

# Az atommag és alkotói „nagyító alatt”

Mit mutatnak a szórás kísérletek a szerkezetről?

Szanyi István

# Az anyag atomos felépítése

# Az anyag atomos felépítése

- ▶ ősi törekvés az anyag végső alkotóelemeinek a megismerésére

# Az anyag atomos felépítése

- ▶ ősi törekvés az anyag végső alkotóelemeinek a megismerésére
- ▶ ókori gondolkodók: Thalész, Hérakleitosz, Empedoklész, Démokritosz, ...



# Az anyag atomos felépítése

- ▶ ősi törekvés az anyag végső alkotóelemeinek a megismerésére
- ▶ ókori gondolkodók: Thalész, Hérakleitosz, Empedoklész, Démokritosz, ...

*Semmi más nem létezik, csak az atomok és az  
üres tér. Minden egyéb puszta vélekedés.*

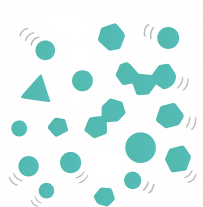
Démokritosz

# Az anyag atomos felépítése

- ▶ ősi törekvés az anyag végső alkotóelemeinek a megismerésére
- ▶ ókori gondolkodók: Thalész, Hérakleitosz, Empedoklész, Démokritosz, ...

*Semmi más nem létezik, csak az atomok és az  
üres tér. Minden egyéb puszta vélekedés.*

Démokritosz



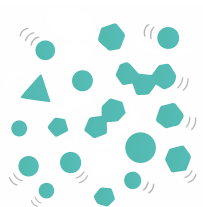
# Az anyag atomos felépítése

- ▶ ősi törekvés az anyag végső alkotóelemeinek a megismerésére
- ▶ ókori gondolkodók: Thalész, Hérakleitosz, Empedoklész, Démokritosz, ...

*Semmi más nem létezik, csak az atomok és az  
üres tér. Minden egyéb puszta vélekedés.*

Démokritosz

- ▶ tudomány a 19. század végén:



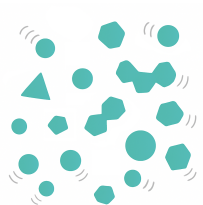
# Az anyag atomos felépítése

- ▶ ősi törekvés az anyag végső alkotóelemeinek a megismerésére
- ▶ ókori gondolkodók: Thalész, Hérakleitosz, Empedoklész, Démokritosz, ...

*Semmi más nem létezik, csak az atomok és az  
üres tér. Minden egyéb puszta vélekedés.*

Démokritosz

- ▶ tudomány a 19. század végén:
  - ▶ az anyag a kémiai elemek atomjaiból épül fel



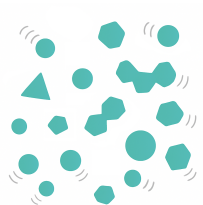
# Az anyag atomos felépítése

- ▶ ősi törekvés az anyag végső alkotóelemeinek a megismerésére
- ▶ ókori gondolkodók: Thalész, Hérakleitosz, Empedoklész, Démokritosz, ...

*Semmi más nem létezik, csak az atomok és az üres tér. Minden egyéb pusztá vélekedés.*

Démokritosz

- ▶ tudomány a 19. század végén:
  - ▶ az anyag a kémiai elemek atomjaiból épül fel
  - ▶ van periódusos rendszer, ismertek az atomtömegek



# Az anyag atomos felépítése

► ősi tö

► ókori

Sem  
üres

► tudor

► a

► v

## Periodische Gesetzmässigkeit der Elemente nach Mendelejeff.

| Reihen | Gruppe I<br>$R^2 O$ | Gruppe II<br>$RO$ | Gruppe III<br>$R^2 O^3$ | Gruppe IV<br>$RH^4$<br>$RO^2$ | Gruppe V<br>$RH^3$<br>$R^2 O^5$ | Gruppe VI<br>$RH^2$<br>$RO^3$ | Gruppe VII<br>$RH$<br>$R^2 O^7$ | Gruppe VIII<br>$RO^4$               |
|--------|---------------------|-------------------|-------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| 1      | H=1                 |                   |                         |                               |                                 |                               |                                 |                                     |
| 2      | Li=7                | Be=9,4            | B=11                    | C=12                          | N=14                            | O=16                          | F=19                            |                                     |
| 3      | Na=23               | Mg=24             | Al=27,3                 | Si=28                         | P=31                            | S=32                          | Cl=35,5                         |                                     |
| 4      | K=39                | Ca=40             | Sc=44                   | Ti=48                         | V=51                            | Cr=52                         | Mn=55                           | Fe=56, Co=59<br>Ni=59, Cu=63        |
| 5      | (Cu=63)             | Zn=65             | Ga=68                   | --72                          | As=75                           | Se=79                         | Br=80                           |                                     |
| 6      | Rb=85               | Sr=87             | Yt=88                   | Zr=90                         | Nb=94                           | Mo=96                         | --100                           | Ru=104, Rh=104<br>Pd=106, Ag=108    |
| 7      | (Ag=108)            | Cd=112            | In=113                  | Sn=118                        | Sb=122                          | Te=125                        | J=127                           |                                     |
| 8      | Cs=133              | Ba=137            | Ce=137                  | La=139                        | --                              | Di=145?                       | --                              | -- -- -- --                         |
| 9      | (-)                 | --                | --                      | --                            | --                              | --                            | --                              |                                     |
| 10     | -- 165              | -- 169            | Er=170                  | --173                         | Ta=182                          | W=184                         | --                              | Pt=194, Os=195(?)<br>Ir=193, Au=196 |
| 11     | (Au=196)            | Hg=200            | Tl=204                  | Pb=208                        | Bi=210                          | --                            | --                              |                                     |
| 12     | --                  | --                | --                      | Th=231                        | --                              | U=240                         | --                              | -- -- -- --                         |

1885

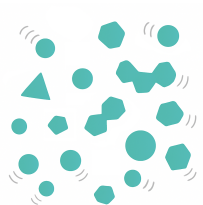
# Az anyag atomos felépítése

- ▶ ősi törekvés az anyag végső alkotóelemeinek a megismerésére
- ▶ ókori gondolkodók: Thalész, Hérakleitosz, Empedoklész, Démokritosz, ...

*Semmi más nem létezik, csak az atomok és az üres tér. Minden egyéb puszta vélekedés.*

Démokritosz

- ▶ tudomány a 19. század végén:
  - ▶ az anyag a kémiai elemek atomjaiból épül fel
  - ▶ van periódusos rendszer, ismertek az atomtömegek
  - ▶ ismert az elektromos, a mágneses és a gravitációs kölcsönhatás



# Az anyag atomos felépítése

- ▶ ősi törekvés az anyag végső alkotóelemeinek a megismerésére
- ▶ ókori gondolkodók: Thalész, Hérakleitosz, Empedoklész, Démokritosz, ...

*Semmi más nem létezik, csak az atomok és az üres tér. Minden egyéb puszta vélekedés.*

Démokritosz



- ▶ tudomány a 19. század végén:
  - ▶ az anyag a kémiai elemek atomjaiból épül fel
  - ▶ van periódusos rendszer, ismertek az atomtömegek
  - ▶ ismert az elektromos, a mágneses és a gravitációs kölcsönhatás
  - ▶ sugárzások is ismertek: fény, katódsugárzás, röntgensugárzás, radioaktív  $\alpha$ - és  $\beta$ -sugárzás (1900-ban már a  $\gamma$ -sugárzás is)



# Az első elképzelés az atom felépítéséről

# Az első elképzelés az atom felépítéséről

- ▶ J. J. Thomson 1897-ben felfedezi az **elektront**: a katódsugárzás részecskéjét és minden elem atomjának alkotórészét

# Az első elképzelés az atom felépítéséről

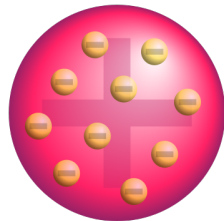
- ▶ J. J. Thomson 1897-ben felfedezi az **elektront**: a katódsugárzás részecskéjét és minden elem atomjának alkotórészét
- ▶ az atom már nem oszthatatlan

# Az első elképzelés az atom felépítéséről

- ▶ J. J. Thomson 1897-ben felfedezi az **elektront**: a katódsugárzás részecskéjét és minden elem atomjának alkotórészét
- ▶ az atom már nem oszthatatlan
- ▶ **Thomson-féle atommodell (1904)**: folytonos eloszlású pozitív töltésű rész és benne pontszerű, negatív töltésű elektronok

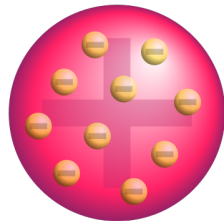
# Az első elképzelés az atom felépítéséről

- ▶ J. J. Thomson 1897-ben felfedezi az **elektront**: a katódsugárzás részecskéjét és minden elem atomjának alkotórészét
- ▶ az atom már nem oszthatatlan
- ▶ **Thomson-féle atommodell (1904)**: folytonos eloszlású pozitív töltésű rész és benne pontszerű, negatív töltésű elektronok



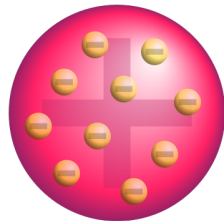
# Az első elképzelés az atom felépítéséről

- ▶ J. J. Thomson 1897-ben felfedezi az **elektront**: a katódsugárzás részecskéjét és minden elem atomjának alkotórészét
- ▶ az atom már nem oszthatatlan
- ▶ **Thomson-féle atommodell (1904)**: folytonos eloszlású pozitív töltésű rész és benne pontszerű, negatív töltésű elektronok
- ▶ az elektronok nyugalomban vannak vagy meghatározott pályákon keringenek



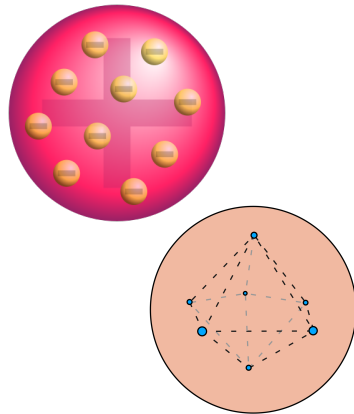
# Az első elképzelés az atom felépítéséről

- ▶ J. J. Thomson 1897-ben felfedezi az **elektront**: a katódsugárzás részecskéjét és minden elem atomjának alkotórészét
- ▶ az atom már nem oszthatatlan
- ▶ **Thomson-féle atommodell (1904)**: folytonos eloszlású pozitív töltésű rész és benne pontszerű, negatív töltésű elektronok
- ▶ az elektronok nyugalomban vannak vagy meghatározott pályákon keringenek
- ▶ vannak stabil elektronelrendeződések



# Az első elképzelés az atom felépítéséről

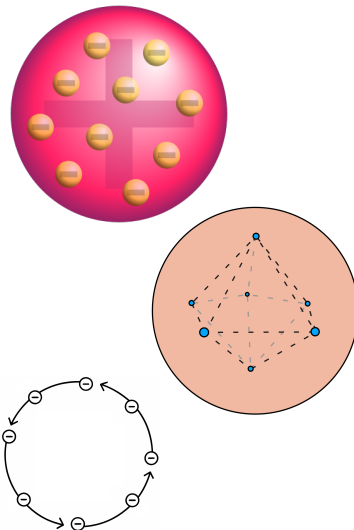
- ▶ J. J. Thomson 1897-ben felfedezi az **elektront**: a katódsugárzás részecskéjét és minden elem atomjának alkotórészét
- ▶ az atom már nem oszthatatlan
- ▶ **Thomson-féle atommodell (1904)**: folytonos eloszlású pozitív töltésű rész és benne pontszerű, negatív töltésű elektronok
- ▶ az elektronok nyugalomban vannak vagy meghatározott pályákon keringenek
- ▶ vannak stabil elektronelrendeződések





# Az első elképzelés az atom felépítéséről

- ▶ J. J. Thomson 1897-ben felfedezi az **elektront**: a katódsugárzás részecskéjét és minden elem atomjának alkotórészét
- ▶ az atom már nem oszthatatlan
- ▶ **Thomson-féle atommodell (1904)**: folytonos eloszlású pozitív töltésű rész és benne pontszerű, negatív töltésű elektronok
- ▶ az elektronok nyugalomban vannak vagy meghatározott pályákon keringenek
- ▶ vannak stabil elektronelrendeződések



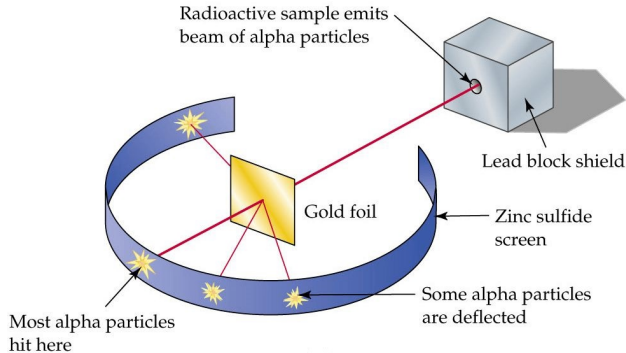
# Az atommag felfedezése

# Az atommag felfedezése

- ▶ Hans Geiger és Ernest Marsden kísérletet végeznek Ernest Rutherford ötlete alapján (1909)

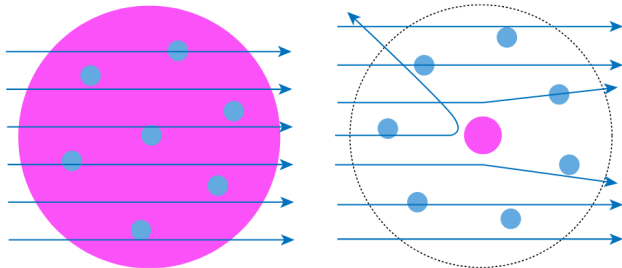
# Az atommag felfedezése

- ▶ Hans Geiger és Ernest Marsden kísérletet végeznek Ernest Rutherford ötlete alapján (1909)



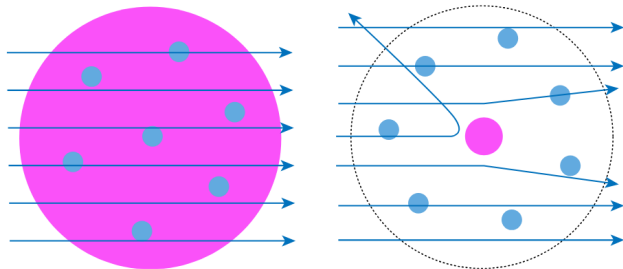
# Az atommag felfedezése

- ▶ Hans Geiger és Ernest Marsden kísérletet végeznek Ernest Rutherford ötlete alapján (1909)



# Az atommag felfedezése

- ▶ Hans Geiger és Ernest Marsden kísérletet végeznek Ernest Rutherford ötlete alapján (1909)



- ▶ az atom tömegének szinte teljes egésze egy kis méretű, pozitív töltésű részbe koncentrálódik, az atommagba (Rutherford, 1911; végső kísérleti megerősítés 1913-ban)

# Atommodellek a mag felfedezését követően

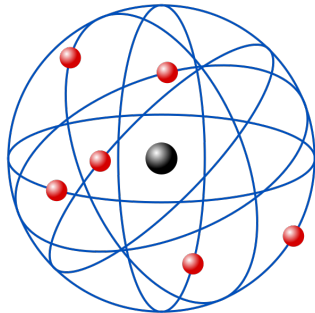
# Atommodellek a mag felfedezését követően

- ▶ **Rutherford-modell (1911)**: az elektron kering a mag körül



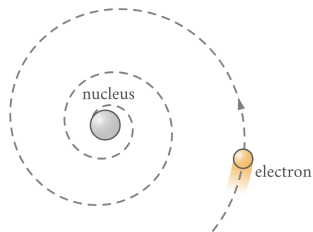
# Atommodellek a mag felfedezését követően

- ▶ **Rutherford-modell (1911):** az elektron kering a mag körül



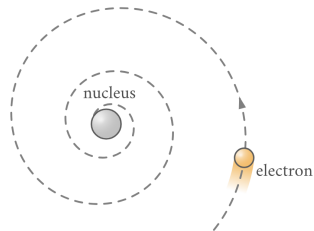
# Atommodellek a mag felfedezését követően

- ▶ **Rutherford-modell (1911):** az elektron kering a mag körül



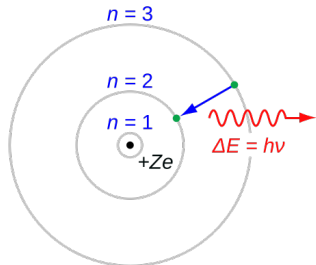
# Atommodellek a mag felfedezését követően

- ▶ **Rutherford-modell (1911)**: az elektron kering a mag körül
- ▶ **Bohr-modell (1913)**: csak bizonyos megengedett kör alakú elektronpályák



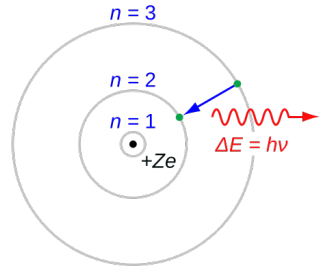
# Atommodellek a mag felfedezését követően

- ▶ **Rutherford-modell (1911)**: az elektron kering a mag körül
- ▶ **Bohr-modell (1913)**: csak bizonyos megengedett kör alakú elektronpályák



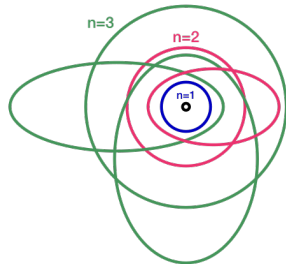
# Atommodellek a mag felfedezését követően

- ▶ **Rutherford-modell (1911)**: az elektron kering a mag körül
- ▶ **Bohr-modell (1913)**: csak bizonyos megengedett kör alakú elektronpályák
- ▶ **Bohr–Sommerfeld-modell**: ellipszis alakú elektronpályák



