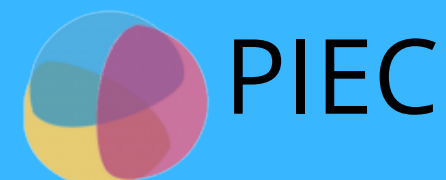


Origens históricas das partículas mediadoras de interações: impactos do uso de representações visuais no desenvolvimento da Física Moderna

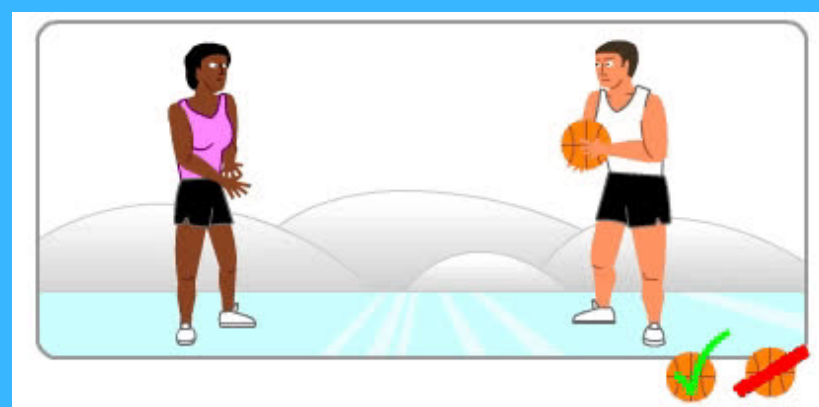
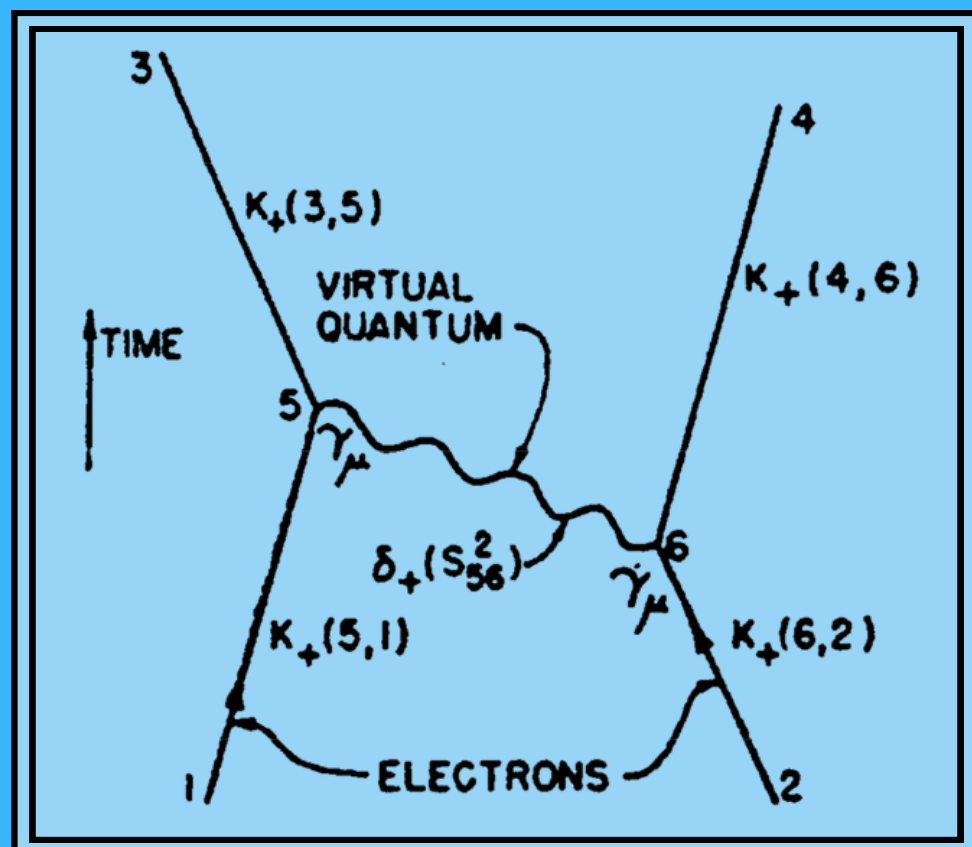
Gabriella Araujo Tukia
Ivã Gurgel
Thiago Hartz

Mestranda em Ensino de Ciências no PIEC-USP
Instituto de Física (IFUSP)
Instituto de Matemática (IME-UFRJ)



Apresentação do problema

O que é uma partícula mediadora de interação?



Fonte: <https://particleadventure.org/unseen.html>

Modelo Padrão das Partículas Elementares

	três gerações da matéria (férmions)			interações / partículas mensageiras (bósons)	
	I	II	III		
massa	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
carga	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
QUARKS	u up	c charm	t top	g glúon	H higgs
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	d down	s strange	b bottom	γ fóton	
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	e elétron	μ múon	τ tau	Z bóson Z	
LÉPTONS	$< 1.0 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	ν_e neutrino do elétron	ν_μ neutrino do múon	ν_τ neutrino do tau	W bóson W	
					BÓSONS DE GAUGE BÓSONS VETORIAIS
					BÓSONS ESCALARES

Körperproblem und Resonanz in der Quantenmechanik.

