

The renaissance of jet physics report

202011010101 物理2001 孙陶庵

2022 年 8 月 15 日

1 introduction

本文主要研究Zhongbo Kang老師於2022/06/20在湖南大學的演講內容，即有關射流(jet)的研究。在高能粒子對撞機中，兩個(或多個)粒子碰撞後會朝著某一特定方向前進，而其反射出來的粒子一般為膠子或夸克。射流是在 QCD 散射過程中產生的，產生高橫向動量夸克或膠子。產生特定射流的概率由射流產生截面描述，它是基本微擾 QCD 夸克、反夸克和膠子過程的平均值，由部分子分佈函數加權。對於最頻繁的射流對產生過程，即兩個粒子的散射，強子碰撞中的射流產生截面由下式給出

$$\sigma_{ij \rightarrow k} = \sum_{i,j} \int dx_1 dx_2 d\hat{t} f_i^1(x_1, Q^2) f_j^2(x_2, Q^2) \frac{d\hat{\sigma}_{ij \rightarrow k}}{d\hat{t}}$$

x, Q^2 :縱向動量分量和動量傳遞

$\hat{\sigma}_{ij \rightarrow k}$:反應 $ij \rightarrow k$ 的微擾 QCD 截面

$f_i^a(x_a, Q^2)$:用於在光束 a 中找到粒子種類 i 的部分子分佈函數。

微擾 QCD 計算可能在最終狀態下具有有色部分，但只有最終產生的無色強子是通過實驗觀察到的。因此，為了描述作為給定過程的結果在探測器中觀察到的內容，所有輸出的有色部分必須首先經歷部分子簇射，然後將產生的部分組合成強子。術語碎片化和強子化在文獻中經常互換使用，以描述軟 QCD 輻射、強子的形成，或同時使用這兩種過程。由於在硬散射中產生的部分退出相互作用，強耦合常數將隨著它的分離而增加。這

增加了 QCD 輻射的概率，其主要是相對於原始部分的淺角。因此，一個部分會輻射膠子，膠子又會輻射“ $q\bar{q}$ ”對，每個新部分幾乎與其父部分共線。

2 Begining of jet physics

對於射流的研究是非常早的，George Strman 於1977發布的”Jets from Quantum Chromodynamics”[1]，其主要為 e^+ 和 e^- 的碰撞反射出兩個方向(back to back)的夸克()。而同樣在大約1979，”Search for gluons in e^+e^- annihilation”[2] 用了類似的作法找到了膠子，當能量足夠大時，末態出來的夸克有可能分離出膠子。

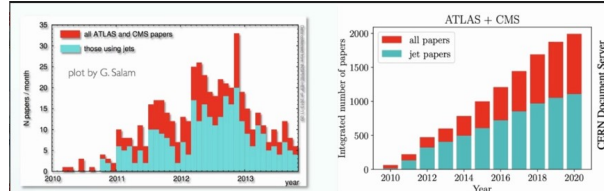


图 1: statistics graph 1 by report

2.1 What are we using jets for?

2.1.1 Quantum imaging of protons and nuclei

就像黑洞成像顯示引力動力學一樣，質子成像將提供對強相互作用的見解，特別是在與質子大小相對應的動量尺度上，再藉由3D成像分析粒子自旋，或許也可以在MRI上有所作用。亞原子粒子具有自旋的量子力學性質。某些原子核，如 1H （質子）、 2H 、 3He 、 23Na 或 31P ，具有非零自旋，因此具有磁矩。對於所謂的自旋 $1/2$ 原子核，例如 1H ，有兩種自旋狀態，有時稱為向上和向下。

當這些自旋被置於強大的外部磁場中時，它們會沿著磁場方向圍繞軸進動。質子以兩種能量本徵態排列（塞曼效應）：一種低能和一種高能，它們被非常小的分裂能分開。

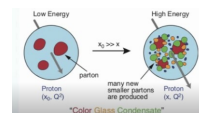
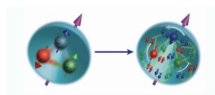


图 2: Quantum imaging of protons and nuclei图 3: A new form of matter - color glass condensate