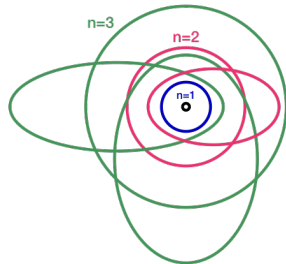
# Atommodellek a mag felfedezését követően

- ▶ **Rutherford-modell (1911):** az elektron kering a mag körül
- ▶ **Bohr-modell (1913):** csak bizonyos megengedett kör alakú elektronpályák
- ▶ **Bohr–Sommerfeld-modell:** ellipszis alakú elektronpályák



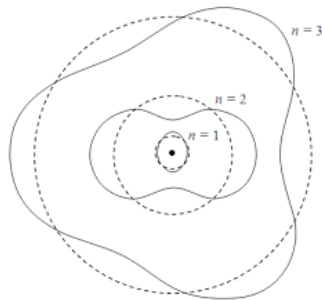
# Atommodellek a mag felfedezését követően

- ▶ **Rutherford-modell (1911):** az elektron kering a mag körül
- ▶ **Bohr-modell (1913):** csak bizonyos megengedett kör alakú elektronpályák
- ▶ **Bohr–Sommerfeld-modell:** ellipszis alakú elektronpályák
- ▶ **Bohr–de Broglie-modell (1924):** minden részecske hullámtermészetet mutat, csak olyan elektronpályák, ahol az elektron mint állóhullám létezhet



# Atommodellek a mag felfedezését követően

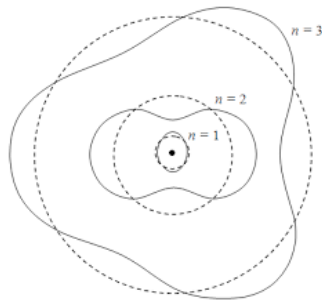
- ▶ **Rutherford-modell (1911):** az elektron kering a mag körül
- ▶ **Bohr-modell (1913):** csak bizonyos megengedett kör alakú elektronpályák
- ▶ **Bohr–Sommerfeld-modell:** ellipszis alakú elektronpályák
- ▶ **Bohr–de Broglie-modell (1924):** minden részecske hullámtermészetet mutat, csak olyan elektronpályák, ahol az elektron mint állóhullám létezhet





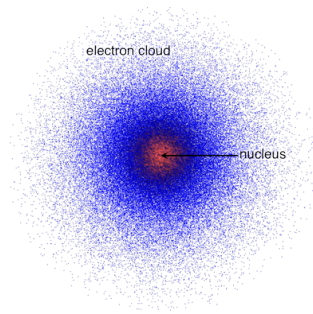
# Atommodellek a mag felfedezését követően

- ▶ **Rutherford-modell (1911):** az elektron kering a mag körül
- ▶ **Bohr-modell (1913):** csak bizonyos megengedett kör alakú elektronpályák
- ▶ **Bohr–Sommerfeld-modell:** ellipszis alakú elektronpályák
- ▶ **Bohr–de Broglie-modell (1924):** minden részecske hullámtermészetet mutat, csak olyan elektronpályák, ahol az elektron mint állóhullám létezhet
- ▶ **kvantummechanikai modell (1926):** az elektron csak egy bizonyos valószínűséggel tartózkodik valahol az atommag körül



# Atommodellek a mag felfedezését követően

- ▶ **Rutherford-modell (1911):** az elektron kering a mag körül
- ▶ **Bohr-modell (1913):** csak bizonyos megengedett kör alakú elektronpályák
- ▶ **Bohr–Sommerfeld-modell:** ellipszis alakú elektronpályák
- ▶ **Bohr–de Broglie-modell (1924):** minden részecske hullámtermészetet mutat, csak olyan elektronpályák, ahol az elektron mint állóhullám létezhet
- ▶ **kvantummechanikai modell (1926):** az elektron csak egy bizonyos valószínűséggel tartózkodik valahol az atommag körül



# Mi van az atommagban?

# Mi van az atommagban?

- ▶ a pozitív töltésű proton felfedezése  
(Rutherford, 1919)

# Mi van az atommagban?

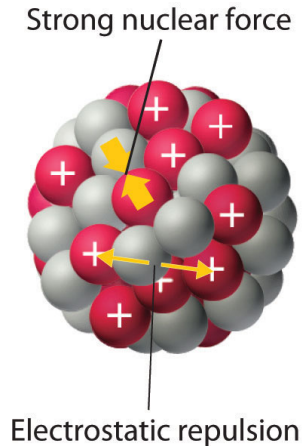
- ▶ a pozitív töltésű proton felfedezése (Rutherford, 1919)
- ▶ az elektromosan semleges neutron felfedezése (James Chadwick, 1932)

# Mi van az atommagban?

- ▶ a pozitív töltésű proton felfedezése (Rutherford, 1919)
- ▶ az elektromosan semleges neutron felfedezése (James Chadwick, 1932)
- ▶ a nukleon és az atommag proton-neutron modellje (Werner Heisenberg, Dmitri Ivanenko, 1932)

# Mi van az atommagban?

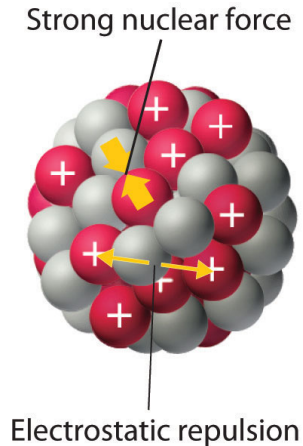
- ▶ a pozitív töltésű proton felfedezése (Rutherford, 1919)
- ▶ az elektromosan semleges neutron felfedezése (James Chadwick, 1932)
- ▶ a nukleon és az atommag proton-neutron modellje (Werner Heisenberg, Dmitri Ivanenko, 1932)



# Mi van az atommagban?

- ▶ a pozitív töltésű proton felfedezése (Rutherford, 1919)
- ▶ az elektromosan semleges neutron felfedezése (James Chadwick, 1932)
- ▶ a nukleon és az atommag proton-neutron modellje (Werner Heisenberg, Dmitri Ivanenko, 1932)
- ▶ egy új kölcsönhatás: kis hatótávolságú erős magerő

$$d \sim 10^{-15} \text{ m} = 1 \text{ fm}$$





# A látás mechanizmusa

# A látás mechanizmusa

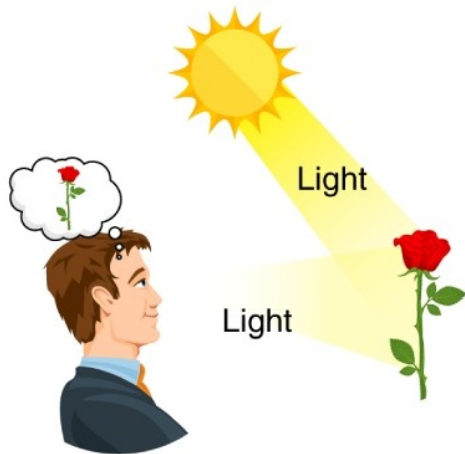
- ▶ az atommagot és alkotóit hasonló módon „láthatjuk”, mint bármi más

# A látás mechanizmusa

- ▶ az atommagot és alkotóit hasonló módon „láthatjuk”, mint bármi mást
- ▶ a fény szóródik a megfigyelt tárgyon és a szembe jut

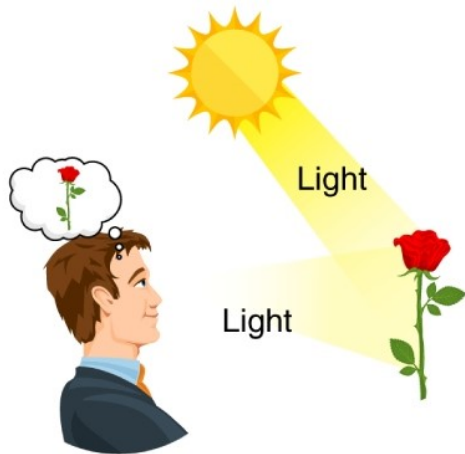
# A látás mechanizmusa

- ▶ az atommagot és alkotóit hasonló módon „láthatjuk”, mint bármi mást
- ▶ a fény szóródik a megfigyelt tárgyon és a szembe jut



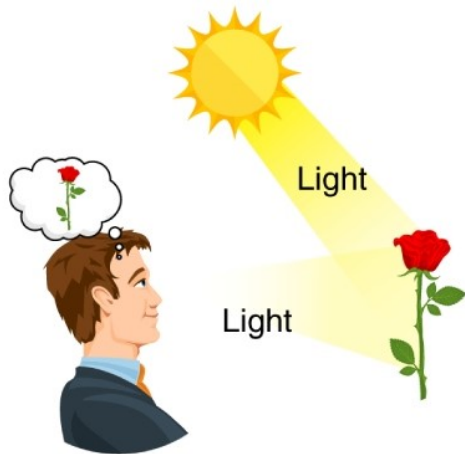
# A látás mechanizmusa

- ▶ az atommagot és alkotóit hasonló módon „láthatjuk”, mint bármi mást
- ▶ a fény szóródik a megfigyelt tárgyon és a szembe jut
- ▶ a szem érzékelő idegsejtjei a fényben kódolt információt az agyba juttatják



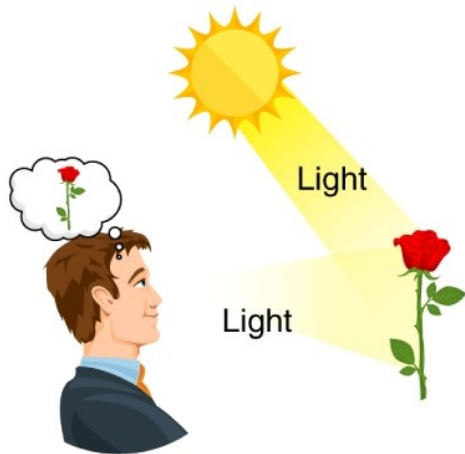
# A látás mechanizmusa

- ▶ az atommagot és alkotóit hasonló módon „láthatjuk”, mint bármi más
- ▶ a fény szóródik a megfigyelt tárgyon és a szembe jut
- ▶ a szem érzékelő idegsejtjei a fényben kódolt információt az agyba juttatják
- ▶ az agy előállítja a tárgy képét



# A látás mechanizmusa

- ▶ az atommagot és alkotóit hasonló módon „láthatjuk”, mint bármi más
- ▶ a fény szóródik a megfigyelt tárgyon és a szembe jut
- ▶ a szem érzékelő idegsejtjei a fényben kódolt információt az agyba juttatják
- ▶ az agy előállítja a tárgy képét
- ▶ a fény elektromágneses hullám és egyben fényrészecskék (fotonok) áradata



# Az elektromágneses hullámok szabta korlátok



# Az elektromágneses hullámok szabta korlátok

- ▶ kis méretek vizsgálatához nagy nagyítású „mikroszkóp” kell

# Az elektromágneses hullámok szabta korlátok

- ▶ kis méretek vizsgálatához nagy nagyítású „mikroszkóp” kell
- ▶ felbontás: a legkisebb  $d$  távolság, amelynél két pont még külön látható

$$d \sim \lambda, \text{ ahol } \lambda \text{ a hullámhossz}$$

# Az elektromágneses hullámok szabta korlátok

- ▶ kis méretek vizsgálatához nagy nagyítású „mikroszkóp” kell
- ▶ felbontás: a legkisebb  $d$  távolság, amelynél két pont még külön látható

$$d \sim \lambda, \text{ ahol } \lambda \text{ a hullámhossz}$$

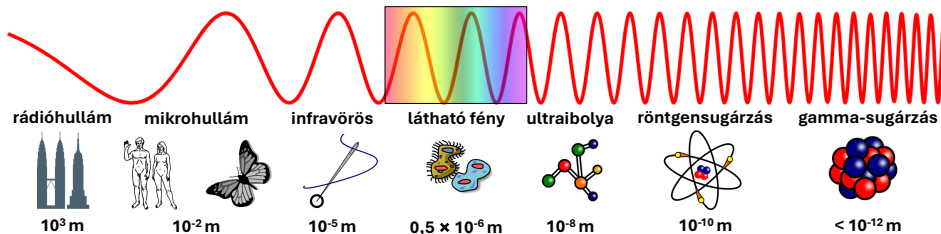
- ▶ látható fény:  $380 \text{ nm} \leq \lambda \leq 750 \text{ nm} \rightarrow$  van egy természetes korlát

# Az elektromágneses hullámok szabta korlátok

- ▶ kis méretek vizsgálatához nagy nagyítású „mikroszkóp” kell
- ▶ felbontás: a legkisebb  $d$  távolság, amelynél két pont még külön látható

$$d \sim \lambda, \text{ ahol } \lambda \text{ a hullámhossz}$$

- ▶ látható fény:  $380 \text{ nm} \leq \lambda \leq 750 \text{ nm} \rightarrow$  van egy természetes korlát

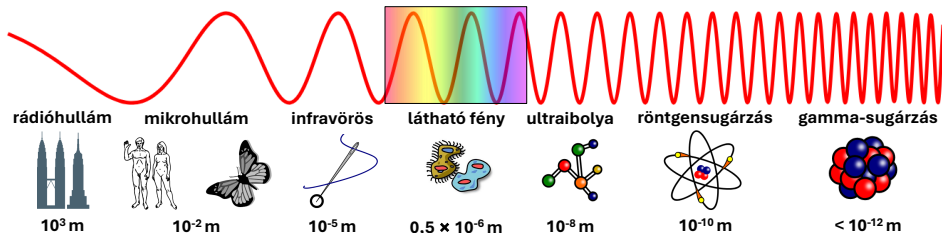


# Az elektromágneses hullámok szabta korlátok

- ▶ kis méretek vizsgálatához nagy nagyítású „mikroszkóp” kell
- ▶ felbontás: a legkisebb  $d$  távolság, amelynél két pont még külön látható

$$d \sim \lambda, \text{ ahol } \lambda \text{ a hullámhossz}$$

- ▶ látható fény:  $380 \text{ nm} \leq \lambda \leq 750 \text{ nm} \rightarrow$  van egy természetes korlát



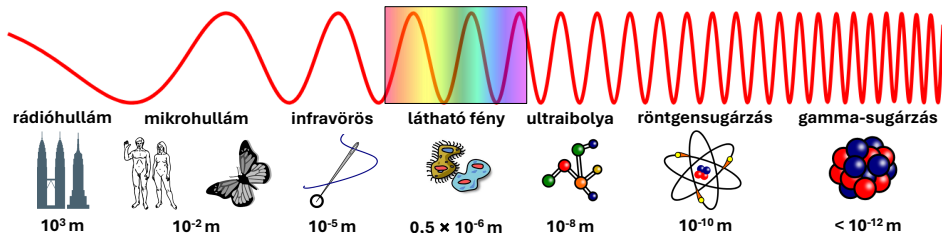
- ▶ röntgendiffrakció: „látható” a kristályos anyagok belső szerkezete, atomrácsa

# Az elektromágneses hullámok szabta korlátok

- ▶ kis méretek vizsgálatához nagy nagyítású „mikroszkóp” kell
- ▶ felbontás: a legkisebb  $d$  távolság, amelynél két pont még külön látható

$$d \sim \lambda, \text{ ahol } \lambda \text{ a hullámhossz}$$

- ▶ látható fény:  $380 \text{ nm} \leq \lambda \leq 750 \text{ nm} \rightarrow$  van egy természetes korlát



- ▶ röntgendifrakció: „látható” a kristályos anyagok belső szerkezete, atomrácsa
- ▶ a (valós) gamma-fotonok nyalábja nem praktikus az atommag és alkotóinak vizsgálatára (pl. bonyolult kölcsönhatás: kevésbé tiszta, hogy mit is látunk)

# Hogyan „láthatjuk” az atommagot és alkotóit?

# Hogyan „láthatjuk” az atommagot és alkotóit?

- ▶ elektromágneses hullámok helyett részecskenyalábok



# Hogyan „láthatjuk” az atommagot és alkotóit?

- ▶ elektromágneses hullámok helyett részecskenyalábok
- ▶ de Broglie (1924): minden részecske viselkedhet hullámként (anyaghullám)

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad \rightarrow \quad \lambda \sim \frac{1}{E}$$

$h$  – Planck állandó,  $p$  – a részecske impulzusa,  $E$  – az energiája

# Hogyan „láthatjuk” az atommagot és alkotóit?

- ▶ elektromágneses hullámok helyett részecskenyalábok
- ▶ de Broglie (1924): minden részecske viselkedhet hullámként (anyaghullám)

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad \rightarrow \quad \lambda \sim \frac{1}{E}$$

$h$  – Planck állandó,  $p$  – a részecske impulzusa,  $E$  – az energiája

- ▶ a finomabb szerkezetek feltárásához egyre nagyobb energia kell!

