

DIE W-/Z-BOSON ENTDECKUNG

JEAN-MARCO ALAMEDDINE

TU DORTMUND
FAKULTÄT PHYSIK

07 12 2018

DIE THEORIE DER SCHWACHEN WECHSELWIRKUNG

FERMIS THEORIE DES β -ZERFALLS

- 1933 beschreibt Fermi den β -Zerfalls über die Fermi-Wechselwirkung
- Theorie beschreibt eine Vier-Fermionen-Wechselwirkung ohne Austauschteilchen
 - Wechselwirkung als Produkt zweier Ströme
 - Kopplungsstärke beschrieben durch Fermikonstante G_F

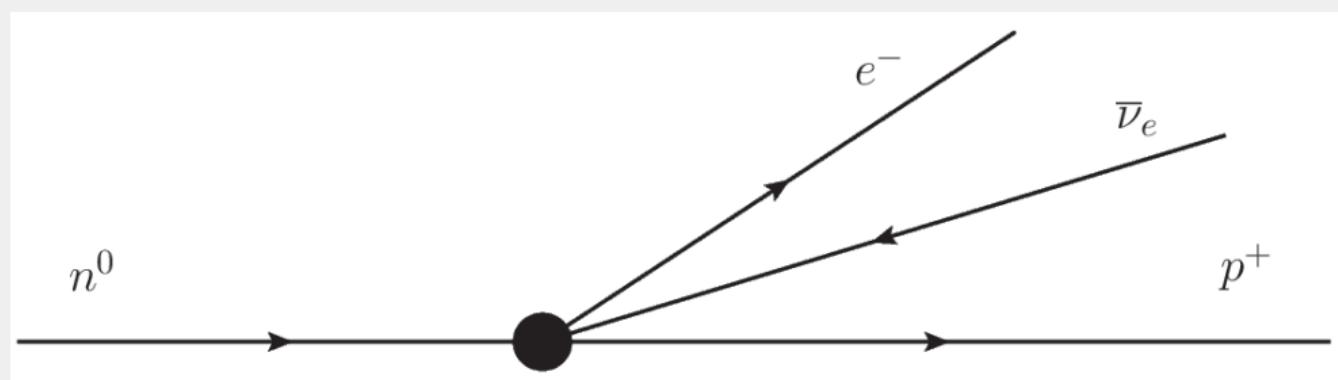
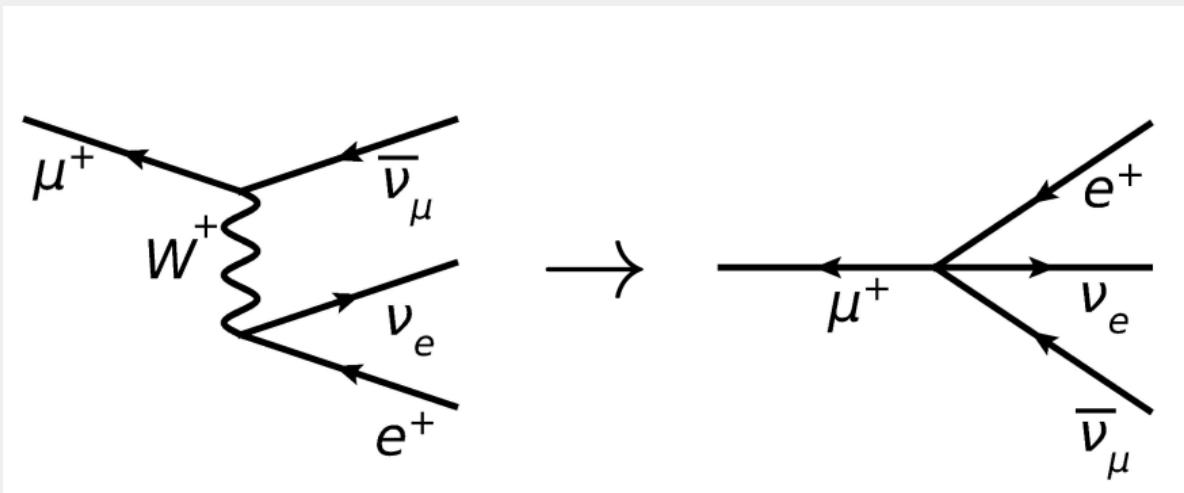


