



VNiVERSIDAD
D SALAMANCA

TESIS DOCTORAL

Título de la tesis doctoral

„QCD en la Era de la Precisión“

enviado por

Miguel Angel Benitez

Salamanca

2026

Aprobación del supervisor

Vicent Mateu Barreda aprueba el presente acompañamiento en español de la tesis doctoral escrita en inglés.

Índice

1. Introducción	6
2. Sobre la Determinación de $\alpha_s(m_Z)$ a partir de Dijets en el Thrust de e^+e^-	9
2.1. Distribución de Thrust	9
2.1.1. Fórmula de Factorización	9
2.1.2. Distribución Partónica Singular	9
2.1.3. Distribución No Singular	9
2.1.4. Correcciones No Perturbativas	9
2.1.5. Sustracción de Renormalones	9
2.1.6. Revisión del Formalismo de Gap	9
2.1.7. Esquemas de Gap	9
2.1.8. Funciones de Perfil	9
2.1.9. Implementación Compatible con la OPE de la Total Rate mediante Funciones de Perfil	9
2.1.10. Impacto de la Resummación sobre la Cross Section	9
2.1.11. Elección de la Normalización y Dependencia del Esquema de Gap	9
2.1.12. Efectos de Masa Hadrónica	9
2.1.13. Correcciones QED, Electrodébiles y de Masa del Quark Bottom	9
2.2. Selección de Datos y Procedimiento de Ajuste	9
2.3. Estabilidad de las Predicciones en Ajustes a Datos	9
2.3.1. Estabilidad de los Resultados e Impacto de la Resummación	9
2.3.2. Dependencia de los Resultados del Ajuste respecto al Esquema de Gap	9
2.4. Sobre la Validez del Enfoque de Factorización de Dijets	10
2.4.1. Rango de la Región de Dijets	10
2.4.2. Modelo para Correcciones No Perturbativas de Tres Jets	10
2.4.3. Resumen Intermedio y Discusión	10
2.4.4. Incertidumbres No Perturbativas más allá de las Correcciones Do- minantes de Dijets	10
2.5. Extracción de α_s en el Régimen de Dijets	10
2.5.1. Resultados de los Ajustes	10
2.5.2. Comparación con Datos Experimentales	10
3. Sobre la Resummación de Logaritmos en el Espacio de Laplace y del Momento	11
3.1. Marco Teórico	11
3.2. Comparación de Cross Sections	11

4. Analizando las Extracciones de α_s a partir de Colisiones e^+e^-	12
4.1. Resumen Teórico	12
4.1.1. Resummación en el Régimen de Dijets	12
4.1.2. Resummación del Shoulder de Sudakov	12
4.1.3. Correcciones No Perturbativas	12
4.2. Análisis de Diferentes Configuraciones Teóricas	12
4.2.1. Comparación entre la Resummación SCET y CTTW	12
4.2.2. Comparación con Resultados de Parton Shower	12
4.2.3. Escalas Canónicas y Funciones de Perfil	12
4.3. Comparación Directa entre Ajustes del Acoplamiento Fuerte usando Th- rust y HJM	12
4.4. Análisis de Diferentes Conjuntos de Datos Experimentales	12
5. Una Determinación Precisa de α_s a partir de la Distribución de HJM	13
5.1. Datos Experimentales	13
5.2. Distribución HJM	13
5.3. Procedimiento de Ajuste	13
5.4. Resultados	13
5.5. Comprobaciones Cruzadas	13
6. Análisis de Renormalones de Observables SCET_{II} en la Aproximación de Large-β_0	14
6.1. Establecimiento del Formalismo	14
6.1.1. Aproximación de Large- β_0	14
6.1.2. Cálculo de las Funciones Suaves y de Jet	14
6.1.3. Extracción del Exponente de Anomalía y de la Función Residual	14
6.2. Ejemplos	14
6.2.1. Jet Broadening con Eje WTA	14
6.2.2. Jet Broadening con Eje de Thrust	14
6.2.3. Descorrelación del Momento Transverso en Dijets	14
6.3. Efectos sobre la Sección Eficaz	14
6.4. Relevancia Fenomenológica	14
7. Resumen	15
A. Comparación con el experimento para diferentes energías	17
B. Estudios adicionales sobre la distribución de HJM	18

Capítulo 1

Introducción

El Modelo Estándar (SM) de la física de partículas proporciona una descripción extraordinariamente exitosa de las interacciones fuertes, débiles y electromagnéticas en un amplio rango de energías. La Cromodinámica Cuántica (QCD), la teoría de la interacción fuerte, es al mismo tiempo teóricamente rica y fenomenológicamente desafiante. Aunque sus principios fundamentales están contenidos en una teoría gauge no abeliana de quarks y gluones, la dinámica que emerge de dichos principios abarca múltiples escalas de energía y da lugar a una gran variedad de fenómenos. Comprender la QCD con alta precisión cuantitativa es, por tanto, esencial, tanto como prueba del propio Modelo Estándar como requisito previo para identificar de manera fiable señales de nueva física más allá de éste.

Un parámetro central de la QCD es el acoplamiento fuerte, α_s . Este depende de la escala de energía, reflejando la propiedad de libertad asintótica. Determinaciones precisas de α_s en diferentes escalas proporcionan pruebas rigurosas de la estructura del grupo de renormalización de la QCD y desempeñan un papel fundamental en los ajustes globales del Modelo Estándar. Además, las incertidumbres asociadas a la determinación del acoplamiento fuerte se propagan prácticamente a todas las predicciones perturbativas de observables en colisionadores hadrónicos, convirtiéndolo en una de las incertidumbres paramétricas dominantes en muchas mediciones de precisión y búsquedas de nueva física. Obtener determinaciones precisas del acoplamiento fuerte constituye, por tanto, uno de los objetivos principales de la física de partículas contemporánea.

La aniquilación electrón-positrón ofrece un entorno excepcionalmente limpio para estudiar la QCD. A diferencia de los estados iniciales hadrónicos, la ausencia de funciones de distribución partónica y de radiación inicial de partículas coloreadas permite un acceso directo a la dinámica de los quarks y gluones en el estado final. A energías muy superiores a la escala de hadronización, el proceso de corta distancia $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$ puede calcularse perturbativamente, mientras que los efectos de larga distancia asociados al confinamiento se manifiestan únicamente en la estructura del estado final. Esta separación convierte las colisiones e^+e^- en un laboratorio ideal para estudios de precisión de la dinámica de la interacción fuerte.

Los observables de forma de evento (*event shapes*) constituyen una herramienta particularmente poderosa en este contexto. Al caracterizar la geometría global de los estados finales hadrónicos, las formas de evento son sensibles al patrón de radiación QCD en todo el espacio de fases. Observables como el *thrust*, la masa pesada de jet y el ensanchamiento de jets son sensibles tanto a emisiones duras a grandes ángulos como a múltiples emisiones suaves y colineales, poniendo así a prueba la QCD perturbativa más allá de los cálculos a orden fijo. Al mismo tiempo, su seguridad infrarroja y colineal garantiza que puedan calcularse sistemáticamente dentro de la teoría perturbativa, complementada con correcciones no perturbativas estimadas mediante cálculos analíticos o métodos

de Monte Carlo.

