- 自人類遠祖發現火以來，人類第一次發現了第二種能源：比火還要強的核能。

- 人類學會了控制電子的行動，從而創造出半導體，引導出了計算機，大大提升了人類的生產力。

- 人類發現了研究極小結構的方法，從而發現了雙螺旋結構，引導出了生物工程技術。
- 人類首次離開了地球的引力場，登上了月球。

時間

空間

運動

能量

力量

交響樂裡面的主題旋律

Thematic Melodies in Symphonic Music

量子化，對稱，相位因子
—— 二十世紀理論物理學的主旋律

I. 量子化

1. *Ueber irreversible Strahlungsvorgänge;* *von Max Planck.*

Nach den Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wissensch. [illegible] Februar 1897, [illegible] Juli 1897, 18. December 1897, 7. Juli 1898, [illegible] Mai 1899 und nachgelassenen Taf. der [illegible] Naturf.-Vers. in München gehaltenen Vorträge für die Annalen bearbeitet vom Verfasser.

Die nachfolgende Arbeit enthält eine Darlegung der Hauptergebnisse meiner unter dem obigen Titel veröffentlichten Untersuchungen über die Bedeutung des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik für die Erscheinungen der Wärmestrahlung, vom Standpunkt der elektromagnetischen Lichttheorie betrachtet.

Dass auch die strahlende Wärme den Forderungen des zweiten Hauptsatzes Genüge leistet, dass z. B. die gegenseitige Zustrahlung verschieden temperirter Körper immer im Sinne einer Ausgleichung ihrer Temperaturen erfolgt, ist wohl allgemein unbestritten, und schon G. Kirchhoff hat hierauf seine Theorie des Emissions- und Absorptionsvermögens der Körper gegründet. Daher macht es die fortschreitende Erkenntnis der elektromagnetischen Natur der Wärmestrahlung zur dringenden Aufgabe, den zweiten Hauptsatz der Wärmetheorie in seiner Anwendung auf die strahlende Wärme rein elektromagnetisch zu begreifen und womöglich auch zu beweisen. Erste Voraussetzung hierbei ist natürlich, dass man die Erscheinungen der Emission und Absorption strahlender Wärme als elektromagnetische Vorgänge auffasst, dass man also die Emission von Wärmestrahlen als bedingt ansieht durch die Aussendung elektromagnetischer Wellen von Seiten gewisser elementarer Oscillatoren, die man sich in irgend einem Zusammenhang mit den ponderablen Atomen der strahlenden Körper denken mag, und ferner, dass man die Absorption strahlender Wärme nicht etwa als Folge eines galvanischen Leitungswiderstandes oder irgend einer Art Reibung, sondern lediglich als Resonanzphänomen auffasst, indem die genannten Oscillatoren nicht nur Wellen aussenden, sondern auch durch auffallende Wellen zu Schwingungen angeregt werden. Hierin liegt zugleich in-

§ 25. Zahlenwerte.

Die Werte der universellen Constanten a und b lassen sich mit Hülfe der vorliegenden Messungen mit genügender Annäherung berechnen.

Hr. F. Kurlbaum[1]) hat gefunden, dass, wenn man mit S die gesamte Energie bezeichnet, welche von 1 qcm eines auf $t°$ C. befindlichen schwarzen Körpers in 1 Sec. in die Luft gestrahlt wird:

$$S_{100} = S_t \quad 0{,}01763\ \text{g-Cal.}$$

Andererseits beträgt nach (52) die gesamte von der Flächeneinheit eines schwarzen Körpers in der Zeiteinheit nach allen Richtungen des Halbraumes ausgestrahlte Energie:

$$\int K \cos\vartheta \, d\Omega = K \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos\vartheta \sin\vartheta \, d\vartheta = \pi K = \frac{12\, a\, b\, \vartheta^4}{c^3 h^3}$$

Folglich, wenn das mechanische Wärmeäquivalent zu $419 \cdot 10^5$ angenommen wird, im absoluten C.G.S.-Maasse:

$$\frac{12\, a\, b\, (373^4 - 273^4)}{c^3 h^3} = 0{,}01763 \cdot 419 \cdot 10^5$$

oder, da $c = 3 \cdot 10^{10}$:

$$\frac{b}{a^3} = 1{,}278 \cdot 10^{15}. \tag{57}$$

Ferner ist von Hrn. F. Paschen[2]) als Mittel aus seinen besten Beobachtungen der Wert der Constanten im Exponenten der Wien'schen Formel (55) zu 14455 [$\mu \times$ Celsiusgrad] angegeben worden. Dies ergiebt, bezogen auf Centimeter:

$$a\, c = 1{,}4455$$

oder:

$$a = 0{,}4818 \cdot 10^{-10}\,[\text{sec} \times \text{Celsiusgrad}]$$

und daraus nach (57):

$$b = 6{,}885 \cdot 10^{-27}\,[\text{erg} \times \text{sec}].$$

§ 26. Natürliche Maasseinheiten.