# Hogyan „láthatjuk” az atommagot és alkotóit?

- ▶ elektromágneses hullámok helyett részecskenyalábok
- ▶ de Broglie (1924): **minden részecske viselkedhet hullámként** (anyaghullám)

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad \rightarrow \quad \lambda \sim \frac{1}{E}$$

$h$  – Planck állandó,  $p$  – a részecske impulzusa,  $E$  – az energiája

- ▶ **a finomabb szerkezetek feltárásához egyre nagyobb energia kell!**
- ▶ az energiát mérhetjük elektronvoltban:  $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$

# Hogyan „láthatjuk” az atommagot és alkotóit?

- ▶ elektromágneses hullámok helyett részecskenyalábok
- ▶ de Broglie (1924): **minden részecske viselkedhet hullámként** (anyag hullám)

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad \rightarrow \quad \lambda \sim \frac{1}{E}$$

$h$  – Planck állandó,  $p$  – a részecske impulzusa,  $E$  – az energiája

- ▶ **a finomabb szerkezetek feltárásához egyre nagyobb energia kell!**
- ▶ az energiát mérhetjük elektronvoltban:  $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$

| eszköz              | vizsgáló részecske          | felbontás                 |
|---------------------|-----------------------------|---------------------------|
| mikroszkóp          | látható fény fotonja (3 eV) | 200 nm                    |
| elektron-mikroszkóp | elektron (100 keV)          | $10^{-10} \text{ m}$      |
| radioaktív elem     | $\alpha$ -részecske (5 MeV) | $10^{-15} \text{ m (fm)}$ |
| gyorsítók           | elektron (200 GeV)          | $10^{-18} \text{ m}$      |
|                     | proton (13,6 TeV)           | $10^{-19} \text{ m}$      |

„Látás” szóráskíslettel

# „Látás” szórás kísérlettel

- ▶ „fény”: részecskék nyalábja

# „Látás” szórás kísérlettel

- ▶ „fény”: részecskék nyalábja
- ▶ tárgy: az anyag atomjai; atommag és alkotói

# „Látás” szórás kísérlettel

- ▶ „fény”: részecskék nyalábja
- ▶ tárgy: az anyag atomjai; atommag és alkotói
- ▶ „szem”: részecskedetektor

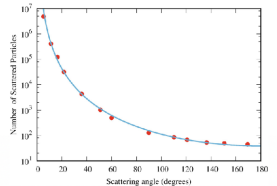
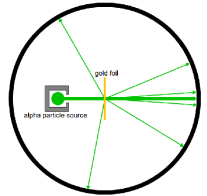
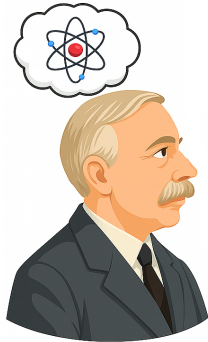


# „Látás” szórás kísérlettel

- ▶ „fény”: részecskék nyalábja
- ▶ tárgy: az anyag atomjai; atommag és alkotói
- ▶ „szem”: részecskedetektor
- ▶ az eredmények feldolgozása, modellalkotás és modelltesztelés

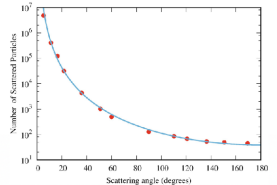
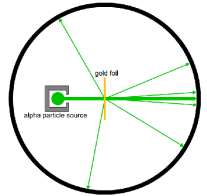
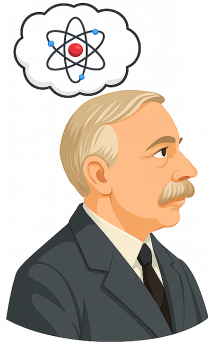
# „Látás” szórás kísérlettel

- ▶ „fény”: részecskék nyalábja
- ▶ tárgy: az anyag atomjai; atommag és alkotói
- ▶ „szem”: részecskedetektor
- ▶ az eredmények feldolgozása, modellalkotás és modelltesztelés



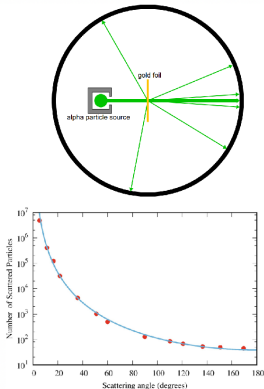
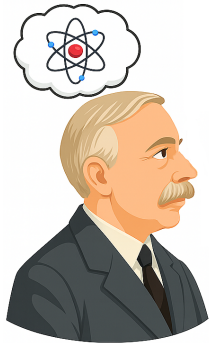
# „Látás” szórás kísérlettel

- ▶ „fény”: részecskék nyalábja
- ▶ tárgy: az anyag atomjai; atommag és alkotói
- ▶ „szem”: részecskedetektor
- ▶ az eredmények feldolgozása, modellalkotás és modelltesztelés
- ▶ a részecskeütközésekből nyert szórási képből következtethető a belső szerkezet



# „Látás” szórás kísérlettel

- ▶ „fény”: részecskék nyalábja
- ▶ tárgy: az anyag atomjai; atommag és alkotói
- ▶ „szem”: részecskedetektor
- ▶ az eredmények feldolgozása, modellalkotás és modelltesztelés
- ▶ a részecskeütközésekből nyert szórási képből következtethető a belső szerkezet
- ▶ számos szórás kísérlet a 20. század első felében  $\alpha$ -részecskékkal, neutronokkal, protonokkal és deuteronnal



# $\alpha$ -szórás és a magok sugara

# $\alpha$ -szórás és a magok sugara

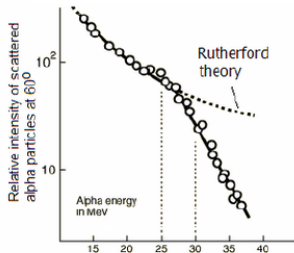
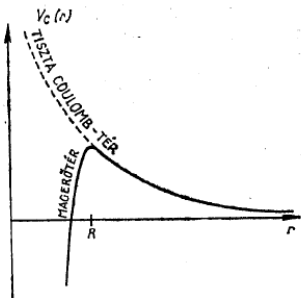
- ▶ anomális  $\alpha$ -szórás

# $\alpha$ -szórás és a magok sugara

- ▶ anomális  $\alpha$ -szórás
- ▶ az  $\alpha$ -részecske behatol a magerőtérbe

# $\alpha$ -szórás és a magok sugara

- ▶ anomális  $\alpha$ -szórás
- ▶ az  $\alpha$ -részecske behatol a magerőtérbe





# $\alpha$ -szórás és a magok sugara

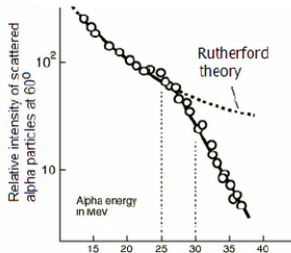
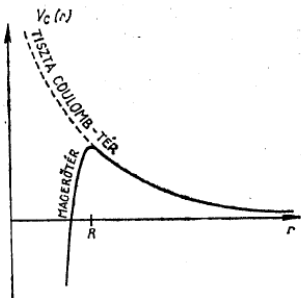
- ▶ anomális  $\alpha$ -szórás
- ▶ az  $\alpha$ -részecske behatol a magerőtérbe
- ▶ a gömb alakúnak feltételezett atommag maganyagának sugara:

$$R = r_0 A^{1/3}, \quad r_0 = (1.4-1.5) \text{ fm}$$

A: tömegszám = protonszám + neutronszám

Dr. Györgyi Géza, Elméleti magfizika (1961)

G. W. Farwell and H. E. Wegner, Phys. Rev. 93, 356 (1954)



# Neutronszórás

# Neutronszóráás

- ▶ nukleáris kölcsönhatás,  $E = 90 \text{ MeV}$   
(elektromos erők nem hatnak)

# Neutronszóráás

- ▶ nukleáris kölcsönhatás,  $E = 90 \text{ MeV}$   
(elektromos erők nem hatnak)
- ▶ az atommag nukleáris sugarának mérése

# Neutronszórás

- ▶ nukleáris kölcsönhatás,  $E = 90 \text{ MeV}$   
(elektromos erők nem hatnak)
- ▶ az atommag nukleáris sugarának mérése
- ▶ a neutronnyaláb anyagon való áthaladása  
során bekövetkező gyengülése alapján

# Neutronszórás

- ▶ nukleáris kölcsönhatás,  $E = 90 \text{ MeV}$   
(elektromos erők nem hatnak)
- ▶ az atommag nukleáris sugarának mérése
- ▶ a neutronnyaláb anyagon való áthaladása  
során bekövetkező gyengülése alapján
- ▶ a gömb alakúnak feltételezett atommag  
maganyagának sugara:

$$R = r_0 A^{1/3}, \quad r_0 = 1,37 \text{ fm}$$

S. Fernbach, R. Serber, T.B. Taylor,  
Phys.Rev. 75 (1949)

# Neutronszórás

- ▶ nukleáris kölcsönhatás,  $E = 90$  MeV (elektromos erők nem hatnak)
- ▶ az atommag nukleáris sugarának mérése
- ▶ a neutronnyaláb anyagon való áthaladása során bekövetkező gyengülése alapján
- ▶ a gömb alakúnak feltételezett atommag maganyagának sugara:

$$R = r_0 A^{1/3}, \quad r_0 = 1,37 \text{ fm}$$

S. Fernbach, R. Serber, T.B. Taylor,  
Phys.Rev. 75 (1949)

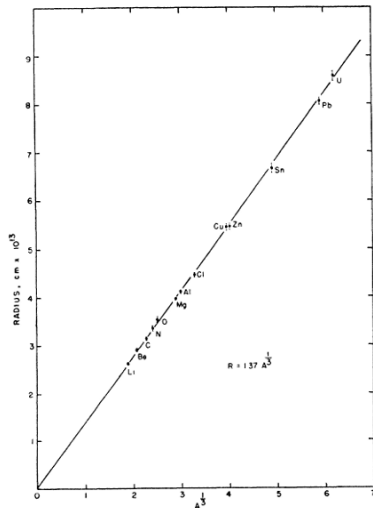


FIG. 2. Nuclear radii deduced from the total cross section measurements of Cook, McMillan, Peterson, and Sewell, plotted against the cube roots of the mass numbers. The straight line is  $R = 1.37 A^{1/3} \times 10^{-13}$  cm.

# Elektronszórás: a magok töltéseloszlása

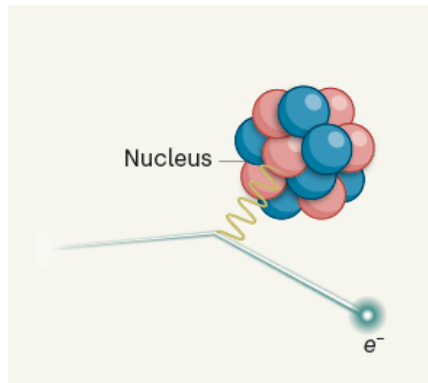


# Elektronszórás: a magok töltéseloszlása

- ▶ a mag szerkezetének kitapogatása az elektromos kölcsönhatás segítségével

# Elektronszórás: a magok töltéseloszlása

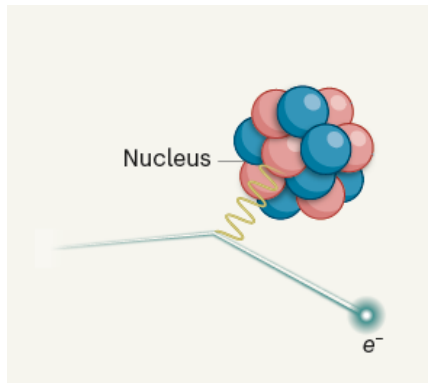
- ▶ a mag szerkezetének kitapogtatása az elektromos kölcsönhatás segítségével



$$153 \text{ MeV} \leq E_{e^-} \leq 1000 \text{ MeV}$$

# Elektronszórás: a magok töltéseloszlása

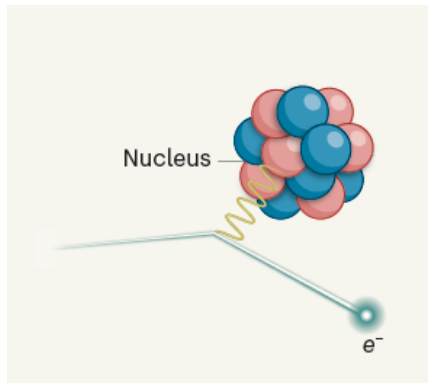
- ▶ a mag szerkezetének kitapogatása az elektromos kölcsönhatás segítségével
- ▶ kísérletek R. Hofstadter vezetésével (Stanford), első eredmények 1953-ban



$$153 \text{ MeV} \leq E_{e^-} \leq 1000 \text{ MeV}$$

# Elektronszórás: a magok töltéseloszlása

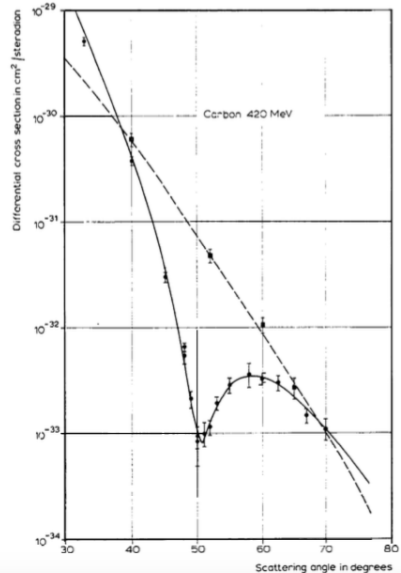
- ▶ a mag szerkezetének kitapogatása az elektromos kölcsönhatás segítségével
- ▶ kísérletek R. Hofstadter vezetésével (Stanford), első eredmények 1953-ban
- ▶ rugalmasan ütköző elektronok szögeloszlása → magon belüli töltéseloszlást leíró sűrűségfüggvény



$$153 \text{ MeV} \leq E_{e^-} \leq 1000 \text{ MeV}$$

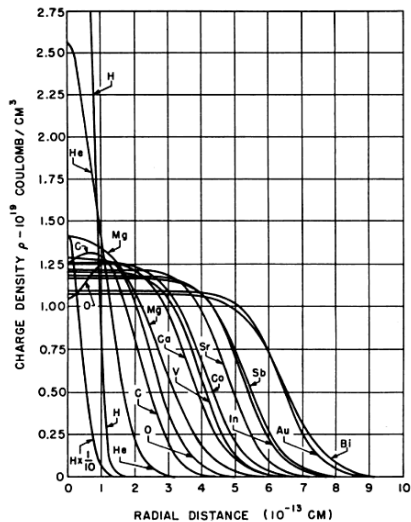
# Elektronszórás: a magok töltéseloszlása

- ▶ a mag szerkezetének kitapogatása az elektromos kölcsönhatás segítségével
- ▶ kísérletek R. Hofstadter vezetésével (Stanford), első eredmények 1953-ban
- ▶ rugalmasan ütköző elektronok szögeloszlása → magon belüli töltéseloszlást leíró sűrűségfüggvény



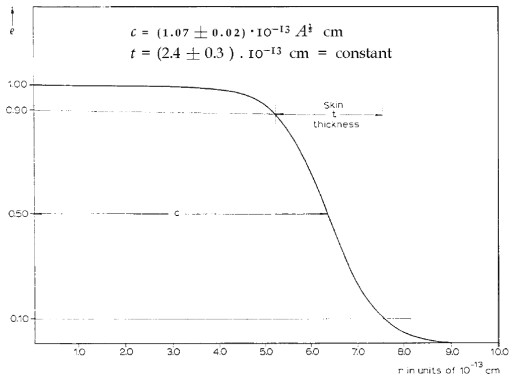
# Elektronszórás: a magok töltéseloszlása

- ▶ a mag szerkezetének kitapogatása az elektromos kölcsönhatás segítségével
- ▶ kísérletek R. Hofstadter vezetésével (Stanford), első eredmények 1953-ban
- ▶ rugalmasan ütköző elektronok szögeloszlása → magon belüli töltéseloszlást leíró sűrűségfüggvény



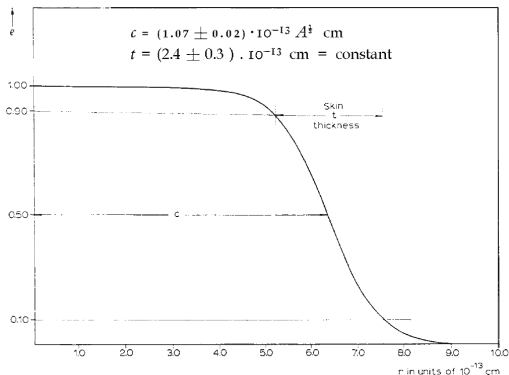
# Elektronszórás: a magok töltéseloszlása

- ▶ a mag szerkezetének kitapogatása az elektromos kölcsönhatás segítségével
- ▶ kísérletek R. Hofstadter vezetésével (Stanford), első eredmények 1953-ban
- ▶ rugalmasan ütköző elektronok szögeloszlása → magon belüli töltéseloszlást leíró sűrűségfüggvény



# Elektronszórás: a magok töltéseloszlása

- ▶ a mag szerkezetének kitapogatása az elektromos kölcsönhatás segítségével
- ▶ kísérletek R. Hofstadter vezetésével (Stanford), első eredmények 1953-ban
- ▶ rugalmasan ütköző elektronok szögeloszlása → magon belüli töltéseloszlást leíró sűrűségfüggvény
- ▶ van egy belső sűrűség ( $c$ ) és egy vékony felületi („bőr”)réteg ( $t$ )



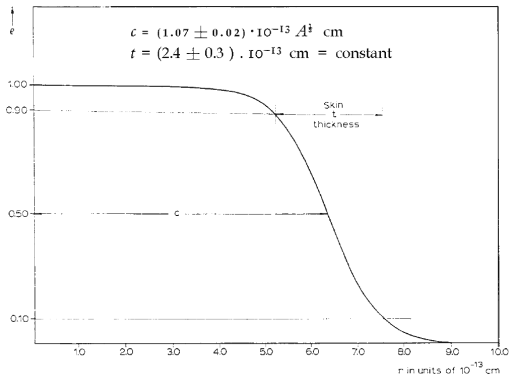


# Elektronszórás: a magok töltéseloszlása

- ▶ a mag szerkezetének kitapogatása az elektromos kölcsönhatás segítségével
- ▶ kísérletek R. Hofstadter vezetésével (Stanford), első eredmények 1953-ban
- ▶ rugalmasan ütköző elektronok szögeloszlása → magon belüli töltéseloszlást leíró sűrűségfüggvény
- ▶ van egy belső sűrűség ( $c$ ) és egy vékony felületi („bőr”) réteg ( $t$ )
- ▶ **első bizonyíték, hogy a proton és a neutron nem pontszerű**

$$\langle r_{p,E} \rangle = (0.75 \pm 0.05) \text{ fm} \quad \langle r_{p,E} \rangle = 0 \text{ fm}$$

$$\langle r_{p,M} \rangle = (0.97 \pm 0.10) \text{ fm} \quad \langle r_{n,M} \rangle = (0.8 \pm 0.1) \text{ fm}$$

