = 8000.");
16     pythia.readString("HardQCD:all = on");
17     // pythia.readString("PhaseSpace:pTHatMin = 20.");
18     pythia.init();
19
20     pythia.next();
21     //Hist mult("charged multiplicity", 100, -0.5, 799.5);
22     // Begin event loop. Generate event. Skip if error. List first
23     // one.
24     //for (int iEvent = 0; iEvent < 100; ++iEvent) {
25     // if (!pythia.next()) continue;
26     // Find number of all final charged particles and fill
27     // histogram.
28     //int nCharged = 0;
29     //for (int i = 0; i < pythia.event.size(); ++i)
30     // if (pythia.event[i].isFinal() && pythia.event[i].
31     // isCharged())
32     // ++nCharged;
33     // mult.fill( nCharged );
34     // End of event loop. Statistics. Histogram. Done.
35     // }
36     //pythia.stat();
37     //cout <<mult;
38     return 0;
39 }
40 */
41
42 // Headers and Namespaces.
43 #include "Pythia8/Pythia.h" // Include Pythia headers.
44 using namespace Pythia8; // Let Pythia8:: be implicit.
45 int main() { // Begin main program.
46     // Declare Pythia object & Reading file
47     Pythia pythia;

```

Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYZEWYOQCTPH6IY	Fecha	06/09/2024 15:06:24
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.		
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ		
Url de verificación	https://sede.uco.es/GOnceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYZEWYOQCTPH6IY	Página	18/51



