

# Erős terek leírása a Wigner-formalizmussal

Berényi Dániel <sup>1</sup>, Varró Sándor <sup>1</sup>, Vladimir Skokov <sup>2</sup>, Lévai Péter <sup>1</sup>



1, MTA Wigner FK, Budapest

2, RIKEN/BNL, Upton, USA

Wigner 115

2017. November 15.

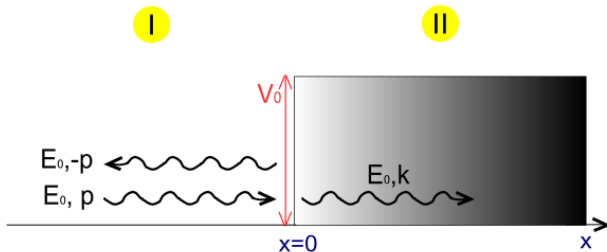
Budapest



# A párkeltés előzményei

Dirac elektromágnességre vonatkozó kvantumelmélete tartalmazott néhány furcsaságot:

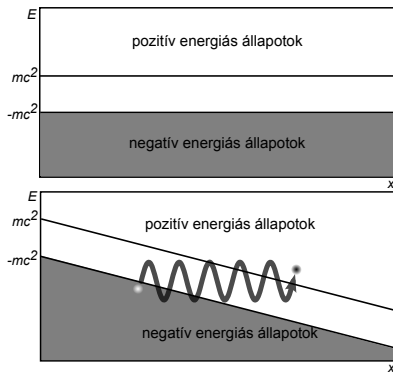
- Oskar Klein vette észre, hogy egy potenciál gátról visszaverődő részecske energiája esetenként nagyobb is lehet, mint ami az ütközés előtt volt.



# A párkeltés előzményei

Dirac elektromágnességre vonatkozó kvantumelmélete tartalmazott néhány furcsaságot:

- Fritz Sauter rájött, hogy ha a potenciál gát elég meredek, akkor az elméletben akkor is lesz visszavert részecske, ha bemenő nincs is!



# A párkeltés előzményei

Amikor a kvantumelektrodinamika megszületett, Julian Schwinger számolta ki a konstans elektromos tér esetére a vákuumból történő elektron-positron párkeltés valószínűségét:

$$P_{e^+e^-} = \frac{e^2 \mathcal{E}^2}{4\pi^3} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\pi \frac{nm^2}{e\mathcal{E}}\right)$$



# Hol jöhet létre párkeltés?

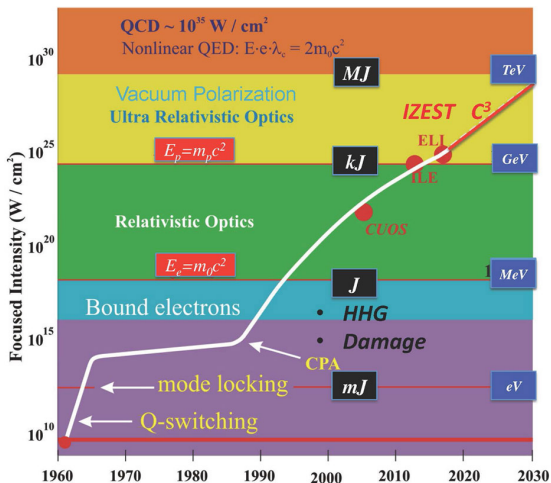
Egzotikus lehetőségek:

- Kompakt asztrofizikai objektumok közelében (fekete lyukak, magnetárok), ahol a gravitáció növeli a párkeltés valószínűségét



# Hol jöhet létre párkeltés?

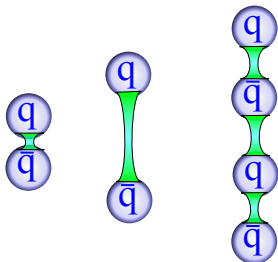
Nagyon erős lézerterek keresztezésekor!



Egy összefoglaló az üzemelő és tervezett létesítményekről: A. Di Piazza et. al, Rev. Mod. Phys. vol. 84, (2012) 1177

# Hol jöhet létre párkeltés?

Az  $e^- - e^+$  párkeltésnek van egy analógja az erős kölcsönhatás esetében is, ahol erős gluon térből jöhetnek létre kvark-antikvark párok:



A kvark potenciál olyan, hogy ha egy  $q - \bar{q}$  pár távolodik egymástól, akkor a kölcsönhatás újabb és újabb párokat kelt, amíg el nem fogy a mezőben tárolt energia.