Los datos de alta precisión obtenidos en el Gran Colisionador Electrón-Positrón (LEP) representan una piedra angular de la QCD experimental. Las mediciones de distribuciones de formas de evento en un amplio rango de energías del centro de masas proporcionan una enorme cantidad de información que sigue siendo competitiva y, en muchos aspectos, complementaria a los datos modernos de colisionadores hadrónicos. De manera importante, la descripción teórica de las formas de evento ha experimentado avances significativos desde la era de LEP, incluyendo cálculos perturbativos de orden superior, resummación a todos los órdenes de grandes logaritmos y una comprensión mejorada de los efectos de hadronización mediante métodos de teoría efectiva de campos y correcciones analíticas de potencia. Estos desarrollos permiten extraer α_s con un control teórico sin precedentes. Además de estos avances teóricos, los datos originales de LEP están siendo actualmente reanalizados, con posibles implicaciones en la extracción de parámetros del Modelo Estándar como α_s . Asimismo, existen actualmente discusiones sobre un futuro programa de colisionadores FCC-ee, en el cual, entre muchas otras oportunidades científicas, la determinación de α_s formaría parte de los proyectos físicos en desarrollo.

Además de la determinación del acoplamiento fuerte a partir de formas de evento en colisiones e^+e^- , existe un amplio conjunto de observables que permiten extracciones igualmente competitivas. Entre los métodos más importantes se encuentran los decaimientos hadrónicos del τ , la dispersión profundamente inelástica, la producción de jets en colisionadores hadrónicos, observables de precisión electrodébil como el ancho hadrónico del bosón Z , reglas de suma y tasas de decaimiento de quarkonios, así como análisis globales de funciones de distribución partónica (PDFs). Entre todos estos enfoques, la QCD en red (*lattice QCD*) desempeña un papel particularmente relevante, ya que proporciona una determinación de primeros principios y sistemáticamente mejorable de α_s , con control completamente no perturbativo de la dinámica a bajas energías. Las determinaciones modernas en QCD en red combinan simulaciones de alta estadística con emparejamientos perturbativos a múltiples bucles y han alcanzado precisiones competitivas por debajo del uno por ciento. Dado que el progreso experimental en determinaciones directas a altas energías probablemente permanecerá limitado hasta la entrada en funcionamiento de la próxima generación de colisionadores leptónicos, se espera que la QCD en red constituya un componente central de la frontera de precisión durante la próxima década, tanto mediante la mejora del promedio mundial del acoplamiento fuerte como proporcionando una referencia teórica esencial para futuras mediciones en colisionadores.

La determinación de α_s a partir de datos de formas de evento requiere la combinación consistente de cálculos perturbativos en múltiples escalas, la resummación de contribuciones logarítmicamente realzadas y un tratamiento cuidadoso de los efectos no perturbativos. Al mismo tiempo, proporciona una prueba rigurosa de nuestra capacidad para describir la transición de quarks y gluones a hadrones dentro de un marco cuantitativo.

El objetivo de esta tesis es contribuir a este programa mediante una determinación de precisión del acoplamiento fuerte utilizando mediciones de formas de evento obtenidas en LEP. Aprovechando herramientas teóricas modernas y una comparación detallada con los datos experimentales, este trabajo pretende refinar nuestra comprensión de la dinámica de la QCD y mejorar la precisión con la que se conoce su parámetro fundamental más importante.

Esta tesis está organizada de la siguiente manera: en el capítulo 2 discutimos la forma de evento más sencilla, el thrust, e investigamos todos los efectos anteriormente mencionados y su impacto en estudios relacionados con la determinación del acoplamiento fuerte. En el capítulo 5, realizamos estudios similares para la forma de evento HJM. El

capítulo 3 aborda entonces un aspecto particular de cualquier predicción fenomenológica que involucre resummación, concretamente el espacio de resummación. El capítulo 4 proporciona una comparación entre thrust y HJM y, en particular, analiza en gran detalle la formulación teórica de este último. Más importante aún, se realizan comparaciones directas entre predicciones basadas en tratamientos de teoría efectiva de campos (EFT) y formulaciones más tradicionales de QCD directa. Finalmente, en el contexto de las formas de evento en colisiones e^+e^- , en el capítulo 6 introducimos un enfoque sistemático para obtener las singularidades de renormalón dominantes de observables de tipo SCET-II en la aproximación de large- β_0 .

Capítulo 2

Sobre la Determinación de $\alpha_s(m_Z)$ a partir de Dijets en el Thrust de e^+e^-

2.1. Distribución de Thrust

2.1.1. Fórmula de Factorización

2.1.2. Distribución Partónica Singular

2.1.3. Distribución No Singular

2.1.4. Correcciones No Perturbativas

2.1.5. Sustracción de Renormalones

2.1.6. Revisión del Formalismo de Gap

2.1.7. Esquemas de Gap

2.1.8. Funciones de Perfil

2.1.9. Implementación Compatible con la OPE de la Total Rate mediante Funciones de Perfil

2.1.10. Impacto de la Resummación sobre la Cross Section

2.1.11. Elección de la Normalización y Dependencia del Esquema de Gap

2.1.12. Efectos de Masa Hadrónica

2.1.13. Correcciones QED, Electrodébiles y de Masa del Quark Bottom

2.2. Selección de Datos y Procedimiento de Ajuste

2.3. Estabilidad de las Predicciones en Ajustes a Datos

2.3.1. Estabilidad de los Resultados e Impacto de la Resummación

2.3.2. Dependencia de los Resultados del Ajuste respecto al Esquema de Gap

2.4. Sobre la Validez del Enfoque de Factorización de Dijets

2.4.1. Rango de la Región de Dijets

2.4.2. Modelo para Correcciones No Perturbativas de Tres Jets

2.4.3. Resumen Intermedio y Discusión

2.4.4. Incertidumbres No Perturbativas más allá de las Correcciones Dominantes de Dijets

2.5. Extracción de α_s en el Régimen de Dijets

2.5.1. Resultados de los Ajustes

2.5.2. Comparación con Datos Experimentales

Capítulo 3

Sobre la Resummación de Logaritmos en el Espacio de Laplace y del Momento

3.1. Marco Teórico

3.2. Comparación de Cross Sections

Capítulo 4

Analizando las Extracciones de α_s a partir de Colisiones e^+e^-

4.1. Resumen Teórico

4.1.1. Resummación en el Régimen de Dijets

4.1.2. Resummación del Shoulder de Sudakov

4.1.3. Correcciones No Perturbativas

4.2. Análisis de Diferentes Configuraciones Teóricas

4.2.1. Comparación entre la Resummación SCET y CTTW

4.2.2. Comparación con Resultados de Parton Shower

4.2.3. Escalas Canónicas y Funciones de Perfil

4.3. Comparación Directa entre Ajustes del Acoplamiento Fuerte usando Thrust y HJM

4.4. Análisis de Diferentes Conjuntos de Datos Experimentales

Capítulo 5

Una Determinación Precisa de α_s a partir de la Distribución de HJM

- 5.1. Datos Experimentales
- 5.2. Distribución HJM
- 5.3. Procedimiento de Ajuste
- 5.4. Resultados
- 5.5. Comprobaciones Cruzadas

Capítulo 6

Análisis de Renormalones de Observables SCET_{II} en la Aproximación de Large- β_0

6.1. Establecimiento del Formalismo

6.1.1. Aproximación de Large- β_0

6.1.2. Cálculo de las Funciones Suaves y de Jet

6.1.3. Extracción del Exponente de Anomalía y de la Función Residual

6.2. Ejemplos

6.2.1. Jet Broadening con Eje WTA

6.2.2. Jet Broadening con Eje de Thrust

6.2.3. Descorrelación del Momento Transverso en Dijets

6.3. Efectos sobre la Sección Eficaz

6.4. Relevancia Fenomenológica

Capítulo 7

Resumen

Esta tesis presenta una determinación de precisión integral del acoplamiento fuerte $\alpha_s(m_Z)$ a partir de datos de aniquilación electrón-positrón, centrándose específicamente en ajustes globales de distribuciones de formas de evento. La motivación principal es aprovechar el entorno experimental limpio de las colisiones e^+e^- y el avanzado control teórico alcanzado en los últimos años para extraer α_s minimizando las incertidumbres teóricas y experimentales. Basándose en la larga tradición de análisis de formas de evento en LEP, este trabajo combina cálculos perturbativos de última generación con resumación a todos los órdenes y tratamientos sistemáticos de efectos no perturbativos.