Alle bisher in Gebrauch genommenen physikalischen Maasssysteme, auch das sogenannte absolute C.G.S.-System, verdanken

1) F. Kurlbaum, Wied. Ann. 65. p. 754. 1898.
2) F. Paschen, Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wissensch. zu Berlin p. 419. 1899.

± 4%

量子化

1900 Planck

1905 Einstein

1912 Bohr

那是有希望的春日，
那是無前途的冬夜。

It was the spring of hope,
it was the winter of despair.

現在我對此理論之前途十分樂觀。

Bohr 致Rutherford
1918年

物理又進入死胡同。對我來說物理太困難了。

Pauli 致Kronig,
1925年5月

Heisenberg的力學使我復蘇。

Pauli 致Kronig,
1925年10月

我們都太厚道，不可介入此爭執。
Bohr與Heisenberg都是堅執不讓，
步步進逼的能手，會把我們壓成
碎片。

。　。　。　。　。

Kramers 致 Klein
1927年

那是一個在實驗室裡耐心工作的時代，
有許多關鍵性的實驗和大膽的決策，
有許多錯誤的嘗試和不成熟的假設。
那是一個真摯通訊與匆忙會議的時代，
有許多激烈的辯論和無情的批評，裡
面充滿了巧妙的數學性的擋架方法。

對於那些參加者，那是一個創新的時代，自宇宙結構的新認識中他們得到了激奮，也嚐到了恐懼。這段歷史恐怕永遠不會被完全紀錄下來。要寫這段歷史須要有像寫奧迪帕斯(Oedipus)　或寫克倫威爾(Cromwell)　那樣的筆力，可是由於涉及的知識距離日常生活是如此遙遠，實在很難想像有任何詩人或史家能勝任。

J.R. Oppenheimer (1904-1967)
Reith Lectures 1953

II. 對稱
(=不變性)

對稱

1905 Einstein

1907 Minkowski

“Superfluous Learnedness”

“無用的艱奧”

“1908年我意識到狹義相對論(=Lorentz變換下的不變性)的要求太狹窄。”

Einstein 1950

有謠言說“Group Pest”已自量子力學中被消除。

Weyl 1930

對稱漸成主題旋律 (1925-1970)

- 群論
- 對稱與不變性 (Invariance)
- 宇稱不守恆 (1956-1958)

幸虧沒有人跟我打賭：否則今天我沒有夠多的錢可輸。現在這樣，我丟了些臉，但是我還有夠多的聲譽可丟。

Pauli, 1957年1月

我從來沒有看見　Pauli　如此爲物理學而激動。

Heisenberg 1978

III. 相位因子

如果有人問我量子力學的主要特點，今天我會說不是 noncommutative algebra, 而是相位(Phase)