Von W. Heisenberg in Kopenhagen.

(Eingegangen am 11. Juni 1926.)
Zur näheren Untersuchung nehmen wir zwei völlig gleiche Systeme a und b von je f Freiheitsgraden an, die durch eine in beiden Systemen symmetrische Wechselwirkungsenergie λH^1 gekoppelt werden. Die einzelnen Systeme a und b sollen nicht entartet sein. Die Energien ihrer stationären Zustände sind durch H_n^a bzw. H_m^b gegeben.

Faßt man zunächst ohne Berücksichtigung der Wechselwirkung die beiden Systeme zu einem einzigen zusammen, so ist die Gesamtenergie des stationären Zustandes „ n, m “ gegeben durch

$$H_{n,m} = H_n^a + H_m^b. \quad (6)$$

Das Gesamtsystem besitzt nun die für die Resonanz charakteristische

Wechselwirkung neutraler Atome und homöopolare Bindung nach der Quantenmechanik.

Von W. Heitler und F. London in Zürich.

2. Als ungestörte Eigenfunktionen, welche die niedrigsten Energien haben, welche besagen, daß ein Elektron am einen, das andere Elektron am anderen Kerne sich befindet. Wenn man diese beiden noch ungekoppelten Systeme als ein System zusammendenkt, hat man bekanntlich das Produkt dieser beiden Eigenfunktionen als die gemeinsame Eigenfunktion anzusehen. Das aber ist — je nach der Verteilung der beiden Elektronen auf die beiden Kerne — auf zwei verschiedene Weisen möglich. Man hat zunächst:

$$\psi_1 \varphi_2 \quad (1 \text{ ist bei } a, 2 \text{ ist bei } b). \quad (3a)$$

Mit demselben Rechte aber erhält man auch:

$$\psi_2 \varphi_1 \quad (2 \text{ ist bei } a, 1 \text{ ist bei } b). \quad (3b)$$

Beide Möglichkeiten gehören zu derselben Energie des Gesamtsystems (doppelte Wasserstoffenergie). Es liegt ein Fall zweifacher Entartung

On the Interaction of Elementary Particles.

H. Yukawa

(Received 1935)

where Ψ denoted the wave function of the heavy particles, being a function of time, position, spin as well as τ_3 , which takes the value either 1 or -1.

Next, the conjugate complex function $\bar{U}(x, y, z, t)$, satisfying the equation

$$\left\{ \Delta - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \lambda^2 \right\} \bar{U} = -4\pi g \bar{\Psi} \frac{\tau_1 + i\tau_2}{2} \Psi, \quad (5)$$

is introduced, corresponding to the inverse transition from proton to neutron state.

der Methode wird es wie in I zweckmäßig sein, die Φ_i Orthogonalsystem zu entwickeln, das durch Lösung des ungestörten Problems gefunden wird. Im Gegensatz zur früheren Methode sind im ungestörten Problem nur die drei Raumkomponenten der Maxwellgleichungen zu erfüllen. Wieder setzen wir [vgl. I, Gleichung (84)]

$$\Phi_1 = \sqrt{\frac{8}{L^3}} q_1^r \cos \frac{\pi}{L} \kappa_r x \cdot \sin \frac{\pi}{L} \lambda_r y \cdot \sin \frac{\pi}{L} \mu_r z$$

$$J(\tau) = -g^2 \frac{e^{-\lambda r}}{r},$$

except that the interaction between the neutrons and that between the protons are not taken into account. Heisenberg's sign for $J(r)$, so that the spin of the lowest energy state in our case, owing to the negative sign in front of g^2

Über den Bau der Atomkerne. I.