Abbildung: Beschreibung des β -Zerfalls nach Fermi [1]

DIE FERMI-WECHSELWIRKUNG ALS EFFEKTIVE THEORIE



$$\frac{-i \left(g_{\mu\nu} - \frac{q_\mu q_\nu}{M^2} \right)}{q^2 - M^2}$$

$\underbrace{\rightarrow}_{q^2 \ll M^2}$

$$\frac{ig_{\mu\nu}}{M^2}$$

[13] (bearbeitet), [14]

DIE FERMI-WECHSELWIRKUNG ALS EFFEKTIVE THEORIE

- Fermi-Wechselwirkung stellt für kleine Energien (bis heute) eine sehr gute Näherung dar (da schwache Wechselwirkung mit geringer Reichweite)
 - Verallgemeinerung: Anwendung der Theorie auf viele weitere Reaktionen (z.B. μ -Zerfall) liefert hervorragende Ergebnisse
- Erweiterung der Theorie, um neue Phänomene wie die Paritätsverletzung beschreiben zu können (V-A-Struktur)

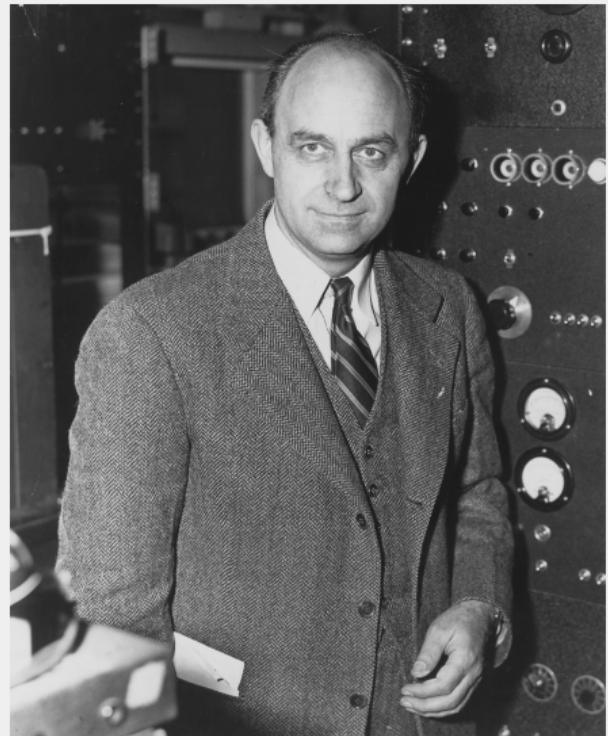


Abbildung: Enrico Fermi [9]

DIE FERMI-WECHSELWIRKUNG ALS EFFEKTIVE THEORIE

- Theorie der Fermi-Wechselwirkung nicht renormierbar
 - Divergenzen bei höheren Energien bzw. höheren Ordnungen in G_F
- Ab $E \approx 300 \text{ GeV}$: Verletzung des "Unitarity limit"
 - $\sigma \propto G_F^2 E^2$
 - Bedingung an totalem Wirkungsquerschnitt, welche aus der Unitarität stammt, wird verletzt (unphysikalisch) [17]
- Mit höheren Beschleunigerenergien können Abweichungen von der Theorie gemessen werden