Dirac 1972

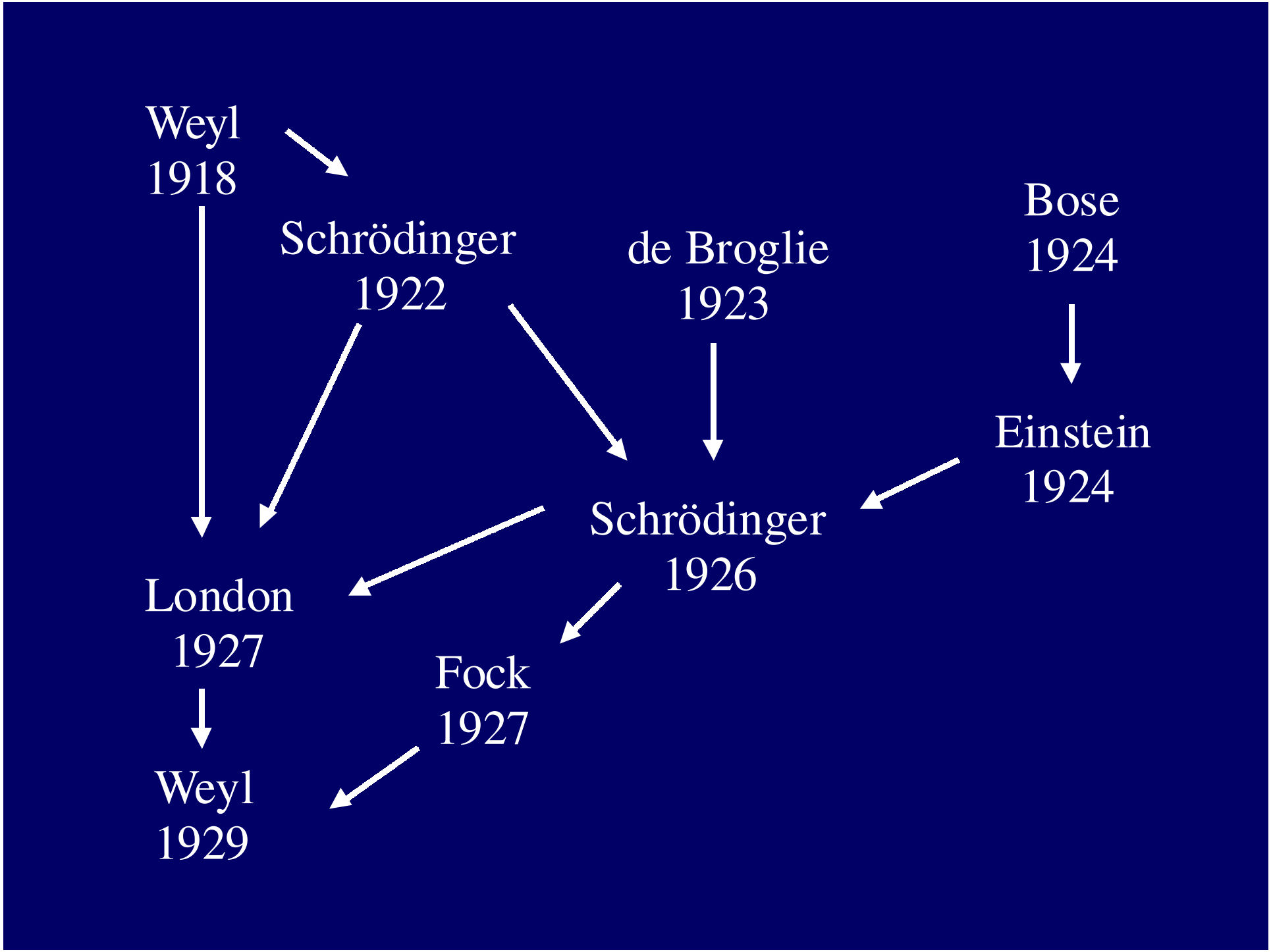
1918 Weyl

1927 Fock & London

*****

規範理論

相位因子之隨意性 → 電磁方程


Weyl
1918
Schrödinger
1922
de Broglie
1923
Bose
1924
Einstein
1924
Schrödinger
1926
London
1927
Fock
1927
Weyl
1929

相位因子

1918 Weyl:

$$exp\left[-\frac{e}{\gamma}\int A_\mu dx^\mu\right]$$

拉長因子
Stretch Factor

1922 Schrödinger: Bohr 軌道上, 方括弧 $= -n\left(\frac{h}{\gamma}\right)$

“Remarkable Property”