Una parte fundamental de esta tesis se basa en la distribución de *thrust* en el límite de dijets. El *thrust* proporciona una medida de cuán colimado es el estado final, correspondiendo la región de dos jets (dijet) al límite $1 - T \rightarrow 0$. La descripción teórica de la distribución de *thrust* en esta región implica una factorización en funciones duras (*hard*), de jet y suaves (*soft*), combinada con la resumación de grandes logaritmos de Sudakov hasta precisión N³LL' y emparejamiento con resultados a orden fijo de $\mathcal{O}(\alpha_s^3)$. Este marco incorpora también correcciones de potencia asociadas a la hadronización mediante una expansión en producto de operadores (OPE), incluyendo sustracciones de renormalón que mejoran la convergencia y reducen las incertidumbres inducidas por la variación de escalas. Un ajuste global a los datos disponibles de *thrust* produce una extracción competitiva de $\alpha_s(m_Z)$ con incertidumbres cuantificadas, demostrando estabilidad frente a variaciones del rango de ajuste y de los supuestos del modelo para correcciones de potencia subdominantes. En particular, este análisis muestra que incluso una selección conservadora de datos dominados por dijets puede alcanzar alta precisión y excelente concordancia con las mediciones experimentales a diferentes energías.

Complementando el análisis de *thrust*, la tesis también incluye una extracción de α_s a partir de la distribución de masa pesada de jet (HJM). El observable HJM, definido en términos de las masas de los dos hemisferios separados por el plano normal al eje de *thrust*, explora una física similar a la de *thrust* mientras introduce sensibilidad a diferentes estructuras logarítmicas. De manera crucial, el espectro de HJM presenta un denominado “hombro de Sudakov” cerca de la configuración simétrica de tres jets, lo que requiere la resumación de logaritmos no solo en el régimen de dijets sino también cerca de esta región de hombro. Por ello, la predicción teórica para HJM combina resultados a orden fijo de $\mathcal{O}(\alpha_s^3)$, resumación N³LL' en el límite de dijets y resumación N²LL del hombro, junto con un tratamiento desde primeros principios de correcciones de potencia en ambos regímenes. El marco de ajuste asociado incorpora cuidadosamente las incertidumbres teóricas mediante una matriz de covarianza derivada de un barrido aleatorio uniforme sobre escalas de renormalización y parámetros de funciones de perfil. Esta metodología produce un valor de $\alpha_s(m_Z)$ consistente con la correspondiente determinación a partir de *thrust* y con precisión comparable, proporcionando además evidencia sobre

el signo y magnitud de desplazamientos no perturbativos en la región de tres jets.

Un tema común en ambos análisis es el papel esencial de la resummación y de la cuantificación sistemática de incertidumbres. Sin la resummación de términos logarítmicamente realzados, los ajustes dependen fuertemente de elecciones arbitrarias del rango de ajuste, lo que conduce a incertidumbres infladas o resultados inestables. El uso de métodos de teoría efectiva de campos, en particular SCET, permite realizar resummación a alto orden logarítmico. Al mismo tiempo, el modelado explícito de efectos no perturbativos mediante parámetros controlados — junto con la propagación cuidadosa de sus incertidumbres — permite una evaluación realista de su impacto en las extracciones de α_s . En conjunto, estos enfoques representan una mejora significativa respecto a métodos anteriores basados únicamente en variaciones ad-hoc de escalas de renormalización o correcciones fenomenológicas de hadronización. A lo largo de los estudios presentados en esta tesis, los valores extraídos de $\alpha_s(m_Z)$ muestran una estrecha concordancia entre sí, mientras que las incertidumbres son competitivas con las mejores determinaciones disponibles provenientes de formas de evento y otros procesos.

Tanto la determinación de α_s a partir de *thrust* como la obtenida mediante HJM tienen en común que el valor final extraído presenta una discrepancia significativa con el promedio mundial del PDG, dominado por el resultado de QCD en red. Reanálisis actuales de los datos de LEP sugieren que el origen de esta discrepancia proviene de tratamientos poco fiables de los datos experimentales brutos, es decir, del *unfolding* y aspectos relacionados. Los primeros resultados muestran que el uso de métodos modernos para analizar los datos originales de LEP, aplicando simultáneamente la misma descripción teórica, conduce a valores del acoplamiento fuerte significativamente más cercanos al resultado de QCD en red. Esto podría resolver potencialmente la tensión de larga data entre los bajos valores de α_s obtenidos por diferentes colaboraciones en el pasado mediante tratamientos completamente analíticos de la predicción teórica y el promedio mundial del PDG.

En el último capítulo de este trabajo introducimos un enfoque sistemático para analizar la estructura de renormalones de expansiones perturbativas de observables sensibles al momento transversal dentro del marco de SCET, es decir, observables de tipo SCET-II, utilizando la aproximación de gran- β_0 . En particular, mediante la identificación de las singularidades de renormalón dominantes de las series perturbativas subyacentes, fuimos capaces de extraer la ambigüedad correspondiente inducida por un renormalón infrarrojo al realizar la transformada de Borel inversa. Esto nos permitió determinar las contribuciones no perturbativas dominantes, formalmente representadas por elementos de matriz no perturbativos, que deben cancelar las ambigüedades provenientes de las singularidades de renormalón en la expansión perturbativa. Además, se demostró cómo estas correcciones no perturbativas pueden incorporarse en una descripción a nivel hadrónico de los observables considerados.

Los resultados presentados en esta tesis contribuyen al programa en curso de fenomenología de precisión en QCD, demostrando que los datos de formas de evento de LEP, cuando se combinan con herramientas teóricas modernas, continúan siendo un laboratorio poderoso para estudiar la interacción fuerte. De este modo, este trabajo subraya tanto la madurez de los cálculos perturbativos en QCD como la importancia de una estimación rigurosa de incertidumbres en extracciones de alta precisión de parámetros fundamentales.