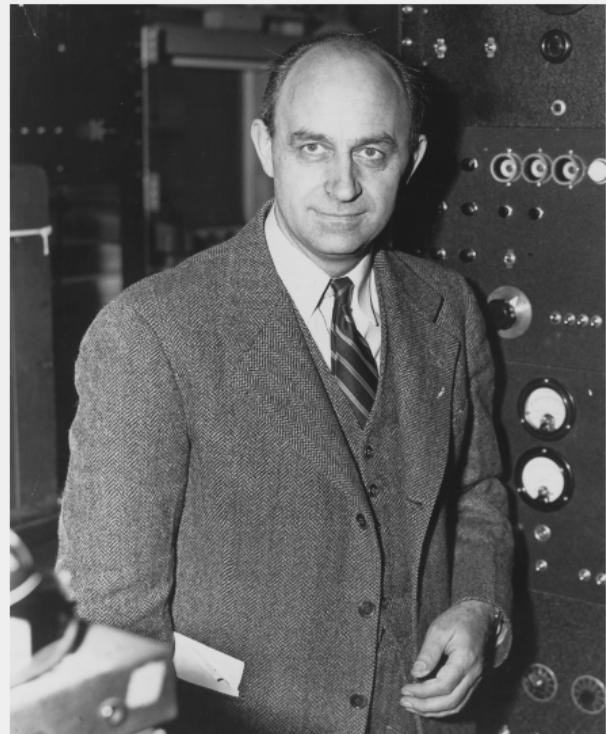


Abbildung: Enrico Fermi [9]

DIE ELEKTROSCHE WACHE WECHSELWIRKUNG



Abbildung: Sheldon
Glashow

[6]



Abbildung: Steven
Weinberg



Abbildung: Abdus Salam

DIE ELEKTROSCHWACHE WECHSELWIRKUNG

- **1968** wird die elektroschwache Wechselwirkung durch Sheldon Glashow, Steven Weinberg und Abdus Salam beschrieben
- Vereinheitlichte Theorie der Quantenelektrodynamik und schwachen Wechselwirkung
- Vier Austauschteilchen:
 - Das masselose Photon γ
 - Die massebehafteten Teilchen W^+ , W^- , Z^0
- Geringe Stärke und Reichweite der schwachen Wechselwirkung wird begründet durch die hohen Massen der Austauschteilchen
- Schwacher Mischungswinkel Θ_W als freier Parameter

DIE ENTDECKUNG DER NEUTRALEN STRÖME

NEUTRALE STRÖME (NC)

- Vorhersage der schwachen Ströme durch die elektroschwache Wechselwirkung
- Leptonische NC: $\nu_\mu + e^- \rightarrow \nu_\mu + e^-$
→ Signatur: Einzelnes Elektron
- Hadronische NC: $\nu_\mu + N \rightarrow \nu_\mu + X$
→ Signatur: Nur Hadronen, ohne Leptonen

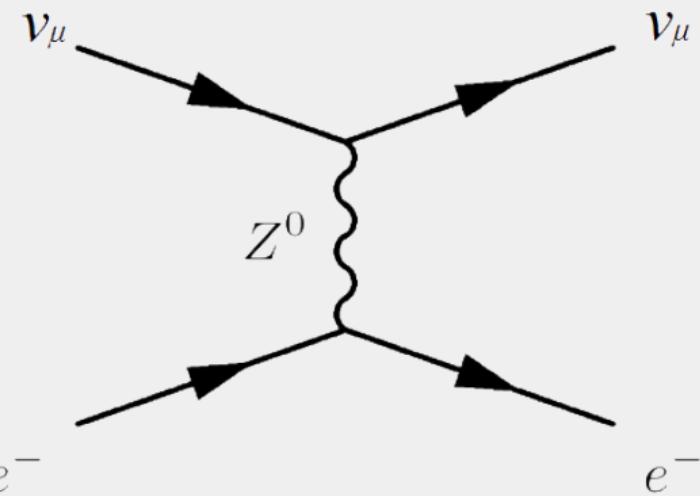


Abbildung: Feynman-Diagramm eines leptonischen neutralen Stromes [11]

1. INTRODUCTION

Among the many problems posed in weak interactions, it appears that neutrino experiments in Gargamelle would be especially suitable to investigate the following : *)

- i) Total cross-sections in the high energy region, for ν and $\bar{\nu}$;
- ii) Inelastic continuum excitation of the hadronic amplitude-structure factors and "partons";
- iii) Existence of the intermediate W-boson;
- iv) Coupling constants for diagonal and non-diagonal weak interactions;
- v) Neutral currents.

