

# 3 x 3



## Stacking-dependent band gap and quantum transport in trilayer graphene

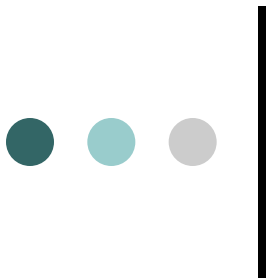
W. Bao<sup>1</sup>, L. Jing<sup>1</sup>, J. Velasco Jr<sup>1</sup>, Y. Lee<sup>1</sup>, G. Liu<sup>1†</sup>, D. Tran<sup>1</sup>, B. Standley<sup>2</sup>, M. Aykol<sup>3</sup>, S. B. Cronin<sup>3</sup>, D. Smirnov<sup>4</sup>, M. Koshino<sup>5</sup>, E. McCann<sup>6</sup>, M. Bockrath<sup>1,2</sup> and C. N. Lau<sup>1\*</sup>

## Observation of an electrically tunable band gap in trilayer graphene

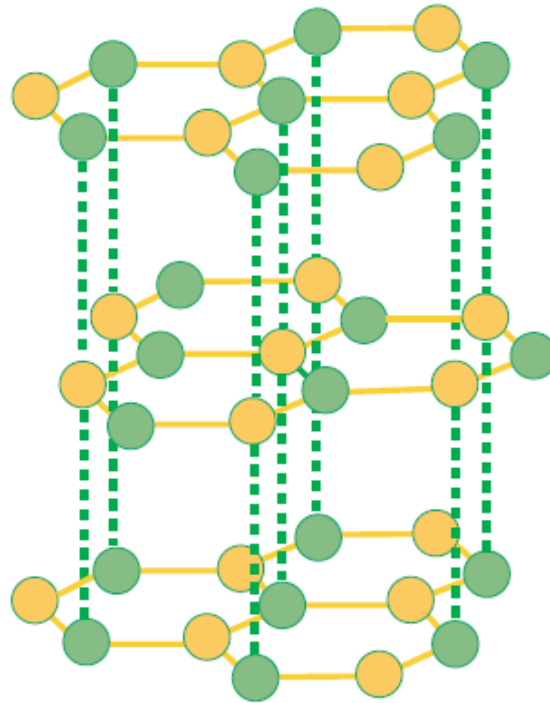
Chun Hung Lui<sup>1</sup>, Zhiqiang Li<sup>1</sup>, Kin Fai Mak<sup>1</sup>, Emmanuele Cappelluti<sup>2,3</sup> and Tony F. Heinz<sup>1\*</sup>

## The experimental observation of quantum Hall effect of $\nu = 3$ chiral quasiparticles in trilayer graphene

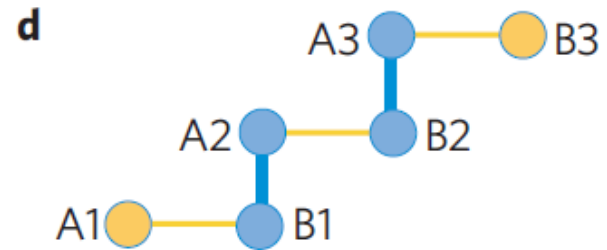
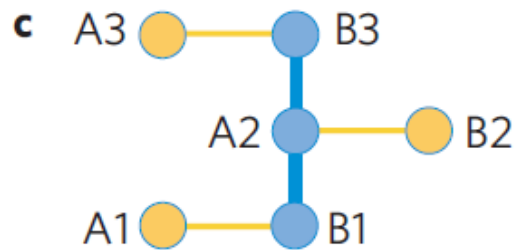
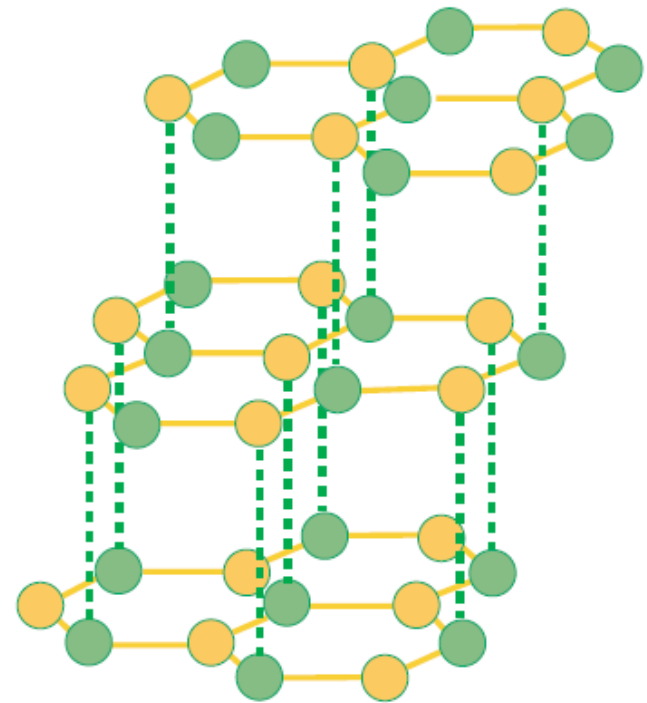
Liyuan Zhang<sup>1,2,3</sup>, Yan Zhang<sup>3</sup>, Jorge Camacho<sup>1</sup>, Maxim Khodas<sup>1,4</sup> and Igor Zaliznyak<sup>1\*</sup>



**a** ABA trilayer



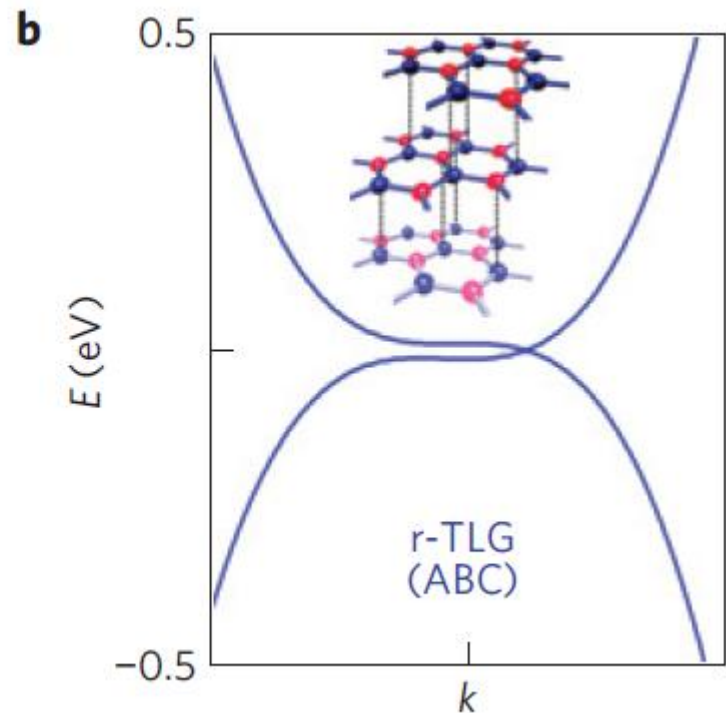
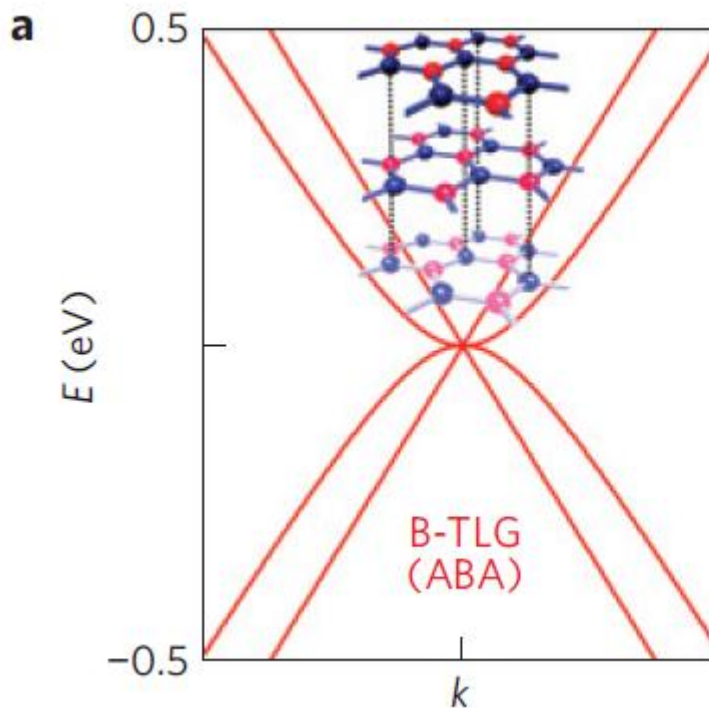
**b** ABC trilayer