2.1.2 A New Glassy State of Matter: The Color Glass Condensate

首先，色荷是夸克和膠子的一種性質，與量子色動力學（QCD）理論中粒子的強相互作用有關。夸克和膠子的“顏色電荷”與顏色和電荷的日常含義完全無關。術語顏色和紅色、綠色和藍色標籤變得流行，僅僅是因為與原色的鬆散類比。有些粒子有相應的反粒子。具有紅色、綠色或藍色電荷的粒子具有相應的反粒子，其中色電荷必須分別是紅色、綠色和藍色的反色，以便在粒子-反粒子的產生和湮滅中保持色電荷。粒子物理學家稱這些為反紅、反綠和反藍。所有三種顏色混合在一起，或這些顏色中的任何一種及其補色（或負），是“無色”或“白色”，淨色荷為零。由於稱為顏色限制的強相互作用的特性，自由粒子的顏色電荷必須為零：重子由三個夸克組成，它們必須是紅色、綠色和藍色中的一種；同樣，一個反重子由三個反夸克組成，反紅、反綠和反藍各一個。介子由一個夸克和一個反夸克組成；夸克可以是任何顏色，反夸克有相應的反色。而jet physics可以幫助觀察到固體、液體、氣體、等離子體和玻色-愛因斯坦凝聚態以外的第六態有色玻璃凝聚物。[\[3\]](#)

2.1.3 jet propagation in nuclear matter

在重離子反應中，射流被廣泛用作探針在夸克-膠子-等離子體（QGP）的研究。射流在介質中的傳播也會影響強相互作用核物質性質的測量。進而影響高能夸克和膠子緻密 QCD 物質中的傳播和相互作用。[\[4\]](#) 包含射流橫截面和射流電荷的理論研究電子離子對撞機。預測電子金中這些可觀測物相對於電子 - 質子碰撞揭示了靈活的質心能量和運動覆蓋率如何新設施可用於增強信號並最大限度地發揮電子核計劃的影響。同時也可以從理論上證明瞭如何解開核子分佈的影響[\[5\]](#)

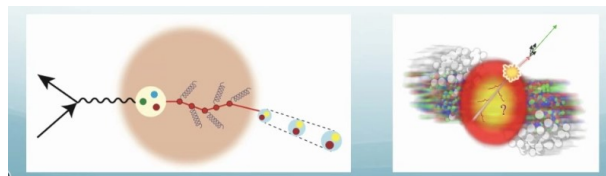


图 4: jet propagation in nuclear matter

2.2 imaging a proton

研究黑洞的過程我們發現了引力波，而研究質子可以讓我們發現強力(strong interaction)的內在作用, 我們現在的問題是

(1)如何從基本夸克/膠子中產生核子的性質，例如質量和自旋

(2)夸克自旋與質子自旋之間的量子相關性

2.2.1 fundamental structure of proton?

雖然質子最初被認為是基本粒子，但在現代粒子物理學標準模型中，質子現在被稱為複合粒子，包含三個價夸克，現在與中子一起被歸類為強子。根據標準模型，質子由三個夸克組成：兩個上夸克和一個下夸克。這些夸克結合起來賦予它電荷和自旋。質子的 $+1$ 電荷來自兩個上夸克（每個 $+\frac{2}{3}$ ）和一個下夸克（ $-\frac{1}{3}$ ）的組合電荷。三個夸克被強大的力量結合在一起；這些鍵的能量決定了質子的大部分質量。因為質子由三個結合在一起的夸克組成，所以它是重子。中子也是重子，由兩個下夸克和一個上夸克組成，因此沒有淨電荷。