Abbildung: Auszug aus dem Proposal zum Gargamelle Detektor, März 1970 [3].

DER GARGAMELLE DETEKTOR

- Blasenkammer, betrieben am CERN von 1970 bis 1979
 - Kammer gefüllt mit 12 m^3 Freon (CBrF_3)
 - Temperatur der Flüssigkeit über der Siedetemperatur
 - Durchquerende Teilchen ionisieren die Flüssigkeit, wobei Dampfblasen entstehen
 - Nachweis der Gasblasen durch Kameras
- Kammer 4,8 m lang, 2 m im Durchmesser, 2 T Magnetfeld (zur Rekonstruktion)



Abbildung: Gargamelle Blasenkammer, ausgestellt am CERN [10]

DER GARGAMELLE DETEKTOR - NEUTRINOQUELLE

- Als Neutrinoquelle diente ein Protonenbeam vom Proton Syncrotron (26 GeV)
 - Entstehung von Kaonen und Pionen durch Kollision der Protonen mit einem Beryllium-Target
 - Kaonen und Pionen werden fokussiert und zerfallen in einem 70 m langen Tunnel in Myonen und Neutrinos
 - Neutrinoenergie im Bereich 1 GeV bis 10 GeV

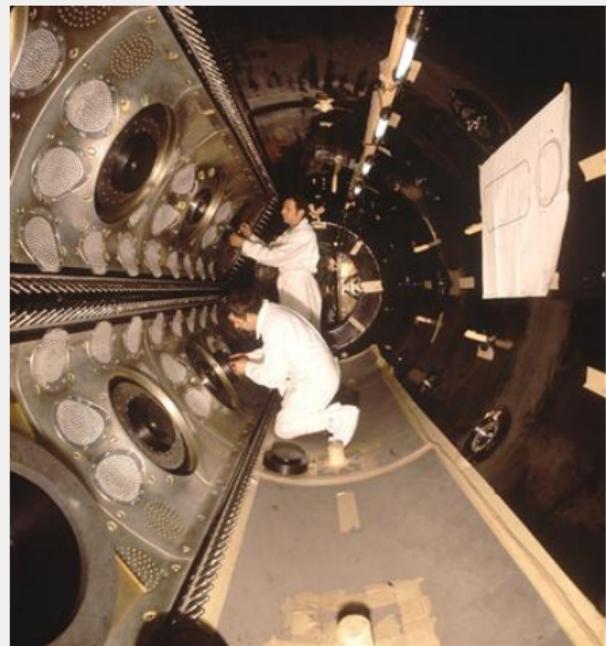


Abbildung: Blick in die Gargamelle Blasenkammer [2]

DER GARGAMELLE DETEKTOR - ERSTE RESULTATE

- **März 1972:** Erste Hinweise auf hadronische schwache Ströme ändern die Prioritäten der Analyse
 - Suche sowohl nach hadronischen als auch leptonischen Events
 - Leptonische Events: Weniger Hintergrundereignisse, treten jedoch selten auf
- **Dezember 1972:** Erste Beobachtung eines leptonischen NC-Events
- **19. Juli 1973:** Entdeckung der schwachen Ströme (leptonisch und hadronisch) wird präsentiert



Abbildung: Beobachtung eines leptonischen neutralen Stromes [4]. Das Elektron bewegt sich horizontal von rechts nach links.

