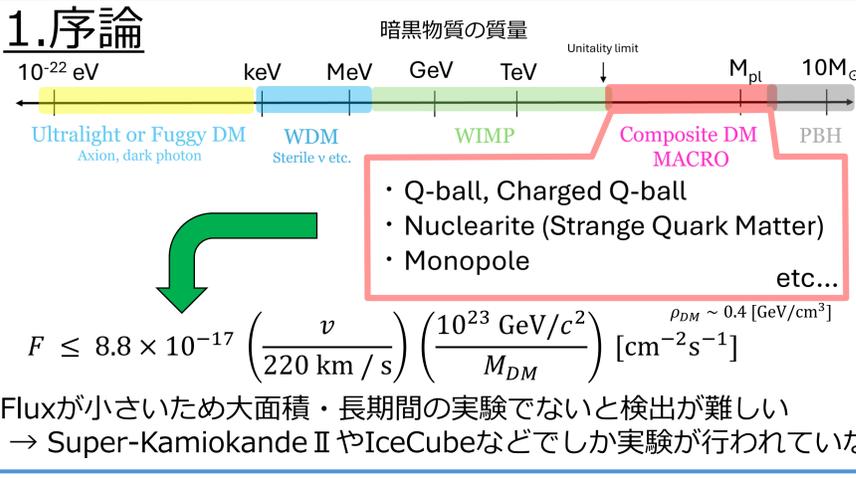


1. 序論

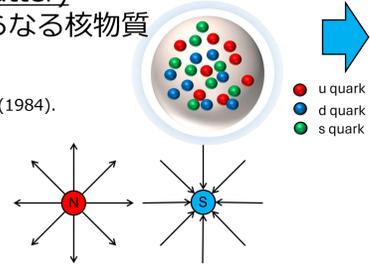


• Q-ball
globalなU(1)対称性を持つ複素スカラー場理論に存在する non-topological solitons
S. Coleman, Nucl. Phys. B **262**, 263 (1985).

• Nuclearite (Strange Quark Matter)
u,d,s quarkがほぼ等しい割合からなる核物質の凝集体
E. Witten, Phys. Rev. D **30**, 272 (1984).
A. De Rújula and S. L. Glashow, Nature **312** 734(1984).

• Monopole
P.A.M. Dirac, Proc. Roy. Soc. A **133**, 60 (1931).

Y. Takenaga et al, Phys Lett. B **647** 18(2007).
IceCube Collaboration, arXiv:1402.3460v2 [astro-ph.CO] (2014).



- 暗黒物質
- バリオン数生成問題
- 超対称性理論
- 大統一理論
- 超重銀河宇宙線起源

1.1 Charged Q-ball

宇宙初期においてglobalなU(1)対称性を持つ複素スカラー場があると仮定した場合において、超対称性理論に基づくAffleck-Dine機構によりインフレーション中にバリオン非対称性が生じQ-ballが生成される

I. Affleck and M. Dine, Nucl. Phys. B **249**, 361 (1985).
A. Kusenko and M.E. Shaposhnikov, Phys. Lett. B **418** 46 (1998).

$\mathcal{L} = (D_{\mu}\Phi_1)^* D^{\mu}\Phi_1 + (D_{\mu}\Phi_2)^* D^{\mu}\Phi_2 - V(\Phi_1, \Phi_2) - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$

Affleck-Dine field potential: $u^c u^c d^c e^c$ flat direction

$D_{\mu}\Phi_1 = (\partial_{\mu} - ieA_{\mu})\Phi_1$
 $D_{\mu}\Phi_2 = (\partial_{\mu} + ieA_{\mu})\Phi_2$

• 質量: M_Q

• 電荷: $Z_Q = \alpha^{-1} \approx 137$

• 半径: $R_Q \sim 1 \text{ \AA}$

• $+O(1)$ ion like

J. Hong, M. Kawasaki, and M. Yamada, arXiv:1604.04352 [hep-ph] (2015).
J. Hong, M. Kawasaki, and M. Yamada, arXiv:1505.02594 [hep-ph] (2017).

1.2 Paleo Detector

→ 鉱物(天然物質)を用いた飛跡検出器

鉱物の形成から数億年の時間が経過

かんらん石 白雲母

標準的な形成年代: $10^8 \sim 10^9$ 年

• 人工検出器では達成できない時間スケールで粒子の飛跡を記録・保持可能

• 飛跡から入射粒子の電荷やエネルギーの物理情報を取得できる

→ 質量の大きい粒子や暗黒物質などのFluxの小さい粒子の検出を目指す

2. 低速領域における飛跡形成機構

Displacement Spike Model
Brinkman JA Amer Phys **24**, 251 (1956).

動いている原子同士も衝突(二体衝突だけでは不十分)

Single Displacement Double Displacement Multiple Displacement

入射粒子の質量が大きい場合

入射粒子と物質との相互作用により結晶に欠陥が形成

欠陥(飛跡)の形成機構の理解には阻止能の理解が不可欠

井戸 悠生 名古屋大学修士論文(2025)

Unirradiated, AFM Xe 50 keV, AFM

白雲母

3. 低速領域における阻止能公式

$\left(\frac{dE}{dx}\right) = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{nuc.}} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ele.}}$

• **Electronic Stopping Power**: 入射粒子と標的物質中の原子核の周りの電子による非弾性項
→ 電子励起、1次イオン化など

$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ele.}} = 8\pi\alpha(\hbar c)a_B \frac{v}{v_B} \sum_i N_{ei} \frac{Z_i^{7/6}}{(Z_i^{2/3} + Z_Q^{2/3})^{3/2}}$
J. Lindhard and M. Scharff, Phys. Rev. **124**, 128(1961).