H. Yukawa

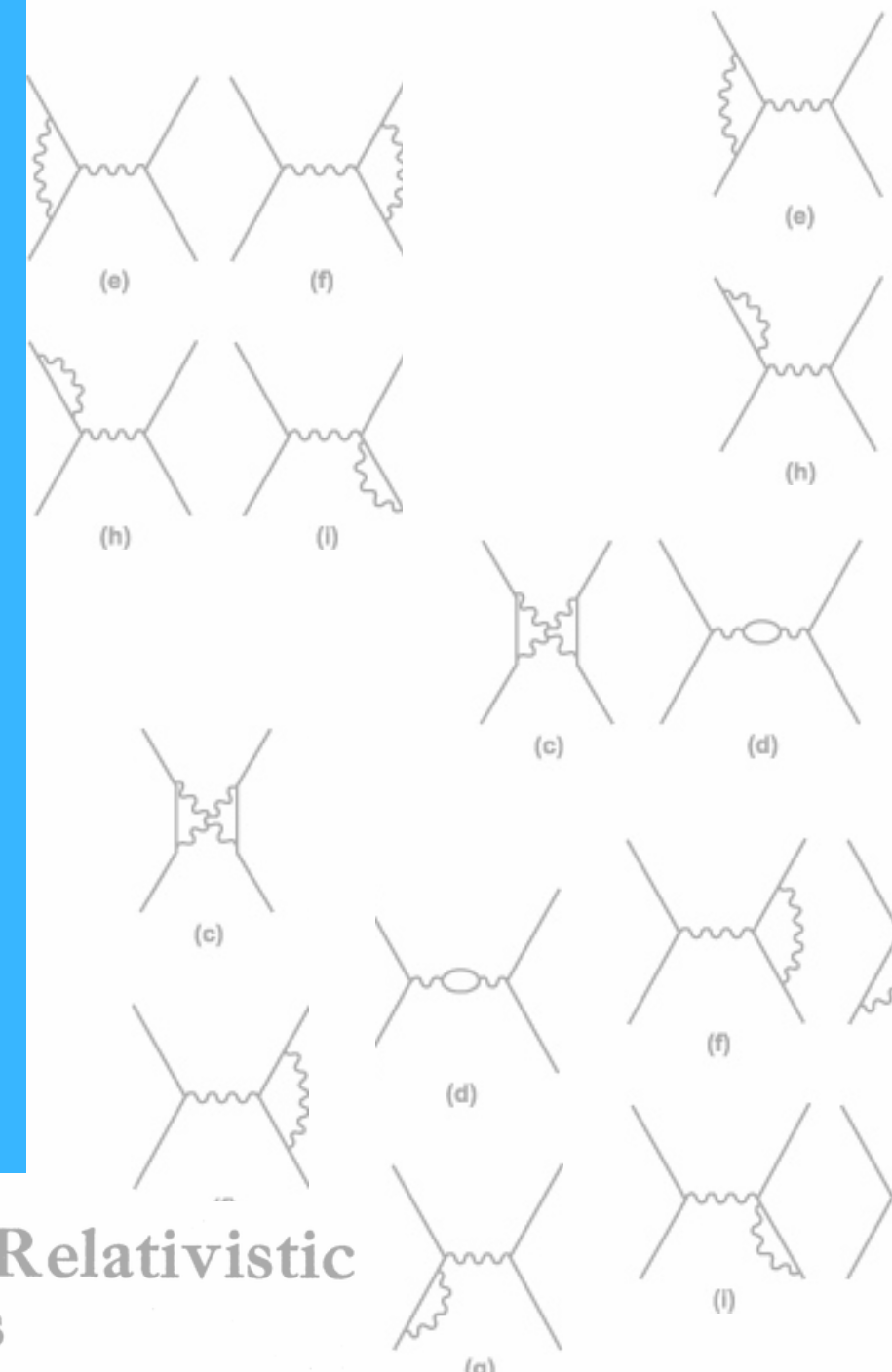
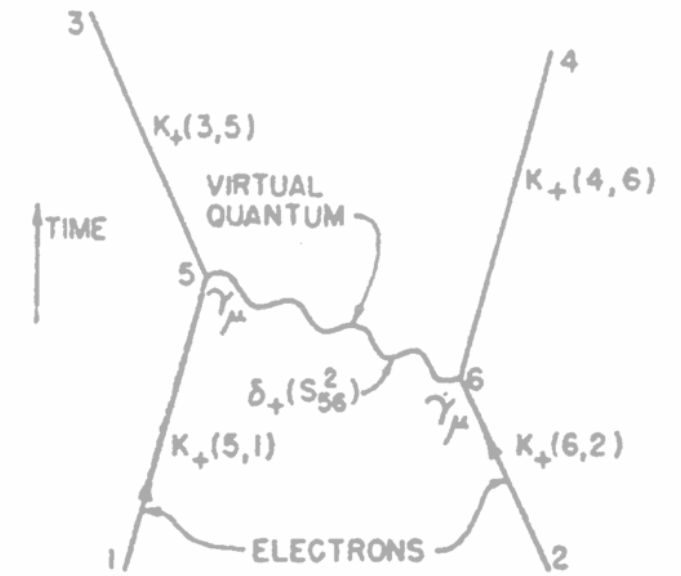
(Received 1935)

Von W. Heisenberg in Leipzig.

Mit 1 Abbildung. (Eingegangen am 7. Juni 1932.)

Sumário

- Motivações para o presente estudo histórico.
- Objetivo da pesquisa.
- Resultados parciais.
- Próximos passos.