DER GARGAMELLE DETEKTOR - ERSTE RESULTATE

- Aus den Ergebnissen des Experimentes konnten die Massen von W-Boson und Z-Boson vorhergesagt werden [16]:

$$M_W \approx (60 - 80) \text{ GeV}$$
$$M_Z \approx (75 - 92) \text{ GeV}$$

- Jedoch existierte noch kein Experiment, welches die zur Erzeugung notwendige Schwerpunktsenergie zur Verfügung stellen konnte
⇒ Verschieben der "energy frontier" notwendig!

"PUSHING THE ENERGY FRONTIER"

CARLO RUBBIA

- Carlo Rubbia, geboren **1934** in Gorizia (Italien)
- Bereits früh ein Experte im Bereich der Elektronik
- Promovierte **1958** in Pisa und ging danach nach Columbia
- Ging nach wenigen Jahren zurück nach Europa zum CERN, bereits mit Mitte 20 "Group leader"
- Nimmt **1970** eine volle Professorenstelle in Harvard an



Abbildung: Carlo Rubbia im Jahre 1983
[5]

CARLO RUBBIA

- Hatte häufig unendlich viele Ideen für Experimente, jedoch selten die Geduld, diese umzusetzen
- Keinen Ruf für genaue Analysen:
"His numbers are what they are. They are usually wrong - but if they suit his purpose, nothing is wrong." (Bernard Sadoulet)
- Seine Expertise war in den 1970er Jahren zwar bekannt, jedoch auch seine Misserfolge
⇒ z.B. widersprachen seine Analysen zunächst der Existenz neutraler Ströme

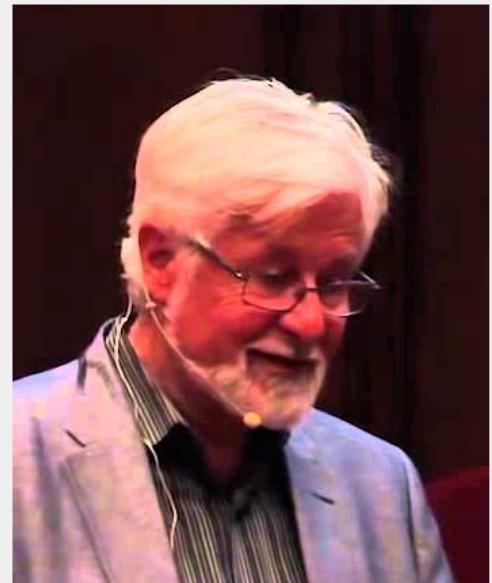


Abbildung: Bernard Sadoulet auf einer Konferenz in Amsterdam, 2013 [12]

SUPER PROTON SYNCHROTRON

- Super Proton Synchrotron (SPS) mit Umfang $R = 6,9 \text{ km}$ am CERN
- Ging **Juni 1976** in Betrieb
- Teilchenenergien von $E = 400 \text{ GeV}$ wurden erreicht
- Nutzung als fixed-target Experimenten mit Protonen:
 $\rightarrow \sqrt{s} \approx \sqrt{2 \cdot E \cdot m} \approx 27 \text{ GeV} \ll M_W, M_Z$
- SPS wird bis heute als Vorbeschleuniger am LHC sowie für Experimente wie COMPASS, NA-61 und NA-62 genutzt



Abbildung: Super Proton Synchrotron (SPS) [7]

COLLIDING-BEAM-EXPERIMENTE

- Idee: Nutzung von Proton-Proton-Kollisionen (pp) um ausreichende Schwerpunktsenergien zu erreichen:
 - Für Colliding-Beam-Experimente gilt $\sqrt{s} = 2 \cdot E$
 - Unter Berücksichtigung der Partonstruktur $\sqrt{s} = 2 \cdot E \cdot x$ (mit $x \approx 0.2$)
- Hierdurch wären geringere Teilchenenergien notwendig