＊＊＊＊＊＊＊＊＊

$\gamma = -i\hbar \rightarrow$ 拉長因子 = 1

de　Broglie的想法與我1922年的工作很類似，但是他的理論比我的工作更有普遍性。

Schrödinger致Einstein
1925年11月3日

Developments 展開

Variations 變奏

Intertwinings 交織

Propagator =

$$\int \; exp\left[\frac{i}{\hbar}(\; action\;)\right]\; d(\; path\;)$$

規範對稱之推廣

$$p - eA \rightarrow p - eB$$

動機：

(1) “奇異粒子”發現多了，需要有普遍原理來寫下它們之間的相互作用。

(2) 電荷守恆 → 電磁場

能量守恆 → 引力場

爲什麼別的守恆原理不 → 其他場？

(3) 守恆原理與 global 相位轉變有關。此觀念與局部場的觀念不融洽。

非阿貝爾規範場

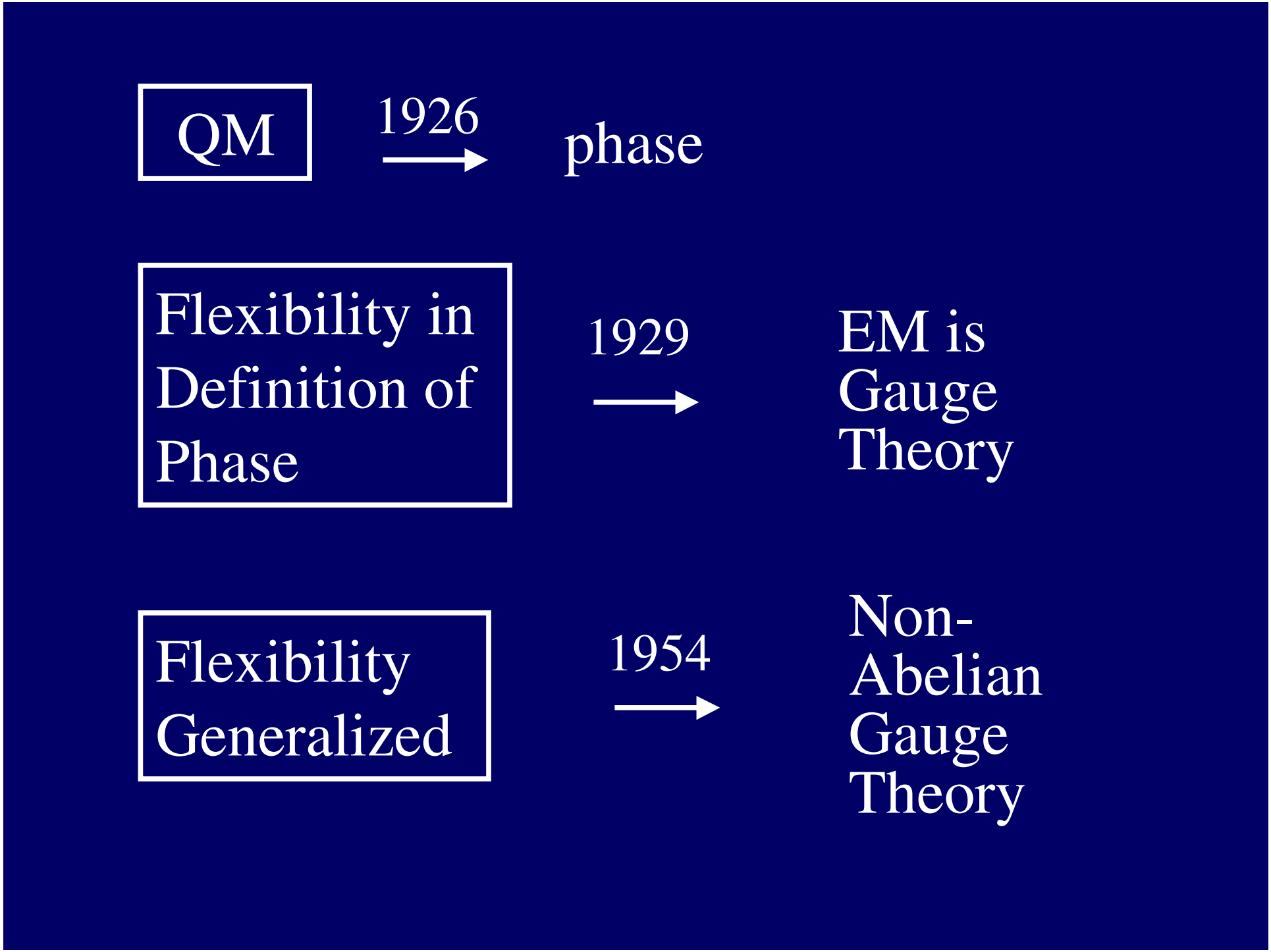
Non-Abelian Gauge Field

Mathematical Language of
Symmetry: Groups

Galois (1811-1832)
Lie (1842-1899)

Simplest Lie Group is Phase Factor

Non-Abelian Lie Groups are
Generalizations of Phase Factor


QM
1926
phase
Flexibility in Definition of Phase
1929
EM is Gauge Theory
Flexibility Generalized
1954
Non-Abelian Gauge Theory

對稱支配相互作用

Symmetry dictates interaction

- 對稱破缺
- 規範場可重整化
- 弱電理論
- QCD

對稱 相位因子與纖維叢

- 拓樸學

時間

空間

運動

能量

力量

量子化：

Democritus (~450 bc)　　原子

Zeno (~300 bc)　　連續

莊子 (~300 bc)　　連續

＊＊＊＊＊

運動量之量子化

對稱：

Anaximander (~600 bc)

Pythagoras (~510 bc)
Harmony of the Spheres

＊＊＊＊＊

非亞貝爾李群

相位：

月之盈虧
四季之循還

＊＊＊＊＊

相位因子之隨意性