Space-Time Approach to Non-Relativistic Quantum Mechanics

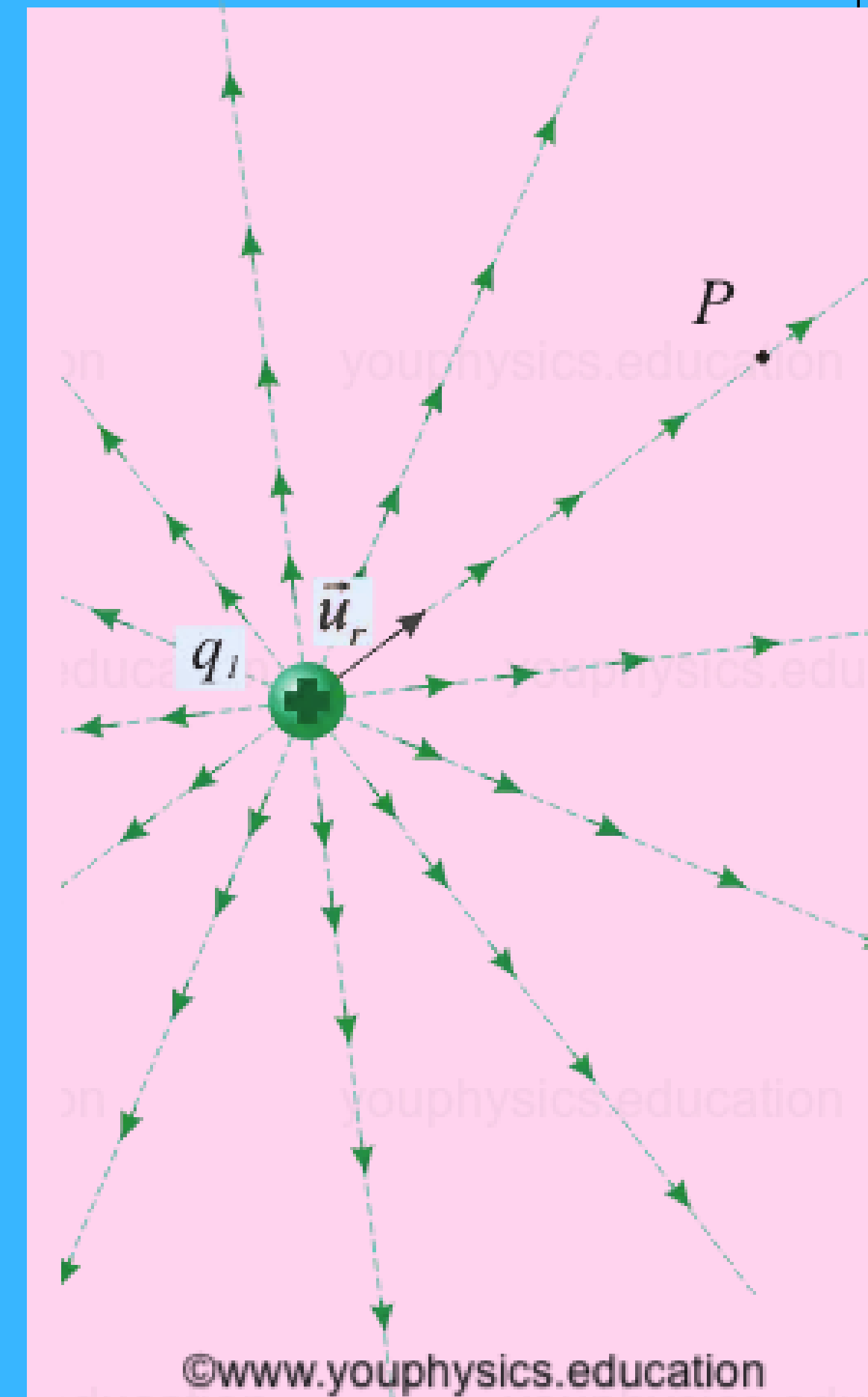
Zur Deutung der Molekelspektren. I.

Von F. Hund, zurzeit in Kopenhagen.

R. P. FEYNMAN

Motivações para o presente estudo histórico.

- Em outras pesquisas realizadas pelo TeHCo foi identificada uma dificuldade conceitual por parte de alunos de graduação em física com relação ao conceito de partícula característica de campo de interação.
- É amplamente reconhecida pela comunidade acadêmica da área do ensino de ciências a importância que a história das ciências tem para o desenvolvimento de um ensino de ciências que esteja preocupado, em última instância, em contribuir no aprimoramento do senso crítico dos alunos.



Objetivos.

Investigar a história do conceito de partícula mediadora de interações: como se desenvolveu, como foi aceito pela comunidade científica e como se relaciona com outras perspectivas sobre a natureza das interações.

Compreender a natureza das representações visuais que aparecem ao longo dessa história e o papel que tiveram nos trabalhos dos físicos que influenciaram o desenvolvimento da ideia de interação mediada.

Resultados parciais

Influências de diversas áreas de pesquisa:

- A partir do estabelecimento da importância da troca em estudos sobre **sistemas de muitas partículas**, o conceito de troca foi concretamente utilizado "na **física atômica** (1926), adentrou rapidamente (1927-1928) a **química quântica**, o **ferromagnetismo** e a **teoria das colisões**, entrando então na **física nuclear** (1932); a partir daí, começou a trilhar seu caminho (em meados da década de 1930, com estabelecimento final entre 1948 e 1950) para a **eletrodinâmica quântica**, que então serviu como modelo para toda **teoria quântica de campos**".

**The Peculiar Notion of Exchange Forces—I:
Origins in Quantum Mechanics, 1926–1928**

*Cathryn Carson**

**The Peculiar Notion of Exchange Forces—
II: From Nuclear Forces to QED,
1929–1950**

*Cathryn Carson**

The quantum
electrodynamical analogy
in early nuclear theory
or the roots
of Yukawa's theory*

Resultados parciais

A importância do formalismo das QFTs:

- "[...] a explicação [das interações fundamentais] pelas teorias quânticas de campo como uma troca de partículas" (Darrigol, 1988, p. 250)