Apéndice A

Comparación con el experimento para diferentes energías

Apéndice B

Estudios adicionales sobre la distribución de HJM

Bibliografía

- [1] TASSO collaboration, W. Braunschweig et al., *Global Jet Properties at 14 GeV to 44 GeV Center-of-mass Energy in e^+e^- Annihilation*, *Z. Phys. C* **47** (1990) 187–198.
- [2] JADE collaboration, P. A. Movilla Fernandez, O. Biebel, S. Bethke, S. Kluth and P. Pfeifenschneider, *A study of event shapes and determinations of α_s using data of e^+e^- annihilations at $s^{1/2} = 22$ GeV to 44 GeV*, *Eur. Phys. J. C* **1** (1998) 461–478, [[hep-ex/9708034](#)].
- [3] AMY collaboration, Y. K. Li et al., *Multi - hadron event properties in e^+e^- annihilation at $\sqrt{s} = 52$ GeV to 57 GeV*, *Phys. Rev. D* **41** (1990) 2675.
- [4] SLD collaboration, K. Abe et al., *Measurement of $\alpha_s(M_Z^2)$ from hadronic event observables at the Z_0 resonance*, *Phys. Rev. D* **51** (1995) 962–984, [[hep-ex/9501003](#)].
- [5] L3 collaboration, B. Adeva et al., *Studies of hadronic event structure and comparisons with QCD models at the Z_0 resonance*, *Z. Phys. C* **55** (1992) 39–62.
- [6] L3 collaboration, P. Achard et al., *Studies of hadronic event structure in e^+e^- annihilation from 30 GeV to 209 GeV with the L3 detector*, *Phys. Rept.* **399** (2004) 71–174, [[hep-ex/0406049](#)].
- [7] DELPHI collaboration, J. Abdallah et al., *A Study of the energy evolution of event shape distributions and their means with the DELPHI detector at LEP*, *Eur. Phys. J. C* **29** (2003) 285–312, [[hep-ex/0307048](#)].
- [8] DELPHI collaboration, P. Abreu et al., *Consistent measurements of α_s from precise oriented event shape distributions*, *Eur. Phys. J. C* **14** (2000) 557–584, [[hep-ex/0002026](#)].
- [9] DELPHI collaboration, P. Abreu et al., *Energy dependence of event shapes and of α_s at LEP-2*, *Phys. Lett. B* **456** (1999) 322–340.
- [10] OPAL collaboration, G. Abbiendi et al., *Measurement of event shape distributions and moments in $e^+e^- \rightarrow$ hadrons at 91 GeV – 209 GeV and a determination of α_s* , *Eur. Phys. J. C* **40** (2005) 287–316, [[hep-ex/0503051](#)].
- [11] OPAL collaboration, K. Ackerstaff et al., *QCD studies with e^+e^- - annihilation data at 161 GeV*, *Z. Phys. C* **75** (1997) 193–207.
- [12] OPAL collaboration, G. Abbiendi et al., *QCD studies with e^+e^- annihilation data at 172 GeV – 189 GeV*, *Eur. Phys. J. C* **16** (2000) 185–210, [[hep-ex/0002012](#)].
- [13] ALEPH collaboration, A. Heister et al., *Studies of QCD at e^+e^- centre-of-mass energies between 91 GeV and 209 GeV*, *Eur. Phys. J. C* **35** (2004) 457–486.

- [14] D. d’Enterria et al., *The strong coupling constant: state of the art and the decade ahead*, *J. Phys. G* **51** (2024) 090501, [2203.08271].
- [15] S. Kluth, *Tests of quantum chromo dynamics at e^+e^- colliders*, *Rept. Prog. Phys.* **69** (2006) 1771–1846, [hep-ex/0603011].
- [16] P. A. Movilla Fernandez, S. Bethke, O. Biebel and S. Kluth, *Tests of power corrections for event shapes in e^+e^- annihilation*, *Eur. Phys. J.* **C22** (2001) 1–15, [hep-ex/0105059].
- [17] E. Farhi, *A QCD Test for Jets*, *Phys. Rev. Lett.* **39** (1977) 1587–1588.
- [18] G. Parisi, *Super Inclusive Cross-Sections*, *Phys. Lett.* **B74** (1978) 65.
- [19] J. F. Donoghue, F. Low and S.-Y. Pi, *Tensor Analysis of Hadronic Jets in Quantum Chromodynamics*, *Phys. Rev.* **D20** (1979) 2759.
- [20] L. Clavelli, *Jet Invariant Mass in Quantum Chromodynamics*, *Phys.Lett.* **B85** (1979) 111.
- [21] T. Chandramohan and L. Clavelli, *Consequences of Second Order QCD for Jet Structure in e^+e^- annihilation*, *Nucl.Phys.* **B184** (1981) 365.
- [22] P. E. Rakow and B. Webber, *Transverse Momentum Moments of Hadron Distributions in QCD Jets*, *Nucl.Phys.* **B191** (1981) 63.
- [23] R. K. Ellis and B. R. Webber, *QCD Jet Broadening in Hadron Hadron Collisions*, in *Snowmass ’86 Summer Study on the Physics of the Superconducting Supercollider*, pp. 74–76, 1986.
- [24] C. L. Basham, L. S. Brown, S. D. Ellis and S. T. Love, *Energy Correlations in electron - Positron Annihilation: Testing QCD*, *Phys. Rev. Lett.* **41** (1978) 1585.
- [25] C. L. Basham, L. S. Brown, S. D. Ellis and S. T. Love, *Energy Correlations in electron-Positron Annihilation in Quantum Chromodynamics: Asymptotically Free Perturbation Theory*, *Phys. Rev. D* **19** (1979) 2018.
- [26] S. Catani and M. H. Seymour, *The Dipole Formalism for the Calculation of QCD Jet Cross Sections at Next-to-Leading Order*, *Phys. Lett.* **B378** (1996) 287–301, [hep-ph/9602277].
- [27] S. Catani and M. H. Seymour, *A general algorithm for calculating jet cross sections in NLO QCD*, *Nucl. Phys.* **B485** (1997) 291–419, [hep-ph/9605323].
- [28] A. Gehrmann-De Ridder, T. Gehrmann, E. W. N. Glover and G. Heinrich, *Second-order QCD corrections to the thrust distribution*, *Phys. Rev. Lett.* **99** (2007) 132002, [0707.1285].
- [29] A. Gehrmann-De Ridder, T. Gehrmann, E. W. N. Glover and G. Heinrich, *NNLO moments of event shapes in e^+e^- annihilation*, *JHEP* **05** (2009) 106, [0903.4658].
- [30] S. Weinzierl, *NNLO corrections to 3-jet observables in electron-positron annihilation*, *Phys. Rev. Lett.* **101** (2008) 162001, [0807.3241].
- [31] S. Weinzierl, *Event shapes and jet rates in electron-positron annihilation at NNLO*, *JHEP* **06** (2009) 041, [0904.1077].