```

45   pythia.readFile("mymain01.cmd");
46   pythia.init();
47   //Saving data
48   ofstream fich("solopt.dat");
49   // Initialize; incoming pp beams is default.
50   int nEvent = pythia.mode("Main:numberOfEvents");
51   int iEvent=0;
52   int i=0;
53   int iTOP = 0;
54   // Set Histograms
55   Hist pT("top transverse momentum", 100, 0., 500.);
56   Hist eta("top pseudorapidity", 100, -5., 5.);
57
58   // Generate event(s).
59   for (iEvent = 0; iEvent < nEvent; ++iEvent) {
60     pythia.next(); // Generate an(other) event. Fill event record.
61     //cout <<" Event "<<iEvent<< endl;
62     //cout <<" top "<<iTop<< endl;
63     //pT.fill( pythia.event[iTop].pT() );
64     //eta.fill( pythia.event[iTop].eta() );
65     for (i = 0; i < pythia.event.size(); ++i) {
66       if (pythia.event[i].id() == 6) iTOP = i;
67       //cout <<" i = " << i << ", pT = " <<pythia.event[i].pT() <<
        endl;
68     }
69     cout << ", pT = " <<pythia.event[iTop].pT() << "eta ="<< pythia.
        event[iTop].eta() << endl;
70     pT.fill( pythia.event[iTop].pT() );
71     eta.fill( pythia.event[iTop].eta() );
72     fich << pythia.event[iTop].pT() <<" "<< pythia.event[iTop].eta()
        << endl;
73   }
74
75   cout <<" Total Events "<<iEvent<< endl;
76   cout <<" Total top "<<iTop<< endl;
77
78
79   pythia.stat();
80   cout << pT << eta;
81   return 0;
82 }


```

Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYZEWOQCTPH6IY	Fecha	06/09/2024 15:06:24
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.		
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ		
Url de verificación	https://sede.uco.es/GONceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYZEWOQCTPH6IY	Página	19/51



Anexo II: Recurso docente elaborado

En este anexo se exponen los respectivos protocolos y guías del profesor.

Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYOQCTPH6IY	Fecha	06/09/2024 15:06:24	
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.			
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ			
Url de verificación	https://sede.uco.es/GOnceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYOQCTPH6IY	Página	20/51	


Protocolo Práctica 3: Simulación de colisiones de partículas a altas energía usando el software Pythia8

Universidad De Córdoba

6 de septiembre de 2024



UNIVERSIDAD
DE
CÓRDOBA

Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYZEWYOQCTPH6IY	Fecha	06/09/2024 15:06:24	
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.			
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ			
Url de verificación	https://sede.uco.es/GOnceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYZEWYOQCTPH6IY	Página	21/51	

Introducción

Las simulaciones en física de partículas, permiten entender el comportamiento de las partículas cuando colisionan, estas son una de las herramientas computacionales más útiles que tenemos para reproducir su comportamiento.

Entre los propósitos de las simulaciones de colisiones de partículas se encuentran:

- Diseñar y optimizar los experimentos reales de colisiones proporcionando información sobre posibles nuevas configuraciones de los detectores.
- Sirven para replicar experimentos y poderlos estudiar con algo más de detenimiento.
- Se usan como herramientas educativas, para ayudar a estudiantes de nuevo ingreso a entender mejor como funciona la física de partículas.

Pythia8 es un software libre utilizado para simular colisiones de partículas de alta energía. Es ampliamente empleado en la física de partículas para generar eventos de colisión que reproducen tanto procesos de dispersión simples como complejos estados finales multihadronicos. Pythia8 incluye una variedad de modelos físicos que permiten la evolución desde un evento inicial de alta energía hasta la producción de partículas finales en el vacío.

En esta sesión de prácticas se utilizará el software Pythia8 para simular colisiones entre protones (colisiones pp) bajo condiciones de energía y luminosidad similares a las del LHC. Este hecho permitirá analizar propiedades y variables de canales de desintegración de partículas del Modelo Estándar hacia el quark top antitop (ttbar).

1. Introducción teórica de conceptos

En esta práctica se introducen varios conceptos los cuales no han sido abordados dentro de los de la asignatura Física Nuclear y de Partículas, es por eso que en este apartado se explican con objetivo de orientar a los estudiantes.

- **Sección eficaz:** La sección eficaz, o en este contexto también llamada área efectiva de la colisión es una magnitud escalar con unidades de superficie, la cual se usa para medir la interacción entre proyectiles o partículas lanzadas a un punto o centro de dispersión. Esta magnitud está ligada al número de eventos que se den y al mismo tiempo a la luminosidad o número de colisiones por centímetro cuadrado y segundo, mediante la siguiente expresión.

$$N_{event/seg} = Lum * \sigma \quad (1)$$

En Física de Partículas la unidad que se usa para esta magnitud es el barn $1b = 10^{-24}cm^2$.

Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYQCTPH6IY	Fecha	06/09/2024 15:06:24
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.		
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ		
Url de verificación	https://sede.uco.es/GONceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYQCTPH6IY	Página	22/51



- **Parámetro de Impacto:** En una colisión entre protones, el parámetro de impacto es una medida de la distancia perpendicular entre las trayectorias iniciales de las dos partículas involucradas.

El parámetro de impacto b se define como la distancia más corta entre las trayectorias de los centros de masa de los dos protones.

Es un concepto clave que nos otorga información importante sobre la colisión, por ejemplo, según su valor podemos sacar conclusiones sobre si la colisión es central (Una colisión central ocurre cuando los dos núcleos o partículas que colisionan tienen un impacto directo o casi directo. En términos geométricos, la distancia de impacto entre los centros de las dos partículas es muy pequeña) o periférica (Una colisión periférica, en contraste, ocurre cuando los dos núcleos o partículas no colisionan de forma directa, sino que lo hacen con un ángulo o un parámetro de impacto mayor. Esto significa que las partículas se rozan.^o colisionan de forma tangencial.), o incluso información sobre la distribución angular de las partículas resultantes.

- **Eficiencia:** Cuando hablamos de eficiencia en Física de Partículas nos referimos a la eficiencia de la colisión, es decir el cociente entre el número de eventos que tienen lugar entre el número total de eventos.

$$\epsilon = \frac{N_{ev_{realizados}}}{N_{ev_{totales}}} \quad (2)$$

En el marco de la asignatura que estamos estudiando, tenemos que tener en cuenta que los procesos involucrados en cada evento compiten entre ellos, esto es clave para entender como calcular la eficiencia de cada proceso en específico.

- **Momento Transverso:** Es una magnitud utilizada principalmente para la interpretación de datos de colisiones en aceleradores de partículas como en el Large Hadron Collider. Se define como la componente perpendicular al eje del haz en la colisión, se suele calcular mediante las otras componentes como:

$$p_T = \sqrt{p_x^2 + p_y^2} \quad (3)$$

Es un concepto de suma importancia ya que entre sus propiedades se encuentran, la invariabilidad ante transformaciones de Lorentz sobre el eje transversal, lo que permite cambiar el sistema de referencia entorno a este eje.

También en los experimentos de física de partículas, se busca identificar y caracterizar eventos de colisión basándose en las distribuciones de p_T .

- **Pseudorapidez:** Es una magnitud angular que se usa en física de partículas para describir la distribución angular de las partículas resultantes de una colisión.

Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYZEWOQCTPH6IY	Fecha	06/09/2024 15:06:24
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.		
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ		
Url de verificación	https://sede.uco.es/GONceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYZEWOQCTPH6IY	Página	23/51



Su definición matemática depende el ángulo polar, que es el ángulo entre la dirección de la partícula resultante y el eje del haz.

$$\eta = -\ln \frac{\theta}{2} \quad (4)$$

Es una magnitud importante en la descripción de las colisiones ya que los detectores de partículas suelen estar diseñados y descritos en términos de pseudorrapidez. La cobertura en pseudorrapidez define la región del espacio en la cual el detector puede identificar y medir partículas.

1.1. Canales de desintegración y capacidad de simulación de Pythia8

En las colisiones de partículas, los rangos de energía y canales de desintegración dependen de diversos factores, como el tipo de partícula involucrada y los procesos de interacción que se estén dando.

En este apartado se expone una visión general de algunos de los rangos de energía y canales de desintegración que se pueden estudiar con el software Pythia8.

1.1.1. Quark Top (t)

El quark top se genera típicamente en colisiones con energías de centro de masa superiores a 350 GeV (para producir un par de tops). El momento transversal (pT) del top puede variar mucho dependiendo del proceso, pero en el LHC, es común que los quarks top tengan un pT en el rango de 100 a varios cientos de GeV.

El quark top se desintegra típicamente en un bosón W y un quark bottom.

- $t \rightarrow W^+ + b$

1.1.2. Bosón W y Z

Para producir un par W+W- o ZZ, la energía del centro de masa debe ser de al menos 160-180 GeV. Los valores típicos del pT del W o Z en eventos LHC pueden estar en el rango de decenas a cientos de GeV.

El Bosón W tiene dos canales de desintegración principales, el canal léptónico en aproximadamente un 33 % de los casos y el canal hadrónico en aproximadamente un 67 % de los casos.

En cuanto al Bosón Z también cuenta con estas dos vías de desintegración pero usualmente en el 70 % de los casos la vía es hadrónica y en el 10 % leptónica.

1.1.3. Bosón de Higgs (H)

La producción de un bosón de Higgs ocurre típicamente en colisiones con energías superiores a 200 GeV (dependiendo del proceso), y el pT del Higgs


Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYZEWYOQCTPH6IY	Fecha	06/09/2024 15:06:24
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.		
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ		
Url de verificación	https://sede.uco.es/GONceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYZEWYOQCTPH6IY	Página	24/51



puede variar significativamente, desde decenas hasta varios cientos de GeV.
Los distintos canales son:

- $H \rightarrow b\bar{b}$
- $H \rightarrow W^+W^-$
- $H \rightarrow ZZ$
- $H \rightarrow \gamma\gamma$
- $H \rightarrow \tau^+\tau^-$

Todos estos fenómenos y más podrán ser estudiados con el software utilizado, como veremos posteriormente.

Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYSEWYOQCTPH6IY	Fecha	06/09/2024 15:06:24	
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.			
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ			
Url de verificación	https://sede.uco.es/GOnceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYSEWYOQCTPH6IY	Página	25/51	

2. Instalación del programa y Preparación de archivos

2.1. Si estas trabajando en los ordenadores de la UCO

Si estas trabajando en los ordenadores de la UCO, el programa estará listo, no hace falta instalación, simplemente sigue las instrucciones de la siguiente sección desde el punto número 4.

2.1.1. Si Tienes un Ordenador Linux

Para instalar el programa hay que seguir los siguientes pasos:

1. Web de Pythia <https://pythia.org/>
 - a) Descargamos el archivo `pythia32xx.tgz`
 - b) Abre la terminal y posícónate en el directorio donde hayas descargado el archivo `.tgz`
 - c) Descomprime el archivo para crear el directorio de trabajo con (`tar xvfz pythia82xx.tgz`), hemmos cresdo un subdirectorío Pythia8xx donde los archivos funete están descomprimidos y listos.
2. Nos movemos a la subcarperta recientemente creada con `cd Pythia8xx`.
3. Una vez estemos en la carpeta ejecutamos con el comando **make**, esto instalará el programa.
4. Descarga los archivos **mymain01.cc** y **mymain.cmnd** del moodle y sobrescribelos en la carpeta **examples**, ya generada. (El archivo `mymain01.cc` contiene el código que vamos a correr y `mymain01.cmnd` se trata de un archivo modificable en el cual iremos dándo valores a las diferntes variables involucradas en la práctica).
5. Por último nos movemos a la carpeta `examples` y compilamos con el comando **make mymain01** para que el programa reconozca el archivo.
6. Por último ejecutamos `mymain01` con `./mymain01`.

2.2. Si Tienes un Ordenador Windows

El software Pythia no está preparado para ejecutarse en el sistema operativo Windows, es por eso que nos hará falta una maquina virtual para simular un entrono de Linux.

En moodle habrá subido un pdf en el que se explica como instalar la virtual machine de Linux.

Una vez hayas conseguido instalar la VM, tendrás que realizar los pasos correspondientes indicados en la anterior sección.

Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYZEWYOQCTPH6IY	Fecha	06/09/2024 15:06:24
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.		
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ		
Url de verificación	https://sede.uco.es/GONceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYZEWYOQCTPH6IY	Página	26/51



3. Step 0: Interpretando el fichero mymain01

En esta sección se analiza el fichero que vamos a utilizar, para que los alumnos puedan comprender de manera más sencilla su utilidad y funcionamiento.

Este programa informático en C++ utiliza la biblioteca Pythia8, un software de simulación de eventos para la física de partículas, específicamente para generar y analizar eventos de colisiones de partículas.

A continuación se describe brevemente lo que hace el programa informático:

- **Importación de Pythia8:** Se incluye la cabecera de Pythia8 y se usa el espacio de nombres Pythia8 para evitar tener que escribirlo explícitamente cada vez. La cabecera corresponde a (include Pythia8/Pythia.h).

- **Inicialización de Pythia:** Se crea un objeto de la clase Pythia, que se inicializa con los parámetros de configuración leídos de un archivo llamado mymain01.cmnd.

- **Configuración de la simulación:** Se determina cuántos eventos se van a simular leyendo el parámetro "Main:numberOfEvents" del archivo de configuración.

- **Definición de histogramas:** Se crean dos histogramas para analizar las partículas top:

pT: Histograma para el momento transversal de la partícula top (100 bins entre 0 y 500 GeV/c). eta: Histograma para la pseudorrapidez de la partícula top (100 bins entre -5 y 5).

- **Generación de eventos:** En un bucle for, se generan los eventos de colisiones de partículas. Para cada evento:

Se busca la partícula top (ID=6) en el evento. Se imprimen en pantalla el momento transversal (pT) y la pseudorrapidez (eta) de la partícula top. Estos valores se almacenan tanto en los histogramas como en un archivo de salida solopt.dat.

- **Estadísticas y resultados:** Al finalizar la simulación:

Se muestran estadísticas de los eventos simulados (pythia.stat()). Se imprimen los histogramas con los valores acumulados para pT y eta.

En resumen, este programa informático simula eventos de colisiones de partículas, identifica las partículas top en los eventos y analiza su momento transversal y pseudorrapidez, guardando los resultados en un archivo de texto y generando histogramas para su análisis posterior.

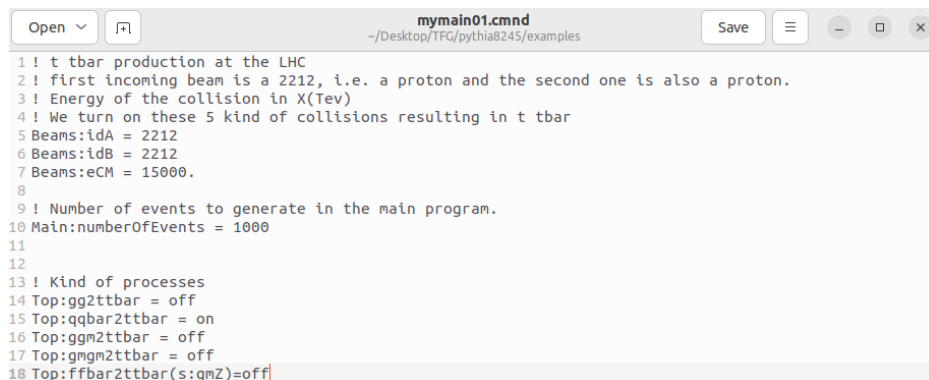
Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYQCTPH6IY	Fecha	06/09/2024 15:06:24
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.		
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ		
Url de verificación	https://sede.uco.es/GONceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYQCTPH6IY	Página	27/51



4. Parámetros de la colisión

Para estudiar los parámetros de la colisión, ejecutaremos nuestro fichero mymain01 desde la terminal, escribiendo en nuestro fichero mymain01.cmnd los diferentes valores de las variables de entrada para la simulación, en función a lo que se pregunta más abajo. Según las diferentes salidas que otorgue el programa se contestarán las diferentes preguntas.

4.0.1. Fichero de comandos