3 Connecting theory and experiment

這一部分在理論範圍內使用了現象學的工作，從實驗數據中得到質子在夸克方面的聯繫，對圖(a)可以設計實驗

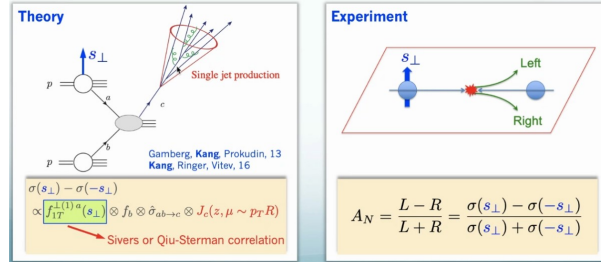


图 5: the comparison of theory and experiment

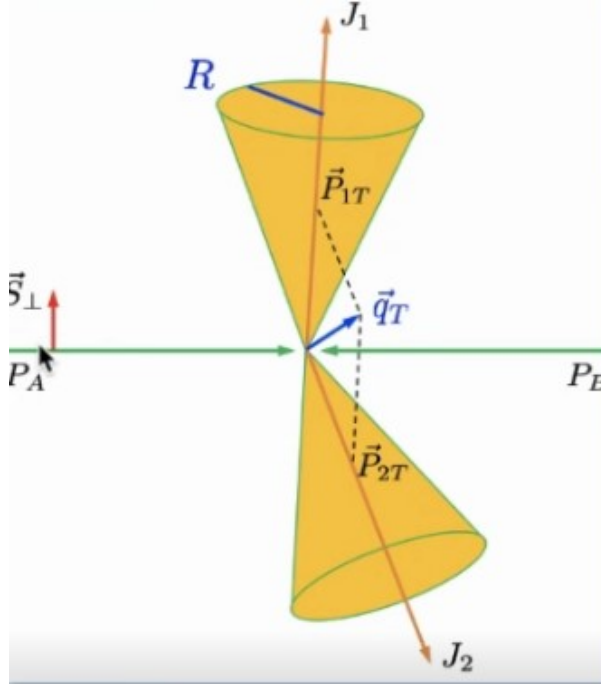


图 6: Improvements to experiments

3.1 Experiment introduce

可以將兩個質子相互作用他們的末態會產生一個射流，此時我們可以嘗試對一個質子探測我們需要的關聯，對各個粒子進行觀測建構出幾個關係式，這一部分在理論範圍內使用了現象學的工作，這樣我們就只需要和實驗數據比對就行。但是我們可以發現對於single jet而言，他的動量大約在60GeV-100GeV之間，而我們關聯的橫向動量約在1GeV,這樣我們就會觀察不到，對此，可以改進實驗方法，在實驗中進一步測量小的橫向動量，例如 dijet 中的橫向動量(q_T)的不平衡(見圖b)從而建構一個有效的場理論

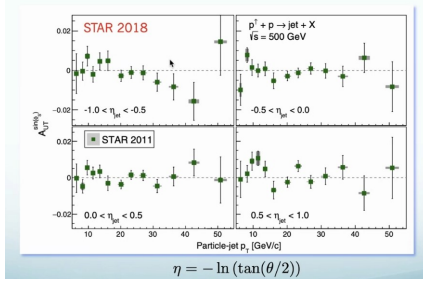


图 7: singlejet

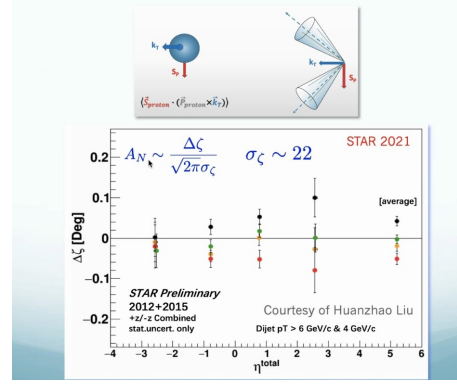


图 8: dijet

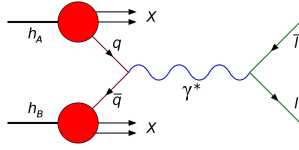


图 9: Drell-Yan

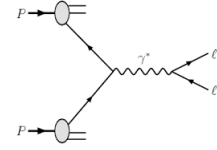


图 10: SIDIS

3.2 Experiment data

我們從實驗數據可以看出，無論是singlejet 或dijet的數據都是十分接近0的。

但這並不代表量子關係不存在，事實上我們可以先嘗試看看測量強子的相互作用，我們分別採用兩種方式:SIDIS和Drell-Yan 然後收集數據最終得到的結果可以看出其對稱性，但是目前我們無論是進行single jet 或者是 dijet 都無法分辨出圖中的u quark和d quark 產生的jet，所以暫時只能將它們全部加起來，這也是我們看不出對稱性的原因。所以我們下面介紹Aharonov-Bohm effect來解決這個問題