○ Bernard (B-TLG)

○ Rombohedrális (r-TLG)

# Diszperziós reláció

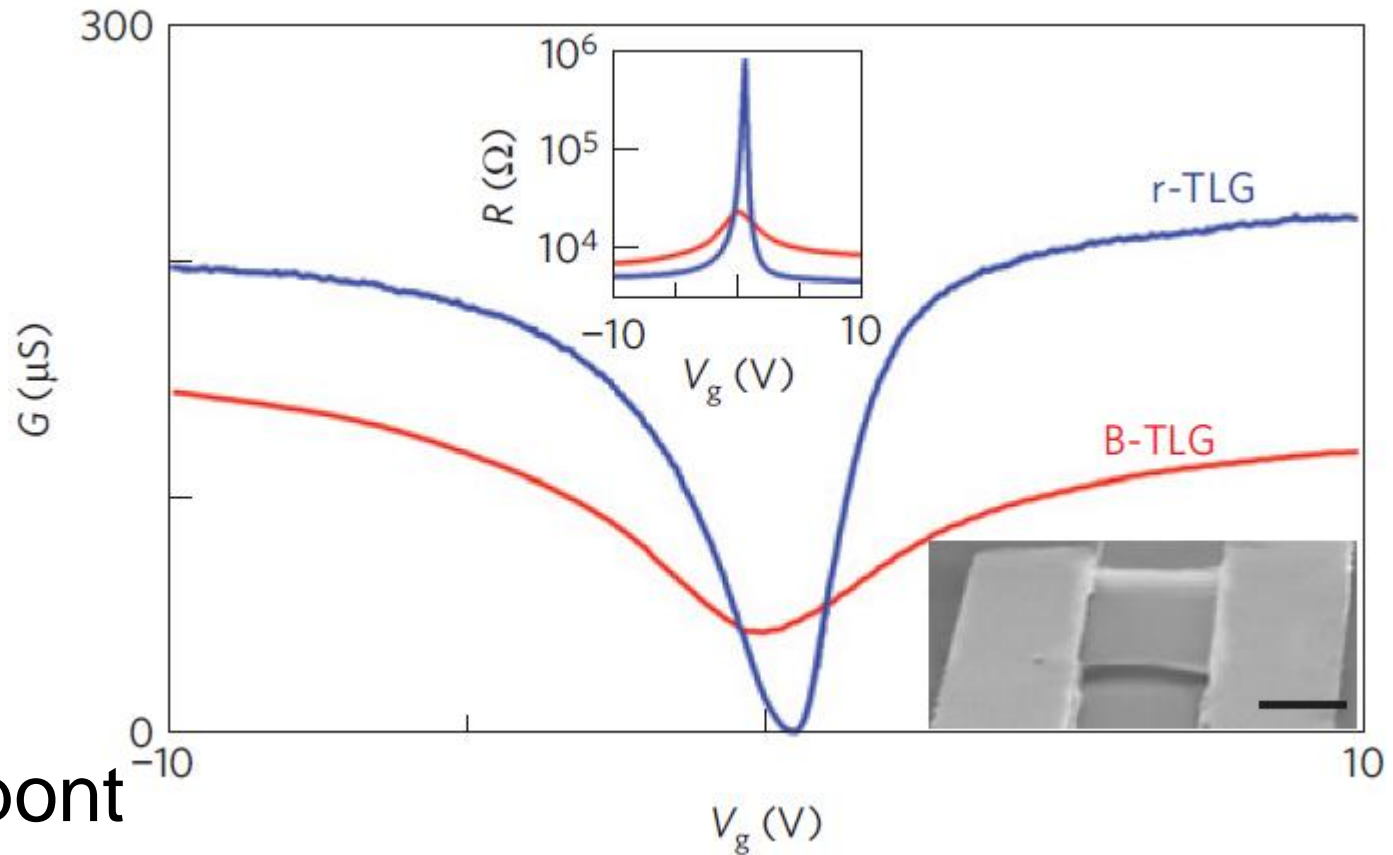


○ B-TLG = SLG + BLG  
 $\sim k$        $\sim k^2$

r-TLG  
 $\sim k^3$  (K, K')

Transzport: különböző lesz a két stackingre.

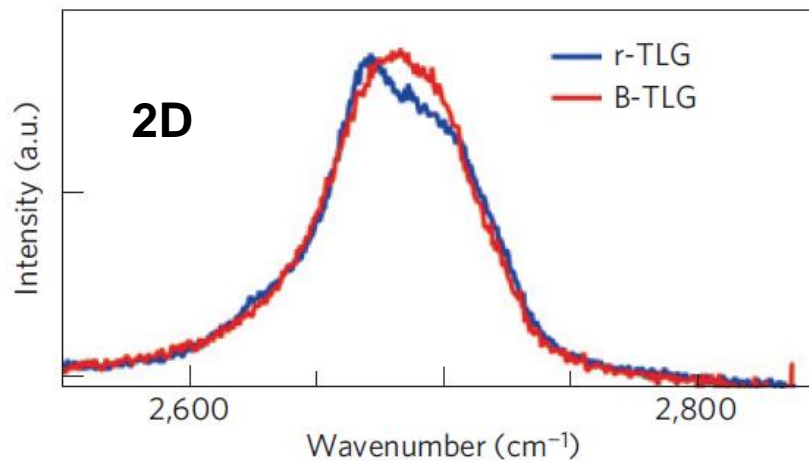
# Vezetőképesség@T=1,5K



- 2 pont
- Suspended flake, scale: 2 $\mu\text{m}$
- $G_{\min(\text{B-TLG})} = 50 \mu\text{S}$ ,  $G_{\min(\text{r-TLG})} < 1 \mu\text{S} @\text{CNP}$