```

1 ! t tbar production at the LHC
2 ! first incoming beam is a 2212, i.e. a proton and the second one is also a proton.
3 ! Energy of the collision in X(Tev)
4 ! We turn on these 5 kind of collisions resulting in t tbar
5 Beams:idA = 2212
6 Beams:idB = 2212
7 Beams:eCM = 15000.
8
9 ! Number of events to generate in the main program.
10 Main:numberOfEvents = 1000
11
12
13 ! Kind of processes
14 Top:gg2ttbar = off
15 Top:qgbar2ttbar = on
16 Top:ggm2ttbar = off
17 Top:gmgm2ttbar = off
18 Top:ffbar2ttbar(s:gmZ)=off
  
```

En este fichero podremos cambiar el valor de algunas de las variables, como por ejemplo el energía en GeV, el número de eventos y poder habilitar o deshabilitar algunos de los procesos que se estudian. Cabe recalcar que una vez se cambien los valores requeridos, simplemente hay que sobrescribir el archivo y el programa estará listo para compilarse de nuevo con `./mymain01`.


4.1. Parámetro de Impacto

Para este tipo de procesos:

- ¿Cuál es el parámetro de impacto?. ¿Por qué?
- Escribe el valor de este Parámetro para cada uno de los procesos posibles en este tipo de colisiones.
- ¿Qué pasaría con esta magnitud si se aumenta la energía de la colisión?. Realice una representación gráfica para descubrir su tendencia. (Escoja valores de la energía entre 3.5 y 5 TeV).
- ¿Y si aumento el número de colisiones?.

4.2. Eficiencia

- ¿Cómo se podría calcular la eficiencia de los procesos dados en este tipo de colisión?.

Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYOQCTPH6IY	Fecha	06/09/2024 15:06:24	
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.			
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ			
Url de verificación	https://sede.uco.es/GOnceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYOQCTPH6IY	Página	28/51	

- Calcúlese para cada uno de ellos.
- ¿Debería esta magnitud ser inherente al número de colisiones que ocurren? ¿Y a la energía de estas?. Justifica tu respuesta.

4.3. Sección Eficaz


- ¿Cuál es la sección eficaz máxima estimada para cada uno de los procesos?.
- ¿Cómo se relaciona la sección eficaz con las magnitudes mencionadas anteriormente? (Parámetro de impacto y eficiencia).
- Selecciona 2 de los procesos posibles y efectúa una representación de las distribuciones de sus secciones eficaces para (10, 100, 1000, 10000 y 100000) eventos.

5. Variables cinemáticas

Nuestro programa genera un fichero en el que se almacenan los valores de las variables momento transverso y pseudorrapidez para cada evento, a partir de este fichero contesta a las siguientes preguntas:

5.1. Momento transverso y Pseudorrapidez de la colisión

- Validando todos los procesos involucrados en las colisiones entre protones realizar un histograma para las dos magnitudes (pT y eta) en el caso de 15000 eventos.
- Si prohibimos algunos de los eventos posibles. ¿Hay algún cambio significativo en estos histogramas?. Saca tus propias conclusiones atendiendo a la definición de ambas magnitudes.
- Escoja varios valores de la pseudorrapidez a elegir entre cualquier evento, calcule el ángulo de desviación y coméntelo.

Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYQCTPH6IY	Fecha	06/09/2024 15:06:24	
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.			
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ			
Url de verificación	https://sede.uco.es/GONceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYQCTPH6IY	Página	29/51	

6. Apéndices

6.1. Apéndice I: Como realizar Representaciones en Gnuplot del tipo Histograma

En esta sección se expone una breve guía de como realizar una representación del tipo histograma en Gnuplot, ya que necesitaremos de esta para poder responder a varias de las cuestiones que se nos proponen en esta práctica.

Tal y como está diseñado el programa informático que vamos a ejecutar, al ejecutarlo nos brindará unos archivos de datos en los que se encuentran un registro de los valores de las diferentes variables a estudiar.

En la primera columna se encuentran los valores de la pseudorrapidez y en la segunda los valores del momento transverso.

```

G N U P L O T
Version 6.0 patchlevel 1   last modified 2024-05-13

Copyright (C) 1986-1993, 1998, 2004, 2007-2024
Thomas Williams, Colin Kelley and many others

gnuplot home:      http://www.gnuplot.info
faq, bugs, etc:    type "help FAQ"
immediate help:    type "help" (plot window: hit 'h')