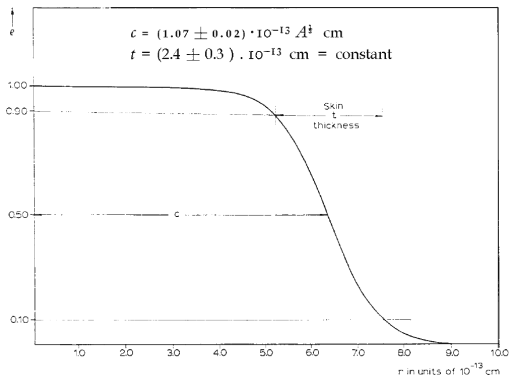


# Elektronszórás: a magok töltéseloszlása

- ▶ a mag szerkezetének kitapogatása az elektromos kölcsönhatás segítségével
- ▶ kísérletek R. Hofstadter vezetésével (Stanford), első eredmények 1953-ban
- ▶ rugalmasan ütköző elektronok szögeloszlása → magon belüli töltéseloszlást leíró sűrűségfüggvény
- ▶ van egy belső sűrűség ( $c$ ) és egy vékony felületi („bőr”) réteg ( $t$ )
- ▶ első bizonyíték, hogy a proton és a neutron nem pontszerű

$$\langle r_{p,E} \rangle = (0.75 \pm 0.05) \text{ fm} \quad \langle r_{p,E} \rangle = 0 \text{ fm}$$

$$\langle r_{p,M} \rangle = (0.97 \pm 0.10) \text{ fm} \quad \langle r_{n,M} \rangle = (0.8 \pm 0.1) \text{ fm}$$



$$\langle r_{p,E} \rangle = 0.879(8) \text{ fm} \text{ [2014]}$$

$$\langle r_{p,E} \rangle = 0.831(14) \text{ fm} \text{ [2019]}$$

# A részecskék „állatkertje” és a Nyolcas Út

# A részecskék „állatkertje” és a Nyolcas Út

- ▶ javaslat a magerő-kvantumok, a mezonok létezésére (Yukawa, 1935)

# A részecskék „állatkertje” és a Nyolcas Út

- ▶ javaslat a magerő-kvantumok, a mezonok létezésére (Yukawa, 1935)
- ▶ 1947: a  $\pi^+$  és  $\pi^-$  mezonok felfedezése

# A részecskék „állatkertje” és a Nyolcas Út

- ▶ javaslat a magerő-kvantumok, a mezonok létezésére (Yukawa, 1935)
- ▶ 1947: a  $\pi^+$  és  $\pi^-$  mezonok felfedezése
- ▶ ezután sok további erősen kölcsönható **hadron** részecske felfedezése

# A részecskék „állatkertje” és a Nyolcas Út

- ▶ javaslat a magerő-kvantumok, a mezonok létezésére (Yukawa, 1935)
- ▶ 1947: a  $\pi^+$  és  $\pi^-$  mezonok felfedezése
- ▶ ezután sok további erősen kölcsönható **hadron** részecske felfedezése

# A részecskék „állatkertje” és a Nyolcas Út

- ▶ javaslat a magerő-kvantumok, a mezonok létezésére (Yukawa, 1935)
- ▶ 1947: a  $\pi^+$  és  $\pi^-$  mezonok felfedezése
- ▶ ezután sok további erősen kölcsönható **hadron** részecske felfedezése
  - ▶ mezonok:  $\pi^0$ ,  $K^+$ ,  $K^-$ ,  $K^0$ ,  $\bar{K}^0$ ,  $\eta$ ,  $K^{*+}$ ,  $K^{*-}$ ,  $K^{*0}$ ,  $\bar{K}^{*0}$ ,  $\rho^0$ ,  $\rho^+$ ,  $\rho^-$ ,  $\omega$  ...



# A részecskék „állatkertje” és a Nyolcas Út

- ▶ javaslat a magerő-kvantumok, a mezonok létezésére (Yukawa, 1935)
- ▶ 1947: a  $\pi^+$  és  $\pi^-$  mezonok felfedezése
- ▶ ezután sok további erősen kölcsönható **hadron** részecske felfedezése
  - ▶ mezonok:  $\pi^0, K^+, K^-, K^0, \bar{K}^0, \eta, K^{*+}, K^{*-}, K^{*0}, \bar{K}^{*0}, \rho^0, \rho^+, \rho^-, \omega \dots$
  - ▶ barionok:  $\Xi^-, \Xi^0, \Sigma^0, \Sigma^+, \Sigma^-, \Lambda, \Xi^{*0}, \Sigma^{*0}, \Sigma^{*+}, \Sigma^{*-}, \Delta^0, \Delta^+, \Delta^{++}, \dots$

# A részecskék „állatkertje” és a Nyolcas Út

- ▶ javaslat a magerő-kvantumok, a mezonok létezésére (Yukawa, 1935)
- ▶ 1947: a  $\pi^+$  és  $\pi^-$  mezonok felfedezése
- ▶ ezután sok további erősen kölcsönható **hadron** részecske felfedezése
  - ▶ mezonok:  $\pi^0, K^+, K^-, K^0, \bar{K}^0, \eta, K^{*+}, K^{*-}, K^{*0}, \bar{K}^{*0}, \rho^0, \rho^+, \rho^-, \omega \dots$
  - ▶ barionok:  $\Xi^-, \Xi^0, \Sigma^0, \Sigma^+, \Sigma^-, \Lambda, \Xi^{*0}, \Sigma^{*0}, \Sigma^{*+}, \Sigma^{*-}, \Delta^0, \Delta^+, \Delta^{++}, \dots$
- ▶ új kvantumszámok: barionszám ( $B$ ), ritkaság ( $S$ , strangeness), ...

# A részecskék „állatkertje” és a Nyolcas Út

- ▶ javaslat a magerő-kvantumok, a mezonok létezésére (Yukawa, 1935)
- ▶ 1947: a  $\pi^+$  és  $\pi^-$  mezonok felfedezése
- ▶ ezután sok további erősen kölcsönható **hadron** részecske felfedezése
  - ▶ mezonok:  $\pi^0, K^+, K^-, K^0, \bar{K}^0, \eta, K^{*+}, K^{*-}, K^{*0}, \bar{K}^{*0}, \rho^0, \rho^+, \rho^-, \omega \dots$
  - ▶ barionok:  $\Xi^-, \Xi^0, \Sigma^0, \Sigma^+, \Sigma^-, \Lambda, \Xi^{*0}, \Sigma^{*0}, \Sigma^{*+}, \Sigma^{*-}, \Delta^0, \Delta^+, \Delta^{++}, \dots$
- ▶ új kvantumszámok: barionszám ( $B$ ), ritkaság ( $S$ , strangeness), ...
- ▶ **Nyolcas Út**: rendezés 8-as és 10-es csoportokba az  $SU(3)$ -szimmetria alapján (Gell-Mann, Ne'eman, 1961)

# A részecskék „állatkertje” és a Nyolcas Út

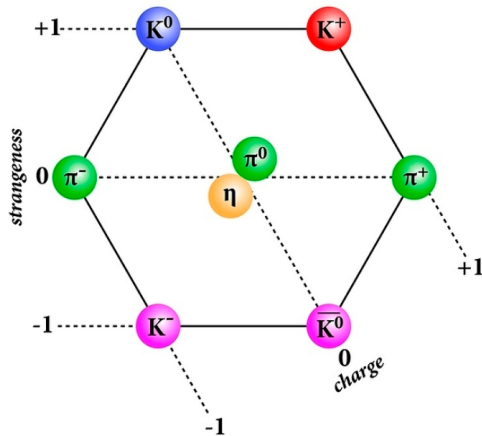
- ▶ javaslat a magerő-kvantumok, a mezonok létezésére (Yukawa, 1935)
- ▶ 1947: a  $\pi^+$  és  $\pi^-$  mezonok felfedezése
- ▶ ezután sok további erősen kölcsönható **hadron** részecske felfedezése
  - ▶ mezonok:  $\pi^0, K^+, K^-, K^0, \bar{K}^0, \eta, K^{*+}, K^{*-}, K^{*0}, \bar{K}^{*0}, \rho^0, \rho^+, \rho^-, \omega \dots$
  - ▶ barionok:  $\Xi^-, \Xi^0, \Sigma^0, \Sigma^+, \Sigma^-, \Lambda, \Xi^{*0}, \Sigma^{*0}, \Sigma^{*+}, \Sigma^{*-}, \Delta^0, \Delta^+, \Delta^{++}, \dots$
- ▶ új kvantumszámok: barionszám ( $B$ ), ritkaság ( $S$ , strangeness), ...
- ▶ **Nyolcas Út**: rendezés 8-as és 10-es csoportokba az SU(3)-szimmetria alapján (Gell-Mann, Ne'eman, 1961)

*A nemes nyolcrétű ösvény:  
helyes gondolkodás, helyes szándék, helyes beszéd, ...*

Buddha tanítása

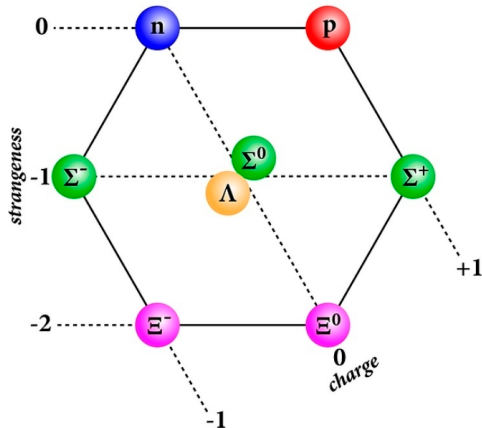
# A részecskék „állatkertje” és a Nyolcas Út

- ▶ javaslat a magerő-kvantumok, a mezonok létezésére (Yukawa, 1935)
- ▶ 1947: a  $\pi^+$  és  $\pi^-$  mezonok felfedezése
- ▶ ezután sok további erősen kölcsönható **hadron** részecske felfedezése
  - ▶ mezonok:  $\pi^0, K^+, K^-, \bar{K}^0, \eta, K^{*+}, K^{*-}, K^{*0}, \bar{K}^{*0}, \rho^0, \rho^+, \rho^-, \omega \dots$
  - ▶ barionok:  $\Xi^-, \Xi^0, \Sigma^0, \Sigma^+, \Sigma^-, \Lambda, \Xi^{*0}, \Sigma^{*0}, \Sigma^{*+}, \Sigma^{*-}, \Delta^0, \Delta^+, \Delta^{++}, \dots$
- ▶ új kvantumszámok: barionszám ( $B$ ), ritkaság ( $S$ , strangeness), ...
- ▶ **Nyolcas Út**: rendezés 8-as és 10-es csoportokba az SU(3)-szimmetria alapján (Gell-Mann, Ne'eman, 1961)



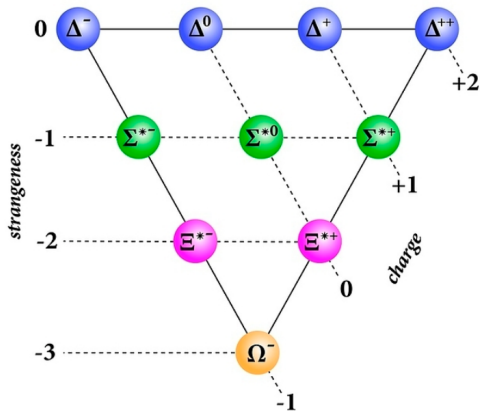
# A részecskék „állatkertje” és a Nyolcas Út

- ▶ javaslat a magerő-kvantumok, a mezonok létezésére (Yukawa, 1935)
- ▶ 1947: a  $\pi^+$  és  $\pi^-$  mezonok felfedezése
- ▶ ezután sok további erősen kölcsönható **hadron** részecske felfedezése
  - ▶ mezonok:  $\pi^0$ ,  $K^+$ ,  $K^-$ ,  $K^0$ ,  $\bar{K}^0$ ,  $\eta$ ,  $K^{*+}$ ,  $K^{*-}$ ,  $K^{*0}$ ,  $\bar{K}^{*0}$ ,  $\rho^0$ ,  $\rho^+$ ,  $\rho^-$ ,  $\omega$  ...
  - ▶ barionok:  $\Xi^-$ ,  $\Xi^0$ ,  $\Sigma^0$ ,  $\Sigma^+$ ,  $\Sigma^-$ ,  $\Lambda$ ,  $\Xi^{*0}$ ,  $\Sigma^{*0}$ ,  $\Sigma^{*+}$ ,  $\Sigma^{*-}$ ,  $\Delta^0$ ,  $\Delta^+$ ,  $\Delta^{++}$ , ...
- ▶ új kvantumszámok: barionszám ( $B$ ), ritkaság ( $S$ , strangeness), ...
- ▶ **Nyolcas Út**: rendezés 8-as és 10-es csoportokba az SU(3)-szimmetria alapján (Gell-Mann, Ne'eman, 1961)



# A részecskék „állatkertje” és a Nyolcas Út

- ▶ javaslat a magerő-kvantumok, a mezonok létezésére (Yukawa, 1935)
- ▶ 1947: a  $\pi^+$  és  $\pi^-$  mezonok felfedezése
- ▶ ezután sok további erősen kölcsönható **hadron** részecske felfedezése
  - ▶ mezonok:  $\pi^0, K^+, K^-, K^0, \bar{K}^0, \eta, K^{*+}, K^{*-}, K^{*0}, \bar{K}^{*0}, \rho^0, \rho^+, \rho^-, \omega \dots$
  - ▶ barionok:  $\Xi^-, \Xi^0, \Sigma^0, \Sigma^+, \Sigma^-, \Lambda, \Xi^{*0}, \Sigma^{*0}, \Sigma^{*+}, \Sigma^{*-}, \Delta^0, \Delta^+, \Delta^{++}, \dots$
- ▶ új kvantumszámok: barionszám ( $B$ ), ritkaság ( $S$ , strangeness), ...
- ▶ **Nyolcas Út**: rendezés 8-as és 10-es csoportokba az SU(3)-szimmetria alapján (Gell-Mann, Ne'eman, 1961)



# A „színes” kvarkok



# A „színes” kvarkok

- ▶ Nyolcas Út → kvarkmodell: a mezonok és a barionok kvarkokból épülnek fel (Gell-Mann, Zweig, 1964)

# A „színes” kvarkok

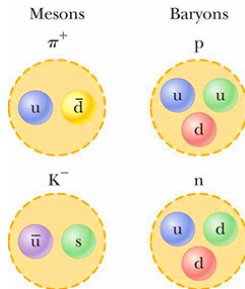
- ▶ Nyolcas Út → kvarkmodell: a mezonok és a barionok kvarkokból épülnek fel (Gell-Mann, Zweig, 1964)
- ▶ kvarkok:  $u$  (up),  $d$  (down),  $s$  (strange)

# A „színes” kvarkok

- ▶ Nyolcas Út → kvarkmodell: a mezonok és a barionok kvarkokból épülnek fel (Gell-Mann, Zweig, 1964)
- ▶ kvarkok:  $u$  (up),  $d$  (down),  $s$  (strange)
- ▶ antikvarkok:  $\bar{u}$  (antiup),  $\bar{d}$  (antidown),  $\bar{s}$  (antistrange)

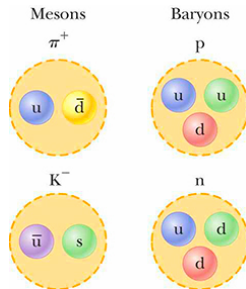
# A „színes” kvarkok

- ▶ Nyolcas Út → kvarkmodell: a mezonok és a barionok kvarkokból épülnek fel (Gell-Mann, Zweig, 1964)
- ▶ kvarkok:  $u$  (up),  $d$  (down),  $s$  (strange)
- ▶ antikvarkok:  $\bar{u}$  (antiup),  $\bar{d}$  (antidown),  $\bar{s}$  (antistrange)



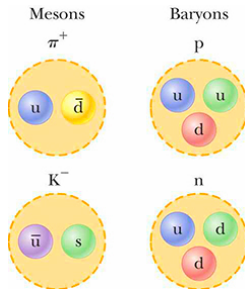
# A „színes” kvarkok

- ▶ Nyolcas Út → **kvarkmodell**: a mezonok és a barionok kvarkokból épülnek fel (Gell-Mann, Zweig, 1964)
- ▶ **kvarkok**:  $u$  (up),  $d$  (down),  $s$  (strange)
- ▶ **antikvarkok**:  $\bar{u}$  (antiup),  $\bar{d}$  (antidown),  $\bar{s}$  (antistrange)
- ▶ a kvarkok feles spinűek → kell egy új **kvantumtulajdonság: a szín**  
(Greenberg, Han, Nambu, Gell-Mann, Fritzsche, 1964–1971)



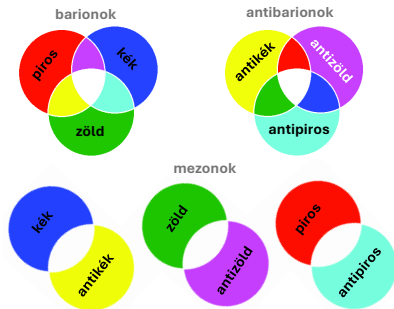
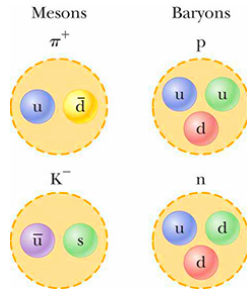
# A „színes” kvarkok

- ▶ Nyolcas Út → **kvarkmodell**: a mezonok és a barionok kvarkokból épülnek fel (Gell-Mann, Zweig, 1964)
- ▶ **kvarkok**:  $u$  (up),  $d$  (down),  $s$  (strange)
- ▶ **antikvarkok**:  $\bar{u}$  (antiup),  $\bar{d}$  (antidown),  $\bar{s}$  (antistrange)
- ▶ a kvarkok felelőssége → kell egy új **kvantumtulajdonság: a szín**  
(Greenberg, Han, Nambu, Gell-Mann, Fritzsche, 1964–1971)
- ▶ a kvarkok „színesek”, a hadronok „fehérek”