# Hol jöhet létre párkeltés?

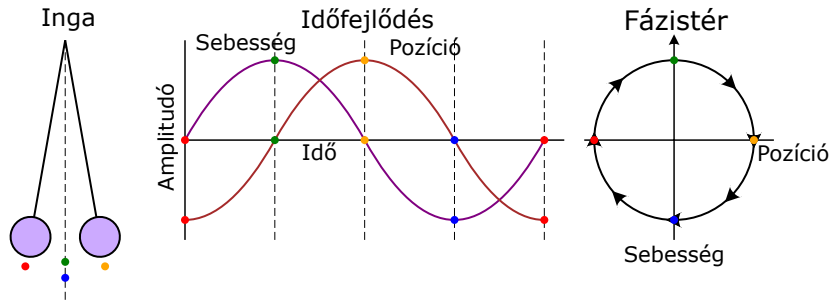
A kvark-antikvark párkeltéshez szintén nagyon erős terekre van szükség, ilyenek csak a legnagyobb részecskegyorsítókban (mint például a Nagy Hadronütköztetőben) létrehozott ütközésekben jöhetnek létre:





# A párkeltés általános leírása

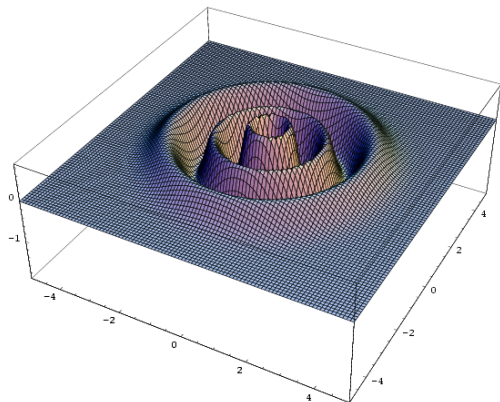
Klasszikus fizikai rendszereket gyakran a fázistérben érdemes leírni:



Kvantum rendszerek esetén nehezebb a feladat, mert a Heisenberg-féle határozatlansági reláció nem engedi a pozíció és a sebesség egyidejű teljesen pontos ismeretét.

# A párkeltés általános leírása

A kvantum rendszerek fázistérbeli leírására a Wigner-függvény ad lehetőséget:



Egy  $n=5$  Fock állapot Wigner függvénye.



Hogyan definiáljuk?

- A párkeltéshez a relativisztikus Wigner-függvényre van szükségünk, ez a hullámfüggvényből építhető fel:

$$\hat{\rho}(\vec{x}, \vec{s}, t) = e^{-ig \int_{-1/2}^{1/2} \vec{A}(\vec{x} + \lambda \vec{s}, t) \vec{s} d\lambda} \left[ \Psi(\vec{x} + \frac{\vec{s}}{2}, t), \bar{\Psi}(\vec{x} - \frac{\vec{s}}{2}, t) \right] \quad (1)$$

- Vegyük a vákum várhatóértéket.
- Fourier-transzformáljuk a különbség koordináta szerint:

$$W(\vec{x}, \vec{p}, t) = -\frac{1}{2} \int e^{-i\vec{p}\vec{s}} \langle \Omega | \hat{\rho}(\vec{x}, \vec{s}, t) | \Omega \rangle d^3s \quad (2)$$

# A Wigner-függvény mozgásegyenlete

Ha az időfejlődésre vagyunk kíváncsiak, meg kell oldanunk a mozgásegyenleteket!

16 csatolt differenciál-egyenlet:

$$D_t \mathbb{S} - 2\vec{P} \cdot \vec{t}_1 = 0 \quad (3)$$

$$D_t \mathbb{P} + 2\vec{P} \cdot \vec{t}_2 = 2m a_0 \quad (4)$$

$$D_t v_0 + \vec{D}_{\vec{x}} \cdot \vec{v} = 0 \quad (5)$$

$$D_t a_0 + \vec{D}_{\vec{x}} \cdot \vec{a} = 2m \mathbb{P} \quad (6)$$

$$D_t \vec{v} + \vec{D}_{\vec{x}} v_0 + 2\vec{P} \times \vec{a} = -2m \vec{t}_1 \quad (7)$$

$$D_t \vec{a} + \vec{D}_{\vec{x}} a_0 + 2\vec{P} \times \vec{v} = 0 \quad (8)$$

$$D_t \vec{t}_1 + \vec{D}_{\vec{x}} \times \vec{t}_2 + 2\vec{P}_{\mathbb{S}} = 2m \vec{v} \quad (9)$$

$$D_t \vec{t}_2 - \vec{D}_{\vec{x}} \times \vec{t}_1 - 2\vec{P}_{\mathbb{P}} = 0 \quad (10)$$