Terminal type is now windows
gnuplot> binwidth=0.1
gnuplot> bin(x,width)=width*floor(x/width)
gnuplot> set yrange [0:1.5]
gnuplot> set xrange [0:500]
gnuplot> plot 'Users\UnaiGarrido\Desktop\TFG\Prueba y error\solopt2.csv' using (bin($2,binwidth)):(0.1) smooth freq with boxes _

```

El programa informático que debemos obtener para la representación de dichos datos sigue el formato de la imagen anterior.

- En la primera fila se declara la el ritmo de aumento del eje Y, es decir cuanto se va a contabilizar en el eje Y cada vez que haya valores repetidos de la variable representada.
- Las líneas 3 y 4 son el rango de valores que toman los dos ejes, en el caso del eje X se tendrá que definir en función de cada variable que queramos representar y el rango de valores que esta experimente al ejecutar nuestro programa. En cuanto al eje Y como ya se ha comentado es el ritmo de aumento y sus límites se definirán en función de eso.
- En cuanto a la última fila, es la fila en la cual llamamos al archivo de datos que queremos representar, en este ejemplo 'solopt.csv'. En using (bin(\$2,binwidth)):(0.1). Estaremos declarando que usamos la columna dos del archivo de datos que se está leyendo.
- Por último la ultima parte del programa representa el estilo que queremos darle a la gráfica, que será al gusto del alumnado siempre que se vea claro que es lo que se está representando y se entienda.

Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYQCTPH6IY	Fecha	06/09/2024 15:06:24
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.		
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ		
Url de verificación	https://sede.uco.es/GONceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYQCTPH6IY	Página	30/51




Protocol of the 3rd Experience: Simulating high energy particle collisions using Pythia8 software

Universidad De Córdoba

September 6, 2024



UNIVERSIDAD
DE
CÓRDOBA

Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYOQCTPH6IY	Fecha	06/09/2024 15:06:24	
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.			
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ			
Url de verificación	https://sede.uco.es/GOnceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYOQCTPH6IY	Página	31/51	

Abstract

Simulations in particle physics allow us to understand the behavior of particles when they collide. These are among the most useful computational tools we have for reproducing their behavior.

Among the purposes of simulations are:

- Designing and optimizing real collision experiments by providing information on possible new configurations of the detectors.
- They are used to replicate experiments and to study them with a bit more detail.
- They are used as educational tools to help new researchers better understand how particle physics works.

Pythia is an open-source software used to simulate high-energy particle collisions. It is widely employed in particle physics to generate collision events that reproduce both simple scattering processes and complex multihadronic final states. Pythia includes a variety of physical models that allow the evolution from an initial high-energy event to the production of final particles in the vacuum.

In this practice session, Pythia8 software will be used to simulate proton-proton collisions (pp collisions) under energy and luminosity conditions similar to those of the LHC. This will allow the analysis of properties and variables of particle decay channels of the Standard Model towards the top-antitop quark (ttbar).

1 Theoretical Introduction

In this practice session, several concepts are introduced that have not been covered within the Nuclear and Particle Physics course. Therefore, this section explains them with the aim of guiding the students.

- **Cross Section:** The cross section, or in this context also called the effective collision area, is a scalar quantity with surface area units, used to measure the interaction between projectiles or particles directed at a point or scattering center. This quantity is related to the number of events that occur and, at the same time, to the luminosity or the number of collisions per square centimeter per second, according to the following expression:

$$N_{event/seg} = Lum * \sigma \quad (1)$$

In Nuclear physics the unit used to measure this magnitude is called barn $1b = 10^{-24}cm^2$.

- **Impact parameter:** In a proton collision, the impact parameter is a measure of the perpendicular distance between the initial trajectories of

Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYZEWYOQCTPH6IY	Fecha	06/09/2024 15:06:24
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.		
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ		
Url de verificación	https://sede.uco.es/GOnceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYZEWYOQCTPH6IY	Página	32/51



the two particles involved. Formally, the impact parameter b is defined as the shortest distance between the trajectories of the centers of mass of the two protons.

It is a key concept that provides us with important information about the collision. For example, based on its value, we can draw conclusions about whether the collision is central (A central collision occurs when the two colliding nuclei or particles have a direct or nearly direct impact. In geometric terms, the impact distance between the centers of the two particles is very small) or peripheral (In contrast, a peripheral collision occurs when the two nuclei or particles do not collide directly, but rather at an angle or with a greater impact parameter. This means that the particles graze each other or collide tangentially), or even information about the angular distribution of the resulting particles.

- **Efficiency:** When we talk about efficiency in Particle Physics, we refer to the efficiency of the collision, meaning the ratio between the number of events that actually occur and the number of events attempted.

$$\eta = \frac{Nev_{realized}}{Nev_{Total}} \quad (2)$$

Within the framework of the course we are studying, we must consider that the processes involved in each event compete with each other. This is key to understanding how to calculate the efficiency of each specific process.

- **Transverse Momentum:** This is a quantity primarily used for the interpretation of collision data in particle accelerators such as the Large Hadron Collider. It is defined as the component perpendicular to the beam axis in the collision and is usually calculated using the other components as :

$$p_T = \sqrt{p_x^2 + p_y^2} \quad (3)$$

It is a crucial concept since one of its properties is its invariance under Lorentz transformations along the transverse axis, which allows changing the reference frame around this axis. In particle physics experiments, the goal is to identify and characterize collision events based on P_t distributions.

- **Pseudorapidity:** This is an angular quantity used in particle physics to describe the angular distribution of particles resulting from a collision.

Its mathematical definition depends on the polar angle, which is the angle between the direction of the resulting particle and the beam axis.

$$\epsilon = -\ln \frac{\theta}{2} \quad (4)$$

Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYZEWOQCTPH6IY	Fecha	06/09/2024 15:06:24
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.		
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ		
Url de verificación	https://sede.uco.es/GONceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYZEWOQCTPH6IY	Página	33/51



Pseudorapidity is important in describing collisions because particle detectors are often designed and described in terms of pseudorapidity. The pseudorapidity coverage defines the region of space in which the detector can identify and measure particles.

1.1 Decay Channels and Simulation Capability of Pythia8

In particle collisions, energy ranges and decay channels depend on various factors, such as the type of particle involved and the interaction processes taking place. This section provides an overview of some energy ranges and decay channels that can be studied using the Pythia8 software.

1.1.1 Quark Top (t)

The top quark is typically generated in collisions with center-of-mass energies exceeding 350 GeV (to produce a pair of top quarks). The transverse momentum (pT) of the top quark can vary significantly depending on the process, but in the LHC, it is common for top quarks to have a pT ranging from 100 to several hundred GeV.

The top quark typically decays into a W boson and a bottom quark:

- $t \rightarrow W^+ + b$

1.1.2 W and Z Bosons

To produce a W^+W^- or ZZ pair, the center-of-mass energy must be at least 160–180 GeV. Typical pT values for W or Z bosons in LHC events can range from tens to hundreds of GeV.

The W boson has two main decay channels: the leptonic channel in approximately 33% of cases and the hadronic channel in about 67% of cases.


As for the Z boson, it also has these two decay modes, but in 70% of cases, the decay is hadronic, while in 10% of cases, it is leptonic.

1.1.3 Higgs Boson (H)

The production of a Higgs boson typically occurs in collisions with energies exceeding 200 GeV (depending on the process), and the pT of the Higgs boson can vary significantly, ranging from tens to several hundred GeV.

The different decay channels include:

- $H \rightarrow b\bar{b}$
- $H \rightarrow W^+W^-$
- $H \rightarrow ZZ$
- $H \rightarrow \gamma\gamma$
- $H \rightarrow \tau^+\tau^-$

Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYZEYWOQCTPH6IY		Fecha	06/09/2024 15:06:24	
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.				
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ				
Url de verificación	https://sede.uco.es/GOnceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYZEYWOQCTPH6IY		Página	34/51	

All these phenomena and more can be studied with the software used, as we will see later.

2 Software installation and file set up

2.0.1 If you are using UCO's computers

If you are working on the UCO computers, the program will already be installed, so there is no need for installation. Simply follow the instructions in the next section starting from point number 4.

2.0.2 If you are using Linux

To install the program, follow these steps:

1. Visit Pythia website <https://pythia.org/>
 - (a) Download the file `pythia32xx.tgz`
 - (b) Open the terminal and navigate to the directory where you downloaded the .tgz file.
 - (c) Uncompress the file to create the working directory with `tar xvfz pythia82xx.tgz`. A subdirectory `Pythia8xx` will be created where the source files are decompressed and ready.
2. Move to the newly created subfolder with `cd Pythia8xx`.
3. Once inside the folder, run the **make** command to install the program.
4. Download the files **mymain01.cc** and **mymain.cmnd** from Moodle and overwrite them in the **examples** folder that was created. (The `mymain01.cc` file contains the code we will run, and `mymain01.cmnd` is a modifiable file where we will input values for the different variables involved in the practice).
5. Finally, move to the examples folder and compile with the **make mymain01** command so that the program recognizes the file.
6. Finally, run `mymain01` with `./mymain01`.

2.0.3 If you are using Windows

The Pythia software is not designed to run on the Windows operating system, which is why we will need a virtual machine to simulate a Linux environment.

A PDF explaining how to install the Linux virtual machine will be uploaded to Moodle. Once you have successfully installed the VM, you will need to follow the corresponding steps indicated in the previous section.

Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYZEWYOQCTPH6IY	Fecha	06/09/2024 15:06:24
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.		
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ		
Url de verificación	https://sede.uco.es/GOnceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYZEWYOQCTPH6IY	Página	35/51



3 Step 0: Interpreting the mymain01 File

In this section, we analyze the file we will be using, so that students can more easily understand its utility and functionality. This C++ program uses the Pythia8 library, a particle physics event simulation software specifically designed to generate and analyze particle collision events.

Here is a brief description of what the program does:

- **Importing Pythia8:** The Pythia8 header is included, and the Pythia8 namespace is used to avoid having to explicitly write it each time. The header corresponds to include Pythia8/Pythia.h.

- **Initializing Pythia8:** An object of the Pythia class is created and initialized with configuration parameters read from a file named mymain01.cmd.

- **Simulation configuration:** The number of events to simulate is determined by reading the parameter "Main:numberOfEvents" from the configuration file.

- **Histogram definition:** Two histograms are created to analyze top quarks: pT: A histogram for the transverse momentum of the top particle (100 bins between 0 and 500 GeV/c).. eta: A histogram for the pseudorapidity of the top particle (100 bins between -5 and 5).

- **Event generation:** In a for loop, particle collision events are generated. For each event:

The top quark (ID=6) is searched for in the event. The transverse momentum (pT) and pseudorapidity (eta) of the top quark are printed to the screen. These values are stored in both the histograms and an output file solopt.dat.

- **Statistics and results:** At the end of the simulation:

Statistics of the simulated events are displayed (pythia.stat()). The histograms with the accumulated values for pT and eta are printed.

In summary, this program simulates particle collision events, identifies top quarks in the events, and analyzes their transverse momentum and pseudorapidity, saving the results in a text file and generating histograms for further analysis.

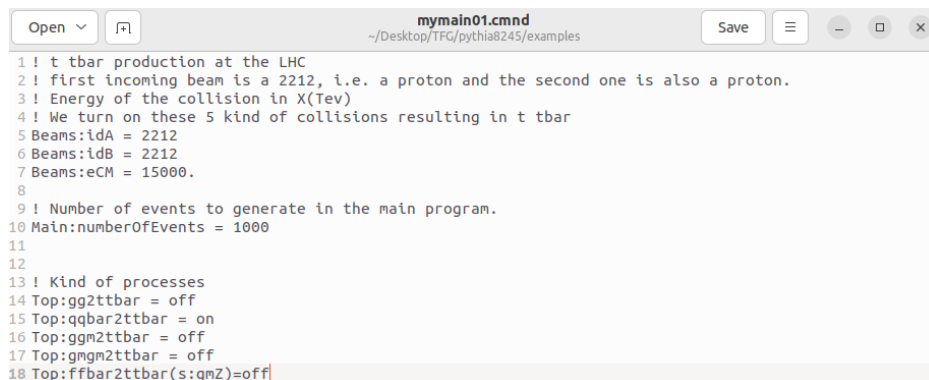
Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYQCTPH6IY	Fecha	06/09/2024 15:06:24
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.		
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ		
Url de verificación	https://sede.uco.es/GOnceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYQCTPH6IY	Página	36/51



4 Collision Parameters

To study the collision parameters, we will execute our mymain01 file from the terminal, writing the different input variable values for the simulation into our mymain01.cmnd file, based on the questions asked below. Depending on the different outputs provided by the program, we will answer the various questions.

4.0.1 Command file