• **Nuclear Stopping Power**: 入射粒子と標的物質中の原子核の弾性散乱(衝突)による項
→ ラザフォード散乱

$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{nuc.}} = 4\pi\alpha(\hbar c) Z_Q \sum_i a_i N_{zi} Z_i \frac{M_Q}{M_Q + M_i} S_{ni}(\epsilon_i)$

$S_{ni}(\epsilon_i) = \frac{\ln(1 + 1.183\epsilon_i)}{2(\epsilon_i + 0.01321\epsilon_i^{0.21226} + 0.19593\epsilon_i^{0.5})}$

$\epsilon_i = \frac{a_i(M_i c^2) M_Q \beta^2}{2\alpha(\hbar c) Z_Q Z_i (M_Q + M_i)}$, $a_i = \frac{0.8853 a_B}{Z_Q^{0.23} + Z_i^{0.23}}$

a_B : ボーア半径
 $v_B = \alpha c$: ボーア速度
 N_{ei} : 標的物質中の原子の電子数密度
 Z_i : 標的物質中の原子の原子番号
 M_i : 標的粒子の質量
 v : 入射粒子の速度

W. D. Wilson, L. G. Haggmark, and J. P. Biersack, Phys. Rev. B **15**, 2458 (1977).
E. Everhart, G. Stone, and F.J. Carbone, Phys. Rev. **99**, 1287 (1955).
Biersack, J. P. and Ziegler, J. F. Springer Berlin Heidelberg 122 (1982).

4. Charged Q-ballの質量下限の計算結果

入射粒子: Charged Q-ball ($\beta \sim 10^{-3}$)
標的物質: かんらん石: Mg_2SiO_4 ($\rho = 3.28 [\text{g}/\text{cm}^3]$)

	SRIM	今回の計算
Nuclear	ZBL	ZBL
Electronic	LSS阻止能公式 + 実験値に対するフィッティング結果	LSS阻止能公式

密度 ρ [g/cm³]、厚さ L [cm] の物質を貫通するための Charged Q-ball の質量下限

$M_Q > \frac{2}{\beta^2} \left(\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} \right) \rho L [\text{GeV}/c^2]$

厚さ L [cm]

$\frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dx} \right) = 0.6921 [\text{MeV}/(\text{mg}/\text{cm}^2)]$ $Z_Q = 1$
 $\frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dx} \right) = 34.10 [\text{MeV}/(\text{mg}/\text{cm}^2)]$ $Z_Q = 137$

地球鉱物 (1 km)

隕石鉱物 (5 mm, 30 μm)

Q-ball stopping power in Mg_2SiO_4

Stopping Power [MeV $\text{mg}^{-1} \text{cm}^2$]

Q-ball charge Z_Q

Charged Q-ball質量 M_Q [GeV/ c^2]

5. 現在のQ-ball探索領域と今後の展開

人工検出器

- SKYLAB(1978) ($Z_Q \geq 10$)
人工衛星での実験
- LEXAN(ポリカーボネート)
- MACRO(2000) ($Z_Q \geq 1$)
地下実験
- LEXAN + CR-39(プラスチック)

天然検出器(鉱物飛跡検出器)

- MICA(1986) ($Z_Q \geq 10$)
地下実験
- 白雲母: $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$
(クロスチェックが必要)
Arafune, J. and Yoshida, T. and Nakamura, S. and Ogure, K. Phys. Rev. D **62**, 105013 (2000).

Flux [$\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$]

Charged Q-ball質量 M_Q [GeV/ c^2]

Over Dark Matter Density

SKYLAB(1978) ($1.2 \text{ m}^2, \sim 0.7 \text{ year}$) $Z_Q = 10$ $F_{DM} \sim 7.0 \times 10^5 (\frac{\text{GeV}}{M_Q})$

MACRO(2000) ($1263 \text{ m}^2, \sim 7.6 \text{ year}$)

MICA(1986) ($0.0595 \text{ m}^2, \sim 10^9 \text{ year}$)

隕石鉱物(かんらん石) ($0.0001 \text{ m}^2, \sim 4.55 \times 10^9 \text{ year}$)

地球鉱物(白雲母, Fission Track法) ($0.17 \text{ m}^2, (1.58 \pm 0.16) \times 10^8 \text{ year}$)
二村翔太 名古屋大学修士論文(2026)

自動飛跡読み取り装置(QTS)

• 隕石中の鉱物(かんらん石 etc...)を飛跡検出器として利用することで質量の軽い領域の探索が可能になる

• 白雲母の場合、自動飛跡読み取り装置のスキャン速度の向上を目指している

まとめ

- 阻止能公式からCharged Q-ballの質量下限を算出
- 既存のCharged Q-ballの探索領域を大幅に広げることが可能

展望

- 隕石資料(かんらん石)の解析
- 分子動力学シミュレーションを用いた飛跡形成メカニズムの理解