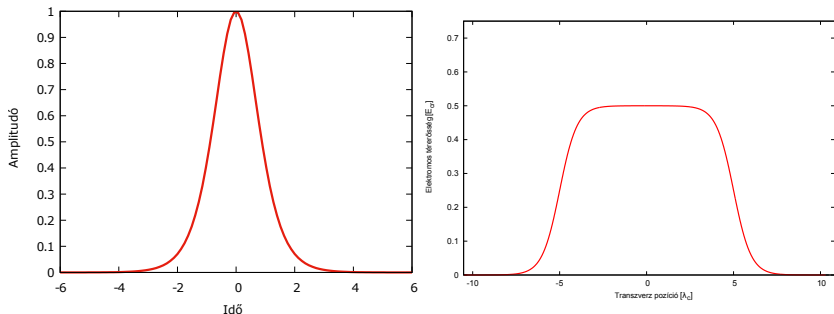
# Megfigyelhető mennyiségek a Wigner függvényből

Néhány komponensnek mérhető mennyiségeknek felelnek meg:

- $\rho$ : Tömegsűrűség
- $\rho_0$ : Töltéssűrűség
- $\vec{v}$ : Áramsűrűség
- $\vec{p}\vec{v} + m\rho$ : Energia sűrűség
- $\vec{a}$ : Spinsűrűség

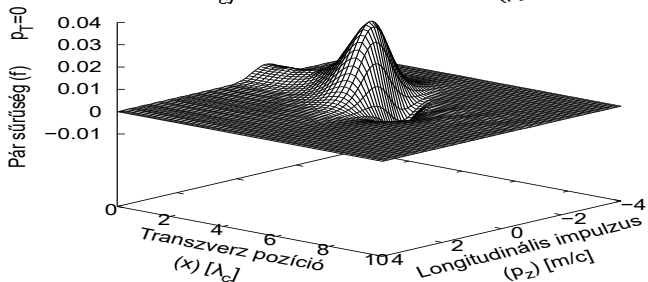
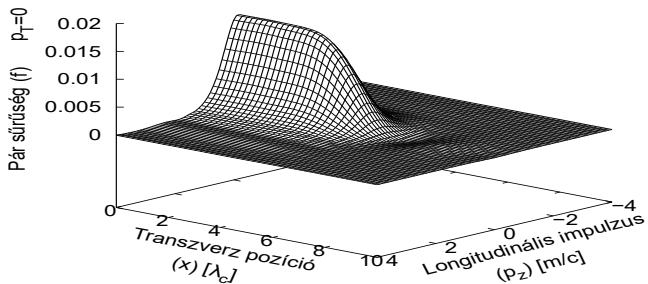
# Időfüggő inhomogén elektromos tér

Az egyik érdekes eset, amikor helytől és időtől is függő elektromos teret kapcsolunk a vákumra:

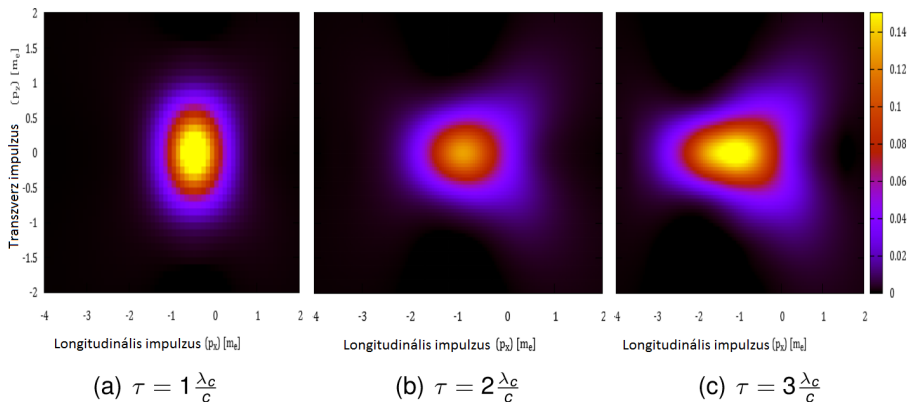


D. Berényi et al, Physics Letters B, Vol 749, pp. 210-214, DOI: 10.1016/j.physletb.2015.07.074.

# Időfüggő inhomogén elektromos tér



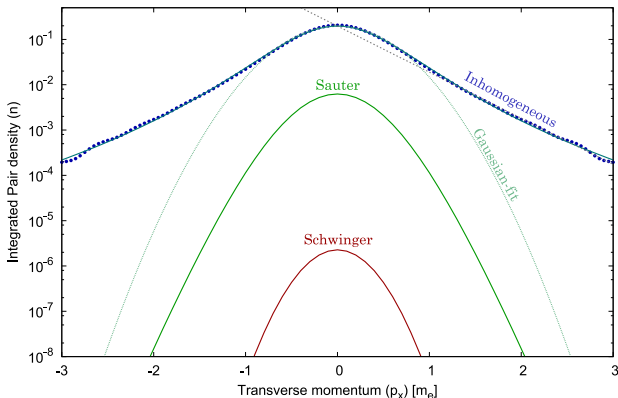
# Időfüggő inhomogén elektromos tér





# Időfüggő inhomogén elektromos tér

Mennyiben tér el a transzverz spektrum a homogén modellekhez képest?

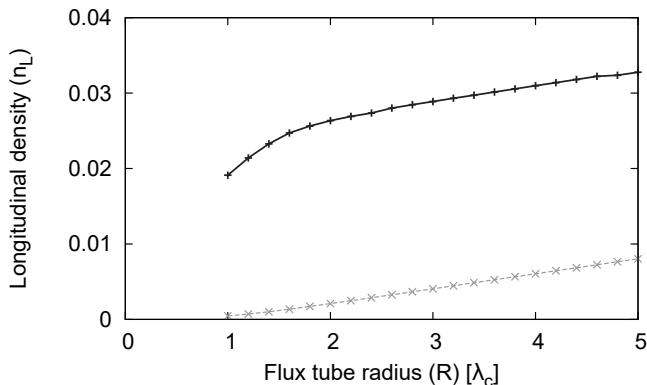


Gauss-iság:  $Ae^{-\beta p_x^2}$ , ahol  $\beta_{Schwinger} = 6.6$ ,  $\beta_{Sauter} = 4.3$ ,  $\beta_{InHom} = 2.6$



# Időfüggő inhomogén elektromos tér

Integrált részecskeszám:



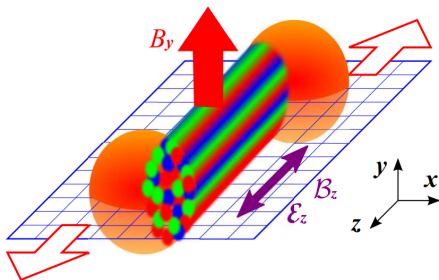
Ugyan az a meredekség: a párkeltés igazából egy felszíni effektus!  
Ezt Heisenberg megjósolta 1934-ben!

W. Heisenberg, Sachliche Akademie der Wissenschaften, Vol. 86, p. 317 (1934)



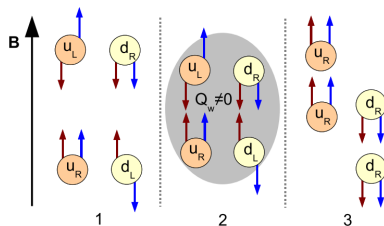
# A Királis Mágneses Effektus

Nem-centrális nehézion-ütközésekben létrejöhet elektromos áram az ütközési irányra merőlegesen, ami az erőskölcsönhatás egy váratlan jóslata:



- Háttér: nagyon erős mágneses tér a töltött ionok elhaladása miatt
- Erős gluon tér a nagyenergiájú ütközésben

# A Királis Mágneses Effektus

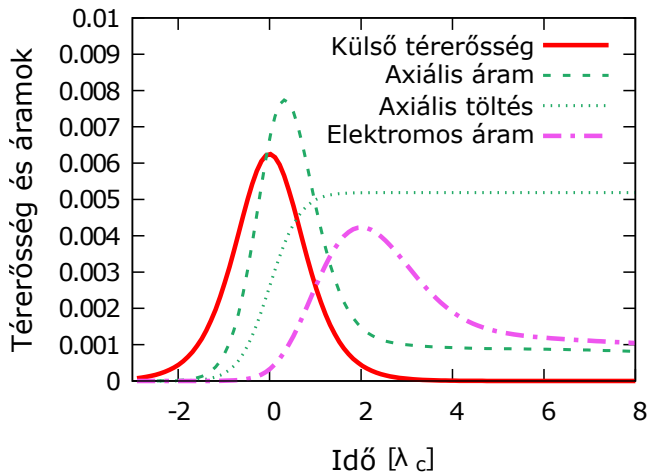


D. E. Kharzeev, L. D. McLerran and H. J. Warringa, Nucl. Phys. A 803, 227 (2008).

Az erős mágneses tér hatására a részecskék a spinjük szerint rendeződnek, majd amikor kölcsönhatnak a QCD terekkel, akkor átfordulhat a kiralitásuk, amely töltésszétválasztódáshoz vezet.