```

1 ! t tbar production at the LHC
2 ! first incoming beam is a 2212, i.e. a proton and the second one is also a proton.
3 ! Energy of the collision in X(Tev)
4 ! We turn on these 5 kind of collisions resulting in t tbar
5 Beams:idA = 2212
6 Beams:idB = 2212
7 Beams:eCM = 15000.
8
9 ! Number of events to generate in the main program.
10 Main:numberOfEvents = 1000
11
12
13 ! Kind of processes
14 Top:gg2ttbar = off
15 Top:qgbar2ttbar = on
16 Top:gmg2ttbar = off
17 Top:gmgm2ttbar = off
18 Top:ffbar2ttbar(s:gmZ)=off
  
```

In this file, we can modify the value of certain variables, such as the energy in GeV, the number of events, and the ability to enable or disable some of the processes being studied. It's important to note that once the required values are changed, you simply need to overwrite the file, and the program will be ready to recompile with ./mymain01.

4.1 Impact parameter


For this kind of processes:

- What is the impact parameter for this type of process? Why?
- Write down the value of this parameter for each of the possible processes in this type of collisions.
- What would happen to this magnitude if the collision energy is increased?. Create a graphical representation to uncover its trend. (Choose energy values between 3.5 and 5 TeV).
- What happens if the number of collisions is increased?

4.2 Efficiency

- How could the efficiency of the given processes in this type of collision be calculated?

Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYOQCTPH6IY		Fecha	06/09/2024 15:06:24	
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.				
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ				
Url de verificación	https://sede.uco.es/GONceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYOQCTPH6IY		Página	37/51	



- Calculate it for each of them.
- Should this magnitude be inherent to the number of collisions that occur? And to their energy? Justify your answer.

4.3 Cross Section

- What is the estimated maximum cross section for each of the processes?
- How is the cross section related to the previously mentioned magnitudes (impact parameter and efficiency)?
- Select 2 of the possible processes and create a representation of their cross section distributions for (10, 100, 1000, 10000, and 100000) events.

5 Kinematics Variables

Our program generates a file in which the values of the Transverse Momentum and Pseudorapidity variables for each event are stored. Based on this file, answer the following questions:

5.1 Transverse Momentum and Pseudorapidity of the colisión

- By validating all the processes involved in proton-proton collisions, create a histogram for the two magnitudes (pT and eta) for 15,000 events.
- If we prohibit some of the possible events, is there any significant change in these histograms? Draw your own conclusions based on the definition of both magnitudes.
- Choose several pseudorapidity values from any event, calculate the deflection angle, and discuss it.

Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYZEWYOQCTPH6IY	Fecha	06/09/2024 15:06:24
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.		
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ		
Url de verificación	https://sede.uco.es/GONceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYZEWYOQCTPH6IY	Página	38/51



6 Annexes

6.1 Annex I: How to use Gnuplot for Histogram type of representations

This section provides a brief guide on how to create a histogram representation in Gnuplot, as we will need this to answer several of the questions posed in this practice session.

As designed, the code we are going to run in our program will generate data files that contain records of the values of the different variables to be studied. In the first column, you will find the values of pseudorapidity, and in the second column, the values of transverse momentu

```

GNUPLOT
Version 6.0 patchlevel 1   last modified 2024-05-13

Copyright (C) 1986-1993, 1998, 2004, 2007-2024
Thomas Williams, Colin Kelley and many others

gnuplot home:      http://www.gnuplot.info
faq, bugs, etc:    type "help FAQ"
immediate help:    type "help" (plot window: hit 'h')