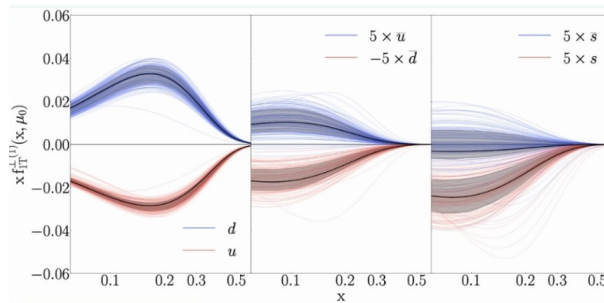


图 11: asymmetry



图 12: DIS

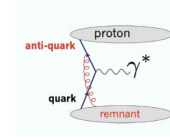


图 13: drell-yan

3.3 Quantum phase:akin Aharonov-Bohm effect

Aharonov-Bohm effect是一種量子力學現象，其中帶電粒子受到電磁勢 (ϕ, A) 的影響，儘管它們被限制在一個區域內磁場 B 和電場 E 為零。其基本機制是電磁勢與帶電粒子波函數的複相耦合，干涉實驗相應地說明了阿哈羅諾夫-玻姆效應。

Aharonov-Bohm 效應在概念上很重要，因為它涉及將（麥克斯韋的）經典電磁理論重鑄為規範理論的三個明顯問題，在量子力學出現之前，可以認為這是一種沒有物理後果的數學重構。這三個問題是：勢能是“物理的”還是僅僅是計算力場的便捷工具；行動原則是否基本；局部性原則。 Aharonov-Bohm effect證明即使在磁場為零的區域，仍舊會存在磁效應，然而，這並不能用來測量磁矢勢，因為只有磁通量會出現在表達效應的公式裡，而且整個理論始終維持規範不變性。阿哈諾夫一波姆效應是量子力學和電動力學發展史上的重要實驗，說明了量子力學的非局域性質。運用到我們的jet，對於DIS quark 穿過reman的規範場從而產生phase rotation, $e^{i\phi}\phi = g_s \int_{path} dr \cdot A$ ，而且因為兩者在光椎上的pass不一樣，透過這樣不同的phase，可以證明 $Siversfunction|_{DIS} = -Siversfunction|_{DY}$

而對於這些”Sivers”之間的關聯可以影響我們對u quark和d quark的分類

4 separate the quarks

我們對於分離u quark 和 d quark 有一個猜想:因為u quark($+\frac{2}{3}e$) 和 d quark($-\frac{1}{3}e$) 有不同帶電量，所以如果我們可以把jet的末帶電量全部加起來，我們就有可能分離u quark 和 d quark。總帶電量 $Q_k \equiv \sum_{h \in jet} z_h^\kappa Q_h$, $z_h = \frac{p_{hT}}{p_{jT}}$, $\kappa = 0.3, 0.4, \dots, 1.0$ 無發射電

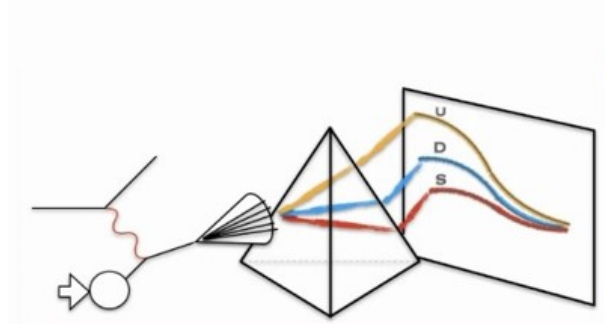


图 14: to get started, we decide to first look at jet production at the EIC

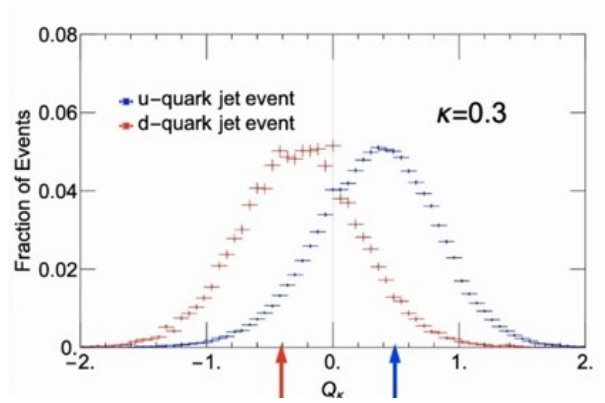


图 15: jet charge distribution of u and d jets

Organize the cross section via jet charge bin Kang, Liu, Mantry, Shao, 20

$$\frac{d^6\sigma_{UU}^i}{dy_e d^2p_T^e d^2q_T dQ_\kappa} = \frac{d^5\sigma_{UU}^i}{dy_e d^2p_T^e d^2q_T} \frac{g_i(Q_\kappa, p_T R, \mu)}{J_i(p_T R, \mu)}$$