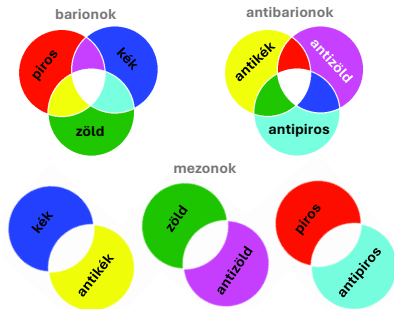
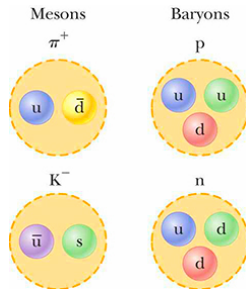
# A „színes” kvarkok

- ▶ Nyolcas Út → **kvarkmodell**: a mezonok és a barionok kvarkokból épülnek fel (Gell-Mann, Zweig, 1964)
- ▶ **kvarkok**:  $u$  (up),  $d$  (down),  $s$  (strange)
- ▶ **antikvarkok**:  $\bar{u}$  (antiup),  $\bar{d}$  (antidown),  $\bar{s}$  (antistrange)
- ▶ a kvarkok feles spinűek → kell egy új **kvantumtulajdonság: a szín**  
(Greenberg, Han, Nambu, Gell-Mann, Fritzsche, 1964–1971)
- ▶ a kvarkok „színesek”, a hadronok „fehérek”



# A „színes” kvarkok

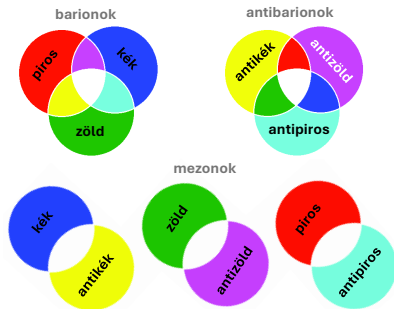
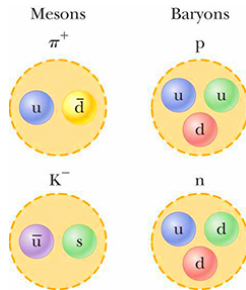
- ▶ Nyolcas Út → **kvarkmodell**: a mezonok és a barionok kvarkokból épülnek fel (Gell-Mann, Zweig, 1964)
- ▶ **kvarkok**:  $u$  (up),  $d$  (down),  $s$  (strange)
- ▶ **antikvarkok**:  $\bar{u}$  (antiup),  $\bar{d}$  (antidown),  $\bar{s}$  (antistrange)
- ▶ a kvarkok feles spinűek → kell egy új **kvantumtulajdonság: a szín**  
(Greenberg, Han, Nambu, Gell-Mann, Fritzsche, 1964–1971)
- ▶ a kvarkok „színesek”, a hadronok „fehérek”
- ▶ nem találtak szabad kvarkokat: „kvarkbezárás”





# A „színes” kvarkok

- ▶ Nyolcas Út → kvarkmodell: a mezonok és a barionok kvarkokból épülnek fel (Gell-Mann, Zweig, 1964)
- ▶ kvarkok:  $u$  (up),  $d$  (down),  $s$  (strange)
- ▶ antikvarkok:  $\bar{u}$  (antiup),  $\bar{d}$  (antidown),  $\bar{s}$  (antistrange)
- ▶ a kvarkok feles spinűek → kell egy új kvantumtulajdonság: a szín  
(Greenberg, Han, Nambu, Gell-Mann, Fritzsche, 1964–1971)
- ▶ a kvarkok „színesek”, a hadronok „fehérek”
- ▶ nem találtak szabad kvarkokat: „kvarkbezárás”
- ▶ kétségek a kvarkok létezését illetően



# A proton szerkezete első ízben (kísérletileg)

# A proton szerkezete első ízben (kísérletileg)

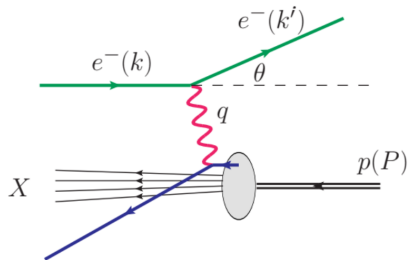
- ▶ mélyen rugalmatlan elektron-proton ütközések  
(SLAC, Stanford, 1967–1973,  $E_e \simeq 20$  GeV)

# A proton szerkezete első ízben (kísérletileg)

- ▶ mélyen rugalmatlan elektron-proton ütközések  
(SLAC, Stanford, 1967–1973,  $E_e \simeq 20$  GeV)
- ▶ Friedman, Kendall, Taylor és társaik

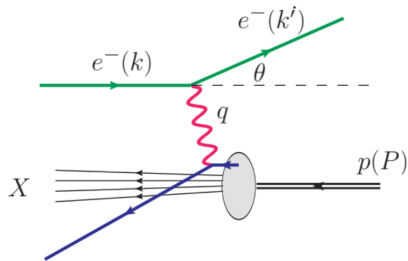
# A proton szerkezete első ízben (kísérletileg)

- ▶ mélyen rugalmatlan elektron-proton ütközések (SLAC, Stanford, 1967–1973,  $E_e \simeq 20$  GeV)
- ▶ Friedman, Kendall, Taylor és társaik



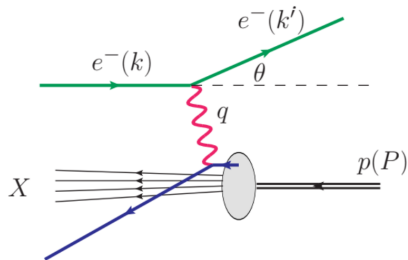
# A proton szerkezete első ízben (kísérletileg)

- ▶ mélyen rugalmatlan elektron-proton ütközések (SLAC, Stanford, 1967–1973,  $E_e \simeq 20$  GeV)
- ▶ Friedman, Kendall, Taylor és társaik
- ▶  $Q^2$  – az átadott impulzusnégyzet nagysága: a protonszondázás energiaskálája



# A proton szerkezete első ízben (kísérletileg)

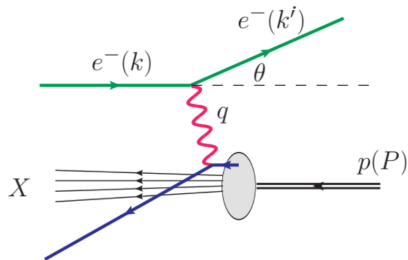
- ▶ mélyen rugalmatlan elektron-proton ütközések (SLAC, Stanford, 1967–1973,  $E_e \simeq 20$  GeV)
- ▶ Friedman, Kendall, Taylor és társaik
- ▶  $Q^2$  – az átadott impulzusnégyzet nagysága: a protonszondázás energiaskálája
- ▶  $x$  – a proton alkotórésze által vitt nyalábirányú lendülethányad



# A proton szerkezete első ízben (kísérletileg)

- ▶ mélyen rugalmatlan elektron-proton ütközések (SLAC, Stanford, 1967–1973,  $E_e \simeq 20$  GeV)
- ▶ Friedman, Kendall, Taylor és társaik
- ▶  $Q^2$  – az átadott impulzusnégyzet nagysága: a protonszondázás energiaskálája
- ▶  $x$  – a proton alkotórésze által vitt nyalábirányú lendülethányad
- ▶ proton szerkezeti függvények mérése

$$F_1(x, Q^2), \quad F_2(x, Q^2)$$





# A proton szerkezete első ízben (kísérletileg)

- ▶ mélyen rugalmatlan elektron-proton ütközések (SLAC, Stanford, 1967–1973,  $E_e \simeq 20$  GeV)
- ▶ Friedman, Kendall, Taylor és társaik
- ▶  $Q^2$  – az átadott impulzusnégyzet nagysága: a protonszondázás energiaskálája
- ▶  $x$  – a proton alkotórésze által vitt nyalábirányú lendülethányad
- ▶ proton szerkezeti függvények mérése

$$F_1(x, Q^2), \quad F_2(x, Q^2)$$

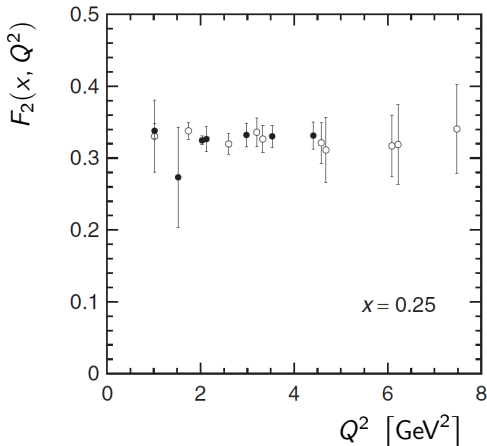
- ▶ szabadon mozgó, pontszerű, feles spinű alkotóelemek (partonok) vannak a protonban (Feynman, Björken, Callan, Gross)

# A proton szerkezete első ízben (kísérletileg)

- ▶ mélyen rugalmatlan elektron-proton ütközések (SLAC, Stanford, 1967–1973,  $E_e \simeq 20$  GeV)
- ▶ Friedman, Kendall, Taylor és társaik
- ▶  $Q^2$  – az átadott impulzusnégyzet nagysága: a protonzondázás energiaskálája
- ▶  $x$  – a proton alkotórésze által vitt nyalábirányú lendülethányad
- ▶ proton szerkezeti függvények mérése

$$F_1(x, Q^2), \quad F_2(x, Q^2)$$

- ▶ szabadon mozgó, pontszerű, feles spinű alkotóelemek (partonok) vannak a protonban (Feynman, Björken, Callan, Gross)

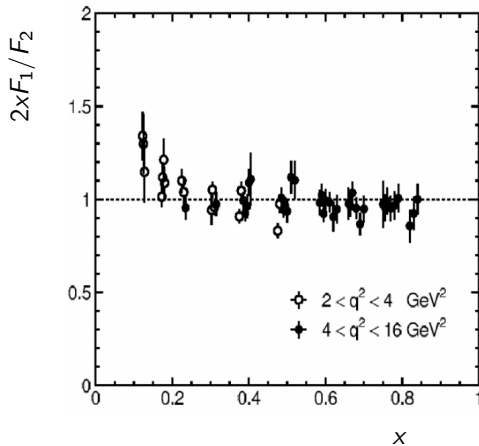


# A proton szerkezete első ízben (kísérletileg)

- ▶ mélyen rugalmatlan elektron-proton ütközések (SLAC, Stanford, 1967–1973,  $E_e \simeq 20$  GeV)
- ▶ Friedman, Kendall, Taylor és társaik
- ▶  $Q^2$  – az átadott impulzusnégyzet nagysága: a protonszondázás energiaskálája
- ▶  $x$  – a proton alkotórésze által vitt nyalábirányú lendülethányad
- ▶ proton szerkezeti függvények mérése

$$F_1(x, Q^2), \quad F_2(x, Q^2)$$

- ▶ szabadon mozgó, pontszerű, feles spinű alkotóelemek (partonok) vannak a protonban (Feynman, Björken, Callan, Gross)



# Kvantum színdinamika (QCD)

# Kvantum színdinamika (QCD)

- ▶ az  $SU(3)$  színszimmetria, mint mértékszimmetria: **szín = színtöltés**  
(Gell-Mann, Fritzsche, Leutwyler 1972)

# Kvantum színdinamika (QCD)

- ▶ az  $SU(3)$  színszimmetria, mint mértékszimmetria: **szín = színtöltés** (Gell-Mann, Fritzsch, Leutwyler 1972)
- ▶ elektromos töltés  $\rightarrow$  elektromágneses kölcsönhatás  $\rightarrow$  kvantum-elektrodinamika

# Kvantum színdinamika (QCD)

- ▶ az  $SU(3)$  színszimmetria, mint mértékszimmetria: **szín = színtöltés** (Gell-Mann, Fritzsch, Leutwyler 1972)
- ▶ elektromos töltés  $\rightarrow$  elektromágneses kölcsönhatás  $\rightarrow$  kvantum-elektrodinamika

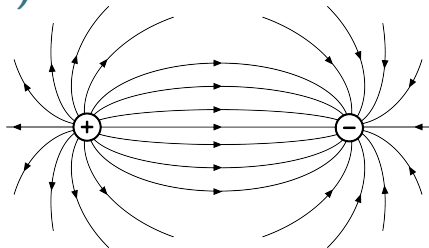
# Kvantum színdinamika (QCD)

- ▶ az  $SU(3)$  színszimmetria, mint  
mértékszimmetria: **szín = színtöltés**  
(Gell-Mann, Fritzsch, Leutwyler 1972)
- ▶ elektromos töltés  $\rightarrow$  elektromágneses  
köölcsönhatás  $\rightarrow$  kvantum-elektrodinamika
- ▶ **színtöltés  $\rightarrow$  erős kölcsönhatás**  
 $\rightarrow$  **kvantum-színdinamika**



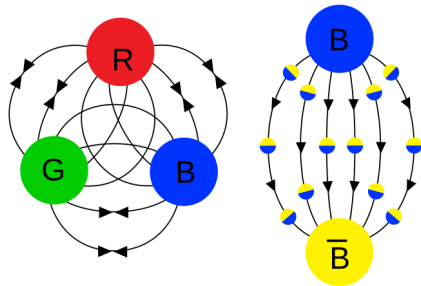
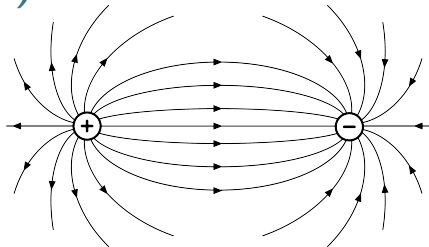
# Kvantum színdinamika (QCD)

- ▶ az  $SU(3)$  színszimmetria, mint mértékszimmetria: **szín = színtöltés** (Gell-Mann, Fritzsch, Leutwyler 1972)
- ▶ elektromos töltés  $\rightarrow$  elektromágneses kölcsönhatás  $\rightarrow$  kvantum-elektrodinamika
- ▶ **színtöltés  $\rightarrow$  erős kölcsönhatás  $\rightarrow$  kvantum-színdinamika**



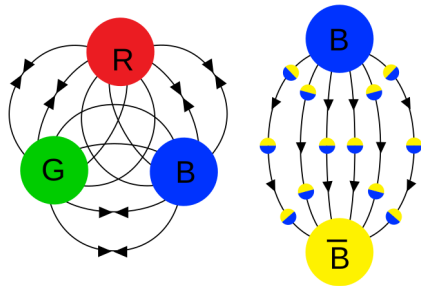
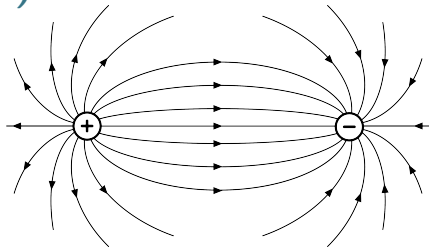
# Kvantum színdinamika (QCD)

- ▶ az  $SU(3)$  színszimmetria, mint mértékszimmetria: **szín = színtöltés** (Gell-Mann, Fritzsche, Leutwyler 1972)
- ▶ elektromos töltés  $\rightarrow$  elektromágneses kölcsönhatás  $\rightarrow$  kvantum-elektrodinamika
- ▶ színtöltés  $\rightarrow$  erős kölcsönhatás  $\rightarrow$  kvantum-színdinamika



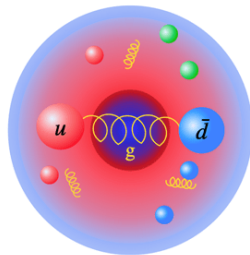
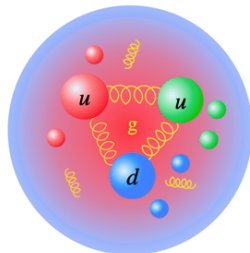
# Kvantum színdinamika (QCD)

- ▶ az  $SU(3)$  színszimmetria, mint mértékszimmetria: **szín = színtöltés** (Gell-Mann, Fritzsch, Leutwyler 1972)
- ▶ elektromos töltés  $\rightarrow$  elektromágneses kölcsönhatás  $\rightarrow$  kvantum-elektrodinamika
- ▶ színtöltés  $\rightarrow$  erős kölcsönhatás  $\rightarrow$  kvantum-színdinamika
- ▶ az erős kölcsönhatást tömeg nélküli gluonok közvetítik a kvarkok között



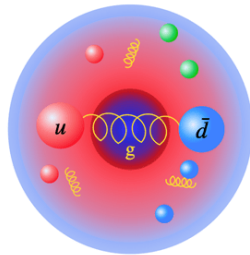
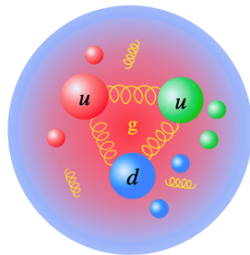
# Kvantum színdinamika (QCD)

- ▶ az  $SU(3)$  színszimmetria, mint mértékszimmetria: **szín = színtöltés** (Gell-Mann, Fritzsch, Leutwyler 1972)
- ▶ elektromos töltés  $\rightarrow$  elektromágneses kölcsönhatás  $\rightarrow$  kvantum-elektrodinamika
- ▶ **színtöltés  $\rightarrow$  erős kölcsönhatás  $\rightarrow$  kvantum-színdinamika**
- ▶ az erős kölcsönhatást tömeg nélküli gluonok közvetítik a kvarkok között



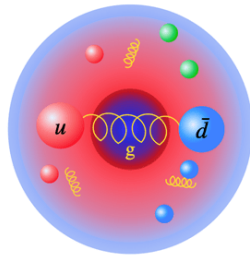
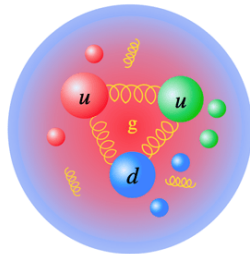
# Kvantum színdinamika (QCD)