Terminal type is now windows
gnuplot> binwidth=0.1
gnuplot> bin(x,width)=width*floor(x/width)
gnuplot> set yrange [0:1.5]
gnuplot> set xrange [0:500]
gnuplot> plot '\Users\UnaiGarrido\Desktop\TFG\Prueba y error\solopt2.csv' using (bin($2,binwidth)):(0.1) smooth freq with boxes _

```

The code we need to generate to represent these data follows the format of the previous image.

- In the first row, the increment rate of the Y-axis is declared, meaning how much will be counted on the Y-axis each time there are repeated values of the variable being represented.
- Lines 3 and 4 define the range of values for the two axes. For the X-axis, it must be defined based on each variable we want to represent and the range of values it experiences when we run our program. As for the Y-axis, as mentioned before, it is the increment rate, and its limits will be defined accordingly.
- Regarding the last row, this is where we call the data file we want to represent, in this example, 'solopt.csv'. In using (bin(\$2, binwidth)):(0.1), we declare that we are using the second column of the data file being read.
- Finally, the last part of the code represents the style we want to give to the graph, which will be at the discretion of the student, as long as it clearly shows what is being represented and is understandable.

Guía del Porfesor: Simulación de colisiones de partículas a altas energías usando el software Pythia8


Universidad De Córdoba

6 de septiembre de 2024



UNIVERSIDAD
D
CÓRDOBA

Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYZEWYOQCTPH6IY		Fecha	06/09/2024 15:06:24	
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.				
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ				
Url de verificación	https://sede.uco.es/GONceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYZEWYOQCTPH6IY		Página	40/51	



Resumen

En esta Guía del profesor, se indicará información detallada sobre cada uno de los apartados y preguntas que se hacen en el protocolo. La guía tiene un carácter informativo y breve, esta diseñada para orientar al tutor a la hora de afrontar las preguntas del alumnado en la realización de estas simulaciones.

1. Parámetros de la colisión

Según las diferentes salidas que otorgue el programa se contestarán las diferentes preguntas.

1.1. Parámetro de Impacto

- ¿Cuál es el parámetro de impacto? ¿Por qué?

```

----- PYTHIA Info Listing -----
Beam A: id = 2212, pz = 4.000e+03, e = 4.000e+03, m = 9.383e-01.
Beam B: id = 2212, pz = -4.000e+03, e = 4.000e+03, m = 9.383e-01.

In 1: id = -1, x = 8.093e-02, pdf = 1.205e-01 at Q2 = 3.520e+04.
In 2: id = 1, x = 2.883e-02, pdf = 4.975e-01 at same Q2.

Subprocess q qbar -> t tbar with code 602 is 2 -> 2.
It has sHat = 1.493e+05, tHat = -6.203e+04, uHat = -2.801e+04,
      pTHat = 7.587e+01, m3Hat = 1.716e+02, m4Hat = 1.727e+02,
      thetaHat = 2.096e+00, phiHat = 3.594e+00.
      alphaEM = 7.882e-03, alphaS = 1.167e-01 at Q2 = 3.539e+04.

Impact parameter b = 8.994e-01 gives enhancement factor = 8.813e-01.
Max pT scale for MPI = 8.000e+03, ISR = 8.000e+03, FSR = 8.000e+03.
Number of MPI = 2, ISR = 4, FSRproc = 9, FSRreson = 24.

----- End PYTHIA Info Listing -----

```

Figura 1: Se muestra b , parámetro de impacto, junto con otras variables.

En este apartado se busca que los alumnos sepan identificar y diferenciar el parámetro de impacto de entre las numerosas variables que nos proporciona el output. Además de saber justificar por qué tiene ese valor.

- Escribe el valor de este Parámetro para cada uno de los procesos posibles en este tipo de colisiones.
- ¿Qué pasaría con esta magnitud si se aumenta la energía de la colisión? Realice una representación gráfica para descubrir su tendencia. (Escoja valores de la energía entre 3.5 y 5 TeV).

Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYQCTPH6IY	Fecha	06/09/2024 15:06:24
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.		
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ		
Url de verificación	https://sede.uco.es/GOnceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYQCTPH6IY	Página	41/51



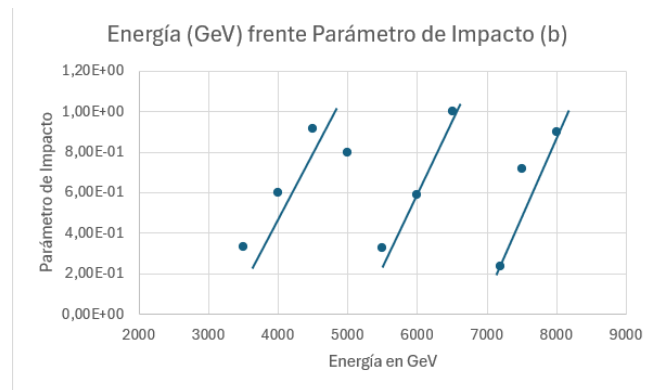


Figura 2: Tendencia del parámetro de impacto

Los alumnos deberán reconocer mediante una representación similar la tendencia del parámetro, siendo esta lineal para valores acotados de la energía. Su valor oscila entre 0 y 1 periódicamente, comportamiento similar al de una función a trozos lineal.

• ¿Y si aumento el número de colisiones?.

Después de encontrar el parámetro de impacto, estas dos siguientes preguntas evaluarán como se desenvuelven a la hora del cambio de variables en el input a través del archivo .cmd. Se espera un buen razonamiento de la respuesta a la última pregunta.

```

1 ! t tbar production at the LHC
2 ! first incoming beam is a 2212, i.e. a proton and the second one is also a proton.
3 ! Energy of the collision in X(Tev)
4 ! We turn on these 5 kind of collisions resulting in t tbar
5 Beams:IdA = 2212
6 Beams:IdB = 2212
7 Beams:eCM = 8000.
8
9 ! Number of events to generate in the main program.
10 Main:numberOfEvents = 1000
11
12
13 ! Kind of processes
14 Top:gg2ttbar = off
15 Top:qqbar2ttbar = on
16 Top:gq2ttbar = off
17 Top:gmg2ttbar = off
18 Top:ffbar2ttbar(s:gmZ)=off

```

Figura 3: Fichero .cmd para la modificación del input.

1.2. Eficiencia

• ¿Cómo se podría calcular la eficiencia de los procesos dados en este tipo de colisión?.

Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYZEWOQCTPH6IY	Fecha	06/09/2024 15:06:24
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.		
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ		
Url de verificación	https://sede.uco.es/GONceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYZEWOQCTPH6IY	Página	42/51



```

*----- PYTHIA Event and Cross Section Statistics -----*
| Subprocess                                Code |          Number of events          |          sigma +- delta          |
|                                           | Tried Selected Accepted | (estimated) (mb) | | |
|---|---|---|---|---|
| q qbar -> t tbar                        602 |          16337          1000    1000 |          3.032e-08  4.867e-10 |
| sum                                     |          16337          1000    1000 |          3.032e-08  4.867e-10 |
|-----|-----|-----|-----|-----|
*----- End PYTHIA Event and Cross Section Statistics -----*

```

Figura 4: Eventos intentados y realizados.

- ¿Debería esta magnitud ser inherente al número de colisiones que ocurren? ¿Y a la energía de estas?. Justifica tu respuesta.

En este apartado se espera que mediante las magnitudes mostradas en la terminal y atendiendo a la definición de la eficiencia, calcularla como el cociente entre el número de eventos intentados y el número de eventos dados.

1.3. Sección Eficaz

- ¿Cuál es la sección eficaz máxima estimada para cada uno de los procesos?.