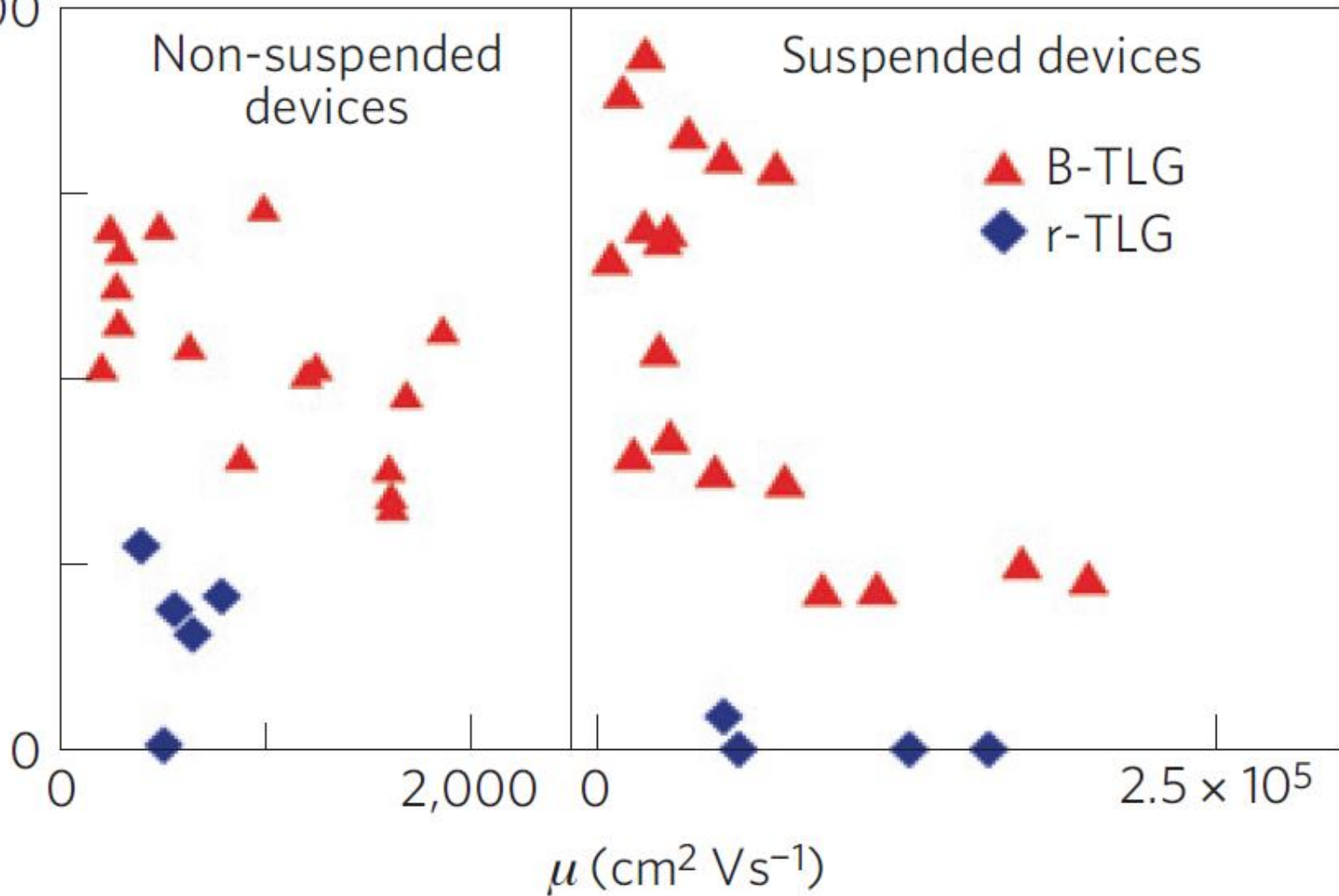
# Nem várt jelenségek:

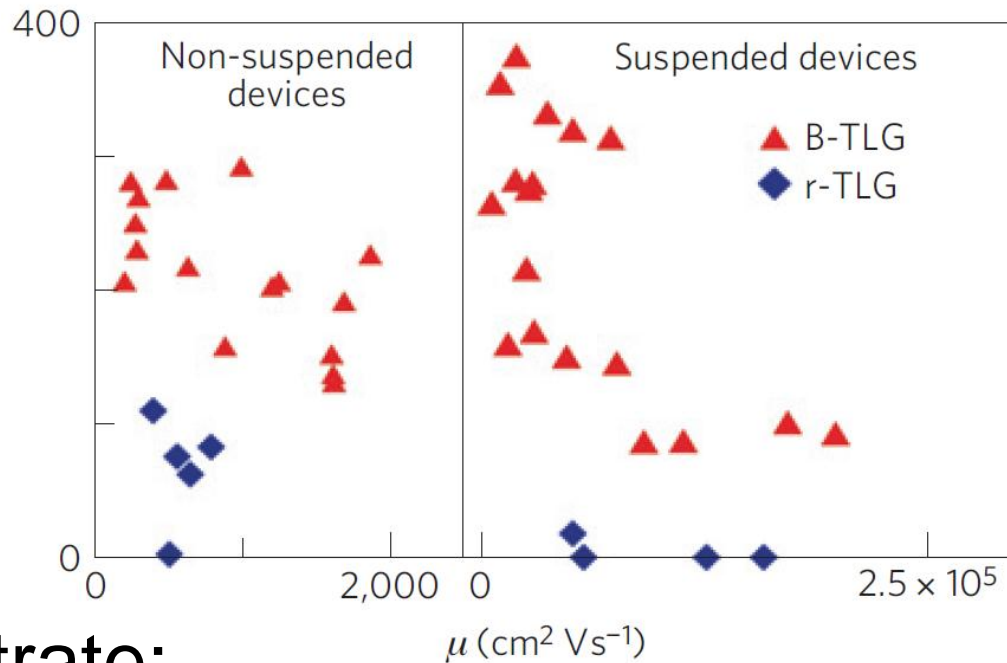
- $\sigma_{\min}$  nagy eltérése a két stacking között
- Bizonyos nagy mobilitású mintákon alacsony  $\sigma_{\min}$ 
  - 21 substrate, 22 suspended TLG
  - Transzport mérések után Raman:



# $\sigma_{\min} (\mu) @ T=4K$

400





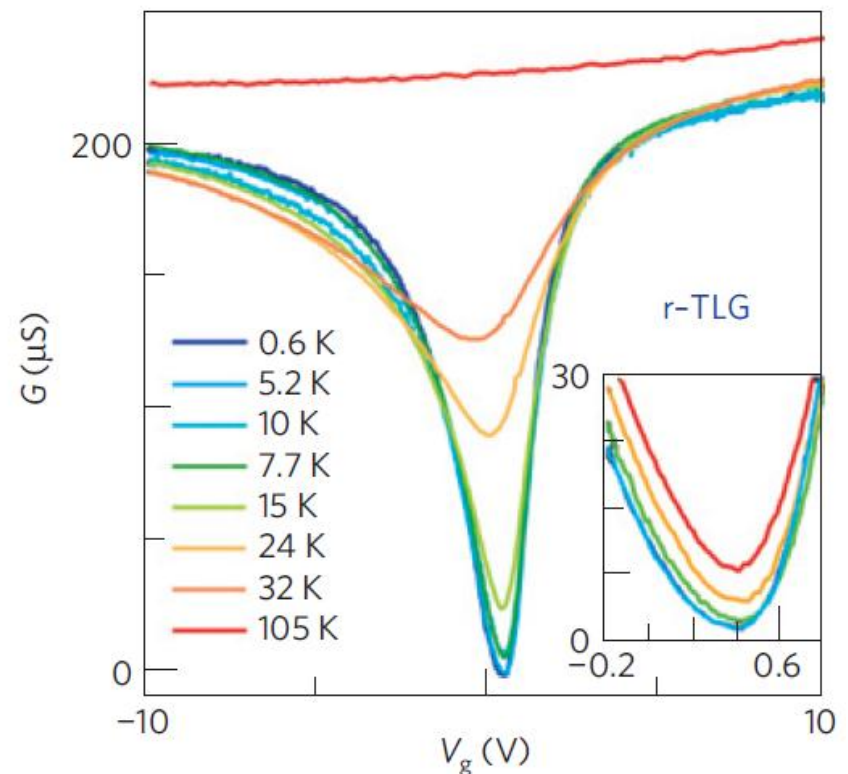
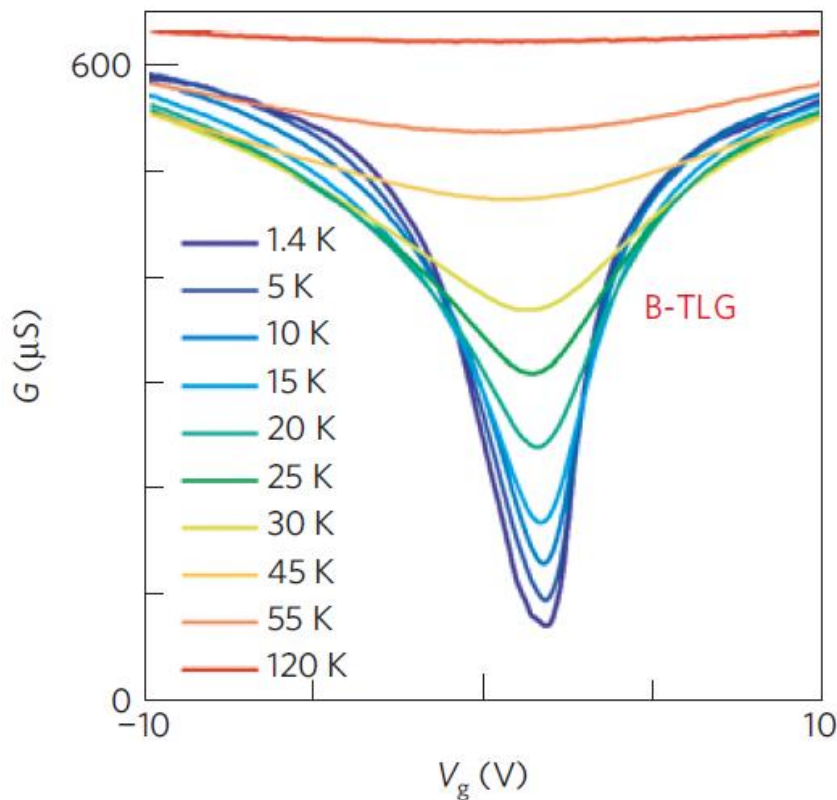
## ○ Substrate:

- B-TLG:  $\sigma_{\min}$  csökken növekvő  $\mu$ -re, de  $\neq 0$
- R-TLG:  $\sigma_{\min}$  sokkal alacsonyabb

## ○ Suspended:

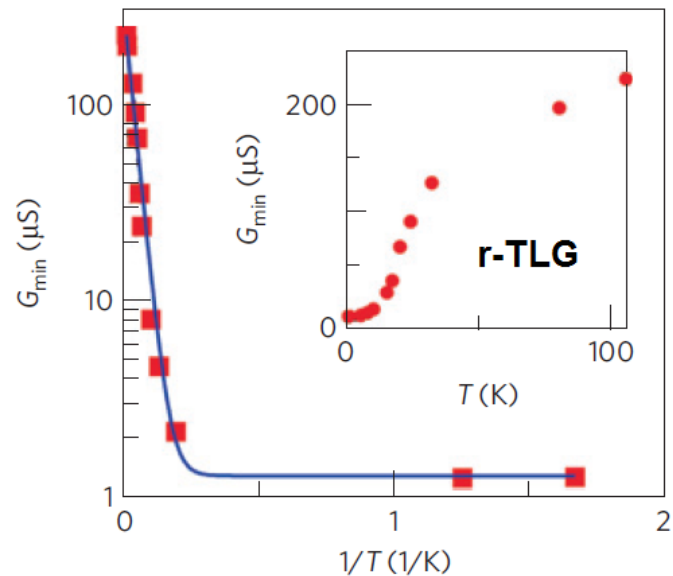
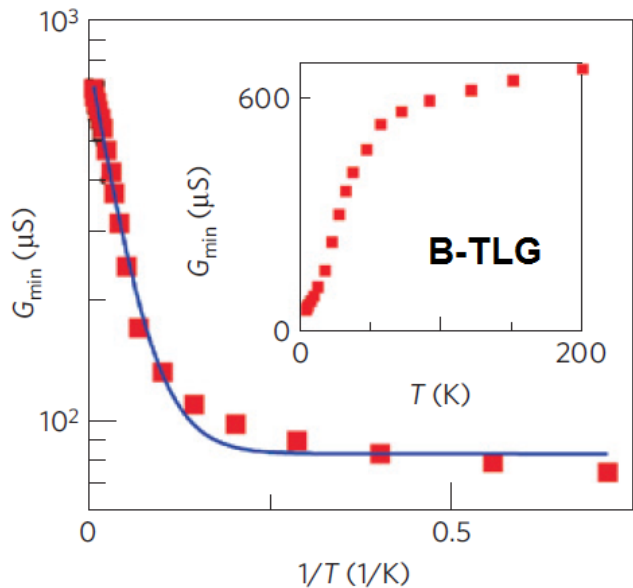
- $\sigma_{\min(\text{r-TLG})} \sim 100 \mu\text{S}$ ,  $\mu < 5 \cdot 10^4 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ : fém
- Egyébként  $\sigma_{\min(\text{r-TLG})} \sim 0$ : szigetelő

- A nem-kölcsönható elektron képből nem várták a szigetelő állapot megjelenését.
- Ezért hőmérsékletfüggést vizsgáltak.
- $G(V_g)$  @  $1\text{K} < T < 120\text{K}$ , mindkettőre.





- Variable range hopping-nak stretched exponens hőmérsékletfüggése van.
- De ez nem adekvát  $\Rightarrow G_{\min} = G_0 + Ae^{-E_A/k_B T}$
- CNP környékén:
  - B-TLG:  $E_A/k_B = 25\text{K}$ , de ez nem tökéletes ennél a stackingnél
  - r-TLG:  $E_A/k_B = 32\text{K}$ , és ez tökéletesen fitteli a méréseket.

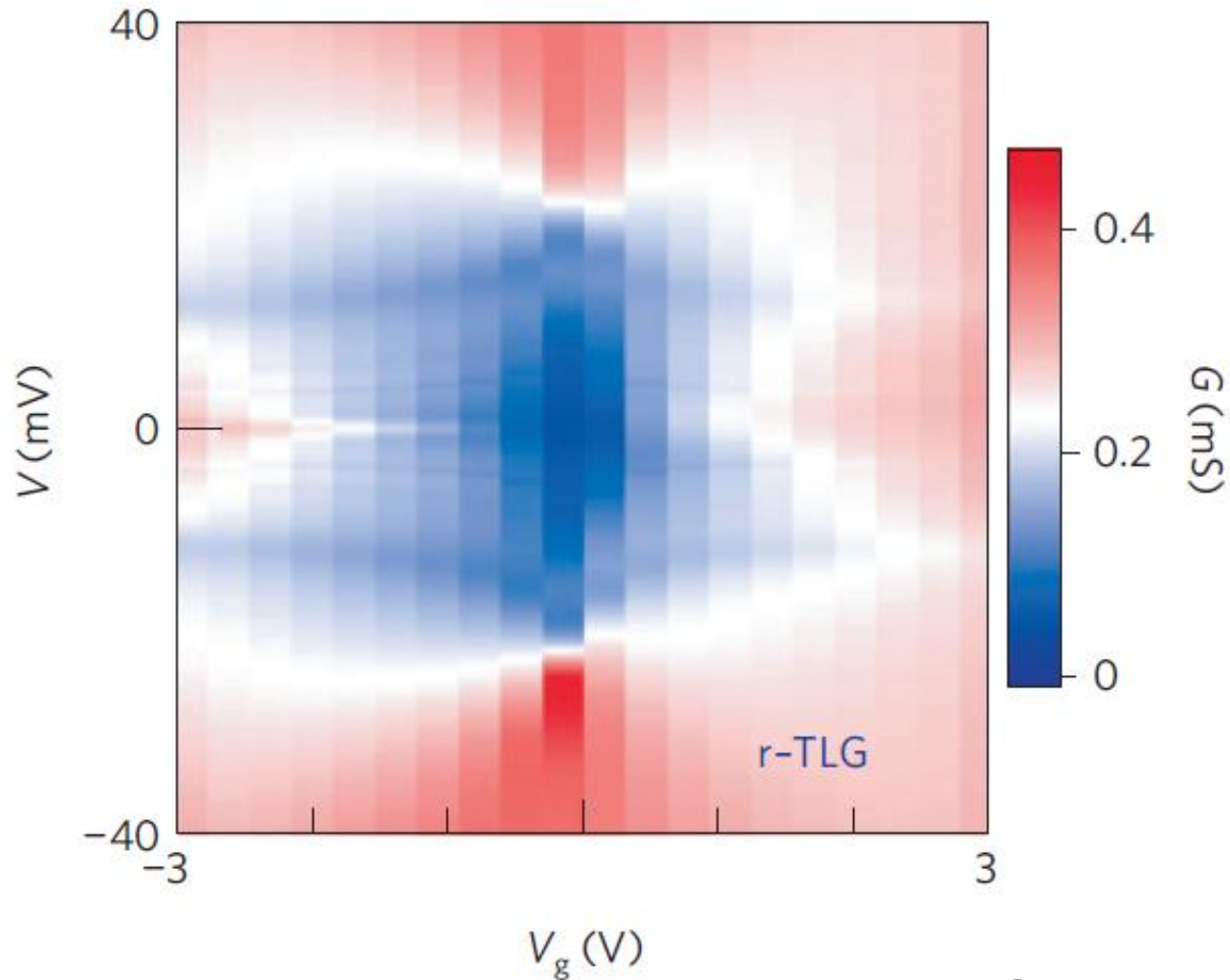


# $dI/dV(V_g, V)$ @ $T=300\text{K}$ mérés:

- r-TLG:

Középen gap:  
 $\Delta \sim 7,5 \text{ mV}$

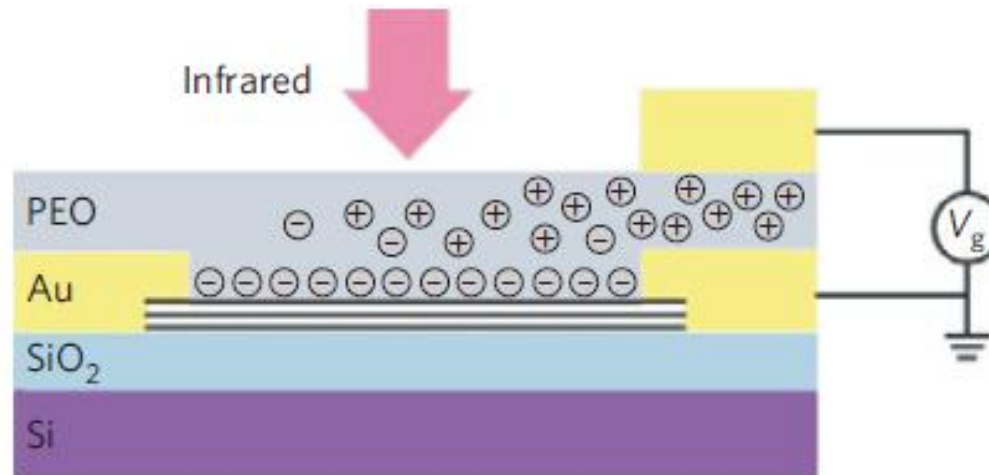
- To sum up our experimental findings: at  $B=0$ , we find that B-TLG remains metallic at the CNP, whereas r-TLG becomes insulating at low temperatures.



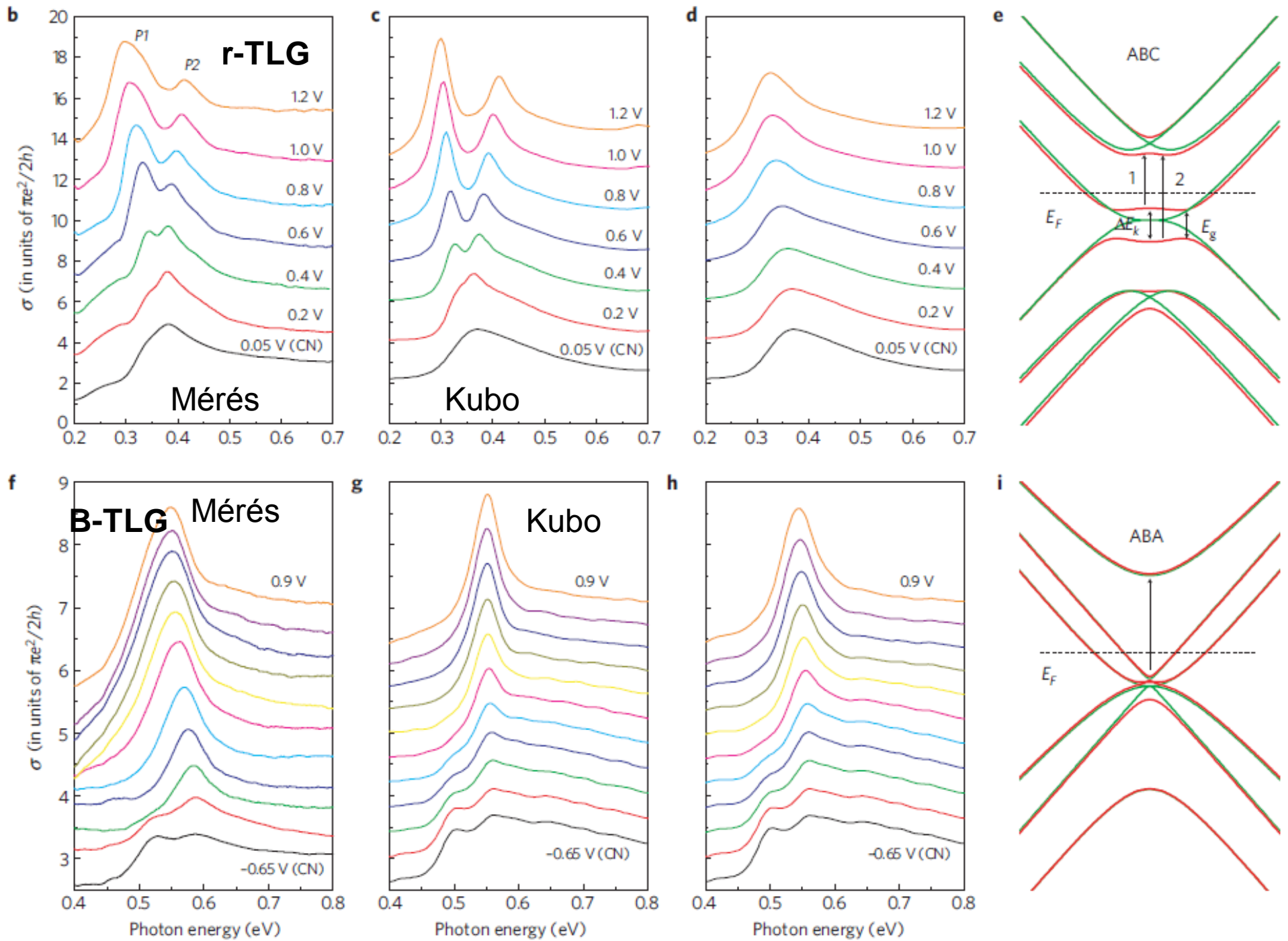
→ intrinsic band gap in r-TLG

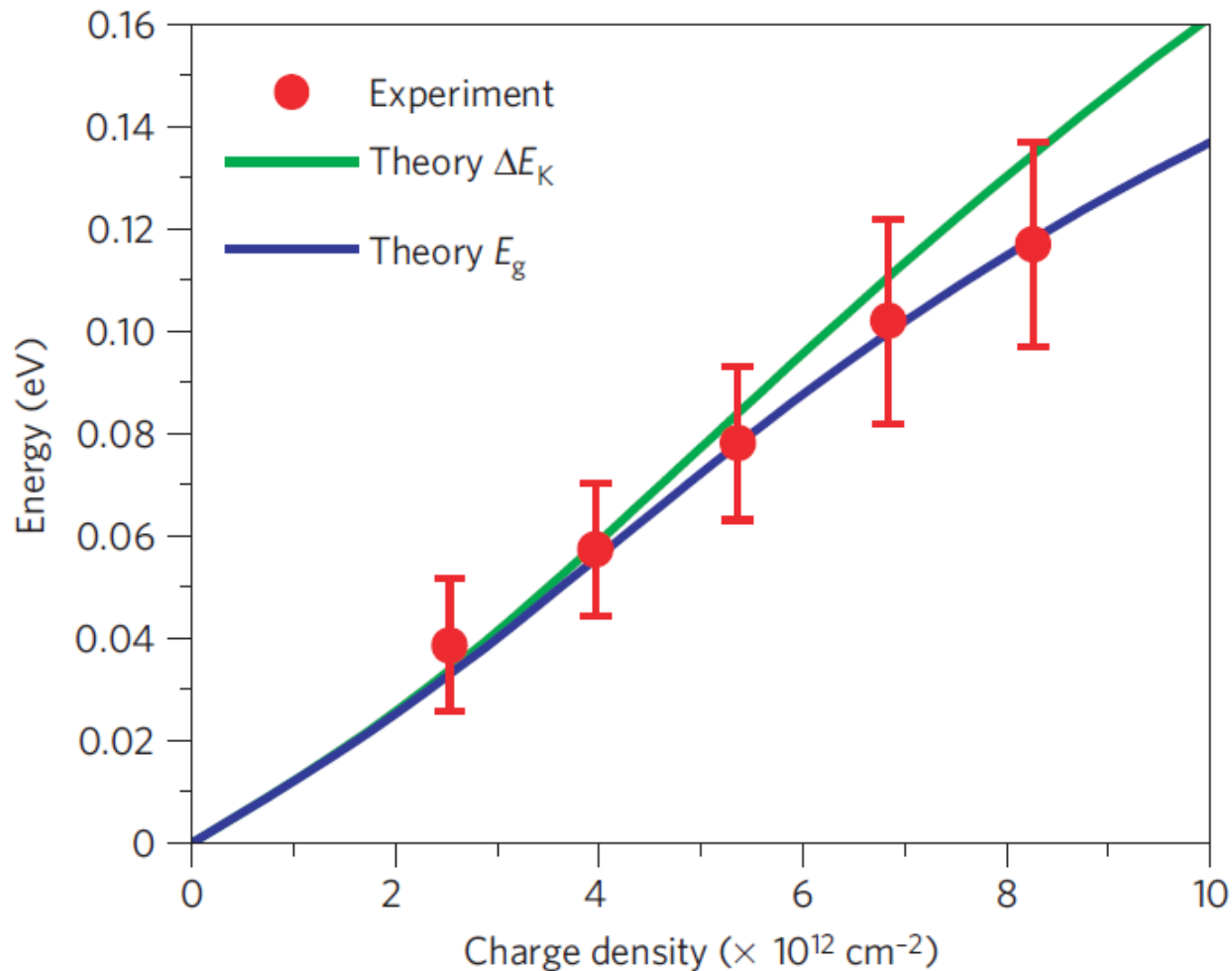
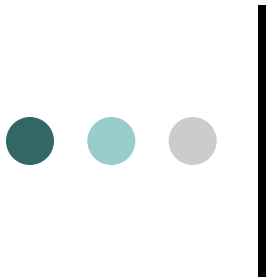
# Observation of an electrically tunable band gap in trilayer graphene