- [32] V. Del Duca, C. Duhr, A. Kardos, G. Somogyi and Z. Trócsányi, *Three-Jet Production in Electron-Positron Collisions at Next-to-Next-to-Leading Order Accuracy*, *Phys. Rev. Lett.* **117** (2016) 152004, [1603.08927].
- [33] V. Del Duca, C. Duhr, A. Kardos, G. Somogyi, Z. Ször, Z. Trócsányi et al., *Jet production in the CoLoRFulNNLO method: event shapes in electron-positron collisions*, *Phys. Rev.* **D94** (2016) 074019, [1606.03453].
- [34] S. Catani, L. Trentadue, G. Turnock and B. R. Webber, *Resummation of large logarithms in e^+e^- event shape distributions*, *Nucl. Phys.* **B407** (1993) 3–42.
- [35] C. W. Bauer, S. Fleming and M. E. Luke, *Summing Sudakov logarithms in $B \rightarrow X_s \gamma$ in effective field theory*, *Phys. Rev.* **D63** (2000) 014006, [hep-ph/0005275].
- [36] C. W. Bauer, S. Fleming, D. Pirjol and I. W. Stewart, *An Effective field theory for collinear and soft gluons: Heavy to light decays*, *Phys. Rev.* **D63** (2001) 114020, [hep-ph/0011336].
- [37] C. W. Bauer and I. W. Stewart, *Invariant operators in collinear effective theory*, *Phys. Lett.* **B516** (2001) 134–142, [hep-ph/0107001].
- [38] C. W. Bauer, D. Pirjol and I. W. Stewart, *Soft collinear factorization in effective field theory*, *Phys. Rev. D* **65** (2002) 054022, [hep-ph/0109045].
- [39] C. W. Bauer, S. Fleming, D. Pirjol, I. Z. Rothstein and I. W. Stewart, *Hard scattering factorization from effective field theory*, *Phys. Rev.* **D66** (2002) 014017, [hep-ph/0202088].
- [40] M. D. Schwartz, *Resummation and NLO Matching of Event Shapes with Effective Field Theory*, *Phys. Rev.* **D77** (2008) 014026, [0709.2709].
- [41] T. Becher and M. D. Schwartz, *A precise determination of α_s from LEP thrust data using effective field theory*, *JHEP* **07** (2008) 034, [0803.0342].
- [42] Y.-T. Chien and M. D. Schwartz, *Resummation of heavy jet mass and comparison to LEP data*, *JHEP* **08** (2010) 058, [1005.1644].
- [43] A. H. Hoang, D. W. Kolodrubetz, V. Mateu and I. W. Stewart, *C -parameter distribution at N^3LL' including power corrections*, *Phys. Rev. D* **91** (2015) 094017, [1411.6633].
- [44] G. Bell, A. Hornig, C. Lee and J. Talbert, *e^+e^- angularity distributions at NNLL' accuracy*, *JHEP* **01** (2019) 147, [1808.07867].
- [45] A. Banfi, G. P. Salam and G. Zanderighi, *Semi-numerical resummation of event shapes*, *JHEP* **01** (2002) 018, [hep-ph/0112156].
- [46] A. Banfi, H. McAslan, P. F. Monni and G. Zanderighi, *A general method for the resummation of event-shape distributions in e^+e^- annihilation*, *JHEP* **05** (2015) 102, [1412.2126].
- [47] B. R. Webber, *Estimation of power corrections to hadronic event shapes*, *Phys. Lett.* **B339** (1994) 148–150, [hep-ph/9408222].
- [48] Y. L. Dokshitzer and B. R. Webber, *Calculation of power corrections to hadronic event shapes*, *Phys. Lett.* **B352** (1995) 451–455, [hep-ph/9504219].

- [49] R. Akhoury and V. I. Zakharov, *On the universality of the leading, $1/Q$ power corrections in QCD*, *Phys. Lett. B* **357** (1995) 646–652, [[hep-ph/9504248](#)].
- [50] G. P. Korchemsky and G. F. Sterman, *Nonperturbative corrections in resummed cross-sections*, *Nucl. Phys. B* **437** (1995) 415–432, [[hep-ph/9411211](#)].
- [51] G. P. Korchemsky and G. F. Sterman, *Power corrections to event shapes and factorization*, *Nucl. Phys. B* **555** (1999) 335–351, [[hep-ph/9902341](#)].
- [52] C. Lee and G. F. Sterman, *Momentum Flow Correlations from Event Shapes: Factorized Soft Gluons and Soft-Collinear Effective Theory*, *Phys. Rev. D* **75** (2007) 014022, [[hep-ph/0611061](#)].
- [53] A. H. Hoang and I. W. Stewart, *Designing gapped soft functions for jet production*, *Phys. Lett. B* **660** (2008) 483–493, [[0709.3519](#)].
- [54] R. Abbate, M. Fickinger, A. H. Hoang, V. Mateu and I. W. Stewart, *Thrust at N^3LL with Power Corrections and a Precision Global Fit for $\alpha_s(m_Z)$* , *Phys. Rev. D* **83** (2011) 074021, [[1006.3080](#)].
- [55] A. Banfi and B. K. El-Menoufi, *Characterising hadronisation across the phase space*, [2511.17708](#).
- [56] P. Nason and M. H. Seymour, *Infrared renormalons and power suppressed effects in e^+e^- jet events*, *Nucl. Phys. B* **454** (1995) 291–312, [[hep-ph/9506317](#)].
- [57] E. Gardi and J. Rathsman, *Renormalon resummation and exponentiation of soft and collinear gluon radiation in the thrust distribution*, *Nucl. Phys. B* **609** (2001) 123–182, [[hep-ph/0103217](#)].
- [58] Y. L. Dokshitzer, G. Marchesini and B. R. Webber, *Dispersive Approach to Power-Behaved Contributions in QCD Hard Processes*, *Nucl. Phys. B* **469** (1996) 93–142, [[hep-ph/9512336](#)].
- [59] Y. L. Dokshitzer and B. Webber, *Power corrections to event shape distributions*, *Phys. Lett. B* **404** (1997) 321–327, [[hep-ph/9704298](#)].
- [60] R. A. Davison and B. R. Webber, *Non-Perturbative Contribution to the Thrust Distribution in e^+e^- Annihilation*, *Eur. Phys. J. C* **59** (2009) 13–25, [[0809.3326](#)].
- [61] A. H. Hoang, A. Jain, I. Scimemi and I. W. Stewart, *R-evolution: Improving perturbative QCD*, *Phys. Rev. D* **82** (2010) 011501, [[0908.3189](#)].
- [62] A. H. Hoang, A. Jain, I. Scimemi and I. W. Stewart, *Infrared Renormalization Group Flow for Heavy Quark Masses*, *Phys. Rev. Lett.* **101** (2008) 151602, [[0803.4214](#)].
- [63] A. H. Hoang, A. Jain, C. Lepenik, V. Mateu, M. Preisser, I. Scimemi et al., *The MSR mass and the $\mathcal{O}(\Lambda_{\text{QCD}})$ renormalon sum rule*, *JHEP* **04** (2018) 003, [[1704.01580](#)].
- [64] R. Abbate, M. Fickinger, A. H. Hoang, V. Mateu and I. W. Stewart, *Precision Thrust Cumulant Moments at N^3LL* , *Phys. Rev. D* **86** (2012) 094002, [[1204.5746](#)].