```

*----- PYTHIA Process Initialization -----*
| We collide p+ with p+ at a CM energy of 8.000e+03 GeV |
|-----|-----|-----|
| Subprocess                                Code | Estimated |
|                                           | max (mb) | |
|---|---|---|
| q qbar -> t tbar                        602 | 4.814e-07 |
|-----|-----|-----|
*----- End PYTHIA Process Initialization -----*

```

Figura 5: Sección eficaz máxima.

Se busca que se sepa identificar la sección eficaz máxima en el output del programa.

- ¿Cómo se relaciona la sección eficaz con las magnitudes mencionadas anteriormente? (Parámetro de impacto y eficiencia).

Para completar este apartado los alumnos tendrán que darse cuenta de que la sección eficaz está directamente relacionada con el parámetro de impacto y la eficiencia de la colisión mediante una multiplicación.

- Selecciona 2 de los procesos posibles y efectúa una representación de las distribuciones de sus secciones eficaces para (10, 100, 1000,

Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYZEWOQCTPH6IY	Fecha	06/09/2024 15:06:24
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.		
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ		
Url de verificación	https://sede.uco.es/GONceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYZEWOQCTPH6IY	Página	43/51



10000 y 100000) eventos.

----- PYTHIA Event and Cross Section Statistics -----						
Subprocess	Code	Number of events			sigma +- delta (estimated) (nb)	
		Tried	Selected	Accepted		
q qbar -> t tbar	602	16337	1000	1000	3.032e-08	4.867e-10
sum		16337	1000	1000	3.032e-08	4.867e-10
----- End PYTHIA Event and Cross Section Statistics -----						

Figura 6: Display de secciones eficaces, solo se muestra $q \bar{q} \rightarrow t \bar{t}$.

El programa nos brinda directamente valores estimados de las secciones eficaces, tras simular las colisiones, para cada uno de los subprocessos posibles. Se pretende la representación de sus valores frente al N^0 de eventos a través de cualquier programa (gnuplot, excel, Google Charts...) y comparar el máximo valor que tomen con la pregunta 1 de este apartado.

2. Variables cinemáticas

Nuestro programa genera un fichero en el que se almacenan los valores de las variables Momento transverso y Pseudorapidez para cada evento, a partir de este fichero contesta a las siguientes preguntas:

2.1. Momento transverso y Pseudorapidez de la colisión

- Validando todos los procesos involucrados en las colisiones entre protones realizar un histograma para las dos magnitudes (pT y eta) en el caso de 15000 eventos.

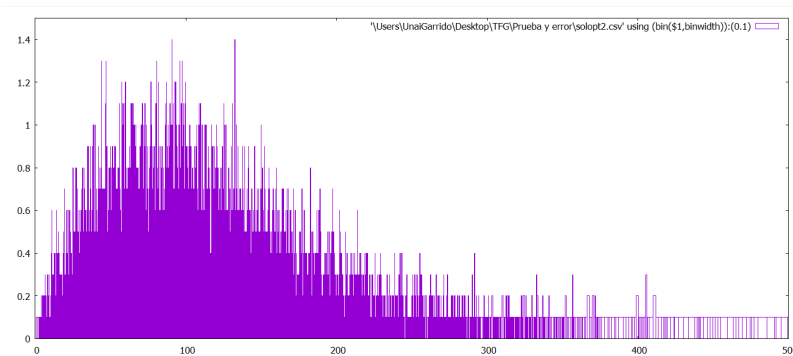


Figura 7: Ejemplo Histograma Pt

- Si prohibimos algunos de los eventos posibles. ¿Hay algún cambio significativo en estos histogramas?. Saca tus propias conclusiones

Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYOQCTPH6IY	Fecha	06/09/2024 15:06:24
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.		
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ		
Url de verificación	https://sede.uco.es/GOnceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYOQCTPH6IY	Página	44/51



atendiendo a la definición de ambas magnitudes.

En el objetivo de este punto, identificamos la importancia de las variables momento transverso y pseudorapidez para la colisión. Además se pide que, mediante un fichero que genera el programa con los valores de estas dos magnitudes, se sepa representar un histograma, creando un código para Gnuplot y poder sacar una buena conclusión sobre esta. El código para gnuplot lucirá algo parecido a esto:

```

GNUPLOT
Version 6.0 patchlevel 1    last modified 2024-05-13

Copyright (C) 1986-1993, 1998, 2004, 2007-2024
Thomas Williams, Colin Kelley and many others

gnuplot home:      http://www.gnuplot.info
faq, bugs, etc:    type "help FAQ"
immediate help:    type "help" (plot window: hit 'h')

Terminal type is now windows
gnuplot> binwidth=0.1
gnuplot> bin(x,width)=width*floor(x/width)
gnuplot> set yrange [0:1.5]
gnuplot> set xrange [0:500]
gnuplot> plot '\Users\UnaIGarrido\Desktop\TFG\Prueba y error\solopt2.csv' using (bin($2,binwidth)):(0.1) smooth freq with boxes _
```

Figura 8: Código ejemplo Histogrma Gnuplot.

- **Escoja varios valores de la pseudorrapidez a elegir entre cualquier evento, calcule el ángulo de desviación y coméntelo.**
- Se propone en este apartado que los alumnos, fijándose en al definición de pseudorrapidez, calculen theeta mediante la definición para algunos eventos a su elección.

Professor Guide: Simulating high energy particle collisions using Pythia8 software

Universidad De Córdoba

September 6, 2024



UNIVERSIDAD
DE
CÓRDOBA

Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYOQCTPH6IY		Fecha	06/09/2024 15:06:24	
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.				
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ				
Url de verificación	https://sede.uco.es/GOnceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYOQCTPH6IY		Página	46/51	

Abstract

This section of the guide focuses on helping the tutor address questions related to the impact parameter in collision simulations. The goal is for students to understand what the impact parameter is, how to identify it among the variables in the output, and how its value affects the outcome of collisions.

1 Collision Parameters

Depending on the output given by the program students will have to answer the following questions.

1.1 Impact parameter

- What is the impact parameter? Why?

```

----- PYTHIA Info Listing -----
Beam A: id = 2212, pz = 4.000e+03, e = 4.000e+03, m = 9.383e-01.
Beam B: id = 2212, pz = -4.000e+03, e = 4.000e+03, m = 9.383e-01.

In 1: id = -1, x = 8.093e-02, pdf = 1.205e-01 at Q2 = 3.520e+04.
In 2: id = 1, x = 2.883e-02, pdf = 4.975e-01 at same Q2.

Subprocess q qbar -> t tbar with code 602 is 2 -> 2.
It has sHat = 1.493e+05, tHat = -6.203e+04, uHat = -2.801e+04,
      pTHat = 7.587e+01, m3Hat = 1.716e+02, m4Hat = 1.727e+02,
      thetaHat = 2.096e+00, phiHat = 3.594e+00.
      alphaEM = 7.882e-03, alphaS = 1.167e-01 at Q2 = 3.539e+04.

Impact parameter b = 8.994e-01 gives enhancement factor = 8.813e-01.
Max pT scale for MPI = 8.000e+03, ISR = 8.000e+03, FSR = 8.000e+03.
Number of MPI = 2, ISR = 4, FSRproc = 9, FSRreson = 24.

----- End PYTHIA Info Listing -----

```

Figure 1: Parameter b is shown among other variables.

The impact parameter, commonly denoted as b , is the minimum perpendicular distance between the initial trajectory of the projectile and the center of the target if the projectile were to follow a straight path without being deflected by any interactive forces. It is crucial for students to identify b within the context of the simulation, typically represented in diagrams or directly in the output data.

- Write the value of this parameter for each of the possible processes in this type of collision..

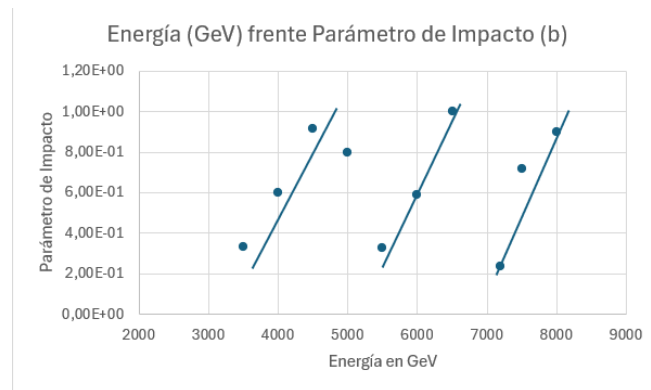


Figure 2: Impact parameter trend

- What would happen to this magnitude if the collision energy is increased? Create a graphical representation to uncover its trend. (Choose energy values between 3.5 and 5 TeV).

The students must identify the trend of the parameter through a similar representation, which is linear for bounded energy values. Its value oscillates between 0 and 1 periodically, exhibiting behavior similar to that of a piecewise linear function.

- What if the number of collisions is increased?

After finding the impact parameter, the following two questions will assess how well students handle changing variables in the input via the .cmd file. A strong reasoning is expected for the answer to the last question.