**The Peculiar Notion of Exchange Forces—I:
Origins in Quantum Mechanics, 1926–1928**

*Cathryn Carson**

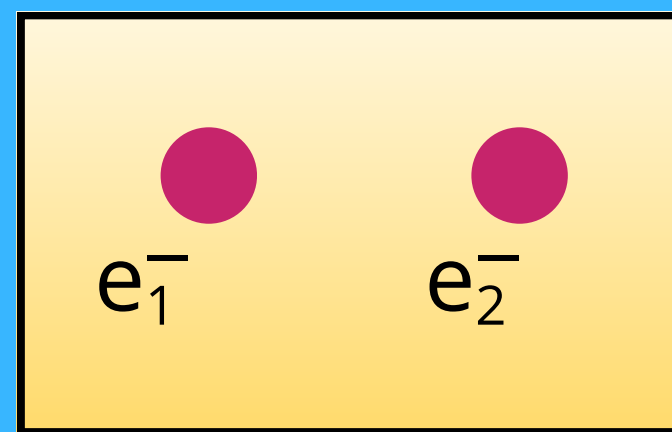
**The Peculiar Notion of Exchange Forces—
II: From Nuclear Forces to QED,
1929–1950**

*Cathryn Carson**

The quantum
electrodynamical analogy
in early nuclear theory
or the roots
of Yukawa's theory*

A "troca" ganha importância

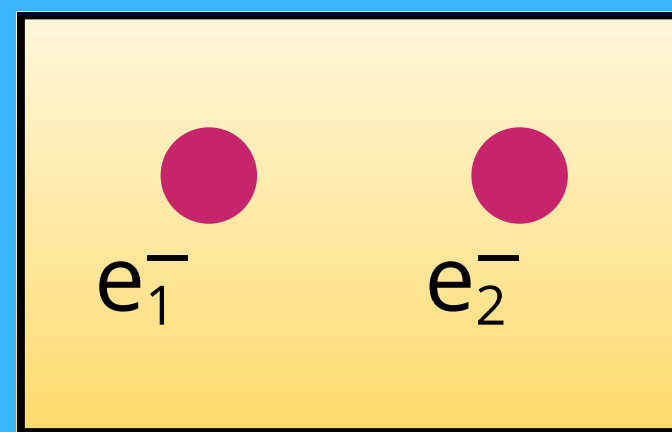
- O conceito de troca (*exchange*) foi introduzido no estudo de sistemas quânticos de muitas partículas idênticas. Nestes sistemas, é necessário considerar a indistinguibilidade das partículas quânticas.



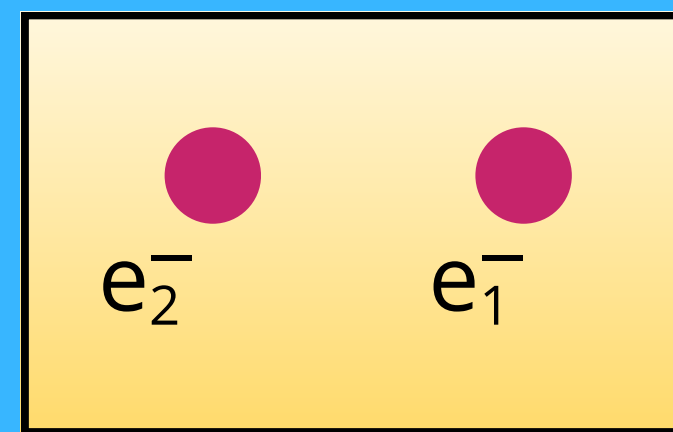
A

A "troca" ganha importância

- O conceito de troca (*exchange*) foi introduzido no estudo de sistemas quânticos de muitas partículas idênticas. Nestes sistemas, é necessário considerar a indistinguibilidade das partículas quânticas.