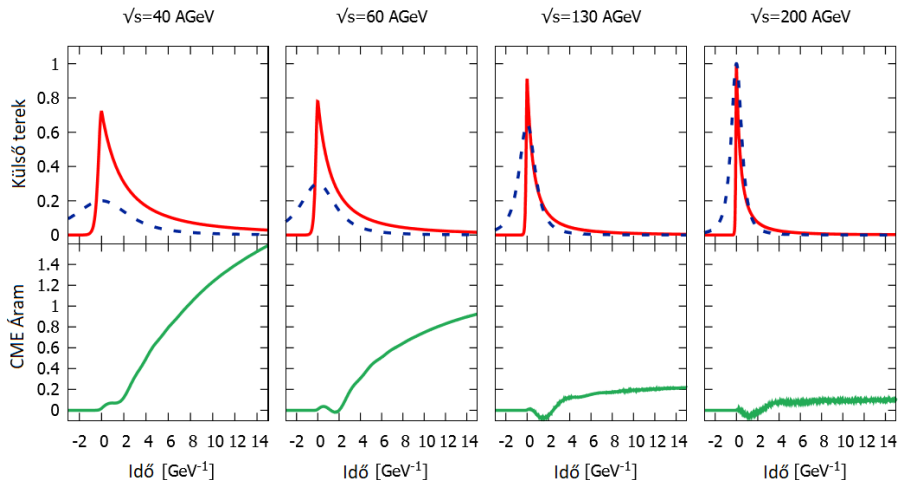
# A Királis Mágneses Effektus

A Wigner-függvény segítségével ez a folyamat is modellezhető, és a különböző komponensek időfejlődése jól tükrözi az események várt lefolyását:



# A Királis Mágneses Effektus

Továbbá jóslatot tudunk tenni az effektus energia függésére is:



- A Wigner-függvény egy igen hasznos eszköz a nagyenergiás lézerfizikai és részecskefizikai folyamatok leírására.
- A Wigner-függvény időfejlődése, bár bonyolult, a mai számítástechnikai eszközökkel már jól kezelhető.
- Példaként az inhomogén elektromos térben történő párkeltést és a királis mágneses effektus leírását láthattuk.

D. Berényi et al, Physics Letters B, Vol 749, pp. 210-214, DOI: 10.1016/j.physletb.2015.07.074. (2015)

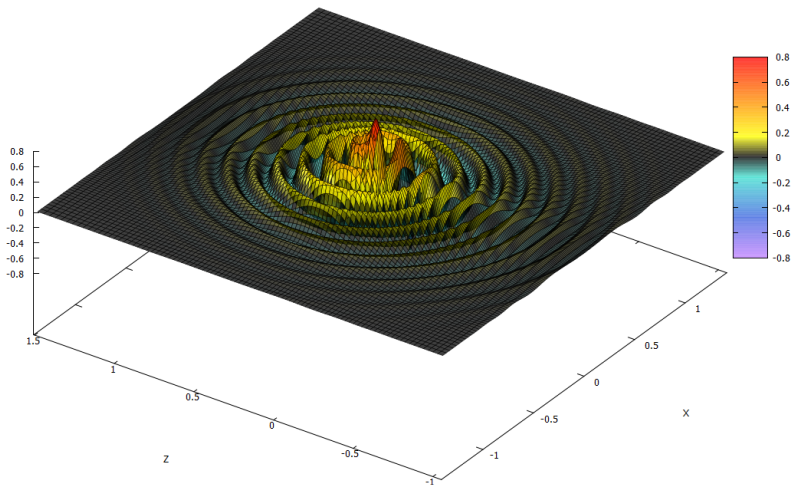
D. Berényi, P. Lévai, arxiv:1707.03621 (2017)

Támogatók: Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal K120660 és K123815

Wigner GPU Labor: [gpu.wigner.mta.hu](http://gpu.wigner.mta.hu)



# Köszönöm a figyelmet!



A királis mágneses áram anomális komponense a fázistérben