```

1 ! t tbar production at the LHC
2 ! first incoming beam is a 2212, i.e. a proton and the second one is also a proton.
3 ! Energy of the collision in X(Tev)
4 ! We turn on these 5 kind of collisions resulting in t tbar
5 Beams:idA = 2212
6 Beams:idB = 2212
7 Beams:eCM = 8000.
8
9 ! Number of events to generate in the main program.
10 Main:numberOfEvents = 1000
11
12
13 ! Kind of processes
14 Top:gg2ttbar = off
15 Top:qqbar2ttbar = on
16 Top:ggm2ttbar = off
17 Top:gmgm2ttbar = off
18 Top:ffbar2ttbar(s:gmZ)=off

```

Figure 3: .cmd file ready for input modification.

1.2 Efficiency

- How could the efficiency of the given processes in this type of collision be calculated?

Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYOQCTPH6IY	Fecha	06/09/2024 15:06:24
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.		
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ		
Url de verificación	https://sede.uco.es/GONceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYOQCTPH6IY	Página	48/51




```

*----- PYTHIA Event and Cross Section Statistics -----*
| Subprocess                                | Code |      Number of events      |      sigma +- delta      |
|                                           |      |      Tried   Selected   Accepted   |      (estimated) (mb)    | |
|---|---|---|---|---|
| q qbar -> t tbar                        | 602  |      16337      1000      1000      |      3.032e-08  4.867e-10 |
| sum                                     |      |      16337      1000      1000      |      3.032e-08  4.867e-10 |
|-----|-----|-----|-----|-----|
*----- End PYTHIA Event and Cross Section Statistics -----*

```

Figure 4: Events Tried and carried out.

- Should this magnitude (efficiency) inherently depend on the number of collisions that occur? And on the energy of these collisions? Justify your answer.

Efficiency can be calculated using the data shown in the terminal, specifically by taking the ratio of the number of attempted events to the number of successful events. This reflects how effectively the processes are occurring during the simulation.

Students should argue that while efficiency could be influenced by the number of collisions and the energy of those collisions, it isn't inherently tied to them. They should justify this by explaining that efficiency is a measure of success relative to attempts, which might vary based on factors like interaction probabilities, rather than just the sheer number of collisions or their energy.

1.3 Cross Section

- What is the estimated maximum cross-section for each of the processes?

```

*----- PYTHIA Process Initialization -----*
| We collide p+ with p+ at a CM energy of 8.000e+03 GeV |
|-----|-----|-----|
| Subprocess                                | Code | Estimated |
|                                           |      | max (mb)  |
|-----|-----|-----|
| q qbar -> t tbar                        | 602  | 4.814e-07 |
|-----|-----|-----|
*----- End PYTHIA Process Initialization -----*

```

Figure 5: Maximum Cross Section.

Students are expected to identify the maximum cross-section for each process based on the simulation output or any provided data. The cross-section

Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYZEWOQCTPH6IY	Fecha	06/09/2024 15:06:24
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.		
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ		
Url de verificación	https://sede.uco.es/GOnceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYZEWOQCTPH6IY	Página	49/51



represents the likelihood of a specific interaction occurring, and they should be able to determine this value from the results of the simulation.

• **How is the cross-section related to the previously mentioned quantities (impact parameter and efficiency)?**

The cross-section is directly related to the impact parameter and the efficiency of the collision. The cross-section can be calculated as a product of the square of the impact parameter and the efficiency. This relationship indicates that both the geometric likelihood of a collision (as represented by the impact parameter) and the success rate of the interaction (efficiency) contribute to the overall cross-section.

• **Select 2 of the possible processes and plot the distributions of their cross-sections for (10, 100, 1000, 10,000, and 100,000) events.**

```

*----- PYTHIA Event and Cross Section Statistics -----*
Subprocess                                Code      Number of events
                                         Tried  Selected  Accepted
-----
q qbar -> t tbar                        602      16337    1000    1000
sum                                     16337    1000    1000
sigma +- delta
(estimated) (mb)
-----
3.032e-08  4.867e-10
3.032e-08  4.867e-10
*----- End PYTHIA Event and Cross Section Statistics -----*

```

Figure 6: Cross section display. Only $q \bar{q} \rightarrow t \bar{t}$ process is shown.

The program directly outputs estimated values of the cross-sections after simulating the collisions for each of the possible subprocesses. The goal is to represent these values against the number of events using any software (Gnuplot, Excel, Google Charts, etc.) and compare the maximum value obtained with the answer to question 1 in this section.

2 Kinematic Variables

Our program generates a file in which the values of the variables Transverse Momentum and Pseudorapidity for each event are stored. Based on this file, answer the following questions:

2.1 Transverse Momentum and Pseudorapidity

• **Validating all the processes involved in proton collisions, create a histogram for both magnitudes (pT and eta) in the case of 15,000 events.**

Código Seguro de Verificación	7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYOQCTPH6IY	Fecha	06/09/2024 15:06:24
Normativa	Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.		
Firmante	UNAI GARRIDO RAMIREZ		
Url de verificación	https://sede.uco.es/GOnceOV/verificar.do?action=buscar&idTransaccion=7F3K4EI5ANCELYQV6LKV76EKZYEWYOQCTPH6IY	Página	50/51



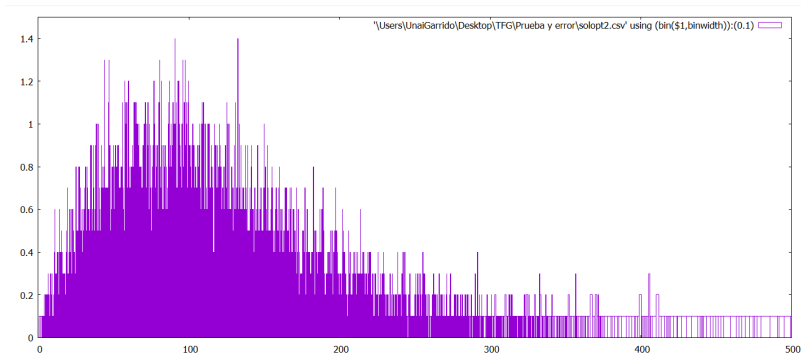


Figure 7: Transverse momentum Histogram

●If we prohibit some of the possible events, is there any significant change in these histograms? Draw your own conclusions based on the definitions of both magnitudes.

In this section, we identify the importance of the transverse momentum and pseudorapidity variables in collisions. Additionally, using a file generated by the program with values for these two magnitudes, you are required to create histograms with Gnuplot and draw meaningful conclusions from them. The Gnuplot code should look similar to the following example.

```

G N U P L O T
Version 6.0 patchlevel 1   last modified 2024-05-13

Copyright (C) 1986-1993, 1998, 2004, 2007-2024
Thomas Williams, Colin Kelley and many others

gnuplot home:      http://www.gnuplot.info
faq, bugs, etc:    type "help FAQ"
immediate help:    type "help" (plot window: hit 'h')

Terminal type is now windows
gnuplot> binwidth=0.1
gnuplot> bin(x,width)=width*floor(x/width)
gnuplot> set yrange [0:1.5]
gnuplot> set xrange [0:500]
gnuplot> plot '\Users\UnaIGarrido\Desktop\TFG\Prueba y error\solopt2.csv' using (bin($2,binwidth)):(0.1) smooth freq with boxes _
```

Figure 8: Example Gnuplot Code.

●Choose several pseudorapidity values from any event, calculate the deflection angle, and discuss it.

In this section, it is proposed that students, focusing on the definition of pseudorapidity, calculate theta using the definition for a selection of events of their choice.