- [65] A. H. Hoang, D. W. Kolodrubetz, V. Mateu and I. W. Stewart, *Precise determination of α_s from the C -parameter distribution*, *Phys. Rev. D* **91** (2015) 094018, [1501.04111].
- [66] M. A. Benitez, A. H. Hoang, V. Mateu, I. W. Stewart and G. Vita, *On Determining $\alpha_s(m_Z)$ from Dijets in e^+e^- Thrust*, 2412.15164.
- [67] M. A. Benitez, A. Bhattacharya, A. H. Hoang, V. Mateu, M. D. Schwartz, I. W. Stewart et al., *A Precise Determination of α_s from the Heavy Jet Mass Distribution*, 2502.12253.
- [68] S. Fleming, A. H. Hoang, S. Mantry and I. W. Stewart, *Jets from massive unstable particles: Top-mass determination*, *Phys. Rev.* **D77** (2008) 074010, [hep-ph/0703207].
- [69] A. von Manteuffel, E. Panzer and R. M. Schabinger, *Cusp and collinear anomalous dimensions in four-loop QCD from form factors*, *Phys. Rev. Lett.* **124** (2020) 162001, [2002.04617].
- [70] J. M. Henn, G. P. Korchemsky and B. Mistlberger, *The full four-loop cusp anomalous dimension in $\mathcal{N} = 4$ super Yang-Mills and QCD*, *JHEP* **04** (2020) 018, [1911.10174].
- [71] J. M. Henn, T. Peraro, M. Stahlhofen and P. Wasser, *Matter dependence of the four-loop cusp anomalous dimension*, *Phys. Rev. Lett.* **122** (2019) 201602, [1901.03693].
- [72] R. Brüser, A. Grozin, J. M. Henn and M. Stahlhofen, *Matter dependence of the four-loop QCD cusp anomalous dimension: from small angles to all angles*, *JHEP* **05** (2019) 186, [1902.05076].
- [73] S. Moch, B. Ruijl, T. Ueda, J. A. M. Vermaseren and A. Vogt, *On quartic colour factors in splitting functions and the gluon cusp anomalous dimension*, *Phys. Lett. B* **782** (2018) 627–632, [1805.09638].
- [74] S. Moch, B. Ruijl, T. Ueda, J. A. M. Vermaseren and A. Vogt, *Four-Loop Non-Singlet Splitting Functions in the Planar Limit and Beyond*, *JHEP* **10** (2017) 041, [1707.08315].
- [75] R. Brüser, Z. L. Liu and M. Stahlhofen, *Three-Loop Quark Jet Function*, *Phys. Rev. Lett.* **121** (2018) 072003, [1804.09722].
- [76] P. Banerjee, P. K. Dhani and V. Ravindran, *Gluon jet function at three loops in QCD*, *Phys. Rev.* **D98** (2018) 094016, [1805.02637].
- [77] R. Kelley, M. D. Schwartz, R. M. Schabinger and H. X. Zhu, *The two-loop hemisphere soft function*, *Phys. Rev.* **D84** (2011) 045022, [1105.3676].
- [78] P. F. Monni, T. Gehrmann and G. Luisoni, *Two-Loop Soft Corrections and Resummation of the Thrust Distribution in the Dijet Region*, *JHEP* **1108** (2011) 010, [1105.4560].
- [79] D. Baranowski, M. Delto, K. Melnikov, A. Pikelner and C.-Y. Wang, *Zero-Jettiness Soft Function to Third Order in Perturbative QCD*, *Phys. Rev. Lett.* **134** (2025) 191902, [2409.11042].

- [80] D. Baranowski, M. Delto, K. Melnikov, A. Pikelner and C.-Y. Wang, *Triple real-emission contribution to the zero-jettiness soft function at N^3LO in QCD*, *JHEP* **04** (2025) 084, [2412.14001].
- [81] L. G. Almeida, S. D. Ellis, C. Lee, G. Sterman, I. Sung et al., *Comparing and counting logs in direct and effective methods of QCD resummation*, *JHEP* **1404** (2014) 174, [1401.4460].
- [82] V. Mateu and P. G. Ortega, *Bottom and Charm Mass determinations from global fits to $Q\bar{Q}$ bound states at N^3LO* , *JHEP* **01** (2018) 122, [1711.05755].
- [83] R. K. Ellis, D. A. Ross and A. E. Terrano, *The Perturbative Calculation of Jet Structure in e^+e^- Annihilation*, *Nucl. Phys.* **B178** (1981) 421.
- [84] I. Moulton, L. Rothen, I. W. Stewart, F. J. Tackmann and H. X. Zhu, *Subleading Power Corrections for N -Jettiness Subtractions*, *Phys. Rev.* **D95** (2017) 074023, [1612.00450].
- [85] A. Gehrmann-De Ridder, T. Gehrmann, E. W. N. Glover and G. Heinrich, *EERAD3: Event shapes and jet rates in electron-positron annihilation at order α_s^3* , *Comput. Phys. Commun.* **185** (2014) 3331, [1402.4140].
- [86] G. Bell, C. Lee, Y. Makris, J. Talbert and B. Yan, *Effects of renormalon scheme and perturbative scale choices on determinations of the strong coupling from e^+e^- event shapes*, *Phys. Rev. D* **109** (2024) 094008, [2311.03990].
- [87] I. Moulton, I. W. Stewart, G. Vita and H. X. Zhu, *First Subleading Power Resummation for Event Shapes*, 1804.04665.
- [88] I. Moulton, I. W. Stewart, G. Vita and H. X. Zhu, *The Soft Quark Sudakov*, *JHEP* **05** (2020) 089, [1910.14038].
- [89] M. Beneke, M. Garny, S. Jaskiewicz, J. Strohm, R. Szafron, L. Vernazza et al., *Next-to-leading power endpoint factorization and resummation for off-diagonal “gluon” thrust*, *JHEP* **07** (2022) 144, [2205.04479].
- [90] G. P. Korchemsky and S. Tafat, *On power corrections to the event shape distributions in QCD*, *JHEP* **10** (2000) 010, [hep-ph/0007005].
- [91] Z. Ligeti, I. W. Stewart and F. J. Tackmann, *Treating the b quark distribution function with reliable uncertainties*, *Phys. Rev.* **D78** (2008) 114014, [0807.1926].
- [92] A. H. Hoang and S. Kluth, *Hemisphere Soft Function at $O(\alpha_s^2)$ for Dijet Production in e^+e^- Annihilation*, 0806.3852.
- [93] B. Bachu, A. H. Hoang, V. Mateu, A. Pathak and I. W. Stewart, *Boosted top quarks in the peak region with N^3LL resummation*, *Phys. Rev. D* **104** (2021) 014026, [2012.12304].
- [94] B. Dehnadi, A. H. Hoang, O. L. Jin and V. Mateu, *Top quark mass calibration for Monte Carlo event generators — an update*, *JHEP* **12** (2023) 065, [2309.00547].
- [95] G. P. Salam and D. Wicke, *Hadron masses and power corrections to event shapes*, *JHEP* **05** (2001) 061, [hep-ph/0102343].
- [96] V. Mateu, I. W. Stewart and J. Thaler, *Power Corrections to Event Shapes with Mass-Dependent Operators*, *Phys. Rev. D* **87** (2013) 014025, [1209.3781].