- ▶ az  $SU(3)$  színszimmetria, mint mértékszimmetria: **szín = színtöltés** (Gell-Mann, Fritzsch, Leutwyler 1972)
- ▶ elektromos töltés  $\rightarrow$  elektromágneses kölcsönhatás  $\rightarrow$  kvantum-elektrodinamika
- ▶ **színtöltés  $\rightarrow$  erős kölcsönhatás  $\rightarrow$  kvantum-színdinamika**
- ▶ az erős kölcsönhatást tömeg nélküli gluonok közvetítik a kvarkok között
- ▶ a gluonok gluonokkal is kölcsönhatnak



# Kvantum színdinamika (QCD)

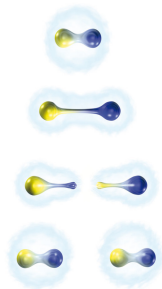
- ▶ az  $SU(3)$  színszimmetria, mint mértékszimmetria: **szín = színtöltés** (Gell-Mann, Fritzsch, Leutwyler 1972)
- ▶ elektromos töltés  $\rightarrow$  elektromágneses kölcsönhatás  $\rightarrow$  kvantum-elektrodinamika
- ▶ **színtöltés  $\rightarrow$  erős kölcsönhatás  $\rightarrow$  kvantum-színdinamika**
- ▶ az erős kölcsönhatást tömeg nélküli gluonok közvetítik a kvarkok között
- ▶ a gluonok gluonokkal is kölcsönhatnak
- ▶ **aszimptotikus szabadság**: kisebb távolság, gyengébb kölcsönhatás (Gross, Politzer, Wilczek, 1973)



# Kvantum színdinamika (QCD)

- ▶ az  $SU(3)$  színszimmetria, mint mértékszimmetria: **szín = színtöltés** (Gell-Mann, Fritzsche, Leutwyler 1972)
- ▶ elektromos töltés  $\rightarrow$  elektromágneses kölcsönhatás  $\rightarrow$  kvantum-elektrodinamika
- ▶ **színtöltés  $\rightarrow$  erős kölcsönhatás  $\rightarrow$  kvantum-színdinamika**
- ▶ az erős kölcsönhatást tömeg nélküli gluonok közvetítik a kvarkok között
- ▶ a gluonok gluonokkal is kölcsönhatnak
- ▶ **aszimptotikus szabadság**: kisebb távolság, gyengébb kölcsönhatás (Gross, Politzer, Wilczek, 1973)

kvarkok szinte szabadok a hadronok belsejében, de távolításkor a kölcsönhatásuk egyre erősebbé válik



a szétszakításra befektetett energia új kvark-antikvark párt kelt a vákuumból, a kvarkok hadronokba záródnak

# Vegyértékkvarkok és tengerkvarkok



# Vegyértékkvarkok és tengerkvarkok

- ▶ parton: kvark, antikvark és gluon

# Vegyértékkvarkok és tengerkvarkok

- ▶ **parton**: kvark, antikvark és gluon
- ▶ **vegyértékkvarkok**: meghatározzák a hadron sok tulajdonságát (töltés, barionszám, ...)

# Vegyértékkvarkok és tengerkvarkok

- ▶ **parton**: kvark, antikvark és gluon
- ▶ **vegyértékkvarkok**: meghatározzák a hadron sok tulajdonságát (töltés, barionszám, ...)
- ▶ keletkezhetnek rövid életű virtuális részecskék

$$\Delta E \geq \frac{1}{4\pi} \frac{h}{\Delta t}$$

# Vegyértékkvarkok és tengerkvarkok

- ▶ **parton**: kvark, antikvark és gluon
- ▶ **vegyértékkvarkok**: meghatározzák a hadron sok tulajdonságát (töltés, barionszám, ...)
- ▶ keletkezhetnek rövid életű virtuális részecskék

$$\Delta E \geq \frac{1}{4\pi} \frac{h}{\Delta t}$$

- ▶ a kvarkok és a gluonok folyamatosan kisugároznak és elnyelnek virtuális gluonokat

# Vegyértékkvarkok és tengerkvarkok

- ▶ **parton**: kvark, antikvark és gluon
- ▶ **vegyértékkvarkok**: meghatározzák a hadron sok tulajdonságát (töltés, barionszám, ...)
- ▶ keletkezhetnek rövid életű virtuális részecskék

$$\Delta E \geq \frac{1}{4\pi} \frac{h}{\Delta t}$$

- ▶ a kvarkok és a gluonok folyamatosan kisugároznak és elnyelnek virtuális gluonokat
- ▶ **tengerkvarkok**: virtuális kvark antikvark párok a gluonokból:  $g \rightarrow q + \bar{q}$

# Vegyértékkvarkok és tengerkvarkok

- ▶ **parton**: kvark, antikvark és gluon
- ▶ **vegyértékkvarkok**: meghatározzák a hadron sok tulajdonságát (töltés, barionszám, ...)
- ▶ keletkezhetnek rövid életű virtuális részecskék

$$\Delta E \geq \frac{1}{4\pi} \frac{h}{\Delta t}$$

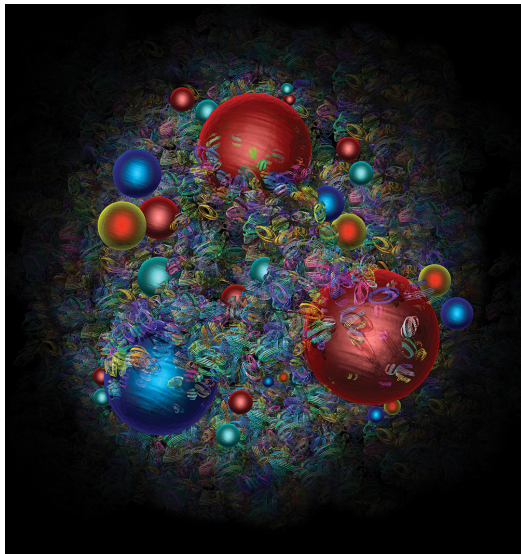
- ▶ a kvarkok és a gluonok folyamatosan kisugároznak és elnyelnek virtuális gluonokat
- ▶ **tengerkvarkok**: virtuális kvark antikvark párok a gluonokból:  $g \rightarrow q + \bar{q}$
- ▶ a proton egy rendkívül összetett dinamikusan változó kvantumrendszer

# Vegyértékkvarkok és tengerkvarkok

- ▶ **parton**: kvark, antikvark és gluon
- ▶ **vegyértékkvarkok**: meghatározzák a hadron sok tulajdonságát (töltés, barionszám, ...)
- ▶ keletkezhetnek rövid életű virtuális részecskék

$$\Delta E \geq \frac{1}{4\pi} \frac{h}{\Delta t}$$

- ▶ a kvarkok és a gluonok folyamatosan kisugároznak és elnyelnek virtuális gluonokat
- ▶ **tengerkvarkok**: virtuális kvark antikvark párok a gluonokból:  $g \rightarrow q + \bar{q}$
- ▶ a proton egy rendkívül összetett dinamikus változó kvantumrendszer

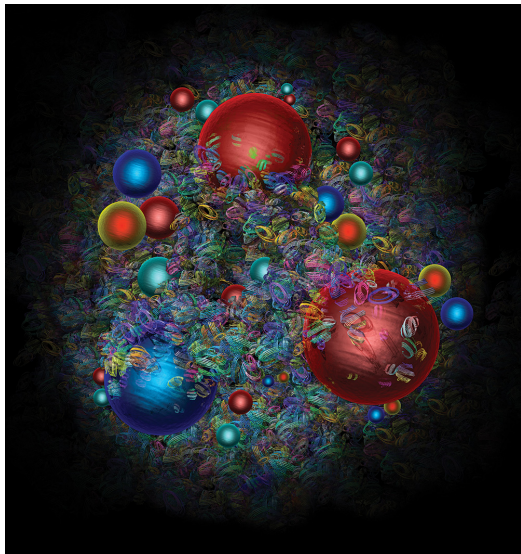


# Vegyértékkvarkok és tengerkvarkok

- ▶ **parton**: kvark, antikvark és gluon
- ▶ **vegyértékkvarkok**: meghatározzák a hadron sok tulajdonságát (töltés, barionszám, ...)
- ▶ keletkezhetnek rövid életű virtuális részecskék

$$\Delta E \geq \frac{1}{4\pi} \frac{h}{\Delta t}$$

- ▶ a kvarkok és a gluonok folyamatosan kisugároznak és elnyelnek virtuális gluonokat
- ▶ **tengerkvarkok**: virtuális kvark antikvark párok a gluonokból:  $g \rightarrow q + \bar{q}$
- ▶ a proton egy rendkívül összetett dinamikus változó kvantumrendszer
- ▶ a hadrontömeg elsősorban az energikus kölcsönhatásból jön ( $E = mc^2 \rightarrow m = E/c^2$ )





# Még több kvark és a protonszerkezet részletei

# Még több kvark és a protonszerkezet részletei

- ▶ a  $c$  (charm), a  $b$  (bottom) és a  $t$  (top) kvarkok felfedezése (1974-1995)

# Még több kvark és a protonszerkezet részletei

- ▶ a  $c$  (charm), a  $b$  (bottom) és a  $t$  (top) kvarkok felfedezése (1974-1995)
- ▶ a protonszerkezet vizsgálata erősen nem kölcsönható részecskékkel

# Még több kvark és a protonszerkezet részletei

- ▶ a  $c$  (charm), a  $b$  (bottom) és a  $t$  (top) kvarkok felfedezése (1974-1995)
- ▶ a protonszerkezet vizsgálata erősen nem kölcsönható részecskékkel
- ▶ SLAC utáni kísérletek müonokkal és neutrínókkal (CERN, Fermilab, ...)

# Még több kvark és a protonszerkezet részletei

- ▶ a  $c$  (charm), a  $b$  (bottom) és a  $t$  (top) kvarkok felfedezése (1974-1995)
- ▶ a protonszerkezet vizsgálata erősen nem kölcsönható részecskékkel
- ▶ SLAC utáni kísérletek müonokkal és neutrínókkal (CERN, Fermilab, ...)
- ▶ mélyen rugalmatlan  $e^-p$  és  $e^+p$  szórás (DESY, Hamburg, 1993-2007)

# Még több kvark és a protonszerkezet részletei

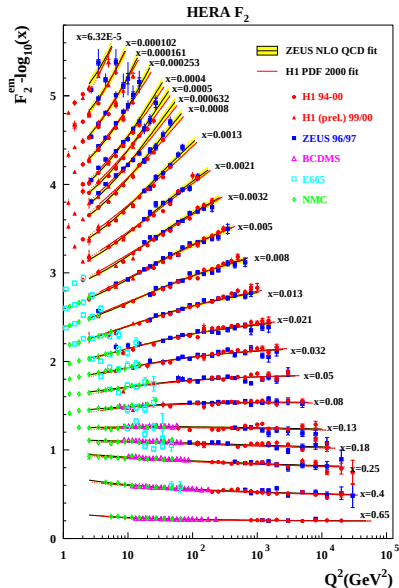
- ▶ a  $c$  (charm), a  $b$  (bottom) és a  $t$  (top) kvarkok felfedezése (1974-1995)
- ▶ a protonszerkezet vizsgálata erősen nem kölcsönható részecskékkel
- ▶ SLAC utáni kísérletek müonokkal és neutrínókkal (CERN, Fermilab, ...)
- ▶ mélyen rugalmatlan  $e^-p$  és  $e^+p$  szórás (DESY, Hamburg, 1993-2007)
  - ▶ HERA gyorsító, H1 és ZEUS kísérletek

# Még több kvark és a protonszerkezet részletei

- ▶ a  $c$  (charm), a  $b$  (bottom) és a  $t$  (top) kvarkok felfedezése (1974-1995)
- ▶ a protonszerkezet vizsgálata erősen nem kölcsönható részecskékkel
- ▶ SLAC utáni kísérletek müonokkal és neutrínókkal (CERN, Fermilab, ...)
- ▶ mélyen rugalmatlan  $e^-p$  és  $e^+p$  szórás (DESY, Hamburg, 1993-2007)
  - ▶ HERA gyorsító, H1 és ZEUS kísérletek
  - ▶  $E = 318 \text{ GeV}$

# Még több kvark és a protonszerkezet részletei

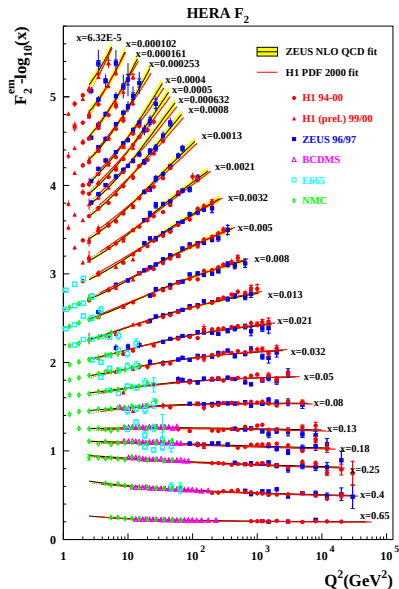
- ▶ a  $c$  (charm), a  $b$  (bottom) és a  $t$  (top) kvarkok felfedezése (1974-1995)
- ▶ a protonszerkezet vizsgálata erősen nem kölcsönható részecskékkel
- ▶ SLAC utáni kísérletek müonokkal és neutrínókkal (CERN, Fermilab, ...)
- ▶ mélyen rugalmatlan  $e^-p$  és  $e^+p$  szórás (DESY, Hamburg, 1993-2007)
  - ▶ HERA gyorsító, H1 és ZEUS kísérletek
  - ▶  $E = 318$  GeV





# Még több kvark és a protonszerkezet részletei

- ▶ a  $c$  (charm), a  $b$  (bottom) és a  $t$  (top) kvarkok felfedezése (1974-1995)
- ▶ a protonszerkezet vizsgálata erősen nem kölcsönható részecskékkel
- ▶ SLAC utáni kísérletek müonokkal és neutrínókkal (CERN, Fermilab, ...)
- ▶ mélyen rugalmatlan  $e^-p$  és  $e^+p$  szórás (DESY, Hamburg, 1993-2007)
  - ▶ HERA gyorsító, H1 és ZEUS kísérletek
  - ▶  $E = 318$  GeV
- ▶ a mérések összhangban vannak a kvantum-színdinamikával



# A partonok eloszlása

# A partonok eloszlása

- ▶ mért proton szerkezeti függvények  
→ partoneloszlást leíró sűrűségfüggvények  $f(x, Q^2)$

# A partonok eloszlása

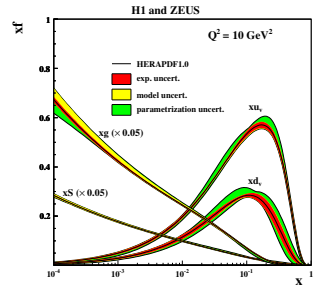
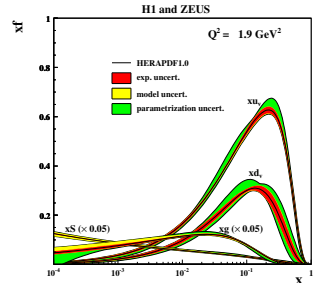
- ▶ mért proton szerkezeti függvények  
→ partoneloszlást leíró sűrűségfüggvények  $f(x, Q^2)$
- ▶ kiszámítható a valószínűség, hogy a parton adott tartományba eső  $x$  lendülethányadot visz valamely  $Q^2$  energiaskálán

# A partonok eloszlása

- ▶ mért proton szerkezeti függvények  
→ partoneloszlást leíró sűrűségfüggvények  $f(x, Q^2)$
- ▶ kiszámítható a valószínűség, hogy a parton adott tartományba eső  $x$  lendülethányadot visz valamely  $Q^2$  energiaskálán
- ▶ „felbontás”  $\sim Q$ , legkisebb felbontható méret  $\sim \frac{1}{Q}$

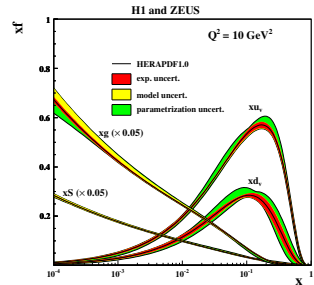
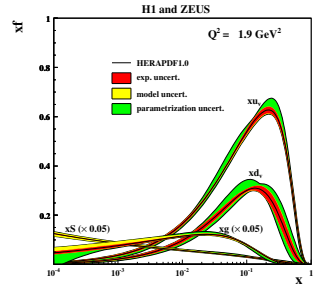
# A partonok eloszlása

- ▶ mért proton szerkezeti függvények  
→ partoneloszlást leíró sűrűségfüggvények  $f(x, Q^2)$
- ▶ kiszámítható a valószínűség, hogy a parton adott tartományba eső  $x$  lendülethányadot visz valamely  $Q^2$  energiaskálán
- ▶ „felbontás”  $\sim Q$ , legkisebb felbontható méret  $\sim \frac{1}{Q}$



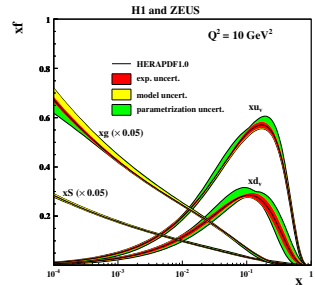
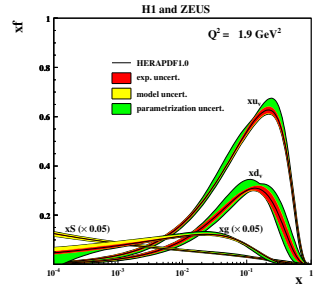
# A partonok eloszlása

- ▶ mért proton szerkezeti függvények  
→ partoneloszlást leíró sűrűségfüggvények  $f(x, Q^2)$
- ▶ kiszámítható a valószínűség, hogy a parton adott tartományba eső  $x$  lendülethányadot visz valamely  $Q^2$  energiaskálán
- ▶ „felbontás”  $\sim Q$ , legkisebb felbontható méret  $\sim \frac{1}{Q}$
- ▶ kis  $Q^2$  értéknél három nagyobb méretű és nagyobb impulzushányadú vegyértékkvark