Chun Hung Lui<sup>1</sup>, Zhiqiang Li<sup>1</sup>, Kin Fai Mak<sup>1</sup>, Emmanuele Cappelluti<sup>2,3</sup> and Tony F. Heinz<sup>1\*</sup>

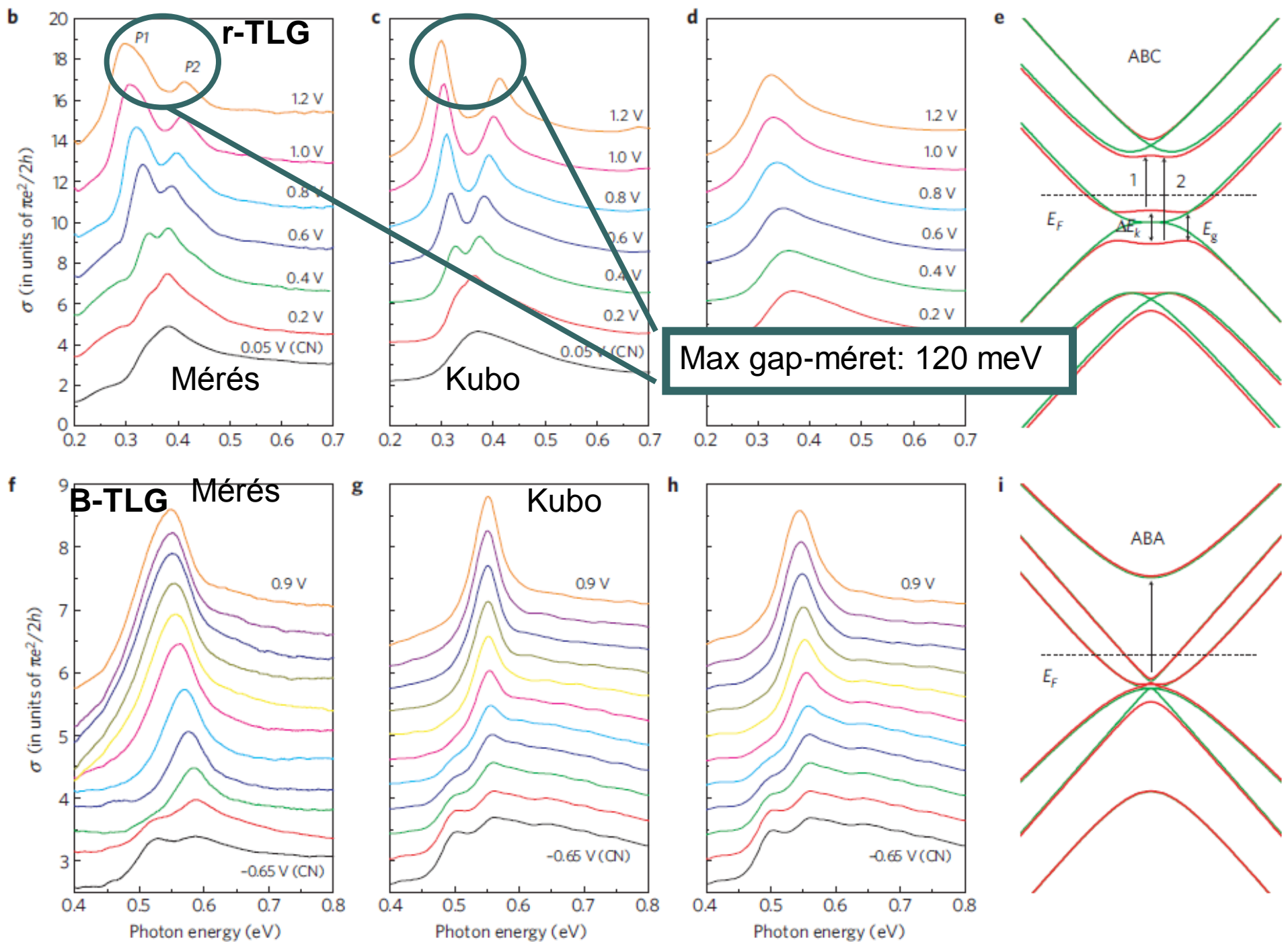


- Optical sheet conductivity: 0.2eV – 10eV
- Polyethylene oxide: polymer electrolyte
- ABA és ABC vizsgálata.





- TB szimuláció intra- és interlayer hoppinggal
- $\Delta E_K$ : K-pontbeli energia gap,  $E_g$ : gap szélessége
- A mért adatok jól illeszkednek az elméleti jóslatra.



Last, we focus on the transport characteristics of TLG devices in the quantum Hall (QH) regime. From tight-binding calculations that include only nearest-layer coupling, the Landau level (LL) spectrum for B-TLG is a superposition of those for SLG and BLG (refs 9,27–29):

$$E_{1,N}^{ABA} = \pm \sqrt{2\hbar v_F^2 eB|N|} \quad \text{and} \quad E_{2,N}^{ABA} = \pm \frac{\hbar v_F^2 eB}{t_\perp} \sqrt{N(N-1)}$$

For r-TLG, the LL energies are given by<sup>9,30</sup>

$$E_N^{ABC} = \pm \frac{(2\hbar v_F^2 eB)^{3/2}}{t_\perp^2} \sqrt{N(N-1)(N-2)} \quad (2)$$