图 16: organize the cross section via jet charge bin

荷選項：去除了 d-夸克，變化很小，因此沒有靈敏度負發射電荷容器選項：更高的靈敏度 jet的例子表明。研究jet內部的成分可以給你新的見解jet子結構，幫助我們實現其他方式無法實現的目標。質子的 3D 成像：質子→ 夸克/膠子分佈部分分佈n● 強子化：夸克/膠子→強子碎裂函數這個理論框架● 稱為極化射流。

在粒子物理裡面，一般不在乎 jet的結構，因為只想尋找超出標準模型的粒子關注QCD的原因是超出標準模型的粒子，產生的動量較小時，他們的decay product就會很大，並且隨著初態動量越來越大，他們的夾角會越來越小，這樣就會有一稱為boosted partical的jet

5 Conclusion

本報告首先介紹了射流的產生原因以及會生成的物質(一般為膠子或夸克)，射流是在 QCD 散射過程中產生的，產生高橫向動量夸克或膠子。微擾 QCD 計算可能在最終狀態下具有有色部分，但只有最終產生的無色強子是通過實驗觀察到的。其中也穿插了jet physics的應用例子，其中也介紹了許多學者們在不同方向的理論創新，包括質子成像，第六態有色玻璃凝聚物等等接著簡單介紹jet之後進入了規劃實驗部分，這裡我們將兩個質子相互作用他們的末態會產生一個射流，此時我們可以嘗試對一個質子探測我們需要的關聯，對各個粒子進行觀測建構出幾個關係式，這一部分在理論範圍內使用了現象學的工作，這樣我們就只需要和實驗數據比對就行。但其中發現慈實驗的不足之處會導致觀測無法進行，對此，我們改進實驗方法，在實驗中進一步測量小的橫向動量，例如 dijet 中的橫向動量的不平衡(見圖b)從而建構一個有效的場理論。我們接下來分別採用兩種方式:SIDIS和Drell-Yan 然後收集數據。但是目前我們無論是進行single jet或者是 dijet 都無法分辨出圖中的u quark和d quark 產生的jet。也因此引入了Aharonov-Bohm effect並企圖以此解決問題。對於DIS quark 穿過reman的規範場從而產生phase rotation, $e^{i\phi}\phi = g_s \int_{path} dr \cdot A$, 而且因為兩者在光椎上的pass不一樣，透過這樣不

同的phase, 可以證明 $Siversfunction|_{DIS} = -Siversfunction|_{DY}$ 這樣就可以分離前面提到的quarks了。主要方法是利用quarks的帶電量並透過總帶電量 $Q_k \equiv \sum_{h \in jet} z_h^\kappa Q_h$, $z_h = \frac{p_{hT}}{p_{jT}}$, $\kappa = 0.3, 0.4, \dots, 1.0$ 至此就可以完成前面的任務。

参考文献

- [1] G. Sterman and S. Weinberg, “Jets from quantum chromodynamics,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 39, pp. 1436–1439, Dec 1977. [Online]. Available: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.39.1436>
- [2] J. Ellis, M. K. Gaillard, and G. G. Ross, “Search for gluons in e+e annihilation,” *Nuclear Physics B*, vol. 111, no. 2, pp. 253–271, 1976. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0550321376905423>
- [3] S. Feller and U. Akgun, “A new glassy state of matter: The color glass condensate,” *International Journal of Applied Glass Science*, vol. 4, no. 1, pp. 1–4, 2013. [Online]. Available: <https://ceramics.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/ijag.12013>
- [4] G. Ovanesyan and I. Vitev, “An effective theory for jet propagation in dense QCD matter: jet broadening and medium-induced bremsstrahlung,” *Journal of High Energy Physics*, vol. 2011, no. 6, jun 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007%2Fjhep06%282011%29080>
- [5] H. T. Li and I. Vitev, “Nuclear matter effects on jet production at electron-ion colliders,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 126, p. 252001, Jun 2021. [Online]. Available: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.126.252001>