- [97] A. Denner, S. Dittmaier, T. Gehrmann and C. Kurz, *Electroweak corrections to hadronic event shapes and jet production in $e+e-$ annihilation*, *Nucl. Phys.* **B836** (2010) 37–90, [1003.0986].
- [98] C. Lepenik and V. Mateu, *NLO Massive Event-Shape Differential and Cumulative Distributions*, *JHEP* **03** (2020) 024, [1912.08211].
- [99] A. Bris, V. Mateu and M. Preisser, *Massive event-shape distributions at N^2LL* , *JHEP* **09** (2020) 132, [2006.06383].
- [100] P. Nason and G. Zanderighi, *Fits of α_s using power corrections in the three-jet region*, *JHEP* **06** (2023) 058, [2301.03607].
- [101] T. Gehrmann, G. Luisoni and P. F. Monni, *Power corrections in the dispersive model for a determination of the strong coupling constant from the thrust distribution*, *Eur. Phys. J.* **C73** (2013) 2265, [1210.6945].
- [102] N. G. Gracia and V. Mateu, *Toward massless and massive event shapes in the large- β_0 limit*, *JHEP* **07** (2021) 229, [2104.13942].
- [103] A. H. Hoang, S. Plätzer and D. Samitz, *On the Cutoff Dependence of the Quark Mass Parameter in Angular Ordered Parton Showers*, 1807.06617.
- [104] A. H. Hoang, O. L. Jin, S. Plätzer and D. Samitz, *Matching hadronization and perturbative evolution: the cluster model in light of infrared shower cutoff dependence*, *JHEP* **07** (2025) 005, [2404.09856].
- [105] F. Caola, S. Ferrario Ravasio, G. Limatola, K. Melnikov and P. Nason, *On linear power corrections in certain collider observables*, *JHEP* **01** (2022) 093, [2108.08897].
- [106] F. Caola, S. Ferrario Ravasio, G. Limatola, K. Melnikov, P. Nason and M. A. Ozelik, *Linear power corrections to e^+e^- shape variables in the three-jet region*, *JHEP* **12** (2022) 062, [2204.02247].
- [107] I. W. Stewart, F. J. Tackmann and W. J. Waalewijn, *Dissecting Soft Radiation with Factorization*, *Phys. Rev. Lett.* **114** (2015) 092001, [1405.6722].
- [108] A. Bhattacharya, M. D. Schwartz and X. Zhang, *Sudakov shoulder resummation for thrust and heavy jet mass*, *Phys. Rev. D* **106** (2022) 074011, [2205.05702].
- [109] I. Feige, D. W. Kolodrubetz, I. Moulton and I. W. Stewart, *A Complete Basis of Helicity Operators for Subleading Factorization*, *JHEP* **11** (2017) 142, [1703.03411].
- [110] I. Moulton, I. W. Stewart and G. Vita, *Subleading Power Factorization with Radiative Functions*, *JHEP* **11** (2019) 153, [1905.07411].
- [111] SIMBA collaboration, F. U. Bernlochner, H. Lacker, Z. Ligeti, I. W. Stewart, F. J. Tackmann and K. Tackmann, *Precision Global Determination of the $B \rightarrow X_s \gamma$ Decay Rate*, *Phys. Rev. Lett.* **127** (2021) 102001, [2007.04320].
- [112] U. G. Aglietti, G. Ferrera, W.-L. Ju and J. Miao, *Thrust Distribution in Electron-Positron Annihilation at Full Next-to-Next-to-Next-to-Leading-Logarithmic Accuracy Including Next-to-Next-to-Leading-Order Terms in QCD*, *Phys. Rev. Lett.* **134** (2025) 251904, [2502.01570].

- [113] S. Catani, M. L. Mangano, P. Nason and L. Trentadue, *The Resummation of Soft Gluon in Hadronic Collisions*, *Nucl. Phys.* **B478** (1996) 273–310, [[hep-ph/9604351](#)].
- [114] U. G. Aglietti, G. Ferrera and W.-L. Ju, *Saddle-point method for resummed form factors in QCD*, [2506.18707](#).
- [115] PARTICLE DATA GROUP collaboration, S. Navas et al., *Review of particle physics*, *Phys. Rev. D* **110** (2024) 030001.
- [116] L. Buonocore, P. Nason, L. Rottoli and P. Torrielli, *On Thrust Resummation Ambiguities in e^+e^- Annihilation into Hadrons*, [2603.06091](#).
- [117] S. Catani, G. Turnock and B. Webber, *Heavy jet mass distribution in e^+e^- annihilation*, *Phys.Lett.* **B272** (1991) 368–372.
- [118] S. Catani and B. Webber, *Infrared safe but infinite: Soft gluon divergences inside the physical region*, *JHEP* **9710** (1997) 005, [[hep-ph/9710333](#)].
- [119] A. H. Hoang, V. Mateu, M. D. Schwartz and I. W. Stewart, *Precision e^+e^- hemisphere masses in the dijet region with power corrections*, [2506.09130](#).
- [120] A. Bhattacharya, J. K. L. Michel, M. D. Schwartz, I. W. Stewart and X. Zhang, *NNLL resummation of Sudakov shoulder logarithms in the heavy jet mass distribution*, *JHEP* **11** (2023) 080, [[2306.08033](#)].
- [121] M. Dasgupta, F. A. Dreyer, K. Hamilton, P. F. Monni, G. P. Salam and G. Soyez, *Parton showers beyond leading logarithmic accuracy*, *Phys. Rev. Lett.* **125** (2020) 052002, [[2002.11114](#)].
- [122] M. van Beekveld et al., *Introduction to the PanScales framework, version 0.1*, *SciPost Phys. Codeb.* **2024** (2024) 31, [[2312.13275](#)].
- [123] M. van Beekveld et al., *New Standard for the Logarithmic Accuracy of Parton Showers*, *Phys. Rev. Lett.* **134** (2025) 011901, [[2406.02661](#)].
- [124] T. Sjostrand, S. Mrenna and P. Z. Skands, *A Brief Introduction to PYTHIA 8.1*, *Comput. Phys. Commun.* **178** (2008) 852–867, [[0710.3820](#)].
- [125] E. Gardi and J. Rathsmann, *The thrust and heavy-jet mass distributions in the two-jet region*, *Nucl. Phys.* **B638** (2002) 243–287, [[hep-ph/0201019](#)].
- [126] M. J. Dinsdale and C. J. Maxwell, *Resummation of large logarithms within the method of effective charges*, *Nucl. Phys. B* **713** (2005) 465–486, [[hep-ph/0412118](#)].
- [127] G. Dissertori et al., *Determination of the strong coupling constant using matched NNLO+NLLA predictions for hadronic event shapes in e^+e^- annihilations*, *JHEP* **08** (2009) 036, [[0906.3436](#)].
- [128] S. Alioli, C. W. Bauer, C. J. Berggren, A. Hornig, F. J. Tackmann et al., *Combining Higher-Order Resummation with Multiple NLO Calculations and Parton Showers in GENEVA*, *JHEP* **1309** (2013) 120, [[1211.7049](#)].
- [129] A. Banfi, B. K. El-Menoufi and R. Wood, *Interplay between perturbative and non-perturbative effects with the ARES method*, *JHEP* **08** (2023) 221, [[2303.01534](#)].

- [130] G. Luisoni, P. F. Monni and G. P. Salam, *C-parameter hadronisation in the symmetric 3-jet limit and impact on α_s fits*, *Eur. Phys. J. C* **81** (2021) 158, [2012.00622].
- [131] P. Nason and G. Zanderighi, *Fits of α_s from event-shapes in the three-jet region: extension to all energies*, 2501.18173.
- [132] ALEPH collaboration, A. Heister et al., *Studies of QCD at e^+e^- centre-of-mass energies between 91 GeV and 209 GeV*, *Eur. Phys. J. C* **35** (2004) 457–486.
- [133] DELPHI collaboration, P. Abreu et al., *Tuning and test of fragmentation models based on identified particles and precision event shape data*, *Z. Phys. C* **73** (1996) 11–60.
- [134] DELPHI collaboration, P. Abreu et al., *Energy dependence of event shapes and of α_s at LEP-2*, *Phys. Lett. B* **456** (1999) 322–340.
- [135] DELPHI collaboration, J. Abdallah et al., *A study of the energy evolution of event shape distributions and their means with the DELPHI detector at LEP*, *Eur. Phys. J. C* **29** (2003) 285–312, [hep-ex/0307048].
- [136] L3 collaboration, B. Adeva et al., *Studies of hadronic event structure and comparisons with QCD models at the Z^0 resonance*, *Z. Phys. C* **55** (1992) 39–62.
- [137] L3 collaboration, P. Achard et al., *Studies of hadronic event structure in e^+e^- annihilation from 30 GeV to 209 GeV with the L3 detector*, *Phys. Rept.* **399** (2004) 71–174, [hep-ex/0406049].
- [138] OPAL collaboration, K. Ackerstaff et al., *QCD studies with e^+e^- annihilation data at 161 GeV*, *Z. Phys. C* **75** (1997) 193–207.
- [139] OPAL collaboration, G. Abbiendi et al., *QCD studies with e^+e^- annihilation data at 172 GeV to 189 GeV*, *Eur. Phys. J. C* **16** (2000) 185–210, [hep-ex/0002012].
- [140] OPAL collaboration, G. Abbiendi et al., *Measurement of event shape distributions and moments in $e^+e^- \rightarrow$ hadrons at 91 GeV – 209 GeV and a determination of α_s* , *Eur. Phys. J. C* **40** (2005) 287–316, [hep-ex/0503051].
- [141] SLD collaboration, K. Abe et al., *Measurement of $\alpha_s(M_Z^2)$ from hadronic event observables at the Z^0 resonance*, *Phys. Rev. D* **51** (1995) 962–984, [hep-ex/9501003].
- [142] S. Fleming, A. H. Hoang, S. Mantry and I. W. Stewart, *Top Jets in the Peak Region: Factorization Analysis with NLL Resummation*, *Phys. Rev. D* **77** (2008) 114003, [0711.2079].
- [143] G. Dissertori et al., *First determination of the strong coupling constant using NNLO predictions for hadronic event shapes in e^+e^- annihilations*, *JHEP* **02** (2008) 040, [0712.0327].
- [144] D. Wicke, *Energy dependence of the event shape observables and the strong coupling. (In German)*, .
- [145] T. Becher and G. Bell, *Enhanced nonperturbative effects through the collinear anomaly*, *Phys. Rev. Lett.* **112** (2014) 182002, [1312.5327].