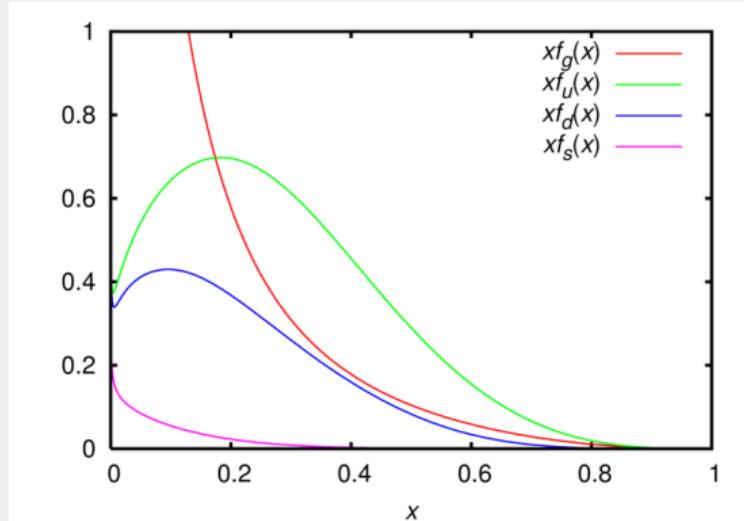


Abbildung: Partonverteilungsfunktion für das Proton, wobei x den Impulsanteil der Partons am gesamten Proton angibt. Die y-Achse ist proportional zur Wahrscheinlichkeit für das jeweilige x [8].

COLLIDING-BEAM-EXPERIMENTE

- **Januar 1975:** Workshop am Fermilab, um über die Möglichkeiten von pp-Experimenten zu sprechen
- Vortrag des jungen Peter M. McIntyre, Kollisionen von Protonen und Antiprotonen durchzuführen
 - Protonen und Antiprotonen könnten sich im selben Rohr befinden und die gleichen Magneten nutzen
 - Umbau eines bestehenden Proton-Syncrotron wäre ausreichend
 - Herausforderung: Erzeugung der Antiprotonen in ausreichender Zahl sowie Kühlung
- Rubbia war, im Gegensatz zu den meisten Workshopteilnehmern, begeistert von der Idee



Abbildung: Peter M. McIntyre [15]

DIE MISERE DES CERNS

- In den vergangenen 25 Jahren gab es keine bedeutende Entdeckungen am CERN oder Nobelpreise
 - J/Ψ -Entdeckung am CERN wurde verpasst
 - Keinen Nobelpreis für die neutralen Ströme
 - Experimente die am CERN abgelehnt wurden, haben häufig an anderen Standorten Entdeckungen gebracht
-
- Das CERN war bestrebt, eine neue Entdeckung zu machen

UMBAU DES SPS IN EINEN PROTON-ANTIPROTON-COLLIDER

- Rubbia und McIntyre schlug dem CERN **1976** vor, den vorhandenen Beschleuniger SPS in einen Proton-Antiproton-Collider umzubauen
 - Mit einer Strahlenergie von $E = 300 \text{ GeV}$ könnte eine Schwerpunktsenergie von $\sqrt{s} = 2 \cdot E \cdot x = 120 \text{ GeV} > M_W, M_Z$ erreicht werden
 - Bau des Eletron-Positron-Colliders (LEP) war geplant, würde aber noch viele Jahre dauern
 - Geld war vorhanden, und die Chance auf die Entdeckung wäre sehr gut
- ⇒ **Januar 1978:** Bestätigung des CERNs, den SPS zum Super ProtonAntiproton Synchrotron (Spp \bar{S}) umzubauen

VIELEN DANK FÜR DIE AUFMERKSAMKEIT!

REFERENCES |



DIE ENTDECKUNG DES W- UND Z-BOSON.

[https://www.quantumdiaries.org/tag/majorana/.](https://www.quantumdiaries.org/tag/majorana/)

[Online; accessed 01-December-2018].