# A partonok eloszlása

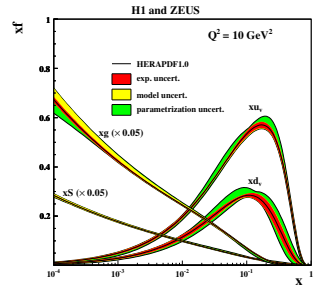
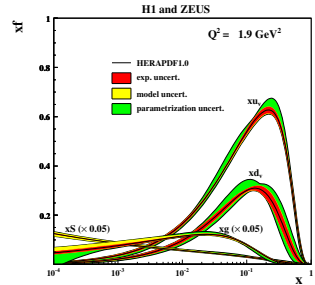
- ▶ mért proton szerkezeti függvények  
→ partoneloszlást leíró sűrűségfüggvények  $f(x, Q^2)$
- ▶ kiszámítható a valószínűség, hogy a parton adott tartományba eső  $x$  lendülethányadot visz valamely  $Q^2$  energiaskálán
- ▶ „felbontás”  $\sim Q$ , legkisebb felbontható méret  $\sim \frac{1}{Q}$
- ▶ kis  $Q^2$  értéknél három nagyobb méretű és nagyobb impulzushányadú vegyértékkvark
- ▶  $Q^2$  növekedésével egyre több kis méretű és kis impulzushányadú tengerkvark és gluon „látszik”





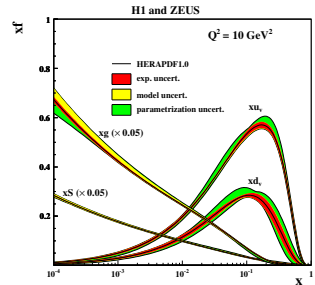
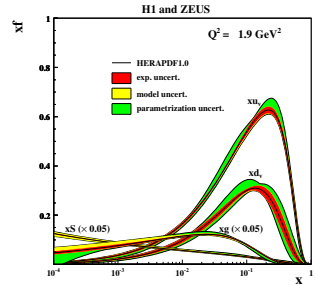
# A partonok eloszlása

- ▶ mért proton szerkezeti függvények  
→ partoneloszlást leíró sűrűségfüggvények  $f(x, Q^2)$
- ▶ kiszámítható a valószínűség, hogy a parton adott tartományba eső  $x$  lendülethányadot visz valamely  $Q^2$  energiaskálán
- ▶ „felbontás”  $\sim Q$ , legkisebb felbontható méret  $\sim \frac{1}{Q}$
- ▶ kis  $Q^2$  értéknél három nagyobb méretű és nagyobb impulzushányadú vegyértékkvark
- ▶  $Q^2$  növekedésével egyre több kis méretű és kis impulzushányadú tengerkvark és gluon „látszik”
- ▶ antikvarkok,  $s$ ,  $c$  és  $b$  kvarkok is „látszanak”



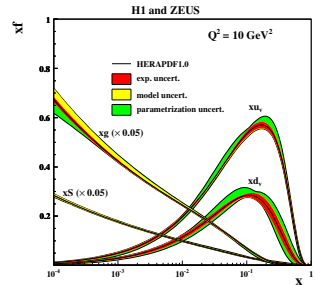
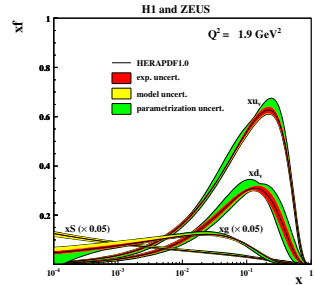
# A partonok eloszlása

- ▶ mért proton szerkezeti függvények  
→ partoneloszlást leíró sűrűségfüggvények  $f(x, Q^2)$
- ▶ kiszámítható a valószínűség, hogy a parton adott tartományba eső  $x$  lendülethányadot visz valamely  $Q^2$  energiaskálán
- ▶ „felbontás”  $\sim Q$ , legkisebb felbontható méret  $\sim \frac{1}{Q}$
- ▶ kis  $Q^2$  értéknél három nagyobb méretű és nagyobb impulzushányadú vegyértékkvark
- ▶  $Q^2$  növekedésével egyre több kis méretű és kis impulzushányadú tengerkvark és gluon „látszik”
- ▶ antikvarkok,  $s$ ,  $c$  és  $b$  kvarkok is „látszanak”
- ▶ további mérések az LHC-n  $pp$  ütközésekben (2009–)



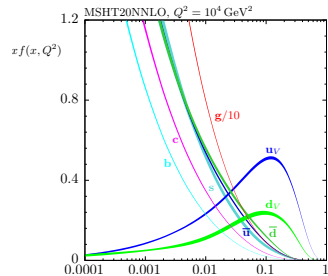
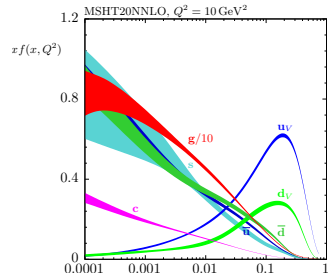
# A partonok eloszlása

- ▶ mért proton szerkezeti függvények  
→ partoneloszlást leíró sűrűségfüggvények  $f(x, Q^2)$
- ▶ kiszámítható a valószínűség, hogy a parton adott tartományba eső  $x$  lendülethányadot visz valamely  $Q^2$  energiaskálán
- ▶ „felbontás”  $\sim Q$ , legkisebb felbontható méret  $\sim \frac{1}{Q}$
- ▶ kis  $Q^2$  értéknél három nagyobb méretű és nagyobb impulzushányadú vegyértékkvark
- ▶  $Q^2$  növekedésével egyre több kis méretű és kis impulzushányadú tengerkvark és gluon „látszik”
- ▶ antikvarkok,  $s$ ,  $c$  és  $b$  kvarkok is „látszanak”
- ▶ további mérések az LHC-n  $pp$  ütközésekben (2009–)
- ▶ a bevitt energia is kelt gluonokat és tengerkvarkokat



# A partonok eloszlása

- ▶ mért proton szerkezeti függvények  
→ partoneloszlást leíró sűrűségfüggvények  $f(x, Q^2)$
- ▶ kiszámítható a valószínűség, hogy a parton adott tartományba eső  $x$  lendülethányadot visz valamely  $Q^2$  energiaskálán
- ▶ „felbontás”  $\sim Q$ , legkisebb felbontható méret  $\sim \frac{1}{Q}$
- ▶ kis  $Q^2$  értéknél három nagyobb méretű és nagyobb impulzushányadú vegyértékkvark
- ▶  $Q^2$  növekedésével egyre több kis méretű és kis impulzushányadú tengerkvark és gluon „látszik”
- ▶ antikvarkok,  $s$ ,  $c$  és  $b$  kvarkok is „látszanak”
- ▶ további mérések az LHC-n  $pp$  ütközésekben (2009–)
- ▶ a bevitt energia is kelt gluonokat és tengerkvarkokat



nagyobb lendülethányadot hordozó vegyértékkvarkok

kisebb lendülethányadot hordozó tengerkvarkok és gluonok

nagyon kis lendülethányadot hordozó gluonok: „gluonfelhő”

nagy  $Q^2 \rightarrow$  nagy „felbontás”  $\rightarrow$  több rész(let)



nagy  $Q^2 \rightarrow$  nagy „felbontás”  $\rightarrow$  több rész(let)

nagy  $Q^2 \rightarrow$  nagy „felbontás”  $\rightarrow$  több rész(let)

kis  $Q^2 \rightarrow$  kis „felbontás”  $\rightarrow$  kevesebb rész(let)

kis  $Q^2 \rightarrow$  kis „felbontás”  $\rightarrow$  kevesebb rész(let)

kis  $Q^2 \rightarrow$  kis „felbontás”  $\rightarrow$  kevesebb rész(let)

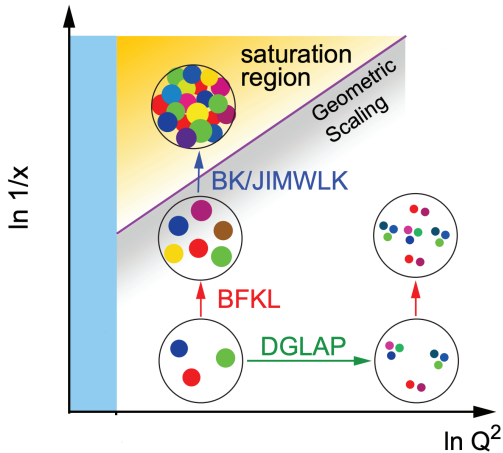
# Gluontelítődés (szaturáció)

# Gluontelítődés (szaturáció)

- ▶ a QCD egyenleti jól leírják a proton képének a változását az  $x$  és a  $Q^2$  függvényében

# Gluontelítődés (szaturáció)

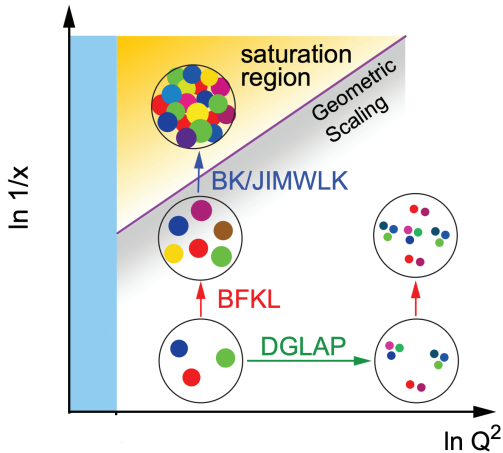
- ▶ a QCD egyenleti jól leírják a proton képének a változását az  $x$  és a  $Q^2$  függvényében





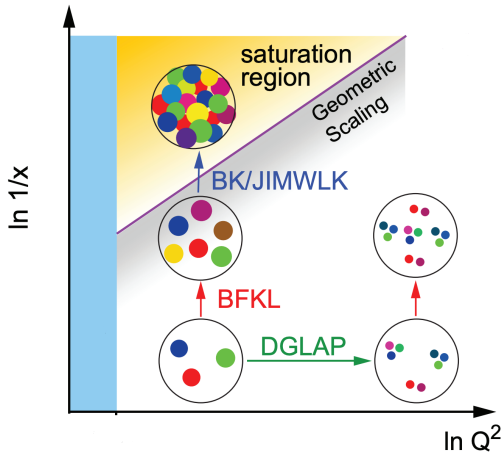
# Gluontelítődés (szaturáció)

- ▶ a QCD egyenleti jól leírják a proton képének a változását az  $x$  és a  $Q^2$  függvényében
- ▶ ha  $Q^2$  fix, nagy  $E$  energiákon az  $x$  kicsi  
→ nagy gluonsűrűség a protonban  
(színüveg-kondenzátum)



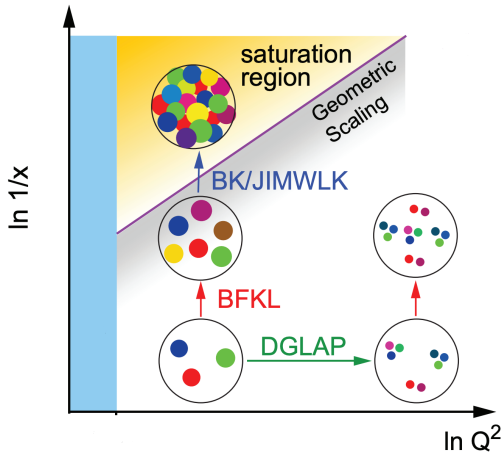
# Gluontelítődés (szaturáció)

- ▶ a QCD egyenleti jól leírják a proton képének a változását az  $x$  és a  $Q^2$  függvényében
- ▶ ha  $Q^2$  fix, nagy  $E$  energiákon az  $x$  kicsi  $\rightarrow$  nagy gluonsűrűség a protonban (színüveg-kondenzátum)
- ▶ QCD jóslat: **gluontelítődés**, dinamikus egyensúly a gluonbomlás és rekombinálódás közt:  $g \leftrightarrow g + g$



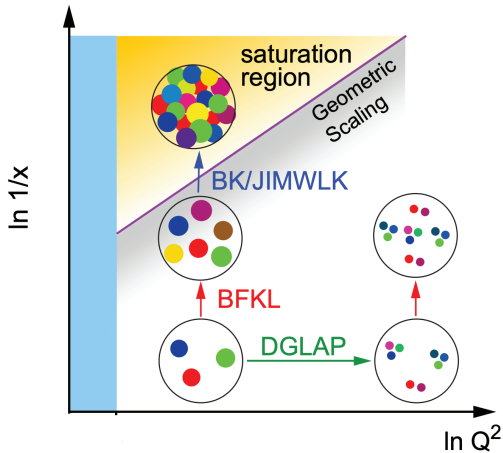
# Gluontelítődés (szaturáció)

- ▶ a QCD egyenleti jól leírják a proton képének a változását az  $x$  és a  $Q^2$  függvényében
- ▶ ha  $Q^2$  fix, nagy  $E$  energiákon az  $x$  kicsi  $\rightarrow$  nagy gluonsűrűség a protonban (színűveg-kondenzátum)
- ▶ QCD jóslat: **gluontelítődés**, dinamikus egyensúly a gluonbomlás és rekombinálódás közt:  $g \leftrightarrow g + g$
- ▶ a gluonok számának növekedése valóban megáll kis  $x$  értékeknél?



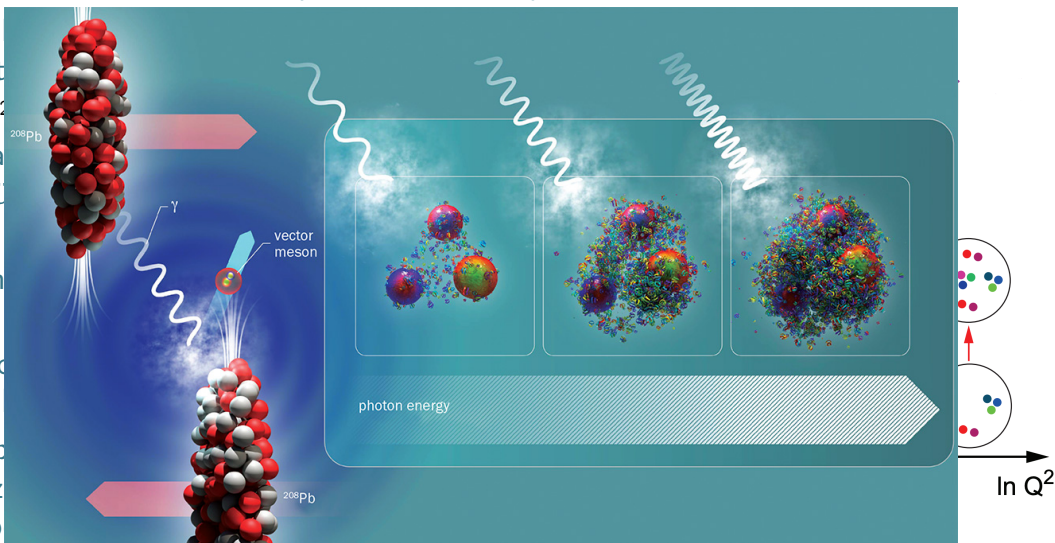
# Gluontelítődés (szaturáció)

- ▶ a QCD egyenleti jól leírják a proton képének a változását az  $x$  és a  $Q^2$  függvényében
- ▶ ha  $Q^2$  fix, nagy  $E$  energiákon az  $x$  kicsi  $\rightarrow$  nagy gluonsűrűség a protonban (színűveg-kondenzátum)
- ▶ QCD jóslat: **gluontelítődés**, dinamikus egyensúly a gluonbomlás és rekombinálódás közt:  $g \leftrightarrow g + g$
- ▶ a gluonok számának növekedése valóban megáll kis  $x$  értékeknél?
- ▶ ultraperiferiális proton-mag és mag-mag ütközésekben vizsgálható (jelenlegi és jövőbeli LHC kísérletek)



# Gluontelítődés (szaturáció)

- ▶ a QCD
- ▶ a vált
- ▶ ha  $Q^2$
- na
- (színi
- ▶ QCD
- egyen
- közt:
- ▶ a glu
- megá
- ▶ ultrap
- ütköz
- jövőb



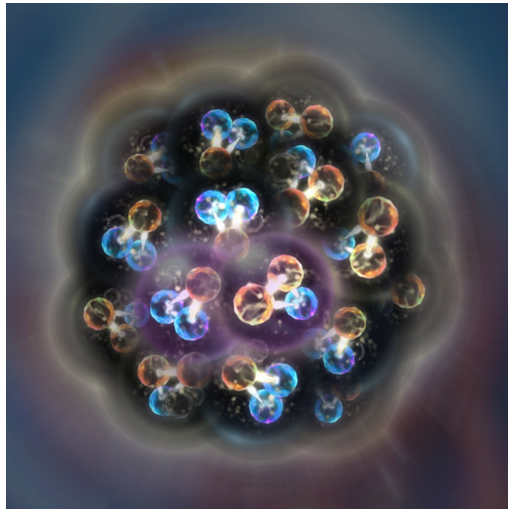
# Az atommag QCD szerkezete

# Az atommag QCD szerkezete

- ▶ a magerő a kvarkok közötti erős kölcsönhatás maradéka

# Az atommag QCD szerkezete

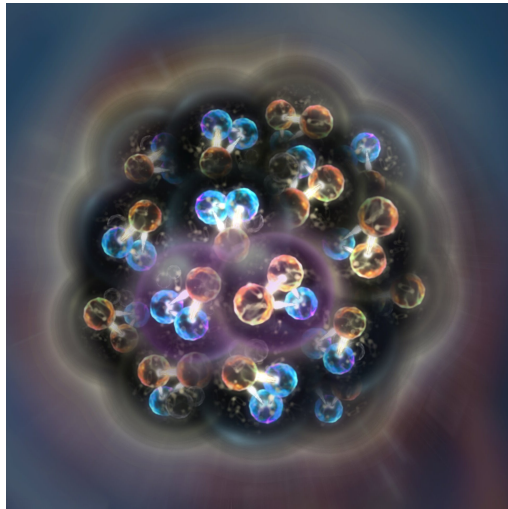
- ▶ a magerő a kvarkok közötti erős kölcsönhatás maradéka