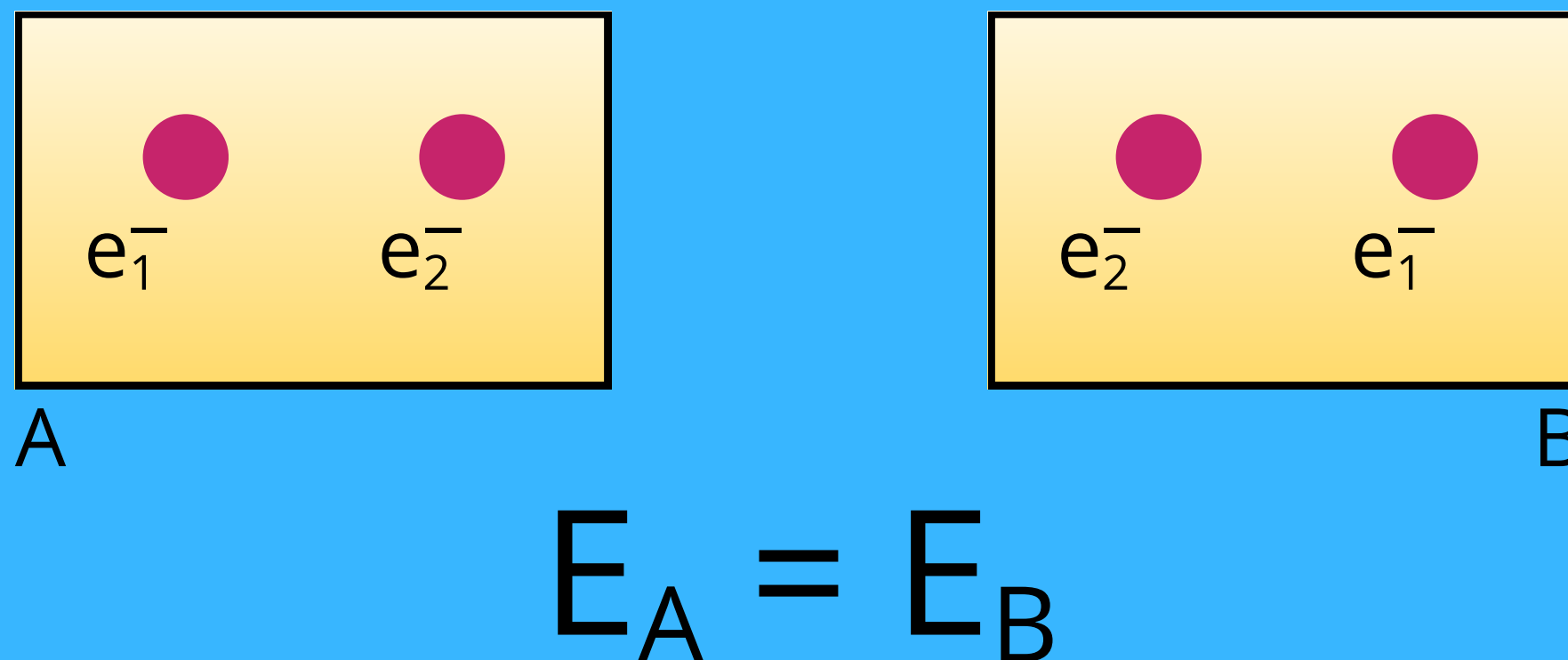
A



B

A "troca" ganha importância

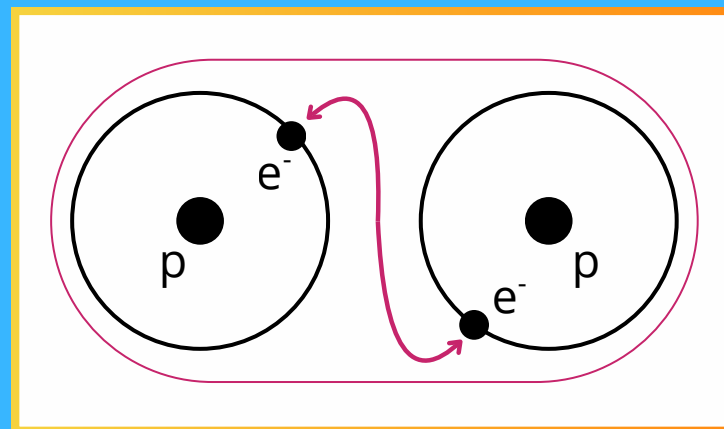
- O conceito de troca (*exchange*) foi introduzido no estudo de sistemas quânticos de muitas partículas idênticas. Nestes sistemas, é necessário considerar a indistinguibilidade das partículas quânticas.



O mecanismo de troca justifica a ligação

Heitler e London (1927) sobre a ligação homopolar.

- Walter Heitler e Fritz London, em 1927, utilizaram a noção de interação de troca (*Austausch*) para explicar a ligação homopolar, que caracteriza, por exemplo, a molécula de H₂.



H₂

$$\psi_1 \varphi_2 \quad (1 \text{ ist bei } a, 2 \text{ ist bei } b).$$

$$\psi_2 \varphi_1 \quad (2 \text{ ist bei } a, 1 \text{ ist bei } b).$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{\sqrt{2 + 2S}} (\psi_1 \varphi_2 + \psi_2 \varphi_1), \\ \beta &= \frac{1}{\sqrt{2 - 2S}} (\psi_1 \varphi_2 - \psi_2 \varphi_1). \end{aligned} \right\}$$