- [146] Y. L. Dokshitzer, G. Marchesini and G. P. Salam, *Revisiting nonperturbative effects in the jet broadenings*, *Eur. Phys. J. direct* **1** (1999) 3, [[hep-ph/9812487](#)].
- [147] T. Becher and M. Neubert, *Drell-Yan Production at Small q_T , Transverse Parton Distributions and the Collinear Anomaly*, *Eur. Phys. J. C* **71** (2011) 1665, [[1007.4005](#)].
- [148] G. Bell, M. A. Benitez, K. Brune, G. Das and V. Mateu, *in preparation*.
- [149] E. C. G. Stueckelberg, *Theory of the radiation of photons of small arbitrary mass*, *Helv. Phys. Acta* **30** (1957) 209–215.
- [150] G. Feldman and P. T. Matthews, *Massive Electrodynamics*, *Phys. Rev.* **130** (1963) 1633–1638.
- [151] M. Beneke and V. M. Braun, *Naive nonAbelianization and resummation of fermion bubble chains*, *Phys. Lett. B* **348** (1995) 513–520, [[hep-ph/9411229](#)].
- [152] D. J. Broadhurst and A. G. Grozin, *Matching QCD and heavy-quark effective theory heavy-light currents at two loops and beyond*, *Phys. Rev. D* **52** (1995) 4082–4098, [[hep-ph/9410240](#)].
- [153] M. Beneke, *Renormalons*, *Phys. Rept.* **317** (1999) 1–142, [[hep-ph/9807443](#)].
- [154] S. T. Schindler, I. W. Stewart and Z. Sun, *Renormalons in the energy-energy correlator*, *JHEP* **10** (2023) 187, [[2305.19311](#)].
- [155] T. Becher and G. Bell, *Analytic Regularization in Soft-Collinear Effective Theory*, *Phys. Lett. B* **713** (2012) 41–46, [[1112.3907](#)].
- [156] G. Bell, R. Rahn and J. Talbert, *Two-loop anomalous dimensions of generic dijet soft functions*, *Nucl. Phys. B* **936** (2018) 520–541, [[1805.12414](#)].
- [157] G. Bell, R. Rahn and J. Talbert, *Generic dijet soft functions at two-loop order: correlated emissions*, *JHEP* **07** (2019) 101, [[1812.08690](#)].
- [158] G. Bell, K. Brune, G. Das and M. Wald, *Automation of Beam and Jet functions at NNLO*, *SciPost Phys. Proc.* **7** (2022) 021, [[2110.04804](#)].
- [159] K. M. Brune, *Automation of jet function calculations in Soft-Collinear Effective theory*. PhD thesis, University of Siegen, 2022.
<http://dx.doi.org/10.25819/ubsi/10228>.
- [160] T. Becher, G. Bell and M. Neubert, *Factorization and Resummation for Jet Broadening*, *Phys. Lett. B* **704** (2011) 276–283, [[1104.4108](#)].
- [161] D. Gutierrez-Reyes, I. Scimemi, W. J. Waalewijn and L. Zoppi, *Transverse momentum dependent distributions with jets*, *Phys. Rev. Lett.* **121** (2018) 162001, [[1807.07573](#)].
- [162] D. Gutierrez-Reyes, I. Scimemi, W. J. Waalewijn and L. Zoppi, *Transverse momentum dependent distributions in e^+e^- and semi-inclusive deep-inelastic scattering using jets*, *JHEP* **10** (2019) 031, [[1904.04259](#)].
- [163] Y. L. Dokshitzer, A. Lucenti, G. Marchesini and G. Salam, *On the QCD analysis of jet broadening*, *JHEP* **9801** (1998) 011, [[hep-ph/9801324](#)].

- [164] A. J. Larkoski, D. Neill and J. Thaler, *Jet Shapes with the Broadening Axis*, *JHEP* **04** (2014) 017, [1401.2158].
- [165] D. Bertolini, T. Chan and J. Thaler, *Jet Observables Without Jet Algorithms*, *JHEP* **04** (2014) 013, [1310.7584].
- [166] T. Becher and G. Bell, *NNLL Resummation for Jet Broadening*, *JHEP* **1211** (2012) 126, [1210.0580].
- [167] T. Huber and D. Maitre, *HypExp: A Mathematica package for expanding hypergeometric functions around integer-valued parameters*, *Comput. Phys. Commun.* **175** (2006) 122–144, [hep-ph/0507094].
- [168] T. Huber and D. Maitre, *HypExp 2, Expanding Hypergeometric Functions about Half-Integer Parameters*, *Comput. Phys. Commun.* **178** (2008) 755–776, [0708.2443].
- [169] I. Scimemi and A. Vladimirov, *Power corrections and renormalons in Transverse Momentum Distributions*, *JHEP* **03** (2017) 002, [1609.06047].
- [170] M. Cacciari and N. Houdeau, *Meaningful characterisation of perturbative theoretical uncertainties*, *JHEP* **09** (2011) 039, [1105.5152].
- [171] T. Becher, C. Lorentzen and M. D. Schwartz, *Resummation for W and Z production at large p_T* , *Phys. Rev. Lett.* **108** (2012) 012001, [1106.4310].
- [172] A. David and G. Passarino, *How well can we guess theoretical uncertainties?*, *Phys. Lett. B* **726** (2013) 266–272, [1307.1843].
- [173] E. Bagnaschi, M. Cacciari, A. Guffanti and L. Jenniches, *An extensive survey of the estimation of uncertainties from missing higher orders in perturbative calculations*, *JHEP* **02** (2015) 133, [1409.5036].
- [174] M. Bonvini, *Probabilistic definition of the perturbative theoretical uncertainty from missing higher orders*, *Eur. Phys. J. C* **80** (2020) 989, [2006.16293].
- [175] C. Duhr, A. Huss, A. Mazeliauskas and R. Szafron, *An analysis of Bayesian estimates for missing higher orders in perturbative calculations*, *JHEP* **09** (2021) 122, [2106.04585].
- [176] F. J. Tackmann, *Beyond Scale Variations: Perturbative Theory Uncertainties from Nuisance Parameters*, 2411.18606.