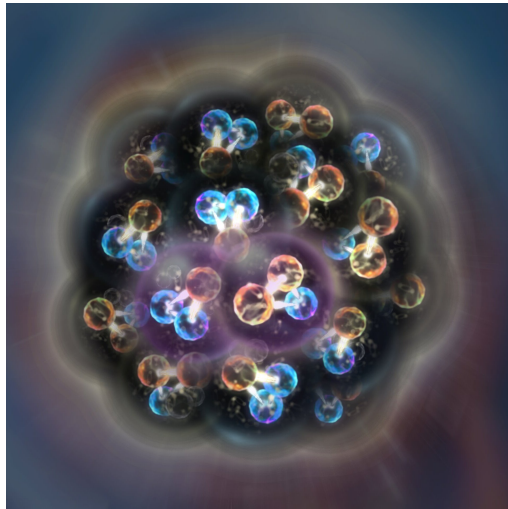
# Az atommag QCD szerkezete

- ▶ a magerő a kvarkok közötti erős kölcsönhatás maradéka
- ▶ az elektron kis energiájú elektron-mag ütközésekben nukleonokat „lát”, nagy energiájú ütközésekben partonokat



# Az atommag QCD szerkezete

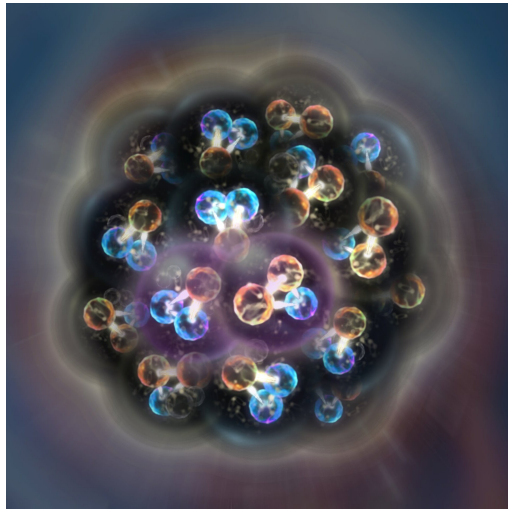
- ▶ a magerő a kvarkok közötti erős kölcsönhatás maradéka
- ▶ az elektron kis energiájú elektron-mag ütközésekben nukleonokat „lát”, nagy energiájú ütközésekben partonokat
- ▶ a magárnyékolás (CERN EMC, 1982) és a kis- $x$  gluonszaturáció magokban



# Az atommag QCD szerkezete

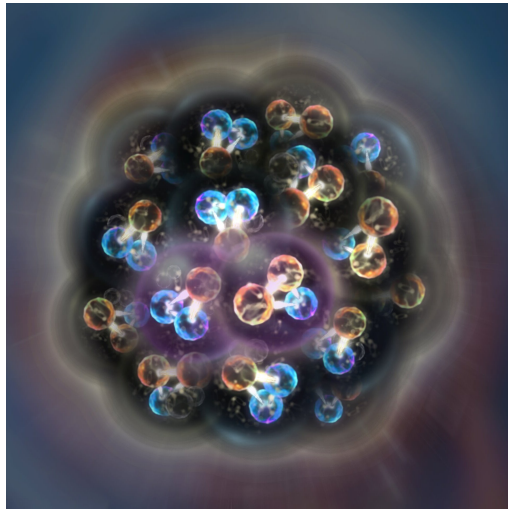
- ▶ a magerő a kvarkok közötti erős kölcsönhatás maradéka
- ▶ az elektron kis energiájú elektron-mag ütközésekben nukleonokat „lát”, nagy energiájú ütközésekben partonokat
- ▶ a magárnyékolás (CERN EMC, 1982) és a kis- $x$  gluonszaturáció magokban
- ▶ az atommag partonszerkezete a nukleonok nagy energián mért partoneloszlásai alapján

Phys. Rev. Lett. 133, 152502 (11 Oct., 2024)



# Az atommag QCD szerkezete

- ▶ a magerő a kvarkok közötti erős kölcsönhatás maradéka
- ▶ az elektron kis energiájú elektron-mag ütközésekben nukleonokat „lát”, nagy energiájú ütközésekben partonokat
- ▶ a magárnyékolás (CERN EMC, 1982) és a kis- $x$  gluonszaturáció magokban
- ▶ az atommag partonszerkezete a nukleonok nagy energián mért partoneloszlásai alapján  
Phys. Rev. Lett. 133, 152502 (11 Oct., 2024)
- ▶ a kialakított modell jól reprodukálta a kis-energiás adatokat



# Proton és magszerkezet rugalmas ütközésekben

# Proton és magszerkezet rugalmas ütközésekben

- ▶ R. J. Glauber diffraktív többszörös-szórás elmélete

# Proton és magszerkezet rugalmas ütközésekben

- ▶ R. J. Glauber diffraktív többszörös-szórás elmélete
- ▶ az ütköző objektumok alkotói között az összes lehetséges egyszeres és többszörös ütközést tekintjük

# Proton és magszerkezet rugalmas ütközésekben

- ▶ R. J. Glauber diffraktív többszörös-szórás elmélete
- ▶ az ütköző objektumok alkotói között az összes lehetséges egyszeres és többszörös ütközést tekintjük
- ▶ a visszafelé szóródás nem lehetséges

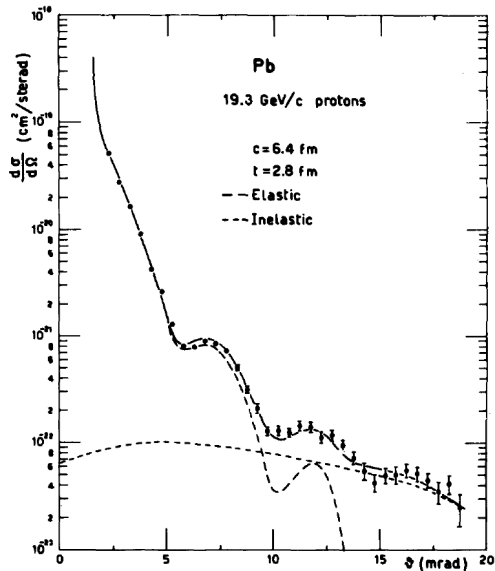


# Proton és magszerkezet rugalmas ütközésekben

- ▶ R. J. Glauber diffraktív többszörös-szórás elmélete
- ▶ az ütköző objektumok alkotói között az összes lehetséges egyszeres és többszörös ütközést tekintjük
- ▶ a visszafelé szóródás nem lehetséges
- ▶ a magok szerkezete rugalmas proton-mag ütközésekből

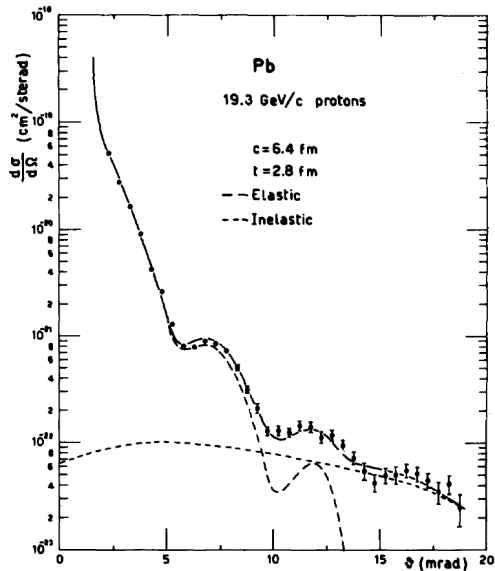
# Proton és magszerkezet rugalmas ütközésekben

- ▶ R. J. Glauber diffraktív többszörös-szórás elmélete
- ▶ az ütköző objektumok alkotói között az összes lehetséges egyszeres és többszörös ütközést tekintjük
- ▶ a visszafelé szóródás nem lehetséges
- ▶ a magok szerkezete rugalmas proton-mag ütközésekből



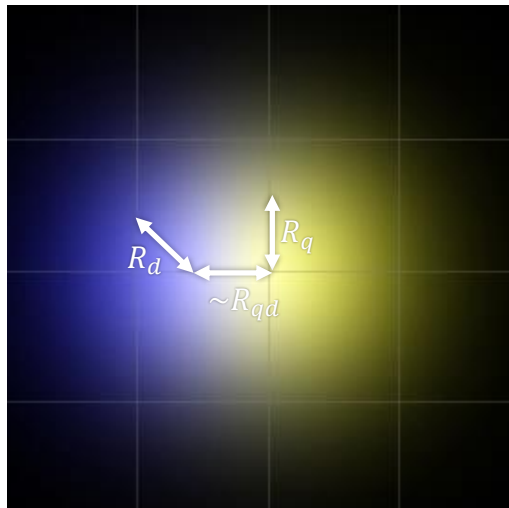
# Proton és magszerkezet rugalmas ütközésekben

- ▶ R. J. Glauber diffraktív többszörös-szórás elmélete
- ▶ az ütköző objektumok alkotói között az összes lehetséges egyszeres és többszörös ütközést tekintjük
- ▶ a visszafelé szóródás nem lehetséges
- ▶ a magok szerkezete rugalmas proton-mag ütközésekből
- ▶ a proton és antiproton szerkezete rugalmas proton-proton és proton-antiproton ütközésekből



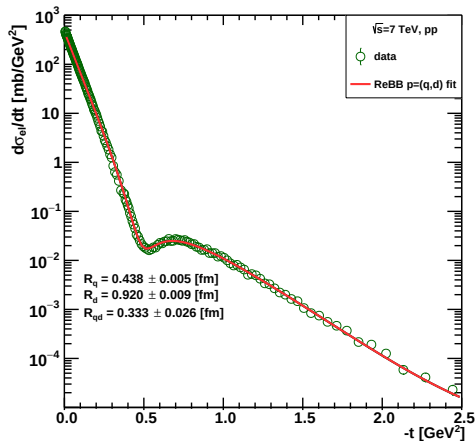
# Proton és magszerkezet rugalmas ütközésekben

- ▶ R. J. Glauber diffraktív többszörös-szórás elmélete
- ▶ az ütköző objektumok alkotói között az összes lehetséges egyszeres és többszörös ütközést tekintjük
- ▶ a visszafelé szóródás nem lehetséges
- ▶ a magok szerkezete rugalmas proton-mag ütközésekből
- ▶ a proton és antiproton szerkezete rugalmas proton-proton és proton-antiproton ütközésekből



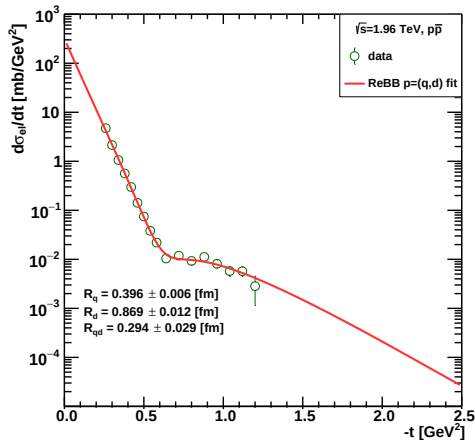
# Proton és magszerkezet rugalmas ütközésekben

- ▶ R. J. Glauber diffraktív többszörös-szórás elmélete
- ▶ az ütköző objektumok alkotói között az összes lehetséges egyszeres és többszörös ütközést tekintjük
- ▶ a visszafelé szóródás nem lehetséges
- ▶ a magok szerkezete rugalmas proton-mag ütközésekből
- ▶ a proton és antiproton szerkezete rugalmas proton-proton és proton-antiproton ütközésekből



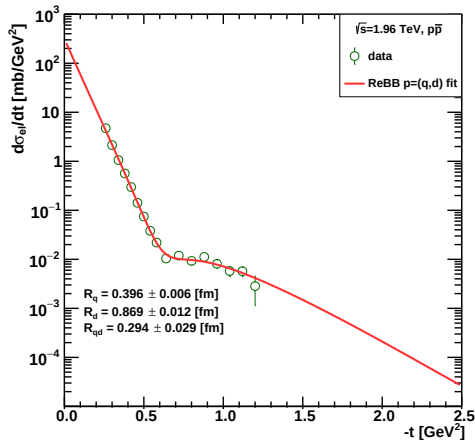
# Proton és magszerkezet rugalmas ütközésekben

- ▶ R. J. Glauber diffraktív többszörös-szórás elmélete
- ▶ az ütköző objektumok alkotói között az összes lehetséges egyszeres és többszörös ütközést tekintjük
- ▶ a visszafelé szóródás nem lehetséges
- ▶ a magok szerkezete rugalmas proton-mag ütközésekből
- ▶ a proton és antiproton szerkezete rugalmas proton-proton és proton-antiproton ütközésekből



# Proton és magszerkezet rugalmas ütközésekben

- ▶ R. J. Glauber diffraktív többszörös-szórás elmélete
- ▶ az ütköző objektumok alkotói között az összes lehetséges egyszeres és többszörös ütközést tekintjük
- ▶ a visszafelé szóródás nem lehetséges
- ▶ a magok szerkezete rugalmas proton-mag ütközésekből
- ▶ a proton és antiproton szerkezete rugalmas proton-proton és proton-antiproton ütközésekből
- ▶ eredmények más módszerekkel is (pl. modell-független Lévy képzalkotás)



# Megoldatlan problémák, jövőbeli kísérletek



# Megoldatlan problémák, jövőbeli kísérletek

- ▶ a színbezárás egzakt matematikai levezetése a QCD-ből

# Megoldatlan problémák, jövőbeli kísérletek

- ▶ a színbezárás egzakt matematikai levezetése a QCD-ből
- ▶ a gluontelítődés döntő jeleinek keresése

# Megoldatlan problémák, jövőbeli kísérletek

- ▶ a színbezárás egzakt matematikai levezetése a QCD-ből
- ▶ a gluontelítődés döntő jeleinek keresése
- ▶ a proton feles spinjének eredete

# Megoldatlan problémák, jövőbeli kísérletek

- ▶ a színbezárás egzakt matematikai levezetése a QCD-ből
- ▶ a gluontelítődés döntő jeleinek keresése
- ▶ a proton feles spinjének eredete
- ▶ a partoneloszlást leíró sűrűségfüggvények pontosítása, az eddig feltérképezetlen területek vizsgálata

# Megoldatlan problémák, jövőbeli kísérletek

- ▶ a színbezárás egzakt matematikai levezetése a QCD-ből
- ▶ a gluontelítődés döntő jeleinek keresése
- ▶ a proton feles spinjének eredete
- ▶ a partoneloszlást leíró sűrűségfüggvények pontosítása, az eddig feltérképezetlen területek vizsgálata
- ▶ Electron-Ion Collider (EIC, 2028-tól): elektron-proton és elektron-mag ütközések,  $E = 20\text{--}140\text{ GeV}$

# Megoldatlan problémák, jövőbeli kísérletek

- ▶ a színbezárás egzakt matematikai levezetése a QCD-ből
- ▶ a gluontelítődés döntő jeleinek keresése
- ▶ a proton feles spinjének eredete
- ▶ a partoneloszlást leíró sűrűségfüggvények pontosítása, az eddig feltérképezetlen területek vizsgálata
- ▶ Electron-Ion Collider (EIC, 2028-tól): elektron-proton és elektron-mag ütközések,  $E = 20\text{--}140\text{ GeV}$
- ▶ High-Luminosity LHC (HL-LHC, 2030-tól): protonok és nehézionok ütköznek,  $E = 14\text{ TeV}$

# Összegzés

# Összegzés

- ▶ a különböző elemek atomjai atommagból és az azt körülvevő elektronfelhőből épülnek fel



# Összegzés

- ▶ a különböző elemek atomjai atommagból és az azt körülvevő elektronfelhőből épülnek fel
- ▶ az atommagban a protonokat és a neutronokat az erős kölcsönhatás tartja bent (pontosabban az erős maradék kölcsönhatás – magerő)

# Összegzés

- ▶ a különböző elemek atomjai atommagból és az azt körülvevő elektronfelhőből épülnek fel
- ▶ az atommagban a protonokat és a neutronokat az erős kölcsönhatás tartja bent (pontosabban az erős maradék kölcsönhatás – magerő)
- ▶ az erős kölcsönhatás fundamentális elmélete a kvantum-színdinamika

# Összegzés

- ▶ a különböző elemek atomjai atommagból és az azt körülvevő elektronfelhőből épülnek fel
- ▶ az atommagban a protonokat és a neutronokat az erős kölcsönhatás tartja bent (pontosabban az erős maradék kölcsönhatás – magerő)
- ▶ az erős kölcsönhatás fundamentális elmélete a kvantum-színdinamika
- ▶ a nukleonok (proton, neutron) szerkezete egy dinamikusan változó közeg három vegyértékkvarkokkal, tengerkvarkokkal és gluonokkal – ezt az erős kölcsönhatás alakítja ki

# Összegzés

- ▶ a különböző elemek atomjai atommagból és az azt körülvevő elektronfelhőből épülnek fel
- ▶ az atommagban a protonokat és a neutronokat az erős kölcsönhatás tartja bent (pontosabban az erős maradék kölcsönhatás – magerő)
- ▶ az erős kölcsönhatás fundamentális elmélete a kvantum-színdinamika
- ▶ a nukleonok (proton, neutron) szerkezete egy dinamikusan változó közeg három vegyértékkvarkokkal, tengerkvarkokkal és gluonokkal – ezt az erős kölcsönhatás alakítja ki
- ▶ az eddigi kísérleti eredmények szerint az elektron és a kvark fundamentális anyagi építőkö, belső szerkezettel nem rendelkeznek

Köszönöm a figyelmet!