$$1/h (E_\beta - E_\alpha)$$

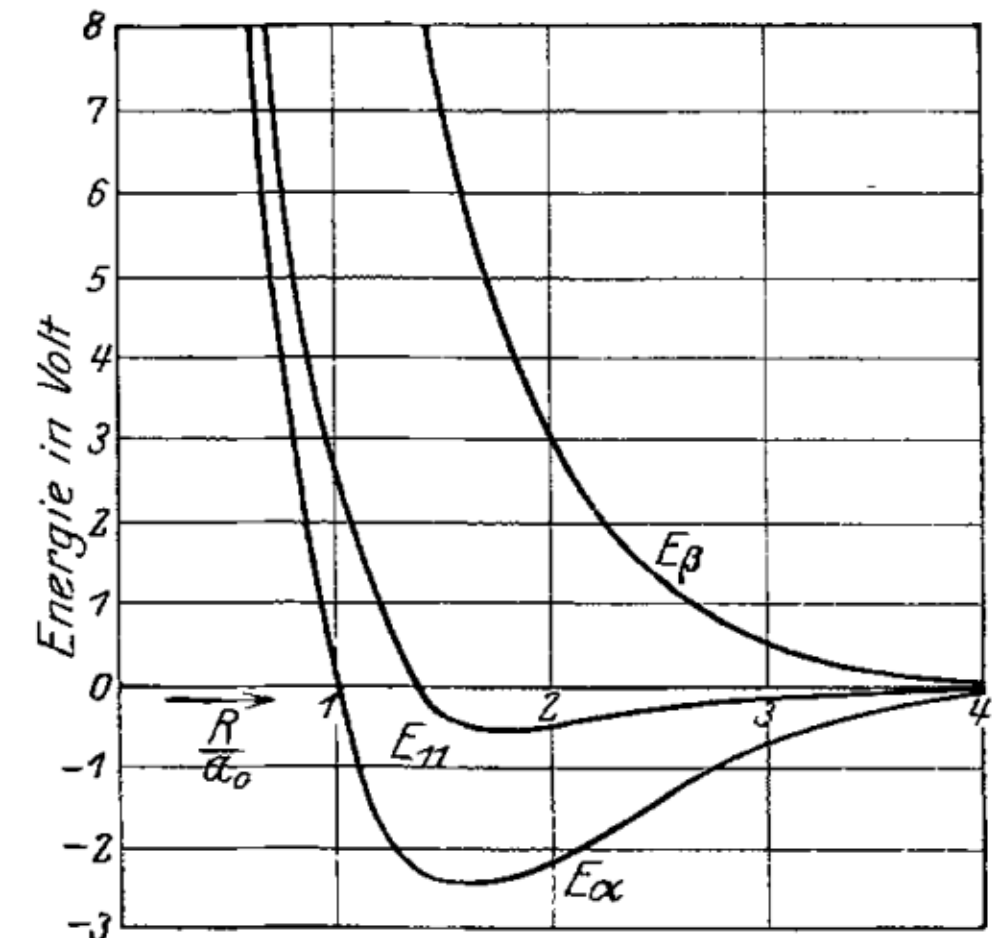
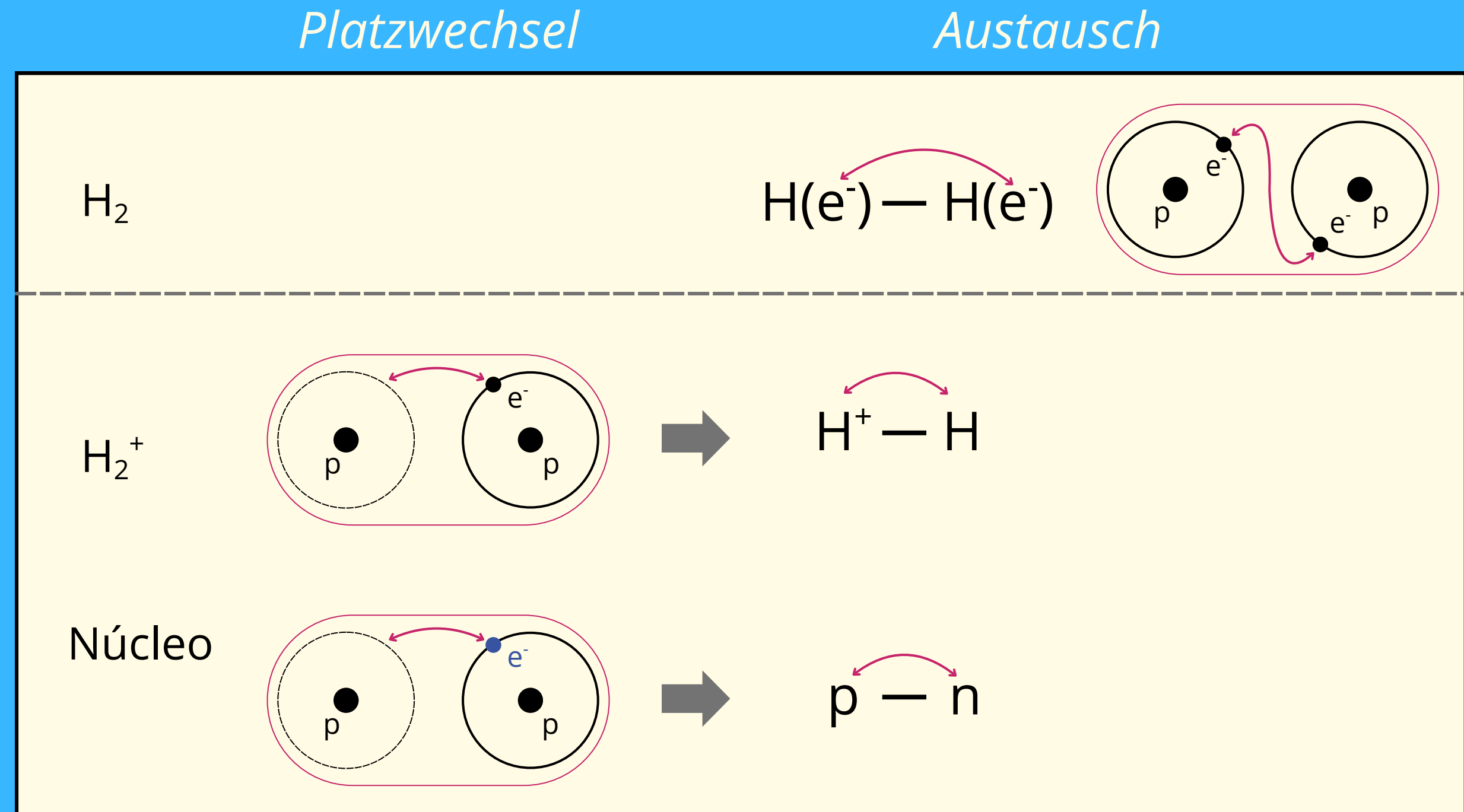


Fig. 1. Potential zweier neutraler H-Atome.
(E_α = homöopolare Anziehung,
 E_β = elastische Reflexion.)