A VIEW INSIDE THE GARGAMELLE BUBBLE CHAMBER. TRAVAUX DE FINITION À L'INTÉRIEUR DU COPRS DE LA CHAMBRE DE GARGAMELLE.

Nov 1970.



PROPOSAL FOR A NEUTRINO EXPERIMENT IN GARGAMELLE.

TECHNICAL REPORT CERN-TCC-70-12, CERN, GENEVA, MAR 1970.



GARGAMELLE: FIRST NEUTRAL CURRENT. EN JUILLET 1973, UNE GRANDE DÉCOUVERTE EST ANNONCÉE DANS LE GRAND AMPHITHEÂTRE DU CERN : LE GROUPE GARGAMELLE A DÉTECTÉ LES COURANTS NEUTRES FAIBLES ! CETTE OBSERVATION CONFIRME LA THÉORIE ÉLECTROFAIBLE, QUI PRÉDIT QUE LA FORCE FAIBLE ET LA FORCE ÉLECTROMAGNÉTIQUE DOIVENT FORMER UNE UNIQUE INTERACTION.

1973.



CARLO RUBBIA IN HIS OFFICE.

No Comment, Aug 1983.



NOBEL LECTURES IN PHYSICS 1971-1980 (NOBEL LECTURES, INCLUDING PRESENTATION SPEECHES AND LAUREATE).

WORLD SCIENTIFIC PUB CO INC, 1991.

REFERENCES II



CERN.

SUPER PROTON SYNCHROTRON (SPS) - PROTONEN.

<http://www.lhc-facts.ch/index.php?page=sps>.

[Online; accessed 02-December-2018].



WIKIMEDIA COMMONS.

FILE:CTEQ6 PARTON DISTRIBUTION FUNCTIONS.PNG — WIKIMEDIA COMMONS, THE FREE MEDIA REPOSITORY, 2012.

[Online; accessed 2-December-2018].



WIKIMEDIA COMMONS.

FILE:ENRICO FERMI 1943-49.JPG — WIKIMEDIA COMMONS, THE FREE MEDIA REPOSITORY, 2017.

[Online; accessed 1-December-2018].



WIKIMEDIA COMMONS.

FILE:GARGAMELLE.JPG — WIKIMEDIA COMMONS, THE FREE MEDIA REPOSITORY, 2018.

[Online; accessed 26-November-2018].



WIKIMEDIA COMMONS.

FILE:NEUTRAL CURRENT, LEPTONIC EVENT, MUON NEUTRINO.PNG — WIKIMEDIA COMMONS, THE FREE MEDIA REPOSITORY, 2018.

[Online; accessed 26-November-2018].

REFERENCES III

-  DELTA INSTITUTE FOR THEORETICAL PHYSICS.
HISTORY OF DARK MATTER SYMPOSIUM.
<https://www.youtube.com/watch?v=btKfJz8iZSE>, Jan 2015.
-  T. P. GORRINGE AND D. W. HERTZOG.
PRECISION MUON PHYSICS.
Prog. Part. Nucl. Phys., 84:73–123, 2015.
-  DAVID J GRIFFITHS.
INTRODUCTION TO ELEMENTARY PARTICLES; 2ND REV. VERSION.
Physics textbook. Wiley, New York, NY, 2008.
-  SHANA HUTCHINS.
1.5 BILLION PARTICLE PHYSICS EXPERIMENT ABOARD ENDEAVOUR HAS TEXAS A AND M TIES.
http://www.science.tamu.edu/news/story.php?story_ID=798.
[Online; accessed 02-December-2018].
-  LUIGI DI LELLA AND CARLO RUBBIA.
THE DISCOVERY OF THE W AND Z PARTICLES, PAGES 137–163.
-  DONALD H. PERKINS.
ELECTROWEAK INTERACTIONS AND THE STANDARD MODEL, PAGE 242275.
Cambridge University Press, 4 edition, 2000.