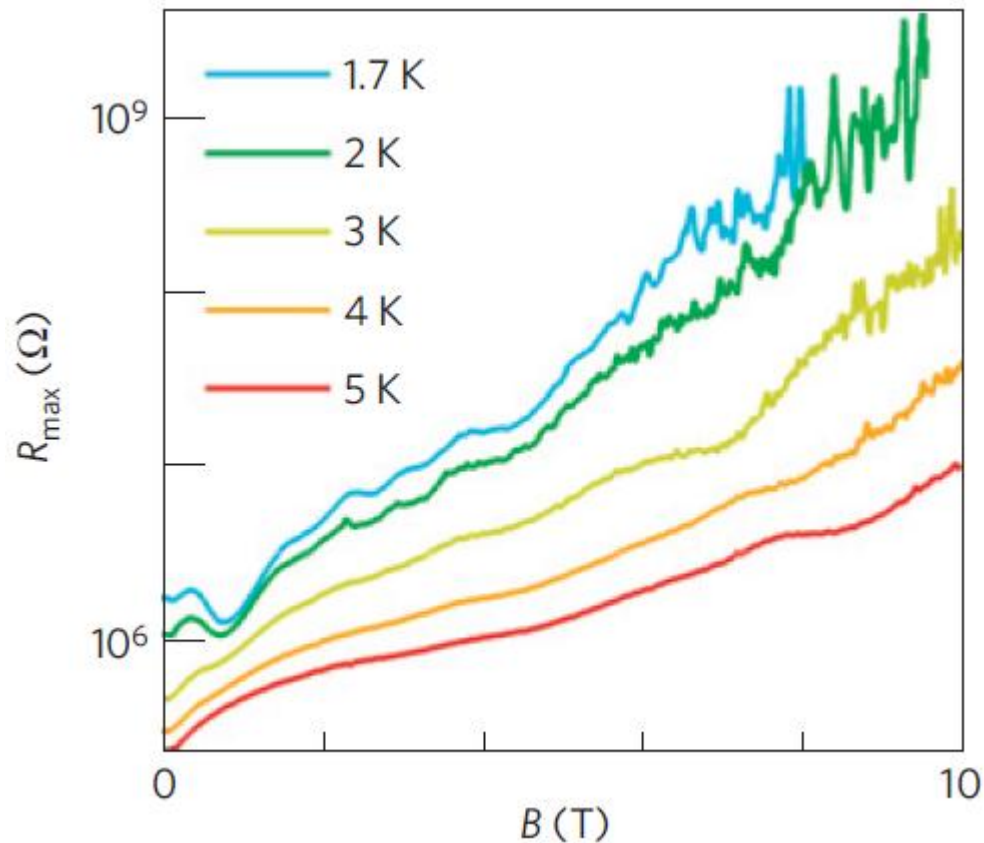
In these expressions,  $N$  is an integer denoting the LL index,  $v_F \sim 10^6 \text{ m s}^{-1}$  is the Fermi velocity,  $e$  is the electron charge,  $\hbar$  is Planck's constant and  $t_\perp \sim 0.2\text{--}0.4 \text{ eV}$  is the nearest-layer coupling energy. For both types of stacking order, the LL at zero energy is 12-fold degenerate, giving rise to quantized conductance plateaux with integer values ...  $-10, -6, 6, 10, 14\text{...}$  of  $e^2/h$ .



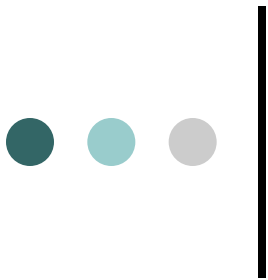
# Magnetotranszport

- Inter- és intralayer hoppinggal bizonyos degenerációk megszűnnek.
- LL degeneráció:
  - B-TLG: 4-szeres
  - R-TLG: 2-szeres
- Kísérlet: ellentétben az elmélettel
  - Mind a B-TLG, mind az r-TLG szigetelő állapotban lesz a Dirac pontban  $B \neq 0$  mágneses tér hatására.



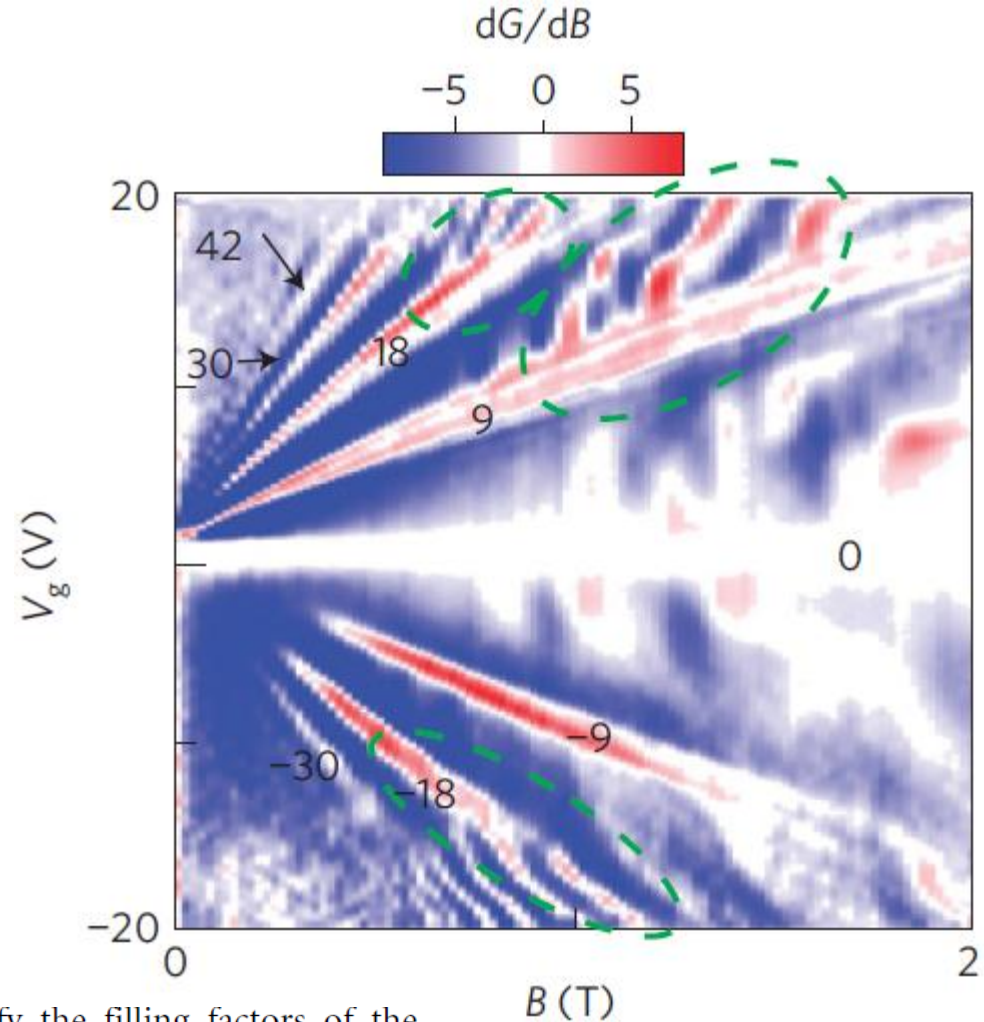


- Az ellenállás a Dirac-pontban (T-függő)
- SdH oszcillációk  $B=0.2\text{T}$ -ről.



## r-TLG:

- $dG/dB(B, V_g)$ : differenciális vezetőképesség
- Látszódnak az oszcillációk
- A vezetőképesség csúcsokból azonosítottak a QH platókat.



we use conductance peaks to identify the filling factors of the QH plateaux<sup>33</sup>, which are determined from their slopes in the  $V_g - B$  plane:  $\nu = nh/Be = \alpha V_g h/Be$ , where  $\alpha$ , the gate coupling efficiency, is estimated to be  $2.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ V}^{-1}$  from geometrical considerations as well as the periods of SdH oscillations<sup>32</sup>. Using this relation, the features in Fig. 4b are determined to correspond to  $\nu = -30 \pm 1.2$ ,  $-18 \pm 1$ ,  $-9.3 \pm 0.5$ ,  $0$ ,  $9 \pm 0.5$ ,  $18 \pm 1$ ,  $30 \pm 1.2$  and  $42 \pm 2$ , respectively, as indicated on the figure.