Expandindo o *Austausch*

- Aquelas ideias inspiraram estudos sobre sistemas compostos por partículas distinguíveis, como os de Werner Heisenberg sobre o núcleo atômico (1932-33). *Austausch* e *Platzwechsel*.



(*) elétron nuclear

A troca chega na eletrodinâmica quântica

- Em 1935, Hideki Yukawa propôs uma teoria para o núcleo atômico por meio de uma analogia o mais próximo possível da Eletrodinâmica Quântica.
 - O potencial U da força nuclear como análogo ao potencial escalar eletromagnético.
 - Equação de campo de U . Dois aspectos da força nuclear são considerados: o pequeno alcance e a natureza de troca.

$$\left\{ \Delta - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \lambda^2 \right\} U = -4\pi g \frac{\bar{\Psi} \tau_1 - i \tau_2 \Psi}{2},$$

A troca chega na eletrodinâmica quântica

- Yukawa reescreveu a equação de campo no vácuo para relacioná-la com a equação de dispersão da relatividade, na qual há um termo de massa.
- “Na teoria quântica, este campo [da interação nuclear] deveria ser acompanhado de um novo tipo de quantum, da mesma forma que o campo eletromagnético é acompanhado do fóton” (Yukawa, 1988, p. 49).
- Esse quantum é o méson-pi.

$$\left\{ \Delta - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \lambda^2 \right\} U = -4\pi g \tilde{\Psi} \frac{\tau_1 - i\tau_2}{2} \Psi,$$

$$\left\{ p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - \frac{W^2}{c^2} + m_\pi c^2 \right\} U = 0$$

$$m_\pi = \frac{\lambda h}{c}$$

A troca chega na eletrodinâmica quântica

- A ligação entre o novo quantum e o mecanismo de troca introduzido pelo operador do isospin não fica explícita.
- Contudo, a ideia de troca se estabelece de forma mais concreta no contexto das teorias quânticas de campo a partir do trabalho de Yukawa.
- Além disso, a identificação e detecção de um novo quantum característico normaliza a busca por novas partículas.

Resultados parciais

- Houve uma ressignificação tanto do formalismo da eletrodinâmica quântica (e teorias quânticas de campo, de forma mais geral) quanto da noção de troca.
- Ao longo desta história, observamos o uso de algumas representações visuais, que eram construídas como tentativas de se interpretar os resultados da manipulação dos formalismos matemáticos. Por meio da análise dessas representações podemos observar como as linguagens se desenvolviam e como as ideias de uma área influenciavam os trabalhos de outra.
- Esse caso reforça a importância da interdisciplinaridade e demonstra a complexidade de se interpretar os formalismos das teorias físicas.
- Este estudo nos leva a refletir sobre a forma como os formalismos das teorias são apresentados em sala de aula, muitas vezes em uma imutabilidade ilusória.

Próximos passos

- É necessário, ainda, substancializar a pesquisa relativa às representações por meio da visita mais cuidadosa dos artigos originais e do estudo bibliográfico em história da física. Dessa forma, pretendemos recontar a sequência de eventos apresentada aqui com um foco maior e mais informado sobre representações.
- Relativo à sequência de eventos, é necessário entender melhor como o formalismo da eletrodinâmica quântica era compreendido na época do trabalho de Yukawa. Também é necessário um estudo mais cuidadoso sobre os trabalhos de Richard Feynman.

W

H

Obrigada!

u

z

μ

e

b

Referências

BANTZ, David A. The structure of discovery: Evolution of structural accounts of chemical bonding. In: SCIENTIFIC Discovery: Case Studies. [S.l.]: Springer, 1980. P. 291–329.

CARSON, Cathryn. The peculiar notion of exchange forces—I: Origins in quantum mechanics, 1926–1928. Studies In History and Philosophy of Science Part B: Studies In History and Philosophy of Modern Physics, Elsevier, v. 27, n. 1, p. 23–45, 1996a.

CARSON, Cathryn. The peculiar notion of exchange forces—II: From nuclear forces to QED, 1929–1950. Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics, Elsevier, v. 27, n. 2, p. 99–131, 1996b.

DARRIGOL, Olivier. The quantum electrodynamical analogy in early nuclear theory or the roots of Yukawa's theory. Revue d'histoire des sciences, p. 225–297, 1988.

ESPOSITO, Salvatore; NADDEO, Adele. The genesis of the quantum theory of the chemical bond. arXiv preprint arXiv:1309.4647, 2013.

HEISENBERG, Werner. Über den bau der atomkerne. i. Zeitschrift für Physik, v. 77, n. 1, p. 1-11, 1932.

HEITLER, Walter; LONDON, Fritz. Wechselwirkung neutraler Atome und homöopolare Bindung nach der Quantenmechanik. Zeitschrift für Physik, v. 44, n. 6, p. 455-472, 1927.

YUKAWA, Hideki. On the interaction of elementary particles. I. Proceedings of the Physico-Mathematical Society of Japan. 3rd Series, v. 17, p. 48-57, 1935.

t

s

ν_e

ν_τ

ν_μ

γ

c

d

g