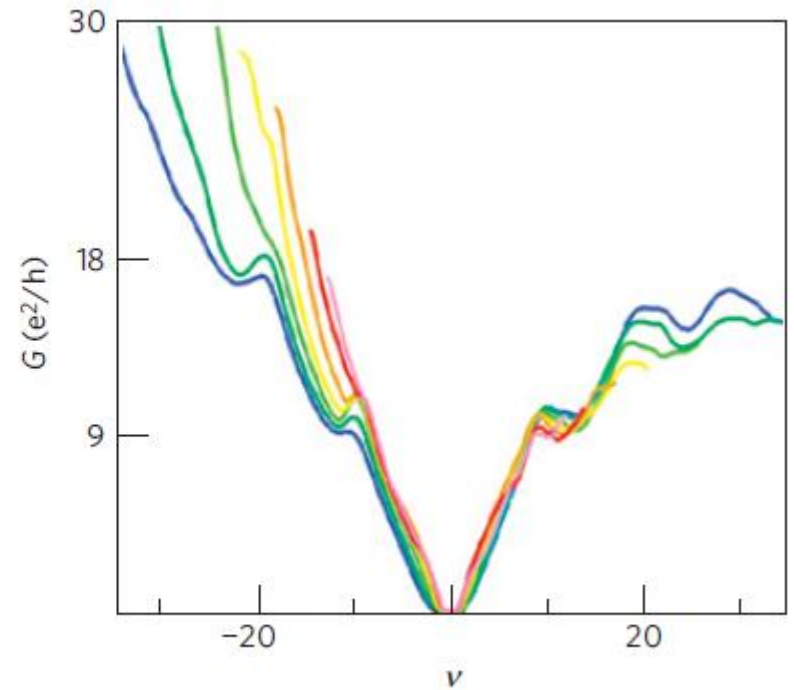
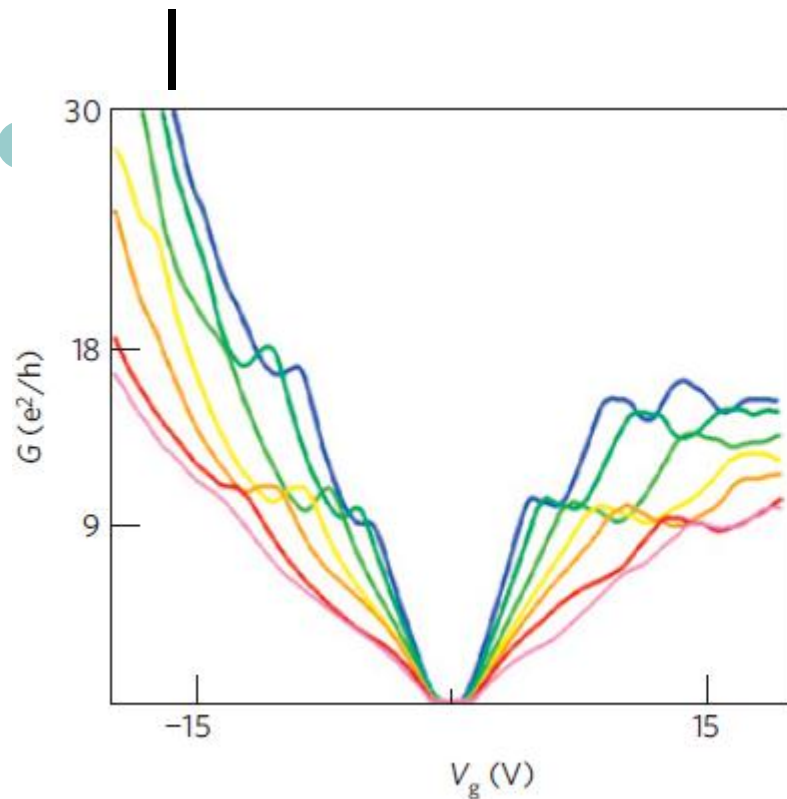
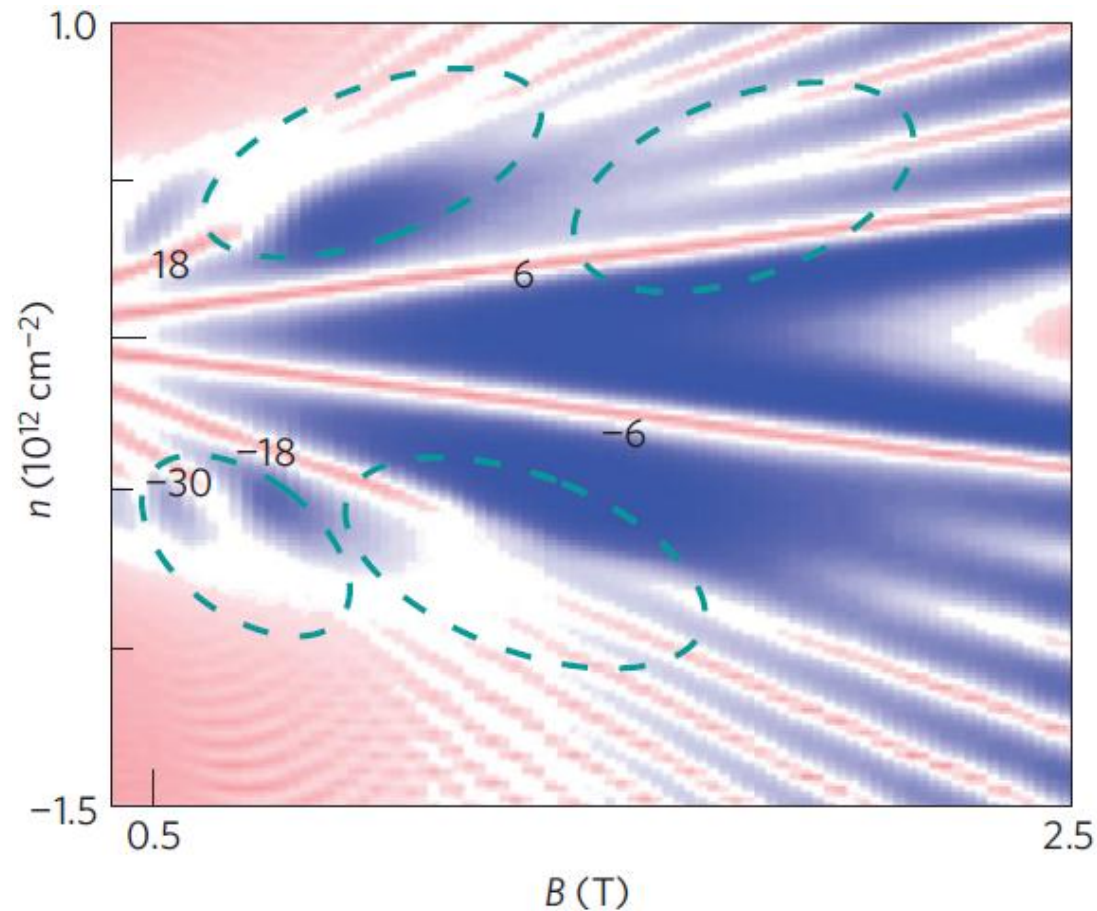
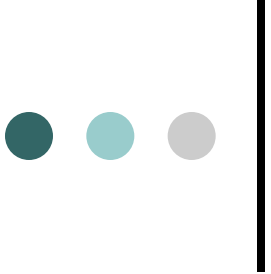
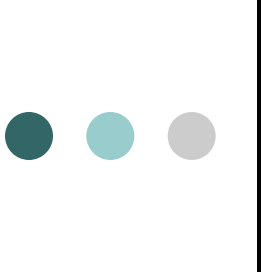


Figure 4c plots the device conductance  $G$  in units of  $e^2/h$  as functions of  $V_g$  taken at different values of  $B$ ; when plotted against  $\nu$ , the seven curves almost collapse into one, with plateaux at  $\sim \pm 9$  and  $-18$ , respectively (Fig. 4d). We note that the conductance values approximately agree with the filling factors.



- Érdekesség: bizonyos platók, amik alacsony B-nél feltűnnek, magasabb B alkalmazásánál váratlanul eltűnnek.
- Illetve 3 részre felhasadó ágak is megjelennek.
- Ez a 3-szorosán degenerált QH plató újdonság.

- 
- Ezek a felhasadások a Lifshitz átmenet jelei: a Fermi felület topológiai változása az elektron sűrűség, ill. a húzófeszültség hatására.
  - MLG esetében előidézheti trigonal warping: 3 pocketre hasad fel a Fermi felület, ami háromszorosan degenerált LL-hez vezet.
  - Ezek magas  $B$ , ill.  $n$  esetében felhasadnak (ilyenkor egyesülnek a pocketek.)

- 
- A megfigyelt splitting  $|V_g| \sim 15V$ -nál figyelhető meg  $B \sim 1T$  mellett.
  - Ez kb. 60%-a az elméleti értéknek.
  - Semi-kvantitatíve egyezik az elméleti modellel: ami bulk grafit paramétereit használ.
  - r-TLG:
    - Spontán gap
    - $\nu=0$  szigetelő QH állapot
    - Lifshitz átmenet trigonal warping miatt



**Köszönöm a figyelmet!**